

ISSN 1810-1909

---

---

# Вестник

## ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

---

---

№ 3 2016

**Технические науки**

*Научный журнал*

Основан в марте 1995 г.

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

*Главный редактор*

**А.Ю. Александров**, кандидат экономических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

*Заместитель главного редактора*

**Г.А. Белов**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

*Члены редакционной коллегии*

**А.А. Афанасьев**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**В.П. Афанасьев**, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Россия)

**В.В. Афанасьев**, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

**А.В. Булычев**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**Н.П. Вашкевич**, доктор технических наук, профессор (Пенза, Россия)

**Н.А. Галанина**, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

**Л.С. Зимин**, доктор технических наук, профессор (Самара, Россия)

**Ю.К. Евдокимов**, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

**А.Г. Коробейников**, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Россия)

**А.Б. Кувалдин**, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

**С.Л. Кужеков**, доктор технических наук, профессор (Новочеркасск, Россия)

**А.Л. Куликов**, доктор технических наук (Нижний Новгород, Россия)

**Ю.Я. Лямец**, доктор технических наук, профессор (Чебоксары, Россия)

**В.И. Мелешин**, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

**Ю.М. Миронов**, доктор технических наук, доцент (Чебоксары, Россия)

**А.В. Мокеев**, доктор технических наук, доцент (Архангельск, Россия)

**В.А. Песошин**, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

**А.А. Потапов**, доктор физико-математических наук, профессор (Москва, Россия)

**В.В. Сагарадзе**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН (Екатеринбург, Россия)

**И.Г. Сидоркина**, доктор технических наук, профессор (Йошкар-Ола, Россия)

**А.И. Федотов**, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

**Л.М. Шарнин**, доктор технических наук, профессор (Казань, Россия)

*Ответственный секретарь*

**Н.И. Завгородняя**

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

*Адрес редакции:* 428015, Чебоксары, Московский пр., 15,  
тел. (8352) 45-20-96, 58-33-63 (доб. 2030)  
e-mail: [vestnik@chuvsu.ru](mailto:vestnik@chuvsu.ru)  
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

ISSN 1810-1909

---

---

# Vestnik

## CHUVASHSKOGO UNIVERSITETA

---

---

№ 3 2016

**Technical Sciences**

*Scientific Journal*

Since March, 1995

Founder:  
Federal State Educational Budgetary Institution  
of Higher Education  
the Ulyanov Chuvash State University

*Editor-in-Chief*

**A.Yu. Aleksandrov**, Candidate of Economics, Associate Professor (Cheboksary, Russia)

*Deputy Editor-in-Chief*

**G.A. Belov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)

*Editorial Board*

**A.A. Afanasyev**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)  
**V.P. Afanasyev**, Doctor of Technical Sciences, Professor (St.-Petersburg, Russia)  
**V.V. Afanasyev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Cheboksary, Russia)  
**A.V. Bulychev**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)  
**N.P. Vashkevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Penza, Russia)  
**N.A. Galanina**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Cheboksary, Russia)  
**L.S. Zimin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Samara, Russia)  
**Yu.K. Evdokimov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)  
**A.G. Korobeinikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg, Russia)  
**A.B. Kuvaldin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Moscow, Russia)  
**S.L. Kuzhekov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Novocherkassk, Russia)  
**A.L. Kulikov**, Doctor of Technical Sciences (Nizhny Novgorod, Russia)  
**Yu.Ya. Lyamets**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)  
**V.I. Meleshin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Moscow, Russia)  
**Yu.M. Mironov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Cheboksary, Russia)  
**A.V. Mokeev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Arkhangelsk, Russia)  
**V.A. Pesoshin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)  
**A.A. Potapov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow, Russia)  
**V.V. Sagaradze**, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)  
**I.G. Sidorkina**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Yoskar-Ola, Russia)  
**A.I. Fedotov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)  
**L.M. Sharnin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan, Russia)

*Executive Editor*

**N.I. Zavgorodnyaya**

The journal is included into the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications issued in the Russian Federation where the main scientific results of doctoral theses are to be published.

*Address:* 15, Moskovskiy pr., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russia  
Tel. +7(8352)45-20-96, 58-33-63 (2030)  
E-mail: [vestnik@chuvsu.ru](mailto:vestnik@chuvsu.ru)  
<http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm>

УДК 621.313.8

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ, НГУЕН КОНГ ТАМ  
**БЕСПАЗОВЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ  
ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ  
С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОВОДОМ**

*Ключевые слова:* беспазовый статор, вихревые токи, магнитные потери, комбинированный провод.

*В беспазовых вентильных двигателях с постоянными магнитами (БВДМ) устраняются многие недостатки конструкции аналогичных двигателей в пазовом исполнении статорного сердечника: наличие реактивного момента, вибрация и повышенный шум, наведение вихревых токов в постоянных магнитах, их нагрев и частичное размагничивание.*

*Приводятся результаты опытного исследования макетного образца БВДМ, показывающие, что, во-первых, из-за снижения магнитных потерь увеличивается верхний рабочий уровень скорости вращения, во-вторых, длительный электромагнитный момент составляет примерно 70% момента пазового вентильного двигателя.*

*Использование комбинированных обмоточных проводов, медная сердцевина которых имеет ферромагнитную оболочку, позволяет поднять электромагнитный момент БВДМ до такой же величины, как у вентильных двигателей классической конструкции.*

**Постановка задачи.** Вентильные электродвигатели с постоянными высокоэнергетическими магнитами получили широкое распространение в различных областях промышленности, энергетики, транспорта, бытовых устройствах.

Расположение обмотки статора в пазах обеспечивает высокий уровень магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором и, следовательно, большое значение электромагнитного момента в заданных габаритах активных материалов. По этому показателю магнитоэлектрические двигатели превосходят все другие типы электродвигателей [4]. Однако такое расположение проводников обмотки статора приводит к отрицательным последствиям:

- образованию реактивного момента (момента «залипания»), обусловленного неравномерностью воздушного зазора;
- повышенным магнитным потерям в стали зубцов статора;
- появлению вихревых токов в массиве магнитов.

Первый нежелательный фактор вызывает неравномерность вращения ротора, особенно на низких скоростях, повышенную вибрацию и шум электродвигателя.

Второй фактор, вызывая нагрев статорного сердечника, снижает допустимый уровень тока статора по условиям нагревостойкости изоляции проводников обмотки.

Третий фактор, связанный с нагревом магнитов, приводит к их размагничиванию и, следовательно, уменьшению перегрузочной способности двигателя.

Вентильные двигатели, у которых отсутствуют статорные пазы, лишены этих недостатков.

**Беспазовые вентильные двигатели с обмоткой статора из обычных проводов.** Беспазовое исполнение коллекторных двигателей постоянного тока позволяет в 2-3 раза снизить реактивную ЭДС и тем самым существенно улучшить коммутацию тока коллектором [3].

Беспазовые обмотки могут применяться и в вентильных двигателях с постоянными магнитами [1, 2, 5].

На Чебоксарском электроаппаратном заводе выпускаются магнитоэлектрические вентильные двигатели (ВД) серии 5 и 6 ДВМ в пазовом исполнении с диаметрами присоединительных фланцевых отверстий 85, 115, 165, 215 и 300 мм, имеющие длительные моменты от 0,23 до 70 Н·м.

На заводе был изготовлен макетный образец беспазового ВД с диаметром фланцевых отверстий 115 мм, которому соответствует серийный ВД с активной длиной 140 мм, длительным моментом  $M_{d0} = 7$  Н·м, максимальной частотой вращения  $n_{\max} = 6000$  об./мин.

Технические данные опытного двигателя следующие:  $n_{\max} = 6000$  об./мин;  $m = 3$ ;  $2p = 6$ ;  $q = 1,5$ . Материал магнита – неодим-железо-бор с  $B_r = 1,12$  Тл. Толщина магнита 4,3 мм. Радиальная толщина двухслойной обмотки составляет 6,25 мм. Воздушный зазор между обмоткой и магнитом равен 1,5 мм. Сердечники выполнены из стали 2013, вал – из стали 3. Расчетная длина  $l_{\delta} = 0,14$  м.

Результаты численного моделирования макетного образца беспазового ВД показывают, что максимальное значение индукции в воздушном зазоре равно примерно 0,5 Тл. Индукции в ярах статора и ротора составляют, соответственно, 0,37 и 1,24 Тл, что позволяет уменьшить сечение ярма статора в 3,7 раза (индукция в этом участке увеличивается до 1,37 Тл) с целью экономии материала и увеличения электромагнитного момента за счет роста наружного диаметра ротора (при сохранении наружного диаметра сердечника статора).

Тепловые испытания этого беспазового ВД показали, что его обмотка статора с классом нагревостойкости  $F$  имеет номинальный ток 4,4 А (при этом токе превышение ее температуры над температурой окружающей среды, измеренное методом сопротивления, составило 100°C).

Указанному току соответствует опытное значение максимального момента 3,6 Н·м.

Как уже отмечалось, серийный пазовый ВД с диаметром фланцевых отверстий 115 мм имеет длительный момент на валу  $M_{d0} = 7$  Н·м (согласно стандарту такой момент должен выдерживаться в интервале скоростей от нуля до  $0,25 n_{\max}$ ; на последующих интервалах  $(0,25 - 0,5) n_{\max}$  и  $(0,5 - 1,0) n_{\max}$  момент может быть не более  $0,8 M_{d0}$  и  $0,5 M_{d0}$ , соответственно). Тепловые испытания серийного ВД показали, что его моменты в конце трех указанных интервалов не превышают, соответственно, значений  $(0,54; 0,33; 0) M_{d0}$ .

При аналогичных испытаниях опытного макета в беспазовом исполнении получили значения:  $(0,86; 0,71; 0,43) M_{d0}$ , причем у него  $M_{d0} = 3,6$  Н·м. Эти экспериментальные данные свидетельствуют, что, начиная с частоты вращения

2800 об./мин, беспазовый ВД может развивать длительно больший момент на валу, чем его серийный пазовый аналог.

Результаты тепловых испытаний ВД приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты тепловых испытаний ВД

Показатели	Пазовый ВД			Беспазовый ВД		
	0	3000	4500	0	3400	10460
$n$ , об./мин	0	3000	4500	0	3400	10460
$M$ , Н·м	7,0	2,33	0	3,6	2,43	0

В линейном приближении опытные данные могут быть представлены в виде двух пересекающихся прямых (рис. 1) с координатами точки пересечения:  $M = 2,64 \text{ Н·м}$ ;  $n = 2800 \text{ об./мин}$ .

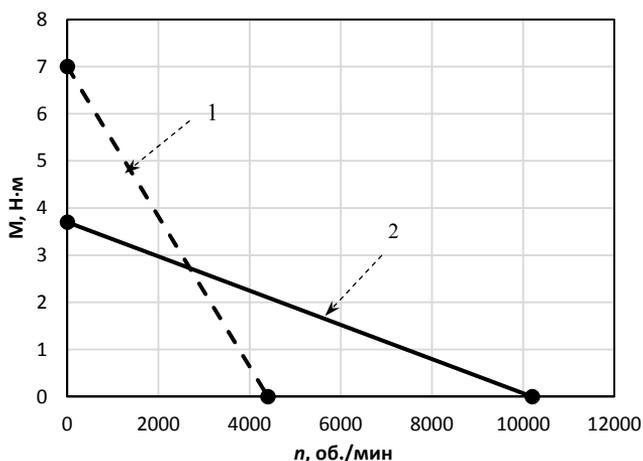


Рис. 1. Экспериментальные данные пазового (кривая 1) и беспазового (кривая 2) вентильных двигателей

Для улучшения использования беспазового ВД в его математической модели были реализованы следующие мероприятия:

1. Межполюсные промежутки на роторе были заполнены тем же магнито-твердым материалом, что и индуктор, но эти участки имеют либо радиальное, либо тангенциальное направления намагничивания. Обе эти модернизации ротора увеличивают его момент при номинальном токе, соответственно, на 11,3 и 14,6%.

2. Увеличение толщины магнитов с 4,3 до 5 и 6 мм. В результате электромагнитный момент увеличивается, соответственно, на 3,4% и 8,2%, принимая значения 3,7 и 3,9 Н·м.

3. Уменьшение высоты спинки ярма статора с 5,5 до 2 мм и соответствующее увеличение диаметра ротора при неизменном наружном диаметре статорного сердечника. Это мероприятие увеличивает момент ВД при номинальном токе на 9,7%.

Перечисленные мероприятия позволяют в итоге увеличить первоначальный момент безпазового ВД на 33%, т.е. его величина может возрасти до 4,8 Нм, что составит 69% от момента серийного пазового ВД.

В [8] приводится анализ величин активного сопротивления и тока обмотки якоря при постоянстве омических потерь в ней для различного исполнения обмотки ВД. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа различного исполнения обмотки ВД

Тип статорной обмотки	Активное сопротивление обмотки, Ом	Ток обмотки, А	Потери в обмотке, Вт
Распределённая	0,74	3,0	20
Сосредоточенная	0,49	3,7	20
Безпазовая	1,33	2,2	20

Если предположить, что электромагнитный момент ВД пропорционален току якоря, то из табл. 2 следует, что момент безпазового ВД составит  $2,2 \cdot 100/3,0 = 73\%$  от момента пазового ВД с распределённой обмоткой.

**Безпазовые вентильные двигатели с обмоткой статора из комбинированных проводов.** Для увеличения магнитной проводимости воздушного зазора безпазового ВД целесообразно применение обмоточного провода, имеющего кроме медной основы ферромагнитную оболочку [7, 8]. Как показывают исследования [8], наиболее оптимальным будет комбинированный провод, у которого ферромагнитная часть поперечного сечения составит примерно 40%. Применение комбинированного провода с медной оболочкой снаружи оказывается менее эффективным (рис. 2).

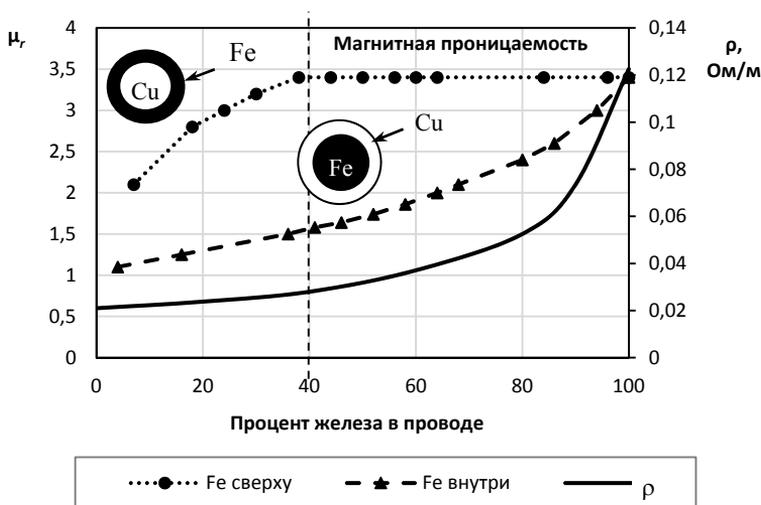


Рис. 2. Эквивалентная относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельное сопротивление комбинированного провода  $\rho$

Эквивалентная относительная магнитная проницаемость может находиться по формуле [8]

$$\mu_r = \frac{\text{Магнитный поток с комбинированной обмоткой}}{\text{Магнитный поток с медной обмоткой}}. \quad (1)$$

Исследования показывают, что беспазовые ВД с комбинированным проводом могут развивать электромагнитный момент, более чем в два раза превышающий момент беспазового ВД с обычным проводом (рис. 3) [7, 8]. Следовательно, момент беспазовых ВД с комбинированным проводом может быть не меньше момента пазовых ВД.

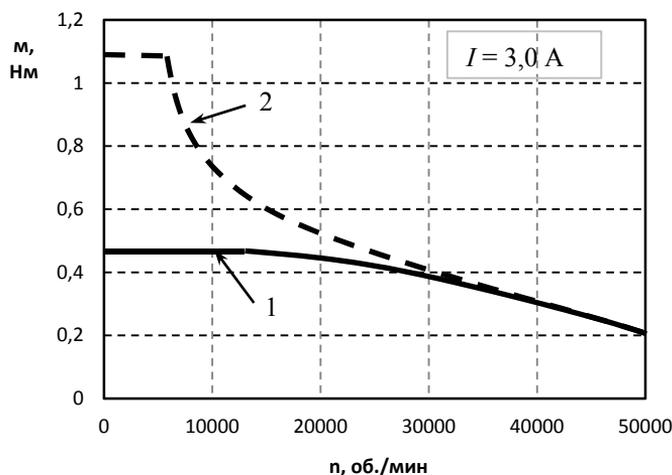


Рис. 3. Характеристики беспазового ВД: момент – скорость вращения при постоянстве потерь: кривая 1 – обмотка из обычного провода; кривая 2 – обмотка из комбинированного провода

При высоких скоростях (более 10 000 об./мин), как видно из рис. 2, это преимущество комбинированного провода из-за роста суммарных потерь снижается и при скоростях выше примерно 25 000 об./мин исчезает полностью – свойства беспазовых ВД с обычным и комбинированным проводом становятся одинаковыми.

Следует отметить, что в беспазовых ВД при достаточно больших скоростях вращения заметно проявляются и потери в железе статора и комбинированного провода (рис. 4), но при обычных скоростях преобладающими являются потери в меди.

Технические характеристики макета беспазового ВД, анализируемого в [7, 8], представлены в табл. 3.

Можно ожидать, что при высоких скоростях вращения комбинированный провод с железом внутри с точки зрения потерь окажется более предпочтительным, так как наружный ток в меди (он превышает ток в железном сечении) не будет наводить вихревые токи во внутреннем железе. При противоположной структуре комбинированного провода переменное магнитное поле тока в меди будет вызывать вихревые токи в наружном железе. Из-за

эффекта вытеснения этих вихревых токов к наружной поверхности провода потери в железе при высокой частоте могут быть значительными [6].

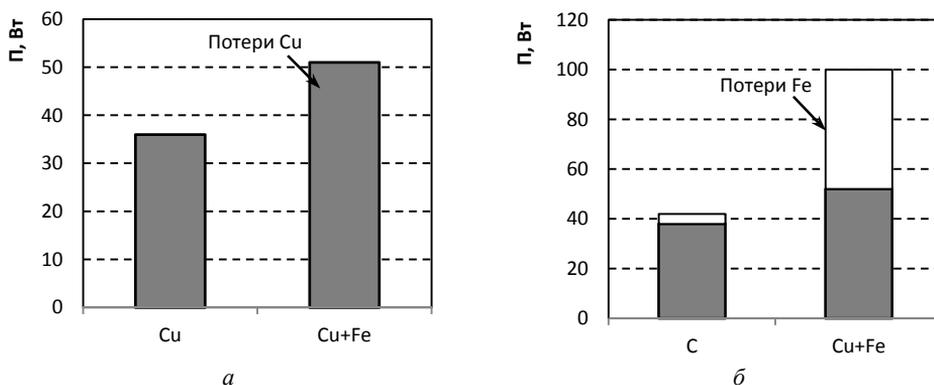


Рис. 4. Сравнительная величина суммарных потерь в ВД с безлавовыми обмотками при различных скоростях вращения: а – 2000 об./мин; б – 50000 об./мин

Таблица 3

**Технические характеристики макета безлавового ВД**

Параметр	Значение
Число пар полюсов	2
Наружный диаметр статора, мм	112
Внутренний диаметр статора, мм	94
Диаметр ротора, мм	60
Диаметр вала, мм	16
Активная длина, мм	40
Толщина магнита, мм	3
Коэрцитивная сила магнита, кА/м	915
Диаметр провода, мм	1,2
Число витков в фазе	434

**Выводы.** 1. Электромагнитный момент безлавового ВД с медными обмотками может достигать 70% момента пазового ВД.

2. При выполнении обмотки безлавового ВД из комбинированного железо-медного провода (с наружной оболочкой из железа) его момент может не уступать моменту пазового ВД.

3. При высоких скоростях вращения может оказаться предпочтительным применение комбинированного провода с медной наружной оболочкой.

Литература

1. Афанасьев А.А., Бабак А.Г., Белов В.В., Нестерин В.А., Никифоров В.Е., Николаев А.В., Чихняев В.А. Сравнение характеристик и физико-математическое моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей в пазовом и безлавовом исполнении // Электричество. 2007. № 7. С. 40–47.

2. Афанасьев А.А., Бабак А.Г., Волокитина Е.В., Головизнин С.Б., Нестерин В.А., Никифоров В.Е., Николаев А.В., Чихняев В.А. Малоинерционный высокоскоростной магнитоэлектрический безлавовый вентильный двигатель // Электричество. 2007. № 4. С. 28–35.

3. Бочаров В.И. Беспазовые тяговые электродвигатели постоянного тока. М.: Энергия, 1976. 192 с.
4. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода // Электричество. 2003. № 2. С. 3–7.
5. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.
6. Нейман Л.П. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. 190 С.
7. Sanada M., Morimoto S. Efficiency Improvement in High Speed Operation using Slot-less Configuration for Permanent Magnet Synchronous Motor. IEEE PES 2007 General Meeting, 24-28 June 2007, pp. 3–27.
8. Sanada M., Ogawa T., Morimoto S., Takeda Y. Thrust Improvement of Linear Electromagnetic Actuator using Compound Wire with Copper and Iron. Proc. of 2005 Int. Power Electronics Conf. Niigata, 2005, pp. 431–434.

---

**АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

**НГУЕН КОНГ ТАМ** – аспирант кафедры автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (nguyencongtam06@gmail.com).

---

**A. AFANASYEV, NGUYEN CONG TAM**  
**SLOTLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**  
**WITH COMBINED WIRE**

**Key words:** *Slotless permanent magnet synchronous motor, eddy currents, magnetic losses, combined wire.*

*In the slotless permanent magnet synchronous motor (PMSM) many shortcomings of similar engines design in the slotting performance of the stator core are eliminated: the presence of reactive torque and as a result, vibration and increased noise, induced eddy currents in the permanent magnets, and therefore, their heating and partial demagnetization. The results of a pilot study of model sample of the slotless PMSM show that, firstly, due to the reduction of magnetic losses the upper operating level of rotation speed increases, and secondly, long electromagnetic torque is approximately 70% of the torque of the conventional PMSM. The use of combined winding wire, where copper core has ferromagnetic sheath, allows increasing electromagnetic torque PMSM to the same dimension as gate motors of classic design.*

References

1. Afanas'ev A.A., Babak A.G., Belov V.V., Nesterin V.A., Nikiforov V.E., Nikolaev A.V., Chikhnyaev V.A. *Sravnenie kharakteristik i fiziko-matematicheskoe modelirovanie magnitoelektricheskikh ventil'nykh dvigatelei v pazovom i bespazovom ispolnenii* [Comparison of characteristics and physical, mathematical modeling of permanent magnet synchronous motor in slots and slotless performance]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 7, pp. 40–47.
2. Afanas'ev A.A., Babak A.G., Volokitina E.V., Goloviznin S.B., Nesterin V.A., Nikiforov V.E., Nikolaev A.V., Chikhnyaev V.A. *Maloinertsionnyi vysokoskorostnoi magnitoelektricheskii bespazovyi ventil'nyi dvigatel'* [Quick-response high-speed magnetoelectric permanent magnet synchronous motor]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 4, pp. 28–35.
3. Bocharov V.I. *Bespazovye tyagovye elektrodvigateli postoyannogo toka* [Slotless traction DC motors]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 192 p.
4. Il'inskii N.F. *Perspektivy razvitiya reguliruemogo elektroprivoda* [Prospects for the development of controlled electric drive]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2003, no. 2, pp. 3–7.

5. Ledovskii A.N. *Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi magnitami* [Electrical machines with highly coercive magnet]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 169 p.

6. Neiman L.R. *Poverkhnostnyi effekt v ferromagnitnykh telakh* [Skin effect in the ferromagnetic bodies]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1949, 190 p.

7. Sanada M., Morimoto S. Efficiency Improvement in High Speed Operation using Slot-less Configuration for Permanent Magnet Synchronous Motor. IEEE PES 2007 General Meeting, 24-28 June 2007, pp. 3–27.

8. Sanada M., Ogawa T., Morimoto S., Takeda Y. Thrust Improvement of Linear Electromagnetic Actuator using Compound Wire with Copper and Iron. Proc. of 2005 Int. Power Electronics Conf. Niigata, 2005, pp. 431–434.

---

**AFANASYEV ALEXANDER – Doctor of Technical Sciences, Professor of Management and Computer Science in Technical Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**NGUYEN CONG TAM – Post-Graduate Student of Management and Computer Science in Technical Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** *Афанасьев А.А., Нгуен Конг Там.* Беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с комбинированным проводом // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 5–12.

УДК 621.318.3

ББК 3264.36

В.В. АШМАРИН, О.А. НИКИТИНА, Н.В. РУССОВА, Г.П. СВИНЦОВ

**РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ФОРСИРОВАННОГО  
БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
С ВНЕДРЯЮЩИМЯ ЯКОРЕМ  
В СХЕМЕ С БАЛЛАСТНЫМ РЕЗИСТОРОМ,  
МИНИМИЗИРУЮЩИХ МАССУ ЕГО АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ\***

*Ключевые слова:* синтез, форсированное управление, масса активных материалов, оптимизация.

*Представлены расчеты размеров форсированного броневоего электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором, минимизирующих массу его активных материалов. При расчете использована методика [1], которая позволяет при минимальных упрощениях описания функционирования электромагнита получить результаты с меньшей погрешностью. Установлено существенное влияние на массу активных материалов таких параметров, как диаметр якоря, высота и толщина обмотки. Причем диаметр якоря, высота и толщина обмотки, в свою очередь, существенно нарастают при увеличении  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 15 Н.*

Броневая магнитная система с внедряющимся якорем (рис. 1, а) является основой приводных электромагнитов коммутационных аппаратов, применяемых в автономных объектах [4], используется в электромагнитных устройствах радиоэлектронной аппаратуры [2], электромагнитных клапанах [8] и других случаях [5, 9].

Известным методикам проектного расчета [2, 3, 4 и др.] присущи недостатки, снижающие качество проектных работ [1, 6]. На основе разработанной методики синтеза [1] путем расширения ее возможностей были проведены оптимизационные расчеты размеров форсированной броневой магнитной системы (рис. 1, а) в схеме с балластным резистором (рис. 1, б). Поиск наилучшего решения проводился методом двухразового сканирования [8, 10] факторного пространства исходных данных проектирования.

Масса активных материалов ( $M_a$ ) магнитной системы складывается из массы электротехнической стали ( $m_c$ ) и обмоточной меди ( $m_m$ );

$$M_a = 7800 \cdot V_c + 8900 \cdot V_0 \cdot K_3, \quad (1)$$

где

$V_c = V_{\text{як}} + V_{\text{ст}} + V_{\text{оф}} + V_{\text{пф}} + V_{\text{к}}$  – объем стали;

$V_{\text{як}} = \frac{\pi d_{\text{як}}^3}{4} (H^* + 2\Delta^* + H_{\text{в}}^* + 0,25 - H_{\text{ст}}^* H^*)$  – объем якоря;

\* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 2014/256 от 19.03.2014 г. «Синтез оптимальных ресурсо-энергосберегающих приводов электрических аппаратов».

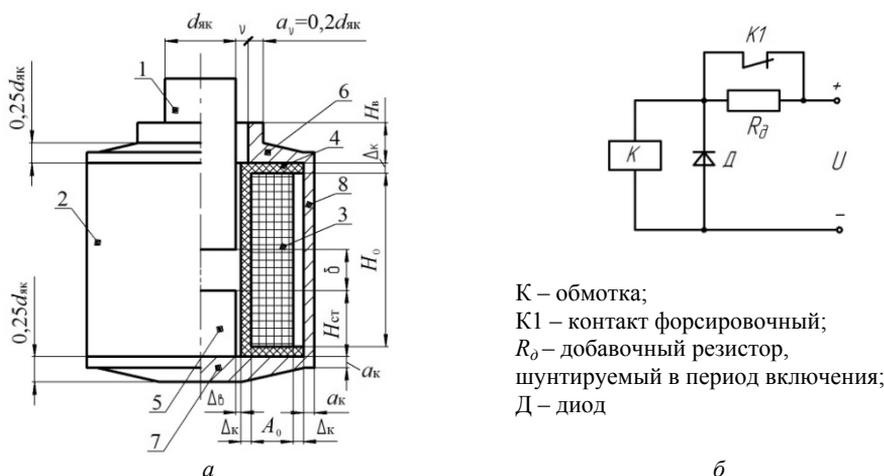


Рис. 1. Эскиз магнитной системы броневого электромагнита (а) и схема управления им (б):

1 – якорь; 2 – магнитопровод (с внешним воротничком); 3 – обмотка;  
4 – каркас катушки; 5 – стоп; 6 – проходной фланец; 7 – опорный фланец; 8 – корпус

$$V_{ст} = \frac{\pi d_{як}^3}{4} (H_{ст*} H_* + \Delta_*) - \text{объем стопа};$$

$$V_{оф} = \frac{\pi \cdot 0,25^2 d_{як}^3}{3} \left[ 1 + (1 + 4\Delta_* + 2A_*)^2 + (1 + 4\Delta_* + 2A_*) \right] - \text{объем опорного фланца};$$

$$V_{пф} = \frac{0,2\pi d_{як}^3}{12} \left[ (1 + 2\nu_* + 0,4)^2 + (1 + 4\Delta_* + 2A_*)^2 + (1 + 2\nu_* + 0,4)(1 + 4\Delta_* + 2A_*) \right] +$$

$$+ \frac{\pi d_{як}^3}{4} \left[ (H_{в*} - 0,2) \left[ (1,4 + 2\nu_*)^2 - (1 - 2\nu_*)^2 \right] \right] - \text{объем проходного фланца};$$

$$V_{к} = \frac{\pi d_{як}^3}{4} (2a_{к*} + H_* + 2\Delta_*) - \text{объем корпуса};$$

$$a_{к*} = \frac{a_{к}}{d_{як}} = 0,5(1 + 4\Delta_* + 2A_*) \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1}{1 + 4\Delta_* + 2A_*} \right)^2} - 1 \right) - \text{относительная толщина}$$

корпуса;

$$V_0 = \pi d_{як}^3 (1 + 2\Delta_* + A_*) A_* H_* - \text{объем обмотки};$$

$K_3$  – коэффициент заполнения медью обмоточного окна;

$$H_* = H_0 / d_{як}; \quad A_* = A_0 / d_{як}; \quad H_{в*} = H_{в} / d_{як}; \quad H_{ст*} = H_{ст} / H_0;$$

$$\nu_* = \nu / d_{як}; \quad \Delta_* = \Delta_{к} / d_{як}.$$

При оптимизационных расчетах принято:  $\nu_* = 0,012$ ;  $\Delta_* = 0,1$ .

В качестве факторов, влияющих на оптимальные размеры магнитной системы, приняты:  $\delta_{кр}$  – критический рабочий воздушный зазор;  $P_{мх кр}$  – усилие механизма, преодолеваемое электромагнитом в критической точке перемещения якоря;  $P_{мх к} / P_{мх кр}$  – отношение механического усилия при конечном положении якоря к критическому усилию;  $T_0$  – расчетная температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) окружающей среды;  $T_{доп}$  – допустимая температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) нагрева обмотки;  $k_{max}$  –

отношение максимально возможного на клеммах источника питания напряжения к напряжению срабатывания электромагнита;  $k = k_{\text{отп}} k_{U_{\text{отп}}} / k_{U_{\text{max}}}$  – комплекс коэффициентов [1] и коэффициент ( $K_3$ ) заполнения обмоточного окна.

Результаты оптимизационных расчетов основных размеров броневое электромагнита с втяжным якорем при фиксированных  $P_{\text{мх кр}} / P_{\text{мх кр}} = 4$ ;  $k_{\text{max}} = 1,5$ ;  $k = 0,45$ ;  $K_3 = 0,5$  приведены в табл. 1–5.

Оптимальное значение диаметра якоря ( $d_{\text{як.опт}}$ ) при допустимой температуре нагрева 115°C и 155°C обмотки, температуре 40°C и 70°C окружающего воздуха в диапазоне изменения  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 15 Н с ростом критического значения рабочего воздушного зазора (табл. 1) монотонно увеличивается; при  $P_{\text{мх кр}} \leq 28$  Н эта зависимость имеет слабовыраженный минимум. При  $\delta_{\text{кр}} = \text{const}$  оптимальное значение диаметра якоря монотонно увеличивается с ростом  $P_{\text{мх кр}}$ . Существенное нарастание  $d_{\text{як.опт}}$  имеет место при увеличении  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 15 Н.

Влияние на оптимальную высоту ( $H_{0 \text{ опт}}$ ) обмотки параметров механической характеристики, температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева обмотки иллюстрируют данные табл. 2. С увеличением величины критического воздушного рабочего зазора при  $P_{\text{мх кр}} = \text{const}$   $H_{0 \text{ опт}}$  монотонно возрастает. С увеличением  $P_{\text{мх кр}}$  при фиксированном  $\delta_{\text{кр}}$  в области  $P_{\text{мх кр}} = 21,5$  Н наблюдается слабовыраженный максимум. Большей допустимой температуре нагрева обмотки при заданной температуре окружающей среды соответствует меньшая высота обмотки.

Таблица 1

**Расчетные оптимальные значения диаметра якоря ( $d_{\text{як.опт}}$ ), минимизирующие массу активных материалов форсированного броневое электромагнита в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м**

$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	11,37	12,46	13,14	13,77	14,51
		8,5 (Н)	15,27	15,98	16,37	16,82	17,50
		15 (Н)	19,11	19,24	19,24	19,48	20,04
		21,5 (Н)	21,65	21,30	21,00	21,07	21,55
		28 (Н)	21,74	21,37	21,06	21,12	21,60
	70	2 (Н)	12,28	13,30	13,92	14,52	15,25
		8,5 (Н)	16,69	17,21	17,46	17,84	18,48
		15 (Н)	21,12	20,88	20,65	20,75	21,25
		21,5 (Н)	24,08	23,21	22,61	22,50	22,90
		28 (Н)	24,19	23,29	22,68	22,56	22,96
155	40	2 (Н)	10,62	11,74	12,46	13,12	13,87
		8,5 (Н)	14,10	14,95	15,43	15,95	16,65
		15 (Н)	17,49	17,88	18,06	18,39	19,01
		21,5 (Н)	19,70	19,72	19,66	19,85	20,40
		28 (Н)	19,77	19,78	19,71	19,90	20,45
	70	2 (Н)	11,43	12,51	13,19	13,82	14,56
		8,5 (Н)	15,36	16,06	16,44	16,89	17,56
		15 (Н)	19,24	19,34	19,33	19,56	20,12
		21,5 (Н)	21,80	21,42	21,11	21,16	21,64
		28 (Н)	21,89	21,49	21,17	21,21	21,69

Таблица 2

Расчетные оптимальные значения высоты обмотки  $H_{0 \text{ опт}}$   
минимизирующие массу активных материалов форсированного  
бронированного электромагнита в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	48,07	50,48	50,94	50,98	51,18
		8,5 (H)	62,72	63,79	63,44	63,27	63,77
		15 (H)	76,27	75,69	74,60	74,39	75,41
		21,5 (H)	83,84	82,52	81,43	81,71	83,63
		28 (H)	81,61	81,53	81,65	83,16	86,37
	70	2 (H)	70,02	73,51	74,52	75,19	76,29
		8,5 (H)	93,19	94,09	93,46	93,42	94,60
		15 (H)	115,45	112,92	110,50	109,85	111,30
		21,5 (H)	128,49	124,15	121,09	120,47	122,65
		28 (H)	126,49	123,20	121,35	122,11	125,65
155	40	2 (H)	43,07	45,60	46,22	46,36	46,57
		8,5 (H)	55,53	57,14	57,22	57,29	57,86
		15 (H)	66,82	67,33	66,95	67,14	68,29
		21,5 (H)	72,94	73,08	72,88	73,64	75,71
		28 (H)	70,89	72,14	73,07	74,99	78,29
	70	2 (H)	58,67	62,03	63,08	63,68	64,54
		8,5 (H)	77,00	78,65	78,61	78,82	79,90
		15 (H)	94,20	93,62	92,46	94,42	93,92
		21,5 (H)	104,17	102,39	100,94	101,24	103,57
		28 (H)	102,02	101,46	101,23	102,74	106,37

Таблица 3

Расчетные оптимальные значения толщины обмотки ( $A_0 \text{ опт}$ ),  
минимизирующие массу активных материалов форсированного бронированного  
электромагнита в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	8,37	9,16	9,66	10,13	10,67
		8,5 (H)	11,23	11,75	12,04	12,37	12,87
		15 (H)	14,06	14,15	14,15	14,32	14,74
		21,5 (H)	15,92	15,66	15,45	15,50	15,85
		28 (H)	15,99	15,72	15,49	15,54	15,89
	70	2 (H)	7,62	8,26	8,64	9,02	9,47
		8,5 (H)	10,36	10,68	10,84	11,08	11,47
		15 (H)	13,11	12,96	12,82	12,88	13,19
		21,5 (H)	14,95	14,41	14,04	13,97	14,22
		28 (H)	15,01	14,46	14,08	14,01	14,25
155	40	2 (H)	8,17	9,04	9,60	10,11	10,68
		8,5 (H)	10,85	11,51	11,88	12,28	12,82
		15 (H)	13,46	13,77	13,91	14,16	14,63
		21,5 (H)	15,17	15,19	15,14	15,29	15,71
		28 (H)	15,22	15,23	15,18	15,32	15,74
	70	2 (H)	7,49	8,20	8,64	9,06	9,54
		8,5 (H)	10,06	10,52	10,77	11,07	11,51
		15 (H)	12,61	12,68	12,67	12,82	13,18
		21,5 (H)	14,29	14,03	13,83	13,87	14,18
		28 (H)	14,34	14,08	13,87	13,90	14,21

Таблица 4

Расчетные оптимальные значения высоты стопа  $H_{ст\ опт}$ ,  
минимизирующие массу активных материалов форсированного броневого  
электромагнита в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{доп}, ^\circ C$	$T_0, ^\circ C$	$P_{мх.кр}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	23,07	24,23	24,45	24,47	24,57
		8,5 (H)	30,11	30,62	30,45	30,37	30,61
		15 (H)	36,61	36,33	35,81	35,71	36,19
		21,5 (H)	40,24	39,61	39,08	39,22	40,14
		28 (H)	39,17	39,13	39,19	39,92	41,46
	70	2 (H)	33,61	35,28	35,77	36,09	36,62
		8,5 (H)	44,73	45,16	44,86	44,84	45,31
		15 (H)	55,41	54,20	53,04	52,73	53,42
		21,5 (H)	61,82	59,59	58,08	57,83	58,87
		28 (H)	60,72	59,14	58,25	58,61	60,31
155	40	2 (H)	20,68	21,89	22,18	22,25	22,36
		8,5 (H)	26,66	27,43	27,47	27,50	27,77
		15 (H)	32,07	32,32	32,14	32,23	32,78
		21,5 (H)	35,01	35,08	34,98	35,35	36,34
		28 (H)	34,03	34,63	35,08	35,99	37,58
	70	2 (H)	28,16	29,78	30,28	30,57	30,98
		8,5 (H)	36,96	37,75	37,73	37,83	38,35
		15 (H)	45,22	44,94	44,38	44,36	45,08
		21,5 (H)	50,00	49,15	48,95	48,59	49,71
		28 (H)	48,97	48,70	48,59	49,32	51,06

Таблица 5

Расчетные оптимальные значения высоты воротничка  $H_{в\ опт}$ ,  
минимизирующие массу активных материалов форсированного броневого  
электромагнита в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{доп}, ^\circ C$	$T_0, ^\circ C$	$P_{мх.кр}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	4,98	5,46	5,75	6,03	6,36
		8,5 (H)	6,69	7,00	7,17	7,37	7,66
		15 (H)	8,37	8,43	8,43	8,53	8,78
		21,5 (H)	9,48	9,33	9,20	9,23	9,44
		28 (H)	9,52	9,36	9,23	9,25	9,46
	70	2 (H)	5,38	5,83	6,10	6,36	6,68
		8,5 (H)	7,31	7,54	7,65	7,81	8,09
		15 (H)	9,25	9,14	9,04	9,09	9,31
		21,5 (H)	10,55	10,16	9,90	9,86	10,03
		28 (H)	10,59	10,20	9,93	9,88	10,06
155	40	2 (H)	4,65	5,14	5,46	5,75	6,07
		8,5 (H)	6,17	6,55	6,76	6,99	7,29
		15 (H)	7,66	7,83	7,91	8,06	8,32
		21,5 (H)	8,63	8,64	8,61	8,69	8,93
		28 (H)	8,66	8,66	8,63	8,72	8,96
	70	2 (H)	5,01	5,48	5,78	6,05	6,38
		8,5 (H)	6,73	7,03	7,20	7,40	7,69
		15 (H)	8,43	8,47	8,47	8,57	8,81
		21,5 (H)	9,55	9,38	9,24	9,27	9,48
		28 (H)	9,59	9,41	9,27	9,29	9,50

О зависимости оптимальной толщины ( $A_{0 \text{ опт}}$ ) обмотки от варьируемых исходных данных проектирования броневое электромагнита с внедряющимся якорем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 3. В частности, с увеличением  $P_{\text{мх кр}}$  при фиксированном  $\delta_{\text{кр}}$  наблюдается монотонное возрастание  $A_{0 \text{ опт}}$  (наиболее интенсивное при  $P_{\text{мх кр}} \leq 21,5$  Н). При  $P_{\text{мх кр}} \leq 8,5$  Н с увеличением  $\delta_{\text{кр}}$  имеет место монотонное возрастание  $A_{0 \text{ опт}}$ . При  $P_{\text{мх кр}} > 8,5$  Н с изменением  $\delta_{\text{кр}}$  может наблюдаться слабовыраженный минимум зависимости  $A_{0 \text{ опт}} = f(\delta_{\text{кр}})$ .

Сведения об оптимальной высоте ( $H_{\text{ст опт}}$ ) стопа представлены в табл. 4. При малых значениях механического (противодействующего) усилия ( $P_{\text{мх кр}} = 2$  Н) наблюдается монотонное незначительное увеличение  $H_{\text{ст опт}}$  с изменением  $\delta_{\text{кр}}$  от 4 до 12 мм. При  $P_{\text{мх кр}} > 2$  Н зависимость  $H_{\text{ст опт}}$  от  $\delta_{\text{кр}}$  имеет место слабовыраженный минимум в области  $8 \div 10$  мм.

В области  $4 \leq \delta_{\text{кр}} \leq 6$  мм с увеличением  $P_{\text{мх кр}}$  имеет место экстремум (максимум). Большее влияние на  $H_{\text{ст опт}}$  оказывают  $P_{\text{мх кр}}$ ,  $T_0$ ,  $T_{\text{доп}}$ .

При фиксированном значении  $\delta_{\text{кр}}$  оптимальная высота  $H_{\text{в опт}}$  внешнего воротничка монотонно увеличивается с ростом  $P_{\text{мх кр}}$  (табл. 5). Интенсивно увеличивается  $H_{\text{в опт}}$  с ростом  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 21,5 Н. В меньшей степени изменяется  $H_{\text{в опт}}$  с увеличением  $\delta_{\text{кр}}$ ,  $T_0$ .

Обратим внимание, что отношение соответствующих данных табл. 5 к данным табл. 1 изменяется в узком пределе от 0,43 до 0,44; аналогично отношение  $H_{\text{с опт}} / H_{0 \text{ опт}} \approx 0,48$  (отношение данных табл. 4 к данным табл. 2).

**Выводы.** 1. Основными размерами, определяющими минимальную массу электромагнита являются: диаметр якоря, высота и толщина обмотки.

2. Для расчета минимальной массы активных материалов форсированного броневое втяжного электромагнита необходимо заменить  $d_{\text{як}}$ ;  $H_0$ ;  $A_0$ ;  $H_{\text{ст}*}$ ;  $H_{\text{в}*}$ , соответственно, на  $d_{\text{як опт}}$ ;  $H_{0 \text{ опт}}$ ;  $A_{0 \text{ опт}}$ ; 0,48; 0,435, а также иметь в виду, что  $\nu^* = 0,012$ ;  $\Delta^* = 0,1$ .

#### Литература

1. *Зайцев Ю.М., Иванов И.П., Никитина О.А., Руссова Н.В., Свинцов Г.П.* Методика синтеза форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 52–61.
2. *Казаков Л.А.* Электромагнитные устройства РЭА: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 352 с.
3. *Клименко Б.В.* Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
4. *Коц Б.Э.* Электромагниты постоянного тока с форсировкой. М.: Энергия, 1973. 80 с.
5. Новые контакторы серии АФ с электронной системой управления // Академия энергетика. 2013. № 6(56). С. 82–83.
6. *Приказицков А.В., Руссова Н.В., Сагардзе Е.В., Свинцов Г.П., Шоглев Д.Г.* Усовершенствованная методика проектного расчета форсированного клапанного электромагнита в схеме с балластным резистором // Электротехника. 2011. № 1. С. 57–62.
7. *Руссова Н.В., Свинцов Г.П., Шоффа В.Н.* Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения с призматическими сердечниками при повторно-кратковременном режиме // Электротехника. 2002. № 2. С. 55–60.

8. Щучинский С.Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. М.: Энергоиздат, 1984. 152 с.

9. Gueorgiev V., Alexandrov A., Yatchev I. Optimization of the force characteristic of a solenoid electromagnet with ferromagnetic disc in the coil. In: Rudnicki M., Wiak S., eds. Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism. Springer-Science +Business Media, B.V., 2003, pp. 261–268.

10. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Petrov O.A., Prikazhchikov A.V., Russova N.V., Svintsov G.P. Minimizing the Power Consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no 8, pp. 474–478.

---

**АШМАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

**НИКИТИНА ОЛЕСЯ АЛЕКСЕЕВНА** – аспирантка кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ipivaniv@vniir.ru).

**РУССОВА НАТАЛИЯ ВАЛЕРЬЕВНА** – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской части, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (russova@mail.ru).

**СВИНЦОВ ГЕННАДИЙ ПЕТРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (eea\_chuvsu@mail.ru).

---

V. ASHMARIN, O. NIKITINA, N. RUSSOVA, G. SVINTSOV  
CALCULATING DIMENSIONS  
OF FORCED ARMORED DC ELECTROMAGNET  
WITH PLUNGING ARMATURE IN SCHEME  
WITH BALLAST RESISTOR, MINIMIZING WEIGHT  
OF ITS ACTIVE MATERIALS

**Key words:** synthesis, forced management, weight of active materials, optimization.

Calculations of the size of the forced armor DC electromagnet with a plunging armature in the scheme with a ballast resistor, minimizing the weight of its active materials are presented. The calculation used the method [1] which allows getting results with less error at minimum simplified description of the operation of the electromagnet.

The diameter of the armature, the height and thickness of the winding are proved to influence on the weight of active materials. The diameter of the armature, winding height and thickness, in their turn, are increasing significantly with an increase of  $P_{\text{max кр}}$  of 2 to 15 N.

References

1. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Nikitina O.A., Russova N.V., Svintsov G.P. *Metodika sinteza forsirovannogo bronevogo elektromagnita postoyannogo napryazheniya s vnedryayushchimsya yakorem v skheme s ballastnym rezistorom* [A technique of synthesis of the forced armored electromagnet of constant tension with the taking root anchor in the scheme with the ballast resistor]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 52–61.

2. Kazakov L.A. *Elektromagnitnye ustroystva REA: Spravochnik* [Electromagnetic devices REA: Reference book]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 352 p.

3. Klimenko B.V. *Forsirovannye elektromagnitnye sistemy* [The forced electromagnetic systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 160 p.

4. Kots B.E. *Elektromagnitny postoyannogo toka s forsirovkoj* [Direct Current Electromagnets with Forced Management]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 80 p.

5. *Novye kontakory serii AF s elektronnoi sistemoi upravleniya* [New contactors of the AF series with an electronic control system]. *Akademiya Energetiki* [Energy Academy], 2013, no. 6(56), pp. 82–83.

6. Prikazshchikov A.V., Russova N.V., Sagardze E.V., Svintsov G.P., Shoglev D.G. *Usovershenstvovannaya metodika proektnogo rascheta forsirovannogo klapannogo elektromagnita v skheme s ballastnym rezistorom* [Advanced technique of design calculation of the forced valvate electromagnet in the scheme with the ballast resistor]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2011, no. 1, pp. 57–62.

7. Russova N.V., Svintsov G.P., Shoffa V.N. *Sintez optimal'nykh simmetrichnykh P-obraznykh dvukhkatushechnykh elektromagnitov postoyannogo napryazheniya s prizmaticheskimi serdechnikami pri povtorno-kratkovremennom rezhime* [Synthesis of optimum symmetric P-shaped two-bobbin electromagnets of constant tension with prismatic cores at the repeated and short-term mode]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2002, no. 2, pp. 55–60.

8. Shchuchinskii S.Kh. *Elektromagnitnye privody ispolnitel'nykh mekhanizmov* [Electromagnetic drives of executive mechanisms]. Moscow, Energoizdat Publ., 1984, 152 p.

9. Gueorgiev V., Alexandrov A., Yatchev I. Optimization of the force characteristic of a solenoid electromagnet with ferromagnetic disc in the coil. In: Rudnicki M., Wiak S., eds. *Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*. Springer-Science +Business Media, B.V., 2003, pp. 261–268.

10. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Petrov O.A., Prikazshchikov A.V., Russova N.V., Svintsov G.P. Minimizing the Power Consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no 8, pp. 474–478.

---

**ASHMARIN VASILII – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Life and Security of the Environmental Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**NIKITINA OLESYA – Post-Graduate Student of Electric and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**RUSSOVA NATALIYA – Candidate of Technical Sciences, Chief of a Research and Development Part, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**SVINZOV GENNADIY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electric and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** Ашмарин В.В., Никитина О.А., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Расчет размеров форсированного броневоегo электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором, минимизирующих массу его активных материалов // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 13–20.

УДК 621.311.1

ББК 31.279

Э. АЮУРЗАНА, А.Д. МАМБЕТЖАНОВ, Б.К. ТАКЫРБАШЕВ,  
Д. ДЖАМАГИДЗЕ, М.И. ПЕТРОВ, А.А. КУЗЬМИН

## ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Ключевые слова:** режим заземления нейтрали, система компенсации тока однофазное замыкание на землю, гармоники в токе ОЗЗ, заземление нейтрали.

*В статье обобщен опыт экспериментальных исследований в сетях среднего класса напряжения. В настоящее время для замера величины тока однофазного замыкания на землю используются несколько основных методов. При этом в нормативных документах нет четких требований к применяемому для этого измерительному оборудованию. В работе дается оценка методов, а также оборудования, применяемого для этих измерений. Приводятся показания измерений, проведенных достоверным способом для сетей различного назначения городских электрических подстанций, нефтехимических производств, горнодобывающих заводов, предприятий генерации и др. Даны рекомендации по выбору средств заземления нейтрали.*

Основу сетей промышленного и городского назначения составляют сети среднего класса напряжения 3-35 кВ. Как правило, данные сети выполнены в виде кабельных или воздушно-кабельных присоединений, общая протяженность которых может насчитывать сотни километров. Основной причиной возникновения большинства аварийных ситуаций является однофазное замыкание на землю. Появление замыкания на землю может быть устойчивым («металлическим») или через перемежающуюся дугу. В случае возникновения дугового замыкания в результате гашений и повторных зажиганий дуги на неповрежденных фазах возникают перенапряжения значительной величины, в результате чего однофазное замыкание на землю переходит в многоместное короткое замыкание, значительно увеличивая экономический ущерб аварии. В настоящее время перенапряжения в сетях среднего класса напряжения хорошо изучены, на основании экспериментальных и расчетных исследований определены наибольшие кратности перенапряжений [1].

Широко известно, что определяющим фактором, влияющим на развитие процессов при возникновении однофазного замыкания на землю, является режим заземления нейтрали. Выбор режима заземления нейтрали требует внимательной проработки различных эксплуатационных вопросов: технологической возможности отключения поврежденного присоединения, наличия в сети кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, координации ОПН и др.

Проблема выбора режима заземления нейтрали должна решаться индивидуально для каждой энергосистемы. В данной статье приводится опыт экспериментальных исследований выбора и оценки режима заземления нейтрали.

**Методика проведения натурных замеров тока однофазного замыкания на землю.** Основной измеряемой характеристикой является величина

тока замыкания на землю. Оценка величины тока может быть произведена расчетным путем. Данный способ наименее трудозатратный, но он применим для тех сетей, где есть полная информация по типам установленного оборудования. Зачастую в развивающихся сетях изменение конфигурации сети может быть не внесено в принципиальные схемы, что в отдельных случаях приводит к погрешности расчетов более чем на 50%. Поэтому определение величины тока расчетным путем применимо для вновь проектируемых электрических сетей.

В настоящее время проработаны и используются несколько методов экспериментального определения емкостного тока замыкания на землю<sup>1</sup> [5]. Наиболее просто реализуем «косвенный» метод замера, выполняемый для сетей без дугогасящих реакторов (ДГР) при помощи введения искусственной несимметрии или снятия резонансной кривой для сетей с ДГР. Однако «косвенный» замер не позволяет получить всей необходимой информации о состоянии сети: уровнях гармонических искажений тока замыкания на землю, активной и реактивной составляющих полного тока замыкания на землю. Кроме того, данный метод в ряде случаев обладает низкой точностью. «Прямой» метод замера является более полным. При этом осуществляется непосредственное заземление одной из фаз с контуром заземления подстанции. Подробно методика проведения замера приведена в Типовой инструкции по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ (ТИ34.20.179-88). Данный метод позволяет оценить полную величину тока замыкания. При использовании современных средств осциллографирования становится возможной пост-процессорная обработка сигналов, включающая: выделение активной и реактивной составляющих, а также разложение в ряд Фурье для получения его гармонических составляющих. Для сетей с оборудованием, испытанным в соответствии с нормативными требованиями, как показывает опыт многочисленных подобных экспериментов, данный вид воздействий не представляет опасности для изоляции оборудования. Для оценки состояния ДГР при проведении опыта необходимо контролировать ток через ДГР.

Для получения информации о сети (уровнях возникающих перенапряжений, величине несимметрии и др.) необходимо одновременно производить мониторинг фазных напряжений. Анализ экспериментальных осциллограмм показывает, что частота переходного процесса, возникающего при однофазном замыкании на землю, может составлять десятки килогерц. Применение трансформаторов напряжения (ТН) для получения сигналов фазных напряжений не всегда приемлемо. Согласно [4] граница пропускаемых частот ТН типа НТМИ, НОМ и ЗНОМ, при которых коэффициент трансформации постоянен, находится в диапазоне 3-5 кГц, однако не гарантируется производителем. При этом в [3] показано, что погрешность ТН типа НОМ-6 на частоте 2 кГц по напряжению достигает 20%, а по углу  $-30^\circ$ , что не соответствует требованиям точности замеров.

---

<sup>1</sup> ТИ34.20.179-88. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ М., 1988.

**Результаты экспериментальных исследований в сети городского электроснабжения.** Для проведения комплексных исследований в сети 10 кВ подстанции городского электроснабжения проведен опыт измерения тока однофазного замыкания на землю «прямым» методом. На кабельном присоединении специально выделенной для организации искусственного ОЗЗ ячейки одна из фаз соединялась с землей «закороткой», рассчитанной на ток трехфазного КЗ. Для осциллографирования тока ОЗЗ в цепь «закоротки» устанавливался дополнительно трансформатор тока (ТТ). К выводам вторичных обмоток трансформатора тока через измерительные кабели подключался цифровой осциллограф для регистрации тока ОЗЗ.

Осциллограмма тока замыкания на землю приведена на рис. 1. Значение полного тока замыкания на землю составляет 58,8 А. В процессе обработки, получен гармонический состав тока, наиболее характерные составляющие (свыше 0,25 А) приведены в табл. 1. Полный гармонический состав приведен на гистограмме (рис. 2). В токе содержится значительная составляющая гармонических искажений – 5,36 А (9,1% от составляющей тока замыкания на землю 50 Гц). Наличие высших гармоник в токе ОЗЗ приводит к невозможности точной компенсации тока однофазного замыкания на землю, осложняют процесс горения дуги, что утяжеляет процесс горения дуги.

Наличие большой активной составляющей в токе ОЗЗ может говорить о значительном техническом износе изоляции кабельных линий. Активная составляющая в токе замыкания на землю составляет 0,79 А (1,3%), что говорит о нормальном состоянии изоляции.

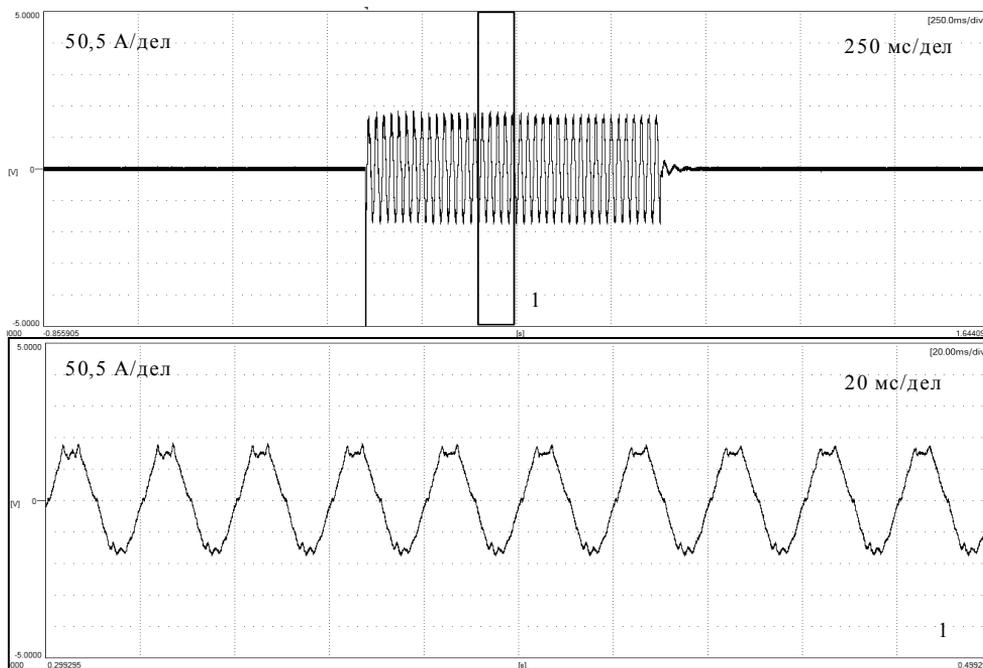


Рис. 1. Осциллограммы тока ОЗЗ при замыкании в сети 10 кВ городской подстанции

Таблица 1

Действующие значения гармоник тока ОЗЗ  
в установившемся режиме в сети 10 кВ, А

Номер гармоники	Опыт № 1
1	58,580
2	0,681
3	0,523
4	0,937
5	4,030
6	1,563
7	0,726
8	0,503
9	0,386
10	0,617
11	2,032
12	1,023
13	1,602
14	0,614
15	0,281
16	0,539
17	0,710
18	0,362
19	0,537
24	0,261
25	0,652

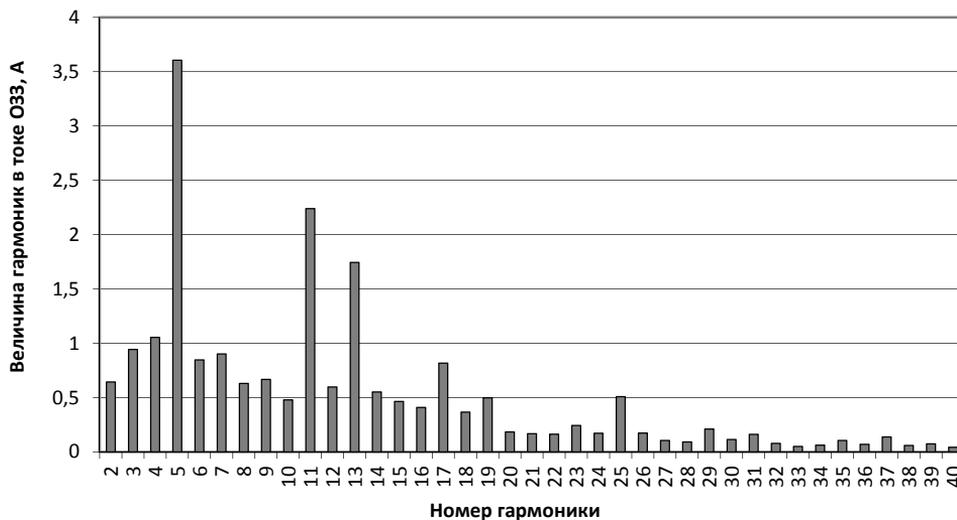


Рис. 2. Действующие значения гармоник тока ОЗЗ  
для сети 10 кВ городской подстанции

В данной сети использование традиционных средств защиты сети путем заземления нейтрали через дугогасящий реактор может оказаться недостаточным из-за значительной величины тока высших гармоник. С учетом анализа полученных экспериментальных данных выданы рекомендации о переводе сети к низкоомному заземлению нейтрали.

**Экспериментальная оценка уровней гармонических искажений тока однофазного замыкания на землю.** На основании многолетнего опыта натурных замеров получены данные о содержании высших гармоник в токах замыкания на землю. Физическая природа появления гармонических искажений в токе ОЗЗ приведена в [7]. При оценке использовались данные по уровням гармонических искажений в токе ОЗЗ 62 объектов напряжением 6-35 кВ России, Белоруссии, Казахстана, Монголии, Грузии. Экспериментальные исследования проводились для электрических сетей различного назначения: городских электрических подстанций, нефтехимических производств, горнодобывающих заводов, предприятий генерации и др.

Для каждого класса напряжения характерны отличительные особенности проблем появления гармонических искажений. Сети 6-10 кВ, как правило, состоят из кабельных линий, имеют значительную параллельную протяженность сети и небольшую длину отдельных присоединений. Нелинейные нагрузки подключаются напрямую, без трансформаторной связи. Сети 35 кВ выполняются кабельно-воздушными линиями с преимуществом воздушных, они имеют большую протяженность отдельных присоединений (по сравнению с сетями 6-10 кВ) и небольшую разветвленность. Кроме объектов металлургии источники гармонических искажений в таких сетях располагаются за трансформаторной связью.

Для систематизации уровней гармонических искажений в токе ОЗЗ на различных объектах введем следующие оценочные критерии:

1. Значение тока высших гармоник ОЗЗ превышает установленные нормы<sup>1</sup>. При таком уровне гармонических искажений полностью теряется эффект компенсации. В сети возможно возникновение резонансных перенапряжений.

2. Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ: ВГ имеют величину 8-15 А для сети 6-10 кВ, 5А для сети 35 кВ. При данных уровнях гармонических искажений дуговое замыкание значительно утяжеляется [2].

3. Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ: уровень ВГ в токе ОЗЗ для сети 6-10 кВ от 4,5 до 8 А, и от 2 до 4 А для сети 35 кВ.

4. Отсутствие значимого гармонического фона в токе ОЗЗ.

Результаты измерений по сетям промышленного и городского электроснабжения приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Результаты гармонического анализа, полученного в ходе натурных исследований, приведены в табл. 3 и 4. Как видно из них, вопрос гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю актуален для эксплуатируемых сетей. В сетях промышленного назначения 4 объекта (6,5%) содержат в своих спектрах величины гармонических искажений, превышающие нормы<sup>2</sup>, что делает невозможным выполнение условия самопогасания дуги обычными системами компенсации; на 7 объектах (25,9%) значения то-

<sup>1</sup> Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации РД 34.20.501-95: утв. Приказом Минэнерго России от 19.06.2003 г. Доступ из справ.-прав. системы Гарант.

<sup>2</sup> Там же.

ков высших гармоник достаточны для неустойчивого горения дуги. Среди объектов класса 6-10 кВ 18,5% содержат гармоники, значения которых превышают 4,5 А. При этом меньше половины (48%) объектов не имеют проблем с высшими гармониками в токе ОЗЗ.

Таблица 3

**Результаты исследований возникновения гармонических искажений  
в сети промышленных предприятий**

Показатели	Класс напряжения, кВ		
	6	10	35
Всего объектов	11	12	4
Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы	0	3	1
Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ	3	2	2
Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ	2	3	0
Отсутствие проблем	6	4	1

Таблица 4

**Результаты исследований возникновения гармонических искажений  
в сети городского назначения напряжения 6-35 кВ**

Показатели	Класс напряжение, кВ		
	6	10	35
Всего объектов	8	23	4
Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы	0	0	0
Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ	1	6	0
Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ	3	6	0
Отсутствие проблем	4	11	4

Для сетей городского назначения характерно также значительное содержание высших гармоник в токе ОЗЗ, 45% исследованных объектов сетей 6-10 кВ городской инфраструктуры содержат токи высших гармоник, усугубляющих процессы при ОДЗ.

**Выбор режима заземления нейтрали.** При достаточном резервировании потребителей возможна реализация низкоомного заземления нейтрали. При этом устройства защиты действует на отключение поврежденного присоединения без выдержки времени. За счет этого снижаются длительность существования аварии и воздействие на оборудование с низким уровнем изоляции, такое как электродвигатели. В настоящее время компанией ООО «Болид» выполнены работы по переводу части подстанций Республики Киргизия и Республики Монголии на низкоомное заземление нейтрали. Согласно наблюдениям службы изоляции ОАО «Северэлектро» (г. Бишкек, Республика Киргизия), количество аварийных отключений после ввода низкоомного заземления нейтрали снизилось в 4,5 раза. Выбор параметров средств заземления определяется обеспечением селективности работы средств релейной защиты.

В ряде случаев невозможно выполнить немедленное отключение поврежденного присоединения, поэтому применяют комбинированное заземление нейтрали. В сетях с большим емкостным током согласно Правилам технической

эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации<sup>1</sup> необходимо применение устройств компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю. При этом эффективность данной меры будет определяться качеством работы силовой части и автоматики настройки. В идеальном случае в аварийном режиме должна обеспечиваться резонансная настройка, при этом обеспечивается снижение в месте замыкания тока до нуля. Однако реально существует активная составляющая тока замыкания на землю, а также токи высших гармоник [6]. Для оценки работоспособности существующих систем и определения рекомендаций по выбору параметров режима заземления нейтрали необходимо проведение натурных исследований.

**Выводы.** 1. Режим заземления нейтрали в сети среднего класса напряжения имеет определяющее значение в вопросе обеспечения надежности электроснабжения. Для принятия обоснованного решения по вопросу выбора режима заземления нейтрали необходима комплексная оценка сети.

2. При исследовании сети необходимо проведение замеров емкостного тока замыкания на землю. Косвенные методы имеют определенную область применения. Для получения наиболее полной информации необходимо проведение прямого замера. При этом датчики тока и напряжения должны обеспечивать стабильную передаточную характеристику во всем диапазоне измеряемых частот.

3. Обобщение результатов замеров емкостного тока в сетях среднего класса напряжения городского и промышленного назначения показывает содержание гармоник в токе однофазного замыкания на землю свыше 4А. В 52% объектов сети промышленного назначения и 45% объектов городского энергохозяйства имеют место токи гармоник, значительно утяжеляющие процессы горения и погасания дуги.

#### Литература

1. Аношин О.А. Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений в сетях 6-10 кВ // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования: материалы Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ПЭИПК, 2003. Вып. 1. 261 с.
2. Базуткин В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2007. № 1. С. 13-18.
3. Булычев А.В., Ванин В.К. Частотные характеристики трансформаторов напряжения для защиты генераторов // Энергетика. 1987. № 11.
4. Гиндуллин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. М.: Высш. шк., 1991.
6. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Стефановский В.А. О технической выполнимости требований минимизации токов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования: материалы Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ПЭИПК, 2003. Вып. 1. С. 293-303.

<sup>1</sup> Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации РД 34.20.501-95: утв. Приказом Минэнерго России от 19.06.2003 г. Доступ из справ.-прав. системы Гарант.

7. Петров М.И., Кузьмин А.А. Влияние частотно-регулируемой нагрузки на процессы при возникновении однофазного замыкания на землю // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 104–108.

**АЮУРЗАНА ЭРДЭНЭБИЛЭГ** – инженер-исследователь, производственно-технический отдел, Национальная электропередающая сеть Монголии, Монголия, Улан-Батор (ert1969@yahoo.com).

**МАМБЕТЖАНОВ АЗАМАТ ДУЙШЕБАЕВИЧ** – заместитель технического директора по капитальному строительству, ОАО «Северэлектро», Киргизия, Бишкек (escholpon@mail.ru).

**ТАКЫРБАШЕВ БЕЙШЕНАЛЫ КАСЫМАЛИЕВИЧ** – начальник службы релейной защиты и автоматики, ОАО «Северэлектро», Киргизия, Бишкек (escholpon@mail.ru).

**ДЖАМАГИДЗЕ ДЖАБА** – начальник отдела высоковольтной сети службы распределительной сети, АО «Теласи», Грузия, Тбилиси (jaba.jamagidze@telasi.ge).

**ПЕТРОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Чувашский государственный университет; директор, ООО «НИР Энерго», Россия, Чебоксары (g374mi@yandex.ru).

**КУЗЬМИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ** – ассистент кафедры безопасности труда, Новосибирский государственный технический университет; начальник отдела перспективных разработок, ООО «Болид», Россия, Новосибирск (kuzmin\_a\_a@211.ru).

**E. AYURZANA, A. MAMBETZHANOV, B. TAKYRBASHEV,  
J. DZHAMAGIDZE, M. PETROV, A. KUZMIN  
ASSESSMENT OF CURRENT COMPONENTS OF SINGLE-PHASE  
EARTHINGS DURING FIELD EXPERIMENTS  
IN MEDIUM-VOLTAGE FOR VARIOUS PURPOSES**

**Key words:** neutral wire earthing, the current compensation systems of a single-phase ground fault, harmonic current of SPE, detuning compensation.

The article summerizes the experience of experimental research in the medium-voltage networks. Several basic methods are used currently to measure the amount of current of single-phase earth faults. In the regulations there is no clear requirement to apply measurement equipment used for this purpose. The paper presents an evaluation of the methods, as well as the equipment used for this purpose. It also provides measurement readings performed in a reliable way for networks of various purposes of urban electric substations, petrochemical plants, mining plants, generation companies and other industries. The article gives recommendations to choose means of neutral grounding.

References

1. Anoshin O.A. *Povyshenie nadezhnosti ekspluatatsii ogranichitelei perenapryazhenii v setyakh 6-10 kV* [Increasing the reliability of surge arresters for networks 6-10 kV]. *Perenapryazheniya i nadezhnost' ekspluatatsii elektrooborudovaniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Overvoltage and reliability of exploitation is Electrical»]. St. Petersburg, 2003, iss. 1, 261 p.
2. Bazutkin V.V. *K probleme kompensatsii emkostnykh tokov v setyakh 6-10-35 kV* [On the problem of compensation of capacitive currents in networks 10/06/35 kV]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2007, no. 1, pp. 13–18.
3. Bulychev A.V., Vanin V.K. *Chastotnye kharakteristiki transformatorov napryazheniya dlya zashchity generatorov* [The frequency characteristics of voltage transformers for the protection of generators]. *Energetika*, 1987, no. 11.
4. Gindullin F.A., Gol'dshtein V.G., Dul'zon A.A., Khalilov F.Kh. *Perenapryazheniya v setyakh 6-35 kV* [Overvoltage in networks 6-35 kV]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989.

5. Kelim Yu.M. *Elektromekhanicheskie i magnitnye elementy sistem avtomatiki* [Electromagnetic elements and automation systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991.

6. Kuchumov L.A., Kuznetsov A.A., Stefanovskii V.A. *O tekhnicheskoi vypolnimosti trebovaniy minimizatsii tokov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-35 kV s izolirovannoi ili kompensirovannoi neutral'yu* [On the technical feasibility requirements, minimizing the currents in single-phase earth faults in electric networks of 6-35 kV with isolated or compensated neutral]. *Perenapryazheniya i nadezhnost' ekspluatatsii elektrooborudovaniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Overvoltage and reliability of exploitation is Electrical»]. St. Petersburg, 2003, iss. 1, pp. 293–303.

7. Petrov M.I., Kuz'min A.A. *Vliyanie chastotno-reguliruemoi nagruzki na protsessy pri vozniknovenii odnofaznogo zamykaniya na zemlyu* [Features of ozone generators with high-resistance electrodes]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 104–108.

---

**AYUURZANA ERDENEBILEG** – Engineering Research, Production and Technical Department, National Electricity Transmission Network of Mongolia, Mongolia, Ulaanbaatar (ert1969@yahoo.com).

**MAMBETZHANOV AZAMAT** – Deputy Technical Director of the capital construction, JSC «Severelectro», Kyrgyzstan, Bishkek (escholpon@mail.ru).

**TAKYRBASHEV BEISHENALY** – Chief of the Relay Protection and Automation, JSC «Severelectro», Kyrgyzstan, Bishkek (escholpon@mail.ru).

**DZHAMAGIDZE JABA** – Head of the High-Voltage Network Service Distribution Networks, JSC «Telasi», Georgia, Tbilisi (jaba.jamagidze@telasi.ge).

**PETROV MIKHAIL** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University; Director, «NIR-Energy», Russia, Cheboksary (g374mi@yandex.ru).

**KUZMIN ALEXEY** – Post-Graduate Student of the Technology and Electrophysics High Voltages Department, Novosibirsk State Technical University, Leading Researcher of «Bolid» LTd, Russia, Novosibirsk (kuzmin\_a\_a@211.ru).

---

**Ссылка на статью:** Аюурзана Э., Мамбетжанов А.Д., Такырбашев Б.К., Джамагидзе Д., Петров М.И., Кузьмин А.А. Оценка составляющих тока однофазного замыкания на землю при проведении натуральных экспериментов в сетях среднего класса напряжения различного назначения // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 21–29.

УДК 621.3.027.3:621.315.56

ББК 324:Л252

И. А. ГУЩИН

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСТЕКАНИЯ ТОКА МОЛНИИ  
ПО ПРОВОДЯЩЕМУ КОМПОЗИЦИОННОМУ МАТЕРИАЛУ**

*Ключевые слова:* ток молнии, проводящий композиционный материал, сплошная анизотропно-проводящая среда, разрушение композита, интеграл действия, молниезащита.

*Рассмотрена аналитическая модель растекания тока в анизотропно-проводящей среде. Найдено точное аналитическое решение уравнения Лапласа методом Гринберга. На основе модели разрушения углепластика проведены расчеты радиуса и глубины разрушения этого проводящего композиционного материала (ПКМ) током молнии. Приведен критерий разрушения углепластика.*

*Целью работы являются проведение теоретических исследований воздействия молнии на ПКМ и разработка модели разрушения углепластика на основе многочисленных экспериментальных данных. В задачи исследования входят проведение анализа последствий разрушения молнией изделий из ПКМ, создание аналитической модели процесса разрушения углепластика и разработка методов прогнозирования возможных последствий, принципов и критериев создания перспективных средств молниезащиты. Рассмотрена практическая значимость работы в создании и дальнейшем развитии современных средств молниезащиты ПКМ.*

Наиболее эффективным способом повышения тактико-технических характеристик летательных аппаратов является снижение их массы. По этой причине происходит интенсивная замена металлических материалов на более легкие и достаточно прочные проводящие композиционные материалы (ПКМ). Объем используемых в современных конструкциях летательных аппаратов таких материалов составляет 20% и по прогнозам в ближайшие 10 лет будет увеличен до 60%. Однако по мере внедрения композиционных материалов в авиацию воздушные суда становятся более подвержены воздействию молнии и получают более значительные повреждения, чем цельнометаллические конструкции. Это вызывает снижение безопасности полетов. Поэтому появляется насущная необходимость существенного повышения молниестойкости элементов конструкции из ПКМ.

При использовании ПКМ в случае воздействия молнии появляется ряд особенностей, которые не свойственны металлическим конструкциям [1, 6]. К ним относятся: электрические пробой ПКМ, газовыделение и появление высоких внутренних давлений, ударные волны, иное воздействие электромагнитного излучения на бортовые цепи оборудования. Это приводит к более частым выходам из строя электронного и электротехнического оборудования, отказам двигателя и значительному повреждению элементов конструкции.

Механизмы разрушения ПКМ существенно различаются для проводящих и диэлектрических материалов, неодинаковы и методы исследования их свойств и способов повышения молниестойкости [2–5]. В настоящее время ощущается недостаток в теоретическом анализе процесса разрушения композиционных материалов при воздействии молнии и в прогнозировании резуль-

татов воздействия. Литературные данные о параметрах, от которых зависит процесс разрушения проводящих композиционных материалов, противоречивы и не пригодны для оценки их молниестойкости. Это усложняет выбор способов повышения молниестойкости изделий, в которых применены такие материалы. Поэтому исследование воздействия молнии на проводящие композиционные материалы, процессов их разрушения и разработка методов повышения молниестойкости изделий, в которых используются такие материалы, является актуальным.

Целью настоящей работы является проведение теоретического анализа процесса разрушения проводящих композитов (ПК). В основу аналитической модели разрушения углепластика положено предположение о том, что при протекании больших импульсных токов происходят быстрый нагрев углепластика, деструкция связующего и повышение внутреннего давления. Это давление ведет к расслоению материала и последующему разрушению углеродного наполнителя.

Поскольку электропроводящие свойства углепластиков обладают анизотропией, следует провести анализ ее влияния на растекания тока в радиальном и поперечном направлениях от канала разряда.

Анализ проведен аналитическим методом, который предполагает, что среда сплошная и обладает анизотропией проводящих свойств. Для расчета растекания тока в модели сплошной среды рассмотрена конечная по протяженности пластина из углепластика, в которую втекает ток. Рассмотрен случай равномерного распределения в пределах окружности плотности тока и неучета влияния скин-эффекта (при характерных частотах тока молнии и толщинах углепластика скин-эффектом можно пренебречь). Растекающийся по пластине ток представлен в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от координат, а другая от времени  $I = f(r, z) \cdot f(t)$ .

Для этой модели справедливы уравнения сплошной среды. Связь между плотностью тока и напряженностью поля в анизотропно-проводящих средах дается симметричным тензором второго ранга. Тогда уравнение Лапласа имеет граничные условия Неймана, вытекающие из непрерывности нормальной составляющей напряженности поля на границе раздела и непрерывности тока (равенства втекающего и вытекающего токов):

$$\begin{aligned} \varphi_{rr} + \frac{\varphi_r}{r} + \varphi_{zz} \frac{\rho_r}{\rho_z} &= 0 \\ \varphi_r &= 0, \quad r = 0, \quad 0 \leq Z \leq H; \\ \varphi_r &= F(z), \quad r = R, \quad 0 \leq Z \leq H; \\ \varphi_z &= 0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad z = H; \\ \varphi_z &= f(r), \quad 0 \leq r \leq r_{\text{кан}}, \quad z = 0; \\ \varphi_z &= 0, \quad r_{\text{кан}} \leq r \leq R, \quad z = 0; \\ \frac{1}{\rho_z} \int_0^R 2\pi r (\varphi_z)_{z=0} dr &= \frac{1}{\rho_r} \int_0^R 2\pi r (\varphi_r)_{r=0} dz. \end{aligned}$$

При указанных условиях было найдено точное аналитическое решение уравнения Лапласа методом Гринберга. Это решение включает в себя функции Бесселя и имеет следующий вид:

$$\varphi = \frac{2j_m r_{\text{кан}}}{R} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\rho_z J_0(\xi_k \cdot r/R) \cdot J_1(\xi_k \cdot r_{\text{кан}}/R) \cdot \text{ch } g_k \cdot (H-z)}{J_0^2(\xi_k) \cdot \xi_k \cdot g_k \cdot \text{sh } g_k \cdot H} - \Delta, \quad (1)$$

где  $\Delta = I_m \rho_r \frac{(r/R)^2 - 1/2}{4\pi H}$ ;  $\xi_k$  – корни уравнения  $J_1(\xi) = 0$ ;  $g_k = \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_r}} \cdot \xi_k / R$ ;  $r_{\text{кан}}$  – радиус канала;  $H, R$  – толщина и радиус пластины, соответственно.

Плотности токов  $j_r$  и  $j_z$  находятся из уравнений  $j_r = -\varphi_r / \rho_r$  и  $j_z = -\varphi_z / \rho_z$ .

Эти решения легко распространить на случай бесконечно протяженной пластины при  $R \rightarrow \infty$  и  $J_0^2(\xi R) \rightarrow \frac{2}{\pi} \xi R$ .

Аналогичным образом при тех же допущениях может быть решена задача при расположении электродов, подводящих ток, с двух сторон пластины соосно. В этом случае граничные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} (\varphi_z)_{z=0} &= (\varphi_z)_{z=H} = f(r), \quad 0 \leq r \leq r_{\text{кан}}; \\ (\varphi_z)_{z=0} &= (\varphi_z)_{z=H} = 0, \quad r_{\text{кан}} < r \leq R; \\ (\varphi_r)_{r=0} &= (\varphi_r)_{r=R} = 0. \end{aligned}$$

Решение при этих условиях отличается от предыдущего симметрией относительно плоскости  $z = H/2$  и принимает вид:

$$\varphi = \frac{2j_m r_{\text{кан}}}{R} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\rho_z J_0(\xi_k \cdot r/R) \cdot J_1(\xi_k \cdot r_{\text{кан}}/R) \cdot \text{sh } g_k \cdot (H/2-z)}{J_0^2(\xi_k) \cdot \xi_k \cdot g_k \cdot \text{ch } g_k \cdot (H/2)} - \Delta, \quad (2)$$

Величиной, определяемой экспериментально, может служить сопротивление проходящему току. Оно находится из выражений (1) и (2):

$$R_{\text{прод}} = \frac{\varphi(r_{\text{кан}}, 0) - \varphi(R, 0)}{I_m} \quad \text{и} \quad R_{\text{попер}} = \frac{\varphi(r_{\text{кан}}, 0) - \varphi(r_{\text{кан}}, H)}{I_m}.$$

На основе расчетов распределений плотностей токов сделан вывод о характере растекания тока в углепластике с анизотропией проводимости. Следует отметить, что при большом отношении  $\rho_z / \rho_r$  ток в основном будет протекать в узком поверхностном слое, а результирующая плотность тока в окрестности радиуса канала будет определяться радиальной составляющей плотности тока  $j_r$ . На рис. 1 показаны зависимости плотности тока  $j_r / j_m$  от параметра  $r/R$  при различных отношениях  $z/H$  ( $H/R = 0,01$ ). Данные наглядно свидетельствуют, что вблизи радиуса канала наблюдаются максимальные плотности токов. С увеличением  $r/R$  и  $z/H$  распределение радиальной составляющей плотности тока выравнивается.

На рис. 2 приведены зависимости  $j_z / j_m$  от параметра  $r/R$  при тех же значениях  $z/H$ . Из сравнения рис. 1 и 2 вытекает, что при расчете результирующей плотности тока можно пренебречь поперечной составляющей  $j_z$ . Плотность тока  $j_z$  быстро убывает с увеличением толщины композита, что приводит к сильно неравномерному распределению тока по материалу вблизи канала разряда.

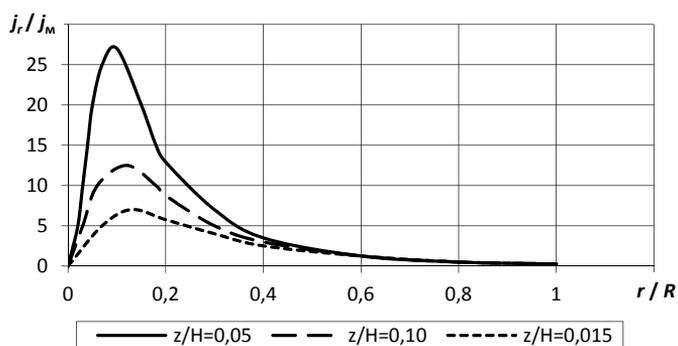


Рис. 1. Распределение  $j_r / j_m$  по радиусу  $r / R$  при различных отношениях  $z / H$

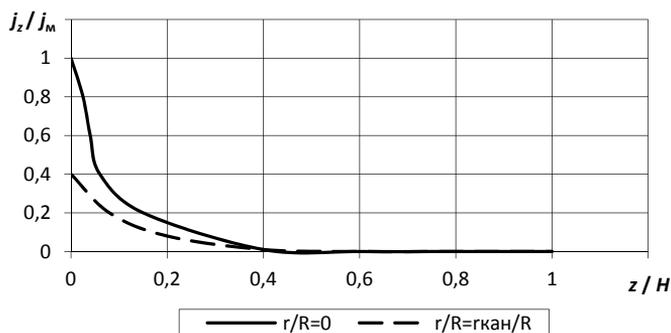


Рис. 2. Распределение  $j_z / j_m$  по толщине  $z / H$  при различных  $r / R$  ( $r_{кан} / R = 0,1$ )

На основе расчета плотностей тока в сплошной анизотропно-проводящей среде толщиной  $H$  можно проводить оценочные расчеты радиуса и глубины разрушения материала. Критерием разрушения является удельная введенная энергия за единицу времени, для которой справедливо выражение:

$$W_{уд} = (j_r^2 \rho_z + j_z^2 \rho_r) \frac{A}{2I_M^2},$$

где  $A$  – интеграл действия тока молнии;  $I_M$  – максимальное значение тока в импульсе.

Из него следует, что значения плотностей токов, приводящих к выделению заданной удельной энергии  $W_{уд}$  лежат на эллипсе. Глубину и радиус разрушения композита оценим, построив изоэнергетические кривые в координатах  $(r, z)$  при заданных значениях радиуса канала молнии  $r_{кан}$ ,  $A$ ,  $\rho_z / \rho_r$ .

На рис. 3 показаны результаты расчета изоэнергетических кривых для углепластика при  $r_{кан} = 1$  см,  $A = 0,6 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>с и двух значениях  $\rho_z / \rho_r$ . При  $\rho_z / \rho_r = 10^3$  радиус и глубина разрушения будут, соответственно,  $r_p = 2,5 r_{кан}$  и  $z_p = H / 3$ , а при  $\rho_z / \rho_r = 10^4$   $r_p = 3 r_{кан}$  и  $z_p = H / 4$ . Отсюда следует, что неравномерность растекания тока вследствие сильной анизотропии приводит к большим разрушениям наружных слоев.

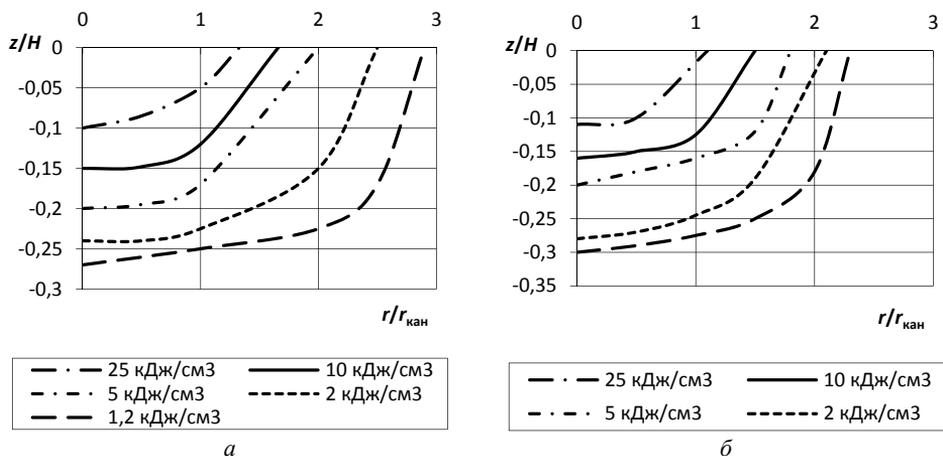


Рис. 3. Изоэнергетические кривые при  $A = 0,6 \cdot 10^6 \text{A}^2 \text{с}$  и  $\rho_z/\rho_r = 10^4$  (а) и  $\rho_z/\rho_r = 10^3$  (б)

Таким образом, модель сплошной среды позволяет анализировать процессы растекания тока и распределения энергии в сплошной анизотропно-проводящей среде и прогнозировать степень разрушения. Построение изоэнергетических кривых позволяет найти условие начала разрушения. При рассмотрении более поздних стадий разрушения необходимо учитывать изменение состояния самого материала – распределения растекания тока в процессе разрушения.

#### Литература

1. Авруцкий В.А., Бизяев А.С., Гуцин И.А., Прохоров Е.Н., Сергиевская И.М. Разрушение изделий из углепластика под действием токов молнии // *Электричество*. 1993. № 2.
2. Avrootskii V., Bizyaev A., Guschin I., Prokhorov E., Sergievskaya I., Sobolevskaya E. Lightning Protection of carbon fiber composites. Proc. of 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Lightning Protection, Berlin, Sept. 21-25, 1992, pp. 271–273.
3. Gardiner G. Lightning Strike Protection For Composite Structures. *Composites World*, 2006, July 1.
4. Korsgaard J. Improved lightning protection system enhances the reliability of multi-MW blades. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.613.848&rep=rep1&type=pdf>.
5. Krogh T., Bertelsen K., Madsen S. Infrared detection of thermal heat development of isotropic and anisotropic materials during impulse current testing. Proc. of 30<sup>th</sup> Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, Sept. 12–16, 2010.
6. Madsen S.F. Proposal of New Zoning Concept Considering Lightning Protection of Wind Turbine Blades. *Journal of Lightning Research*, 2012, no. 4, pp. 108–117.

---

**ГУЦИН ИГОРЬ АРДАЛЬЕНОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elpardon@gmail.com).

---

**I. GUSHCHIN**  
**ANALYTICAL MODEL OF SPREADING**  
**OF LIGHTNING CURRENT VIA**  
**CONDUCTING COMPOSITE MATERIAL**

**Key words:** lightning current, conductive composite material, continuous anisotropic carrying-out environment, composite destruction, action integral, lightning protection.

An analytical model of current spreading in an anisotropic-conductive medium is considered. An exact analytical solution of the Laplace equation by Greenberg method is found. The criterion of carbon plastic destruction is given. Calculations of radius and depth of destruction of the carrying-out material by lightning current are carried out on the basis of model of carbon plastics destructions.

The aim of the work is to carry out theoretical study of lightning influence on the conducting composite materials and to develop the model of carbon plastics destruction on the basis of numerous experimental data. The objective of the paper is to analyse the consequences of carbon plastics destruction by lightning, to create an analytical model of carbon plastics destruction process and to develop methods to forecast possible outcomes, principles and criteria to form promising ways of lightning protection. The work has practical value to create modern means to protect conducting composite material from lightning.

References

1. Avruckii V.A., Bizjaev A.S., Gushhin I.A., Prohorov E.N., Sergievskaya I.M. *Razrushenie izdelij iz ugleplastika pod dejstviem tokov molnii* [Destruction of products from carbon fiber by the action of lightning currents]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1993, no. 2.
2. Avrootskii V., Bizyaev A., Guschin I., Prokhorov E., Sergievskaya I., Sobolevskaya E. Lightning Protection of carbon fiber composites. Proc. of 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Lightning Protection, Berlin, Sept. 21-25, 1992, pp. 271–273.
3. Gardiner G. Lightning Strike Protection for Composite Structures. *Composites World*, 2006, July 1.
4. Korsgaard J. Improved lightning protection system enhances the reliability of multi-MW blades. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.613.848&rep=rep1&type=pdf>.
5. Krogh T., Bertelsen K., Madsen S. Infrared detection of thermal heat development of isotropic and anisotropic materials during impulse current testing. Proc. of 30<sup>th</sup> Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, Sept. 12–16, 2010.
6. Madsen S.F. Proposal of New Zoning Concept Considering Lightning Protection of Wind Turbine Blades. *Journal of Lightning Research*, 2012, no. 4, pp. 108–117.

---

**GUSHCHIN IGOR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** Гушчин И.А. Аналитическая модель растекания тока молнии по проводящему композиционному материалу // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 30–35.

УДК 537.311.5:621.365.3

ББК 31.292

А.Н. ИЛЬГАЧЁВ

## АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВАННЫ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ПЕЧЕЙ

*Ключевые слова:* метод эквивалентных источников, метод отражений, расчетный режим короткого замыкания ванны, составной источник тока.

*Обсуждается аналитико-численный метод решения уравнения Лапласа, описывающего при определенных допущениях электрическое поле ванны шлаковых и многошлаковых многоэлектродных руднотермических печей. Его основу составляет совокупность известных методов: эквивалентных источников тока, отражений, разделения переменных и других методов. Функция, определяющая потенциал электрического поля ванны в расчетном режиме короткого замыкания для одного из электродов, находится как сумма трёх гармонических функций: функции распределения потенциала электрического поля бесконечной в радиальном направлении ванны; функции, учитывающей влияние боковой стенки на электрическое поле ванны с однородной средой; функции, учитывающей неоднородность проводимости среды. Приведена блок-схема алгоритма расчета характеристик электрического поля ванны печи с использованием аналитико-численного метода.*

При исследовании электрических процессов в ванне многоэлектродных руднотермических печей (РТП) на микроуровне все большее распространение получает использование математических моделей, которые различаются по форме представления. Аналитическая модель предполагает использование явных зависимостей искомым переменных от заданных величин (обычно зависимости фазовых координат объекта от внутренних и внешних параметров). Такие модели строятся на основе физических законов либо в результате прямого интегрирования исходных дифференциальных уравнений с помощью табличных интегралов. К ним относятся также регрессионные модели, получаемые на основе результатов эксперимента. В алгоритмической форме соотношения физических величин модели связаны между собой посредством выбранного численного метода решения и записаны в виде алгоритма – последовательности действий вычислительного характера. Ряд моделей сочетает в себе аналитическую и алгоритмическую формы представления, совмещая их достоинства.

Показательным примером последних являются математические модели для исследования электрического поля ванн многоэлектродных печей резистивного и смешанного нагрева, построенные на основе аналитико-численного метода.

Аналитико-численный метод расчета электрического поля в ванне многоэлектродной печи является дальнейшим развитием аналитического метода расчета характеристик и входных сопротивлений электрического поля ванны электродных многошлаковых и шлаковых печей, разработанного на кафедре АЭТУС Чувашского госуниверситета под руководством и при непосредственном участии профессора Ю.М. Миронова в начале 70-х гг. XX в. [4] и

успешно развивающегося в настоящее время. Его основу составляет совокупность известных методов: эквивалентных источников тока, изображений, разделения переменных и др.

Рассмотрим подробнее особенности реализации аналитико-численного метода для исследования электрического поля ванны многоэлектродной печи с электродами кругового сечения в расчетном режиме ее короткого замыкания, когда питание осуществляется со стороны одного из электродов и подового, а остальные соединены с подовым [2], описываемом уравнением

$$\nabla^2 \Phi_{к.з.}^{(i)} = 0$$

и граничными условиями:

- потенциалы электродов  $\Phi_{эi к.з.}^{(i)} = 1$ ,  $\Phi_{эk к.з.}^{(i)} = 0, k \neq i$ ;
- поверхность расплава с высокой проводимостью (плоскость  $z = l$ ) эквипотенциальна с потенциалом  $\Phi_{пк.з.}^{(i)} = 0$ ;
- на верхней границе слоя ванны с незначительной проводимостью (плоскость  $z = 0$ )  $\frac{\partial \Phi_{к.з.}^{(i)}}{\partial n} = 0$ ;
- на боковых ограничивающих ванну поверхностях в зависимости от материала стенки задаются граничные условия I или II рода либо существенно смешанные условия;
- на границе раздела проводящих сред задаются граничные условия IV рода.

Безразмерная вещественная функция  $\Phi_{к.з.}^{(i)}$  характеризует распределение потенциала электрического поля в ванне для расчетного режима, когда на неё подаётся единичное напряжение со стороны  $i$ -го и подового электродов, а остальные электроды присоединены к подовому электроду.

Для облегчения получения решения задачи производится отражение ванны и электродной системы относительно верхней границы слабо проводящего слоя. При этом электрическое поле и электроды становятся симметричными (рис. 1). Токи, вытекающие из электродов, увеличиваются вдвое. Таким образом, задача сводится к определению электрического поля, созданного совокупностью  $m$  электродов в кусочно-однородной среде между двумя параллельными проводящими плоскостями, которая ограничена в радиальном направлении.

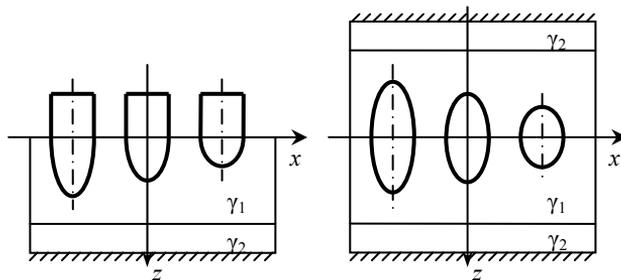


Рис 1. Отражение системы «электрод – ванна» относительно плоскости  $z = 0$

Функция  $\varphi_{\text{к.з.}}^{(i)}$  представляется как сумма трёх гармонических функций

$$\varphi_{\text{к.з.}}^{(i)} = V_{\text{к.з.}}^{(i)} + U_{\text{к.з. ст.}}^{(i)} + U_{\text{к.з. н.к.}}^{(i)} = W_{\text{к.з.}}^{(i)} + U_{\text{к.з. н.к.}}^{(i)}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{к.з.}}^{(i)}$  – функция распределения потенциала электрического поля бесконечной в радиальном направлении ванны в расчетном режиме короткого замыкания для  $i$ -го электрода;  $U_{\text{к.з. ст.}}^{(i)}$  – функция, учитывающая влияние на электрическое поле ванны с однородной средой боковой стенки;  $U_{\text{к.з. н.к.}}^{(i)}$  – функция, учитывающая неоднородность проводимости среды в зоне с проводимостью  $\gamma_k$ . При этом каждой зоне с постоянной удельной проводимостью  $\gamma_k$  соответствует своя функция  $U_{\text{к.з. н.к.}}^{(i)}$ .

Для нахождения функции  $V_{\text{к.з.}}^{(i)}$  используются методы эквивалентного источника тока, зеркальных изображений (отражений) [3, 4]. В соответствии с методом эквивалентного источника тока действие токов, стекающих с рабочих поверхностей электродов, заменяется действием системы источников тока, подобранных таким образом, чтобы в электрическом поле, созданном этими источниками, имелись эквипотенциальные поверхности, имеющие такие же размеры, форму и расположение, как и рабочие поверхности электродов. Нахождение вида, расположения и распределения токов эквивалентных источников в общем случае является достаточно сложной задачей и обычно осуществляется подбором.

Для электродов круглого сечения в зависимости от формы рабочей поверхности и соотношения геометрических параметров электрода в аналитическом методе хорошие результаты показали источники тока в виде отрезка длиной  $2f$  с линейной плотностью тока  $\tau = \frac{I}{f}$ , диска радиуса  $a$  с поверхностной

плотностью тока  $\sigma = \frac{I}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}}$  [4], а также их комбинации [5]. Для обеспе-

чения универсальности метода применительно к различным формам рабочей поверхности электродов круглого сечения в аналитико-численном методе используется составной источник тока, состоящий из  $N_f$  источников в виде отрезков, имеющих кратные размеры и расположенных вдоль оси  $z$ , и  $N_a$  пар, расположенных на одной оси, параллельно и симметрично относительно плоскости  $z = 0$ , источников в виде дисков с кратными радиусами. Размеры источников в виде отрезков  $f_k = f \cdot k / N_f$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_f$ ; а максимальные размеры источников в виде дисков, расположенных на концах источников в виде отрезков, определяются так, чтобы поверхность, обтягивающая их, была подобна эквипотенциальной поверхности, соответствующей рабочей поверхности электрода. В частности, если эквипотенциальная поверхность имеет форму эллипсоида вращения, то

$$a_{kj} = \frac{r_k f}{h_j N_f} \sqrt{1 - \frac{1}{j^2}}, j = 1, 2, \dots, N_a, k = 1, 2, \dots, N_f - 1.$$

Потенциал электрического поля составного источника тока

$$V(r, z) = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k} V_o(r, z, f_k) + \sum_{k=1}^{N_f-1} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}} \left[ V_d(r, z - f_k, a_{kj}) + V_d(r, z + f_k, a_{kj}) \right],$$

где  $K_{f_k}$ ,  $K_{a_{kj}}$  – соответственно, значения токов источника в виде отрезка размером  $2f_k$  и источника в виде диска радиусом  $a_{kj}$ , входящего в пару.

На рис. 2 приведены составной источник для  $N_f = 2$ ,  $N_a = 2$  и эквипотенциальная поверхность, имеющая форму эллипсоида вращения.

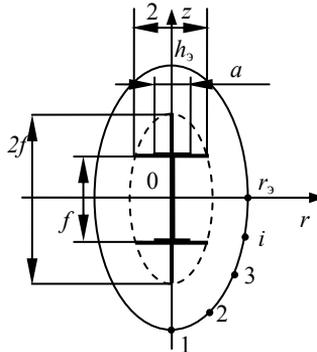


Рис. 2. Составной источник тока

Замена действия токов, стекающих с рабочих поверхностей электродов, действием эквивалентных источников тока существенно облегчает получение решения исходной задачи, так как с учётом поля источников, находящихся в кусочно-однородной среде, упрощается выполнение оставшихся граничных условий на поверхностях, имеющих цилиндрические и плоские формы. Это обстоятельство, а также линейность уравнения Лапласа позволяет успешно применять метод зеркальных изображений, разделения переменных и другие известные методы теории потенциала.

Учет влияния проводящих поверхностей  $z = l$  и  $z = -l$  производится путем многократных построений зеркальных изображений источников тока относительно них [6] (рис. 3).

Для этого последовательно отражаются исходный источник и полученные источники-отражения относительно указанных плоскостей. Точное решение задачи представляется в виде бесконечного ряда:

– для источника в виде отрезка длиной  $2f$

$$V(r, z, f) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[ V_o(r, z + 4nl, f) - V_o(r, z + (4n+2)l, f) \right];$$

– для источника в виде пары дисков радиуса  $a$ , расположенных от плоскости  $z = 0$  на расстоянии  $f$ :

$$V(r, z, f, a) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[ V_d(r, z + f + 4nl, a) - V_d(r, z + f + (4n+2)l, a) + V_d(r, z - f + 4nl, a) - V_d(r, z - f + (4n+2)l, a) \right].$$

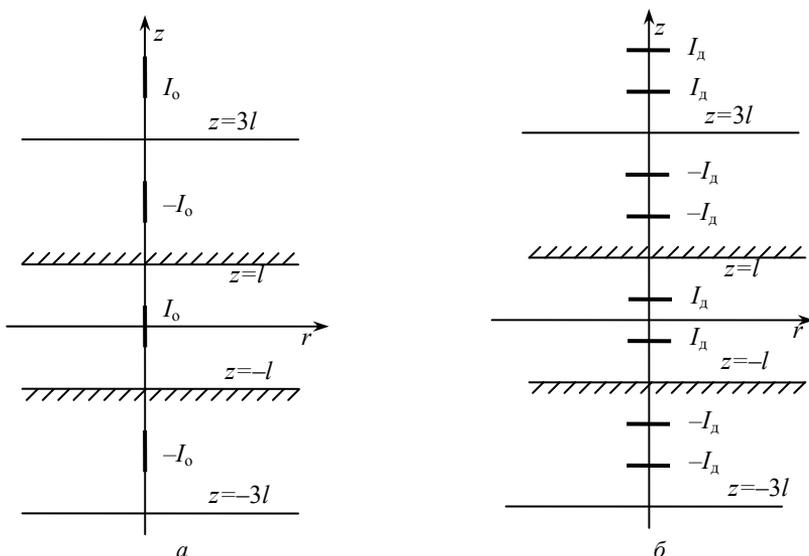


Рис. 3. Зеркальные изображения источников тока в виде отрезка (а) и пары дисков (б) относительно проводящих поверхностей  $z = \pm l$

Присутствие проводящих плоскостей  $z = l$  и  $z = -l$  искажает формы эквипотенциальных поверхностей в электрическом поле, что приводит к изменению связи между размерами поверхности и параметрами источника тока. Общее количество искоемых величин составного источника равно  $N_f + 1 + (N_f - 1)N_a$ , из которых потенциалы для  $N_f + (N_f - 1)N_a$  источников в выражении для потенциала электрического поля системы источников тока зависят линейно. Параметры элементов составного источника определяются решением системы уравнений, составленных для точек, равномерно расположенных на поверхности, принятой за рабочую поверхность электрода:

$$V(r_i, z_i) = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k} V_0(r_i, z_i, f_k) + \sum_{k=2}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}} [V_d(r_i, z_i - f_k, a_{kj}) + V_d(r_i, z_i + f_k, a_{kj})] = 1, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_f - 1 + (N_f - 1)N_a,$$

где  $V_0(r, z, f_k)$  – потенциал электрического поля источника в виде отрезка длиной  $2f_k$ ;  $V_d(r, z - f_k, a_{kj}) + V_d(r, z + f_k, a_{kj})$  – потенциал электрического поля пары дисков радиуса  $a_{kj}$ , расположенных симметрично относительно плоскости  $z = 0$  на расстоянии  $f_k$  от нее.

При этом расчёт электрического поля ванны для электродов различной формы и размеров производится по одним и тем же формулам, меняются лишь параметры (размеры элементов источника и значения их токов) источников тока. Этим достигаются универсальность и гибкость метода.

Ток составного источника равен сумме токов отдельных его элементов и численно соответствует проводимости ванны одиночного электрода:

$$I_0 = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k} + \sum_{k=2}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}} = g_b.$$

Учёт влияния электродов друг на друга производится методом изображений. Для этого многократно решается вспомогательная задача определения источника-изображения, который нужно поместить внутри эквипотенциальной поверхности, соответствующей рабочей поверхности электрода, чтобы скомпенсировать возмущающее воздействие электрического поля внешнего источника тока на этой поверхности. Исследования показывают, что для электродов круглого сечения удовлетворительная компенсация достигается, если источник-изображение представляется в том же виде, как и внешний. Определение его геометрических параметров и токов элементов осуществляется решением система уравнений, составленных для совокупности  $N_f + 3 + (N_f - 1)N_a$  точек, расположенных неравномерно на эквипотенциальной поверхности, соответствующей рабочей поверхности электрода. Например, для  $N_f = 2$ ,  $N_a = 2$  расположение точек на эквипотенциальной поверхности, имеющей форму эллипсоида вращения, показано на рис. 4, а система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_o(r_3 - \alpha, 0, f_k^{(x)}) + \sum_{k=1}^{N_f-1} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}}^{(x)} \left[ V_{\pi}(r_3 - \alpha, 0, -f_k, a_{kj}^{(x)}) + V_{\pi}(r_3 - \alpha, 0, f_k, a_{kj}^{(x)}) \right] = \\
 & = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_o(S - r_3, 0, f_j^{(0)}) + \sum_{k=1}^{N_f-1} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}}^{(0)} \left[ V_{\pi}(S - r_3, 0, -f_k, a_{kj}^{(0)}) + V_{\pi}(S - r_3, 0, f_k, a_{kj}^{(0)}) \right], \\
 & \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_o(\alpha, h_3, f_j^{(x)}) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(x)} \left[ V_{\pi}(\alpha, h_3, -f_j, a_{jk}^{(x)}) + V_{\pi}(\alpha, h_3, f_j, a_{jk}^{(x)}) \right] = \\
 & = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_o(S, h_3, f_j^{(0)}) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(0)} \left[ V_{\pi}(S, h_3, -f_j, a_{jk}^{(0)}) + V_{\pi}(S, h_3, f_j, a_{jk}^{(0)}) \right], \quad (3) \\
 & \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_o(\sqrt{r_3^2 + \alpha^2}, 0, f_j^{(x)}) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(x)} \left[ V_{\pi}(\sqrt{r_3^2 + \alpha^2}, 0, -f_j, a_{jk}^{(x)}) + \right. \\
 & \left. + V_{\pi}(\sqrt{r_3^2 + \alpha^2}, 0, f_j, a_{jk}^{(x)}) \right] = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_o(\sqrt{r_3^2 + S^2}, 0, f_j^{(0)}) + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(0)} \left[ V_{\pi}(\sqrt{r_3^2 + S^2}, 0, -f_j, a_{jk}^{(0)}) + V_{\pi}(\sqrt{r_3^2 + S^2}, 0, f_j, a_{jk}^{(0)}) \right], \\
 & \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_o(r_3 + \alpha, 0, f_j^{(x)}) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(x)} \left[ V_{\pi}(r_3 + \alpha, 0, -f_j, a_{jk}^{(x)}) + V_{\pi}(r_3 + \alpha, 0, f_j, a_{jk}^{(x)}) \right] = \\
 & = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_o(S + r_3, 0, f_j^{(0)}) + \sum_{k=1}^{N_f-1} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}}^{(0)} \left[ V_{\pi}(S + r_3, 0, -f_k, a_{kj}^{(0)}) + V_{\pi}(S + r_3, 0, f_k, a_{kj}^{(0)}) \right], \\
 & \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_o\left(\frac{r_3 - \alpha}{2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_k^{(x)}\right) + \sum_{k=1}^{N_f-1} \sum_{j=1}^{N_a} K_{a_{kj}}^{(x)} \left[ V_{\pi}\left(\frac{r_3}{2} - \alpha, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, -f_k, a_{kj}^{(x)}\right) + \right. \\
 & \left. + V_{\pi}\left(\frac{r_3}{2} - \alpha, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_k, a_{kj}^{(x)}\right) \right] = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_o\left(S - \frac{r_3}{2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_j^{(0)}\right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(0)} \left[ V_{\pi} \left( S - \frac{r_3}{2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, -f_j, a_{jk}^{(0)} \right) + V_{\pi} \left( S - \frac{r_3}{2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_j, a_{jk}^{(0)} \right) \right], \\
& \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_0 \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + \alpha^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_j^{(x)} \right) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(x)} \left[ V_{\pi} \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + \alpha^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, -f_j, a_{jk}^{(x)} \right) + \right. \\
& \left. + V_{\pi} \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + \alpha^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_j, a_{jk}^{(x)} \right) \right] = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_0 \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + S^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, f_j^{(0)} \right) + \\
& + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(0)} \left[ V_{\pi} \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + S^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, -f_j, a_{jk}^{(0)} \right) + V_{\pi} \left( \sqrt{\left( \frac{r_3}{2} \right)^2 + S^2}, \frac{h_3 \sqrt{3}}{2}, +f_j, a_{jk}^{(0)} \right) \right], \\
& \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(x)} V_0 \left( 0, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, f_j^{(x)} \right) + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(x)} \left[ V_{\pi} \left( 0, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, -f_j, a_{jk}^{(x)} \right) + \right. \\
& \left. + V_{\pi} \left( 0, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, f_j, a_{jk}^{(x)} \right) \right] = \sum_{k=1}^{N_f} K_{f_k}^{(0)} V_0 \left( S - \alpha, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, f_j^{(0)} \right) + \\
& + \sum_{j=1}^{N_f-1} \sum_{k=1}^{N_a} K_{a_{jk}}^{(0)} \left[ V_{\pi} \left( S - \alpha, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, -f_j, a_{jk}^{(0)} \right) + V_{\pi} \left( S - \alpha, h_3 \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{r_3} \right)^2}, f_j, a_{jk}^{(0)} \right) \right].
\end{aligned}$$

Нелинейная система уравнений (3) решается методом Ньютона – Рафсона [1] и за 4-6 итераций обеспечивается получение решения с относительной точностью  $\varepsilon = 10^{-5}$  для геометрических параметров, характерных для действующих печей.

Последовательность действий при решении вспомогательных задач учета влияния электродов друг на друга в расчетном режиме короткого замыкания ванны для  $i$ -го электрода следующая.

1. Определяются вид, размеры и значение тока основного источника  $i$ -го электрода для расчетного режима короткого замыкания решением системы уравнений (2). Ток этого источника обозначим  $I_i^{(0)}$ . Его действие заменяет действие тока, стекающего с рабочей поверхности электрода в предположении отсутствия влияния других электродов.

2. Многократным решением вспомогательной задачи учета взаимного влияния  $i$ -го электрода и остальных электродов находятся параметры источников первого отражения относительно эквипотенциальных поверхностей, соответствующих оставшимся электродам, а затем их токи  $I_{ik_1}^{(1)}$ ,  $k_1 = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, m$ . Таким образом, после первого отражения основного источника  $i$ -го электрода внутри эквипотенциальных поверхностей, соответствующих остальным электродам, будут находиться по одному источнику-изображению.

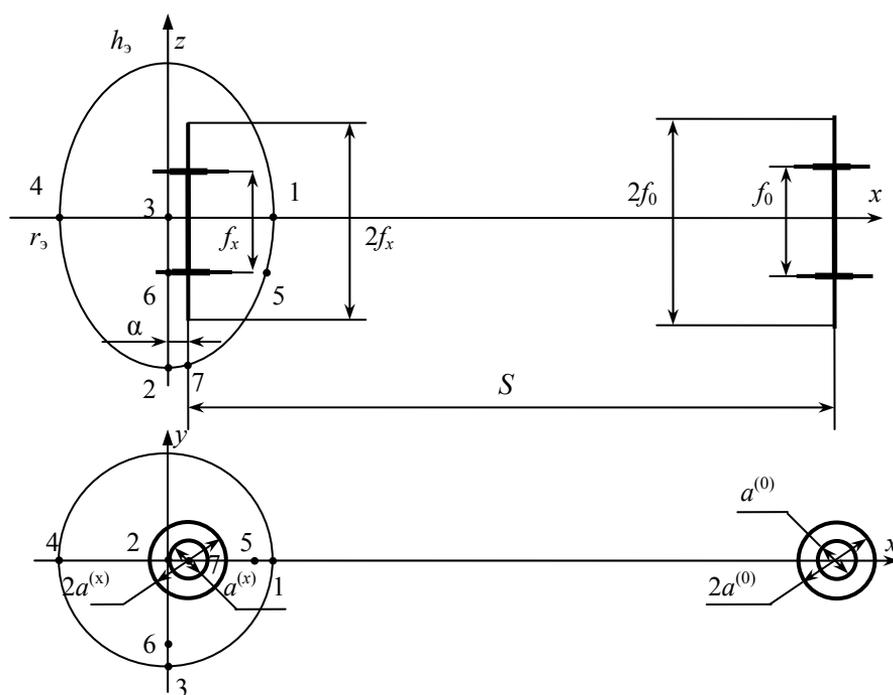


Рис. 4. Вспомогательная задача определения параметров источника, компенсирующего возмущающее воздействие электрического поля внешнего источника на поверхности рассматриваемого электрода

3. Каждый источник первого отражения подвергается следующему многократному отражению относительно эквипотенциальных поверхностей, принятых за поверхности электродов. В результате определяются расположение, размеры и токи источников второго отражения  $I_{ik_1k_2}^{(2)}$ ,  $k_1 = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, m$ ,  $k_2 = 1, 2, \dots, k_1-1, k_1+1, \dots, m$ . После второго отражения внутри эквипотенциальной поверхности, принятой за поверхность  $i$ -го электрода, будут находиться источники с токами  $I_i^{(0)}$ ,  $I_{i,1,i}^{(2)}$ , ...,  $I_{i,i-1,i}^{(2)}$ ,  $I_{i,i+1,i}^{(2)}$ , ...,  $I_{i,m,i}^{(2)}$ , т.е. один основной источник и  $m-1$  источников второго отражения. А внутри каждой из остальных эквипотенциальных поверхностей будет находиться по одному источнику первого отражения и  $m-2$  источников второго отражения.

4. Каждый источник второго отражения многократно подвергается следующим отражениям, в результате которых определяются расположения, размеры и токи источников третьего отражения  $I_{ik_1k_2k_3}^{(3)}$ ,  $k_1 = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, m$ ,  $k_2 = 1, 2, \dots, k_1-1, k_1+1, \dots, m$ ,  $k_3 = 1, 2, \dots, k_2-1, k_2+1, \dots, m$ . После третьего отражения внутри эквипотенциальной поверхности, принятой за поверхность  $i$ -го электрода, будут находиться один основной источник,  $m-1$  источников второго отражения и  $(m-1)(m-2)$  источников третьего отражения. А внутри каждой из остальных эквипотенциальных поверхностей, принятых за поверхности электродов, будет находиться один источник первого отраже-

ния,  $m - 2$  источников второго отражения и  $m - 1 + (m - 2)^2$  источников третьего отражения.

5. Каждый источник третьего отражения многократно подвергается следующим отражениям, в результате которых определяются расположения, размеры и токи источников четвертого отражения  $I_{ik_1k_2k_3k_4}^{(4)}$ ,  $k_1 = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, m$ ,  $k_2 = 1, 2, \dots, k_1 - 1, k_1 + 1, \dots, m$ ,  $k_3 = 1, 2, \dots, k_2 - 1, k_2 + 1, \dots, m$ ,  $k_4 = 1, 2, \dots, k_3 - 1, k_3 + 1, \dots, m$ . После четвертого отражения внутри эквипотенциальной поверхности, принятой за поверхность  $i$ -го электрода, будут находиться один основной источник,  $m - 1$  источников второго отражения,  $(m - 1)(m - 2)$  источников третьего отражения и  $(m - 1)^2 + (m - 1)(m - 2)^2$  источников четвертого отражения. А внутри каждой из остальных эквипотенциальных поверхностей, принятых за поверхности электродов, будут находиться один источник первого отражения,  $m - 2$  источников второго отражения,  $m - 1 + (m - 2)^2$  источников третьего отражения и  $(m - 1)^2 + (m - 1)(m - 2)^2$  источников четвертого отражения.

Можно показать, что после нечетного числа  $t$  отражений источников тока относительно эквипотенциальных поверхностей, принятых за поверхности электродов, внутри каждой из них будет находиться одинаковое количество источников, равное

$$\frac{\sum_{k=0}^t (m-1)^k}{m} = \frac{(m-1)^{t+1} - 1}{m(m-2)},$$

а после четного числа  $t$  отражений внутри поверхности, соответствующей  $i$ -му электроду, будет находиться на один источник больше, чем внутри поверхностей, соответствующих остальным электродам.

Сумма токов источников после  $t$  отражений, находящихся внутри эквипотенциальной поверхности, принятой за поверхность  $i$ -го электрода, приближенно будет равна удвоенному току электрода в режиме короткого замыкания ванны для  $i$ -го электрода

$$2I_{\text{э.и.к.з.}}^{(i)} \approx I_i^{(0)} + \sum_{\substack{k_1=1 \\ k_1 \neq i}}^m I_{ik_1}^{(2)} + \sum_{\substack{k_1=1, k_2=1 \\ k_1 \neq i, k_2 \neq k_1}}^m I_{ik_1k_2}^{(3)} + \dots + \sum_{\substack{k_1=1, k_2=1 \\ k_1 \neq i, k_2 \neq k_1}}^m \dots \sum_{\substack{k_{t-1}=1 \\ k_{t-1} \neq k_{t-2}}}^m I_{ik_1k_2\dots k_{t-1}}^{(t)}. \quad (4)$$

Сумма токов источников после  $t$  отражений, находящихся внутри эквипотенциальной поверхности, принятой за поверхность  $j$ -го электрода, приближенно будет равна удвоенному току  $j$ -го электрода в режиме короткого замыкания ванны для  $i$ -го электрода:

$$2I_{\text{э.и.к.з.}}^{(i)} \approx I_{ij}^{(1)} + \sum_{\substack{k_1=1 \\ k_1 \neq i}}^m I_{ik_1j}^{(2)} + \sum_{\substack{k_1=1, k_2=1 \\ k_1 \neq i, k_2 \neq k_1}}^m I_{ik_1k_2j}^{(3)} + \dots \\ + \sum_{\substack{k_1=1, k_2=1 \\ k_1 \neq i, k_2 \neq k_1}}^m \dots \sum_{\substack{k_{t-1}=1 \\ k_{t-1} \neq k_{t-2}}}^m I_{ik_1k_2\dots k_{t-1}j}^{(t)}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Чтобы независимо от числа электродов и режима питания ванны учет влияния составной боковой стенки производить единым подходом, функция

$U_{\text{к.з. ст } i}^{(i)}$ , учитывающая влияние этой стенки в расчетном режиме короткого замыкания для  $i$ -го электрода, ищется в виде суммы функций  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)} = \sum_j U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$ , каждая из которых соответствует одному основному источнику или источнику-изображению из системы источников, определяющей расчетный режим короткого замыкания ванны для  $i$ -го электрода.

Функция  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$  находится из условия, чтобы на боковых стенках ванны, в которой расположен один источник тока, создающий электрическое поле в неограниченной в радиальном направлении среде ванны, описываемое функцией  $V_{\text{к.з. } j}^{(i)}$ , соблюдались заданные граничные условия для функции

$$W_{\text{к.з. } j}^{(i)} = V_{\text{к.з. } j}^{(i)} + U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}.$$

Так как при существенно смешанных граничных условиях на боковой стенке ванны нахождение функции  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$  с использованием точных методов разделения переменных и конечных интегральных преобразований [3] невозможно, решение ищется приближенным методом, согласно которому  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$  представляется линейной комбинацией функций  $\omega_{mn}$ , удовлетворяющей уравнению Лапласа:

$$U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} Q_{mn}^{ij} \omega_{mn},$$

а коэффициенты  $Q_{mn}^{ij}$  определяются из условия, чтобы как можно точнее выполнялись граничные условия в интегральном смысле. В результате нахождение коэффициентов  $Q_{mn}^{ij}$  сводится к решению системы линейных уравнений.

Для круглой ванны в качестве функции  $\omega_{mn}$  используется решение уравнения Лапласа в системе цилиндрических координат  $(r, \theta, z)$ , полученное методом разделения переменных с учетом свойств функции  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$ :

$$\omega_{mn} = I_m \left( n \frac{\pi}{2} r \right) \cos \left( n \frac{\pi}{2} z \right) \cos(m\theta),$$

где  $I_m \left( n \frac{\pi}{2} r \right)$  – модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Для прямоугольной ванны в качестве функции  $U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)}$ , учитывающей влияние боковой стенки, используются суммы частных решений уравнения Лапласа в системе декартовых координат [3]

$$U_{\text{к.з. ст } j}^{(i)} = \sum_{m=0}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} \left( A_{\text{ст } mn}^{ij} \omega_{\text{ст } mn}^A + B_{\text{ст } mn}^{ij} \omega_{\text{ст } mn}^B + C_{\text{ст } mn}^{ij} \omega_{\text{ст } mn}^C + D_{\text{ст } mn}^{ij} \omega_{\text{ст } mn}^D \right),$$

где

$$\omega_{\text{ст } mn}^A(x, y, z) = \text{ch}(q_{mn}x) \cos \left( m \frac{\pi}{L} y \right) \cos \left( n \frac{\pi}{2} z \right),$$

$$\omega_{\text{ст } mn}^B(x, y, z) = \text{ch}(q_{mn}x) \sin \left( m \frac{\pi}{L} y \right) \cos \left( n \frac{\pi}{2} z \right),$$

$$\omega_{ctmn}^C(x, y, z) = \operatorname{sh}(q_{mn}x) \cos\left(m \frac{\pi}{L} y\right) \cos\left(n \frac{\pi}{2} z\right),$$

$$\omega_{ctmn}^D(x, y, z) = \operatorname{sh}(q_{mn}x) \sin\left(m \frac{\pi}{L} y\right) \cos\left(n \frac{\pi}{2} z\right),$$

$$q_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{2m}{L}\right)^2 + n^2};$$

где  $L$  – большой полуразмер сечения прямоугольной ванны.

Коэффициенты  $A_{ctmn}^{ij}$ ,  $B_{ctmn}^{ij}$ ,  $C_{ctmn}^{ij}$ ,  $D_{ctmn}^{ij}$  определяются из условия наилучшего соблюдения граничных условий в интегральном смысле на боковых стенках. Так же как и в случае круглых ванн, нахождение этих коэффициентов в зависимости от вида граничных условий сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений или часть коэффициентов определяется непосредственно.

В качестве функций  $U_{\text{к.з.н}jk}^{(i)}$ , учитывающей неоднородность проводимости среды в зоне с проводимостью  $\gamma_k$ , используются частные решения уравнения Лапласа, полученные методом разделения переменных в соответствующей системе координат. При этом каждой зоне с постоянной удельной проводимостью  $\gamma_k$  соответствует своя функция  $U_{\text{к.з.н}jk}^{(i)}$ , каждая из которых представляется линейными комбинациями функций  $\omega_{nm}$ :

$$U_{\text{к.з.н}jk}^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=0}^{N_2} Q_{nm}^{ijk} \omega_{nm}^k.$$

Для верхней зоны круглой ванны с удельной проводимостью  $\gamma_1$  функция  $U_{\text{к.з.н}j1}^{(i)}$  имеет вид

$$U_{\text{к.з.н}j1}^{(i)}(r, \theta, z) = \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=0}^{N_2} Q_{nm}^{i1} \operatorname{ch}\left(\xi_m \frac{z}{h_y}\right) J_n\left(\xi_m \frac{r}{r_b}\right) \cos(n\theta). \quad (6)$$

Для нижней зоны круглой ванны с удельной проводимостью  $\gamma_2$  функция  $U_{\text{к.з.н}j2}^{(i)}$  имеет вид

$$U_{\text{к.з.н}j2}^{(i)}(r, \theta, z) = \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=0}^{N_2} Q_{nm}^{i2} \operatorname{sh}\left(\xi_m \frac{l-z}{h_y}\right) J_n\left(\xi_m \frac{r}{r_b}\right) \cos(n\theta). \quad (7)$$

В формулах (6) и (7)  $\xi_m$  – корни уравнения  $J_n(x) = 0$  (в случае проводящей стенки ванны) или  $J'_n(x) = 0$  (в случае непроводящей стенки ванны);  $r_b$  – радиус ванны;  $l = h_3 + h_p$  – суммарная высота углеродистой зоны и зоны расплава;  $J_n(x)$  – функция Бесселя первого порядка. Коэффициенты  $Q_{nm}^{i1}$  и  $Q_{nm}^{i2}$  определяются из условия на границе раздела технологических зон.

К числу важных достоинств аналитико-численного метода следует также отнести его пошаговую реализацию, когда задача нахождения координат расположения, размеров и токов решается не для всей системы источников в целом, а последовательно, применительно к отдельным составным источникам. Благодаря этому удается обойти трудность, возникающую при одновременном опреде-

лении параметров всех источников – решение системы уравнений высокого порядка, которая обычно имеет плохо обусловленную матрицу коэффициентов.

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма расчета параметров схем замещений и характеристик электрического поля ванны многоэлектродной печи.

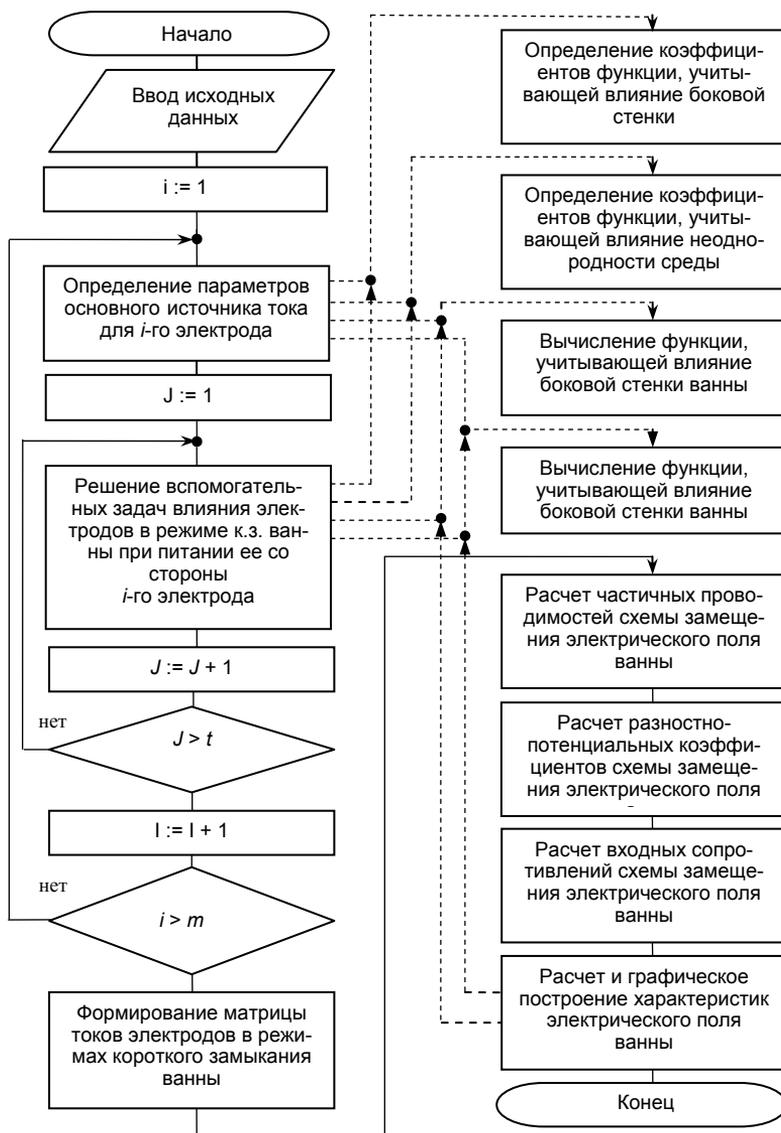


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета параметров схем замещения и характеристик электрического поля ванны многоэлектродной печи

Как видно из блок-схемы, расчёт параметров схем замещений и характеристик электрического поля ванны многоэлектродной печи при наличии несимметричности электрического режима и асимметрии пространственного расположения электродов выполняется в несколько этапов.

На первом этапе для каждого электрода определяются вид, размеры и токи элементов основного источника с учётом влияния боковой стенки и неоднородности слабо проводящей среды, когда при заданных геометрических параметрах электродов решаются системы трансцендентных уравнений вида (2), полученных приравниванием потенциалов в точках, характеризующих размеры и форму электродов, единичному значению. Затем многократным решением вспомогательной задачи учета взаимного влияния электродов друг на друга определяются параметры источников изображений для различных расчетных режимов короткого замыкания ванны, которые имеют тот же вид, что и основные источники тока. Параметры этих источников находятся решением систем уравнений вида (3).

На втором этапе производится расчет матрицы токов электродов в расчетных режимах короткого замыкания [2] в соответствии с (4) и (5), частичных проводимостей и разностно-потенциальных коэффициентов схем замещений. По заданным значениям токов электродов вычисляются входные сопротивления ванны многоэлектродной печи.

На третьем этапе по заданным значениям токов электродов рассчитываются дифференциальные характеристики электрического поля ванны наложением электрических полей отдельных источников и строятся картины их распределения по объему и плоскостям сечений ванны.

#### Литература

1. *Вержбицкий В.М.* Основы численных методов. М.: Высш. шк. 2002. 840 с.
2. *Ильгачев А.Н.* Частичные проводимости схемы замещения электрического процесса в ванне электродных печей резистивного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 73–80.
3. *Иоссель Ю.А.* Расчет потенциальных полей в энергетике (справочная книга). Л.: Энергия. 1978. 351 с.
4. *Иоссель Ю.А., Кочанов Э.С., Струнский М.С.* Расчёт электрической емкости. Л.: Энергия, 1981. 288 с.
5. *Мионов Ю.М., Тарасов В.А.* Аналитический расчёт электрических полей и сопротивлений ванн электрических печей // Известия вузов. Электромеханика. 1975. № 11. С. 1174–1189.
6. *Таврин Н.Ю.* Расчет сопротивления ванн печей с электродами различной формы // Исследование специальных вопросов электротермии: межвузов. сб. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1983. С. 73–79.
7. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964. 773 с.

---

**ИЛЬГАЧЁВ АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([anikil47@mail.ru](mailto:anikil47@mail.ru)).

---

A. ILGACHEV

ANALYTICAL NUMERICAL METHOD TO CALCULATE  
MULTIELECTRODE FURNACES  
BATH OF ELECTRIC FIELD CHARACTERISTICS

**Key words:** equivalent source method, reflection method, bath short circuit rated conditions, composite current source.

The article discusses an analytical numerical method of solving Laplace's equation describing the bath electrical field for slag and multi-slag multi-electrode ore-thermal furnaces at certain admissions. It is based on a totality of well-known methods: equivalent current source method, reflection method, variable separation method and other methods. The function that determines the bath electrical field potential in the short circuit rated conditions for one of the electrodes is calculated as a sum of three harmonic functions: the electrical field potential distribution function that is infinite in the bath radial direction; the function taking into account sidewall influence upon the bath electric field with uniform medium; the function taking into account non-uniformity of medium conductance. The algorithm block diagram for calculating the furnace bath electric field characteristics using analytical numerical method is presented.

#### References

1. Verzhbitskii V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Bases of numeral methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002, 840 p.
2. Ilgachev A.N. *Chastichnye provodimosti skhemy zameshcheniya elektricheskogo protsessa v vanne elektrodnykh pechei rezistivnogo nagreva* [Direct admittances of the bath electric process equivalent circuit for the resistance-type heating electrode furnaces]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no 1, pp. 73–80.
3. Iossel' Yu.A. *Raschet potentsial'nykh polei v energetike (spravochnaya kniga)* [A calculation of the potential fields is in energy]. St. Petersburg, Energy Publ., 1978, 351 p.
4. Iossel' Yu.A., Kochanov E.S., Strunskii M.S. *Raschet elektricheskoi emkosti* [Calculation of electric capacity]. St. Petersburg, Energy Publ., 1981, 288 p.
5. Mironov Yu.M., Tarasov V.A. *Analiticheskii raschet elektricheskikh polei i soprotivlenii vann elektricheskikh pechei* [Analytical calculation of the electric fields and resistances of baths of electric furnaces]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1975, no. 11, pp. 1174–1189.
6. Tavrinn N.Yu. *Raschet soprotivleniya vann pechei s elektrodami razlichnoi6 formy* [Calculation of resistance of baths of furnaces with electrodes of different furnaces]. In: *Issledovanie spetsial'nykh voprosov elektrotermii: mezhvuzov. sb.* [Research of the special questions of electroheat: collected papers]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 1983, pp. 73–79.
7. Shimoni K. *Teoreticheskaya elektrotehnika* [Theoretical electrical engineering]. Moscow, World Publ., 1964, 773 p.

---

**ILGACHEV ANATOLII – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Automated Technological Installations and Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** Ильгачёв А.Н. Аналитико-численный метод расчета характеристик электрического поля ванны многоэлектродных печей // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 36–49.

УДК 537.311.5:621.365.3  
ББК 31.292

А.Н. ИЛЬГАЧЁВ

## ЧАСТИЧНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ВАННЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И ИХ СВЯЗЬ С ВХОДНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ ВАННЫ

**Ключевые слова:** частичные проводимости схемы замещения ванны, режим короткого замыкания ванны, входные сопротивления ванны.

*Приводятся результаты исследования влияния геометрических параметров электродов и ванны на частичные проводимости схем замещения ванн трех- и шестиэлектродных шлаковых и многошлаковых прямоугольных печей с различным расположением электродов, полученные математическим моделированием при определенных допущениях для электрического поля ванны. Предложены и обоснованы расчетные схемы замещения ванн трех- и шестиэлектродных печей с расположением электродов в одну и две линии. Рассмотрена связь входных сопротивлений ванны с частичными проводимостями схем замещения для упомянутых расположений электродов и в общем случае схемы питания по току. Отмечается, что при наличии асимметрии в расположении электродов в ванне печи ее входные сопротивления представлены как активными, так и реактивными составляющими.*

Частичные проводимости эквивалентной схемы замещения электрического поля ванны многоэлектродной руднотермической печи (РТП) со слабовыраженным дуговым или бездуговым режимом удобно использовать для исследования ее несимметричных электрических режимов [1]. При пренебрежении проявлением дуг, поверхностным эффектом и предположении, что электрическое поле в среде ванны описывается уравнением Лапласа, они не зависят от ее электрического режима и полностью определяются геометрическими параметрами, формой рабочей поверхности электродов, их расположением в ванне и проводимостью материалов среды в ней. Будем называть элементы схемы замещения ванны, соединяющие электроды и подину (высокопроводящий слой расплава), собственными частичными проводимостями (СЧП), а элементы, соединяющие пары электродов, – взаимными частичными проводимостями (ВЧП).

В [1] предложены математическая модель расчетных режимов короткого замыкания ванны многоэлектродных печей и полученные на ее основе формулы для определения частичных проводимостей схем замещения. Кроме того, исследовано влияние геометрических параметров плоских электродов одноэлектродной и двухэлектродной печей проводимости их ванн.

В данной работе продолжено исследование влияния геометрических параметров электродов прямоугольных печей с тремя и шестью электродами, расположенными в линии, на частичные проводимости схем замещения ванны.

В трех- и шестиэлектродных печах плоские электроды размещаются широкими сторонами параллельно один другому (рис. 1, а, в). Плоские электроды при одной и той же площади поперечного сечения, как и у электродов круглого сечения, располагаются ближе друг к другу. Это позволяет сократить длину ванны и увеличить ее ширину по сравнению с длиной ванны с круглыми электродами и улучшить конструктивные и энергетические показатели печи.

На рис. 1, б приведено расположение шести электродов в две линии, применяемое в ряде прямоугольных печей, в частности, для выплавки кремния. В

таких печах попарно сгруппированные электроды подключаются к соответствующим фазам трехфазной системы. Рассматриваемая шестиэлектродная печь соответствует трехэлектродной с тремя плоскими электродами, для которой каждый плоский электрод заменяется двумя круглыми электродами с эквивалентной суммарной площадью сечения. Замена плоского электрода двумя электродами круглого сечения незначительно влияет на величину действующего объема реакционных тиглей, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики установки и уменьшить индуктивность печного контура.

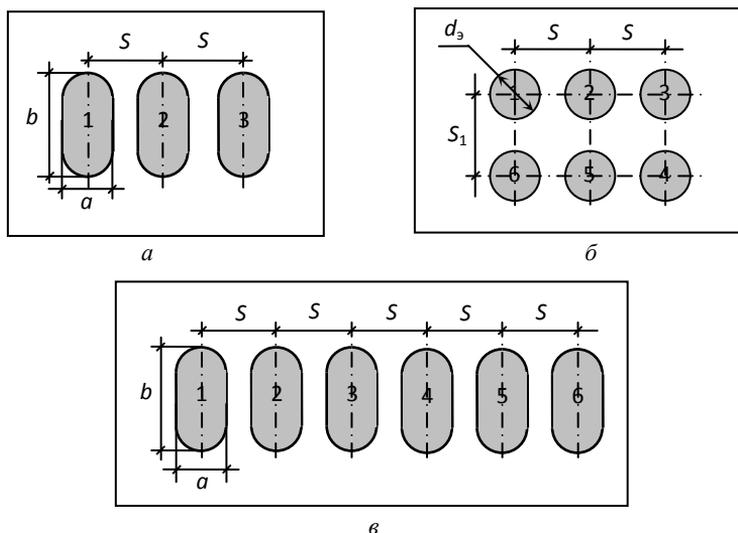


Рис. 1. Расположение и обозначение электродов в ванне прямоугольных печей

Исследование влияния геометрических параметров плоских и круглых электродов на частичные проводимости схемы замещения электрического процесса в ванне осуществлялось с использованием математических моделей режимов короткого замыкания ванны, идеализированной эллипсоидально-цилиндрической формы рабочей поверхности плоского электрода [1] и компьютерного приложения Comsol Multiphysics.

Так как описываемые уравнением Лапласа процессы автомодельны, для получения обобщенных зависимостей параметров схемы замещения геометрические размеры электродов выражены в долях от базисного. В качестве последнего принята высота слабопроводящего слоя  $l$  ванны:  $x^* = x/l$ ,  $y^* = y/l$ ,  $z^* = z/l$ ,  $a^* = a/l$ ,  $h_3^* = h_3/l$ ,  $S^* = S/l$ , а частичные проводимости схемы замещения ванны представлены в критериальной форме

$$G_{ij} = \frac{g_{ij}}{\gamma l},$$

где  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – пространственные координаты;  $a$  – размер меньшей стороны сечения плоского электрода;  $h_3$  – заглубление электрода в слабопроводящую среду;  $S$  – расстояние между осями соседних электродов;  $g_{ij}$  – частичная проводимость схемы замещения многоэлектродной ванны;  $\gamma$ ,  $l$  – удельная проводимость и высота слабопроводящего слоя ванны.

Анализ результатов моделирования показывает, что для геометрических параметров действующих печей СЧП схемы замещения примерно на порядок больше, чем ВЧП схемы замещения для соседних электродов. В свою очередь, ВЧП схемы замещения для электродов, расположенных через электрод, на один-два порядка меньше, чем ВЧП схемы замещения для соседних электродов. Поэтому при расчете электрического режима печного контура можно пренебречь влиянием части элементов схемы замещения ванны в связи с незначительностью значений их проводимостей. Тогда схемы замещения трех- и шестиэлектродных прямоугольных ванн с частичными проводимостями приобретают виды, приведенные на рис. 2.

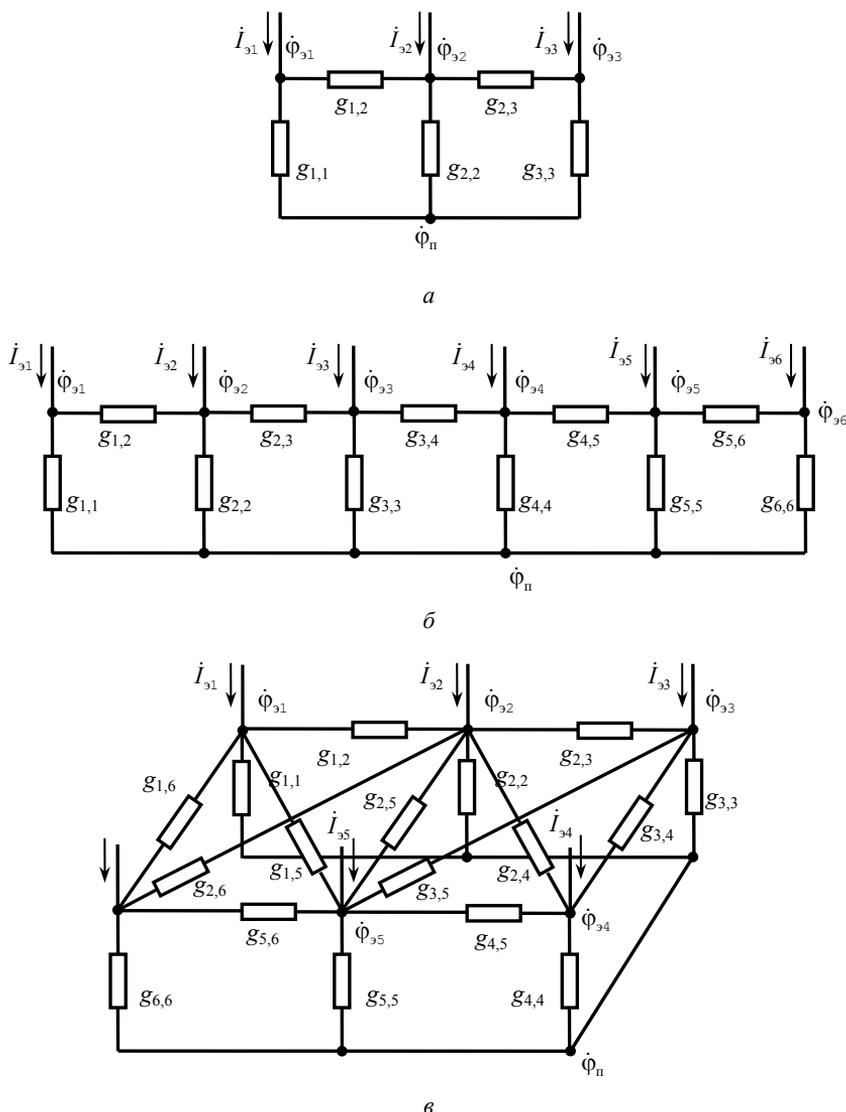


Рис. 2. Расчетные схемы замещения ванн прямоугольных печей с тремя (а), шестью электродами (б) в одну линию и шестью электродами в две линии (в)

СЧП  $G_{1,1}$ ,  $G_{2,2}$ ,  $G_{3,3}$  и ВЧП  $G_{1,2}$ ,  $G_{2,3}$  схемы замещения прямоугольной ванны трехэлектродной печи так же, как и для двухэлектродной системы, практически линейно зависят от соотношения сторон  $\mu = b/a$  сечения электродов при постоянных размере узкой стороны  $a$  сечения, заглублении  $h_3$  электродов и расстоянии  $S$  между осями соседних электродов (рис. 3, а, б). Значение СВЧ  $G_{2,2}$  схемы замещения для электрода, расположенного внутри ряда, меньше СЧП для электродов, расположенных по краям ряда.

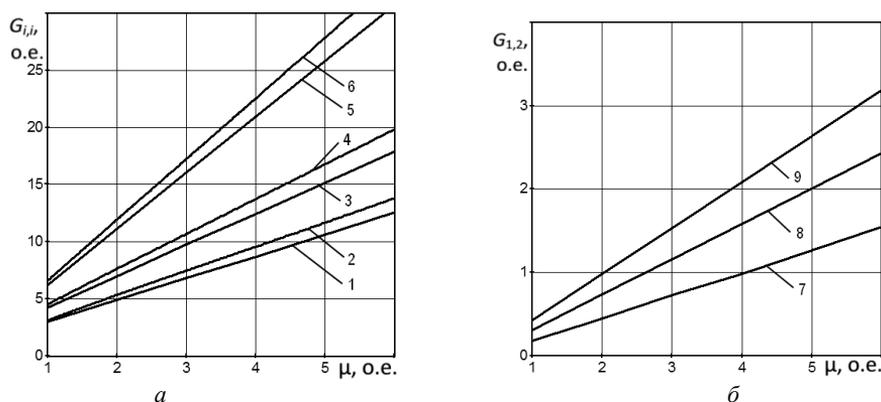


Рис. 3. Зависимости частичных проводимостей  $G_{1,1} = G_{3,3}$ ,  $G_{2,2}$  (а),  $G_{1,2} = G_{2,3}$  (б) в критериальной форме схемы замещения ванны с тремя одинаково заглубленными плоскими электродами от отношения  $\mu$  размеров сечения электродов ( $a^* = 1,0$ ,  $S^* = 1,8$ ):

1, 3, 5 –  $G_{2,2}$ ; 2, 4, 6 –  $G_{1,1} = G_{3,3}$ ; 7, 8, 9 –  $G_{1,2} = G_{2,3}$ ;  
 1, 2, 7 –  $h_{31}^* = h_{32}^* = h_{33}^* = 0,2$ ; 3, 4, 8 –  $h_{31}^* = h_{32}^* = h_{33}^* = 0,5$ ; 5, 6, 9 –  $h_{31}^* = h_{32}^* = h_{33}^* = 0,8$

При увеличении расстояния  $S$  между осями соседних электродов ВЧП схемы замещения между осями соседних электродов уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулю, а СЧП при этом возрастают, асимптотически приближаясь к проводимости ванны одиночного электрода (рис. 4, а, б). При одинаковых заглублениях электродов в проводящую среду ванны и одинаковых расстояниях  $S$  между осями соседних электродов  $G_{1,1} = G_{3,3}$ ,  $G_{1,2} = G_{2,3}$ .

Закономерности изменения СЧП  $G_{1,1}$ ,  $G_{2,2}$ ,  $G_{3,3}$  от заглубления  $h_3$  электродов близки к закономерности изменения проводимости одноэлектродной ванны (рис. 5, а). Частичные проводимости  $G_{1,2}$ ,  $G_{2,3}$  примерно на порядок меньше частичных проводимостей  $G_{1,1}$ ,  $G_{2,2}$  и  $G_{3,3}$  для геометрических параметров электродов и ванны, характерных для действующих печей. При этом скорости их изменения уменьшаются с увеличением расстояния между осями  $S$  соседних электродов. С увеличением заглубления  $h_3$  электродов, увеличением отношения сторон его сечения  $\mu = b/a$  и увеличением размера узкой стороны  $a$  сечения электрода ВЧП  $G_{1,2}$ ,  $G_{2,3}$  схемы замещения возрастают (рис. 5, б).

СЧП для крайних электродов схемы замещения ванны с шестью электродами при одинаковых заглублениях всех электродов практически равны между собой и отличаются от СЧП схемы замещения для крайних электродов трех-

электродной печи с идентичными геометрическими параметрами не более чем на 1%. СЧП схемы замещения для внутренних электродов  $G_{2,2}$ ,  $G_{3,3}$ ,  $G_{4,4}$ ,  $G_{5,5}$  при одинаковых заглублениях мало отличаются друг от друга и также незначительно отличаются от СЧП схемы замещения для среднего электрода трехэлектродной печи. При этом ВЧП  $G_{1,2}$ ,  $G_{2,3}$ ,  $G_{3,4}$ ,  $G_{4,5}$ ,  $G_{5,6}$  мало отличаются друг от друга и от ВЧП  $G_{1,2}$ ,  $G_{2,3}$  схемы замещения трехэлектродной печи.

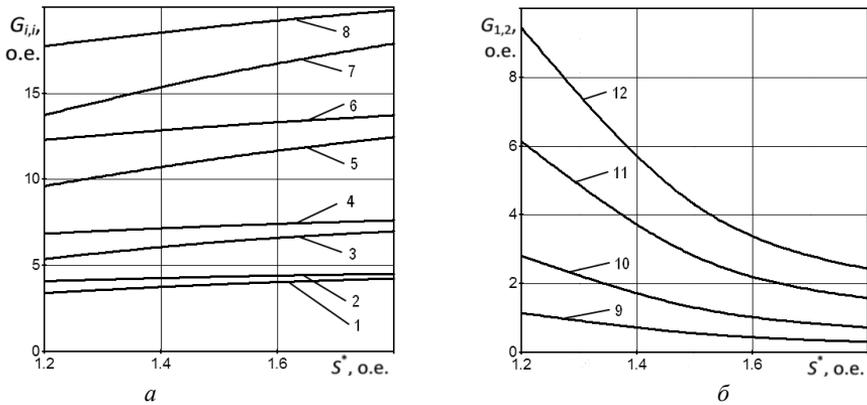


Рис. 4. Зависимости частичных проводимостей  $G_{1,1} = G_{3,3}$ ,  $G_{2,2}(a)$ ,  $G_{1,2} = G_{2,3}(b)$  в критериальной форме схемы замещения ванны с тремя плоскими электродами от расстояния между осями соседних электродов ( $a^* = 1,0$ ,  $h_{31}^* = h_{32}^* = h_{33}^* = 0,5$ ):

1, 3, 5, 7 –  $G_{2,2}$ ; 2, 4, 6, 8 –  $G_{1,1}=G_{3,3}$ ; 9, 10, 11, 12 –  $G_{1,2}=G_{2,3}$ ;  
1, 2, 9 –  $\mu = 1$ ; 3, 4, 10 –  $\mu = 2$ ; 5, 6, 11 –  $\mu = 4$ ; 7, 8, 12 –  $\mu = 6$

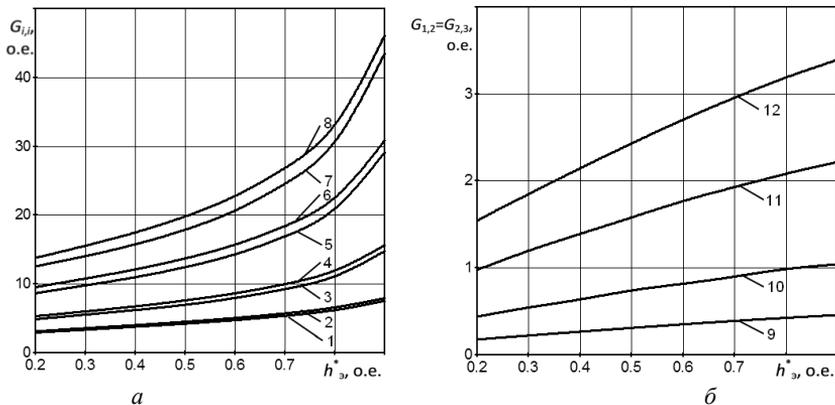


Рис. 5. Зависимости частичных проводимостей  $G_{1,1} = G_{3,3}$ ,  $G_{2,2}(a)$ ,  $G_{1,2} = G_{2,3}(b)$  в критериальной форме схемы замещения ванны с тремя плоскими электродами от заглубления электродов ( $a^* = 1,0$ ,  $S^* = 1,8$ ):

1, 3, 5, 7 –  $G_{2,2}$ ; 2, 4, 6, 8 –  $G_{1,1}=G_{3,3}$ ; 9, 10, 11, 12 –  $G_{1,2}=G_{2,3}$ ;  
1, 2, 9 –  $\mu = 1$ ; 3, 4, 10 –  $\mu = 2$ ; 5, 6, 11 –  $\mu = 4$ ; 7, 8, 12 –  $\mu = 6$

Закономерности влияния геометрических параметров электродов и их расположения в ванне на частичные проводимости схемы замещения прямоугольной ванны с шестью электродами, расположенными в две линии, напо-

минают аналогичные закономерности для трехэлектродной прямоугольной ванны. При одинаковом заглублении всех электродов для рассматриваемой схемы замещения справедливы равенства

$$g_{1,1} = g_{3,3} = g_{4,4} = g_{6,6} > g_{2,2} = g_{5,5},$$

$$g_{1,2} = g_{2,3} = g_{4,5} = g_{5,6}, g_{1,6} = g_{3,4}, g_{2,5} < g_{1,6} = g_{3,4}, g_{1,5} = g_{2,6} = g_{2,4} = g_{3,5}.$$

Напряжения на участках электрод – подина ванны и токи, протекающие в электродах, для топологии схемы замещения в виде полносвязанного многоугольника удовлетворяют системе равенств

$$I_{3i} = g_{ii} \dot{U}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m g_{ij} (\dot{U}_i - \dot{U}_j), i=1,2,\dots,m,$$

где  $m$  – число электродов;  $I_{3i}$ ,  $\dot{U}_i$  – ток электрода и напряжение участка электрод – подина ванны, или в матричной форме

$$\mathbf{I}_3 = \mathbf{g} \cdot \mathbf{U}_3. \tag{1}$$

Для расчетной схемы замещения трехэлектродной прямоугольной ванны (рис. 2, а) матрица проводимости  $\mathbf{g}$  имеет вид

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_{1,1} - g_{1,2} & g_{1,2} & 0 \\ g_{1,2} & g_{2,2} - g_{1,2} - g_{2,3} & g_{2,3} \\ 0 & g_{2,3} & g_{1,1} - g_{1,2} \end{pmatrix},$$

а для расчетной схемы замещения прямоугольной ванны с шестью электродами в одну линию (рис. 2, в)

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \bar{g}_{1,1} & g_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{1,2} & \bar{g}_{2,2} & g_{2,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{2,3} & \bar{g}_{3,3} & g_{3,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{3,4} & \bar{g}_{4,4} & g_{4,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{4,5} & \bar{g}_{5,5} & g_{5,6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{5,6} & \bar{g}_{6,6} \end{pmatrix},$$

где  $\bar{g}_{1,1} = g_{1,1} - g_{1,2}$ ,  $\bar{g}_{2,2} = g_{2,2} - g_{1,2} - g_{2,3}$ ,  $\bar{g}_{4,4} = g_{4,4} - g_{3,4} - g_{4,5}$ ,  $\bar{g}_{5,5} = g_{5,5} - g_{4,5} - g_{5,6}$ ,  $\bar{g}_{6,6} = g_{6,6} - g_{5,6}$ .

Для расчетной схемы замещения прямоугольной ванны с шестью электродами в две линии (рис. 2, б) матрица проводимости  $\mathbf{g}$  имеет вид

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \bar{g}_{1,1} & g_{1,2} & 0 & 0 & g_{1,5} & g_{1,6} \\ g_{1,2} & \bar{g}_{2,2} & g_{2,3} & g_{2,4} & g_{2,5} & g_{2,6} \\ 0 & g_{2,3} & \bar{g}_{3,3} & g_{3,4} & g_{3,5} & 0 \\ 0 & g_{2,4} & g_{3,4} & \bar{g}_{4,4} & g_{4,5} & 0 \\ g_{1,5} & g_{2,5} & g_{3,5} & g_{4,5} & \bar{g}_{5,5} & g_{5,6} \\ g_{1,6} & g_{2,6} & 0 & 0 & g_{5,6} & \bar{g}_{6,6} \end{pmatrix},$$

где  $\bar{g}_{1,1} = g_{1,1} - g_{1,2} - g_{1,5} - g_{1,6}$ ,  $\bar{g}_{2,2} = g_{2,2} - g_{1,2} - g_{2,3} - g_{2,4} - g_{2,5} - g_{2,6}$ ,

$\bar{g}_{3,3} = g_{3,3} - g_{2,3} - g_{3,4} - g_{3,5}$ ,  $\bar{g}_{4,4} = g_{4,4} - g_{2,4} - g_{3,4} - g_{4,5}$ ,

$\bar{g}_{5,5} = g_{5,5} - g_{1,5} - g_{2,5} - g_{3,5} - g_{4,5} - g_{5,6}$ ,  $\bar{g}_{6,6} = g_{6,6} - g_{1,6} - g_{2,6} - g_{5,6}$ .

Матричное уравнение (1), разрешенное относительно вектора напряжений на участках электрод – подина ванны:

$$\dot{U}_3 = \mathbf{g}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{I}}_3 = \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{I}}_3. \quad (2)$$

В (2) элементы  $\{R_{ij}\}$  матрицы  $\mathbf{R}$  имеют размерность сопротивления и представляют собой разностно-потенциальные коэффициенты схемы замещения электрического процесса ванны [3].

Тогда входные сопротивления ванны могут быть определены из выражений

$$Z_i = \sum_{j=1}^m \frac{\dot{I}_{3j}}{\dot{I}_{3i}} R_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Анализ результатов расчета по (3) показывает, что при одинаковых действующих значениях токов электродов и асимметрии их расположения входные сопротивления  $Z_{вхi}$  ванны обладают как активными, так и реактивными составляющими.

#### Литература

1. Ильгачев А.Н. Частичные проводимости схемы замещения электрического процесса в ванне электродных печей резистивного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 73–80.
2. Струнскиий Б.М. Расчеты руднотермических печей. М.: Metallurgy, 1982. 192 с.
3. Ильгачёв А.Н. Разностно-потенциальные коэффициенты как параметры схемы замещения электрического процесса в ванне многоэлектродных печей // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Пермь, апрель 2015 г.). Пермь: Меркурий, 2015. С. 76–79.

---

**ИЛЬГАЧЁВ АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (aniki47@mail.ru).

---

#### A. ILGACHEV

#### DIRECT ADMITTANCES OF RECTANGULAR ORE-THERMAL FURNACES BATH EQUIVALENT CIRCUITS AND THEIR CONNECTION WITH BATH INPUT RESISTANCES

**Key words:** bath equivalent circuit direct admittances, bath short circuit mode, bath input resistances

The article gives the results of investigating the electrode geometrical parameters influence on the bath equivalent circuit direct admittances for three- and six-electrode slag and multi-slag rectangular furnaces having various electrode location which were obtained by means of mathematical modeling at certain admissions for bath electrical field. Bath equivalent design circuits for three- and six-electrode furnaces having electrode location in one and two lines are suggested and explained. The article considers bath input resistances connection with equivalent circuit direct admittances for the mentioned electrode locations and general case of feed circuits by current. It is noted if there is electrode location dissymmetry in the furnace bath then its input resistances are represented to be both active and reactive components.

## References

1. Ilgachev A.N. *Chastichnye provodimosti skhemy zameshcheniya elektricheskogo protsessa v vanne elektrodnykh pechei rezistivnogo nagreva* [Direct admittances of the bath electric process equivalent circuit for the resistance-type heating electrode furnaces]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no 1, pp. 73–80.
2. Strunskii B.M. *Raschety rudnotermicheskikh pechej* [Calculations ore-smelting furnaces]. Moscow, Metallurgija Publ. 1982 192 p.
3. Ilgachev A.N. *Raznosno-potencial'nye koefitsienty kak parametry shemy zameshheniya jelektricheskogo processa v vanne mnogojelektrodnyh pechej* [Potential difference coefficients as parameters of equivalent circuit for an electric process are in bath of multielectrode furnaces]. *Aktual'nye voprosy tehnikeskikh nauk*. [Pressing questions of engineering sciences]. *Materialy III Mezhdunar. nauch. konf. (Perm', apre'l, 2015)*. [Proc. of Sci. Conf. (Perm, april, 2015)]. Perm, Mercury Publ., 2015. pp. 76–79.

---

**ILGACHEV ANATOLII – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Automated Technological Installations and Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** Ильгачёв А.Н. Частичные проводимости схем замещения ванны прямоугольных руднотермических печей и их связь с входными сопротивлениями ванны // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 50–57.

УДК 621.314.222.6:[621.311.1:631.371]

ББК 3261.8;3279.125

О.И. КАНЮГИН, Н.Л. МАКАРОВА

## СТРАТЕГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 кВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

*Ключевые слова:* силовые трансформаторы, диагностирование, стратегия обслуживания, техническое состояние, объект обслуживания, текущий ремонт, аварийный запас, витковое замыкание, внутренняя изоляция, влияющие факторы.

*Выполнен анализ статистического материала оценки технического состояния силовых трансформаторов 10/0,4 кВ. Определены факторы, влияющие на работоспособность силового оборудования. Приведены результаты экспериментальных исследований по отказам силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в сельских электрических сетях. Представлена классификация отказов по элементам, причинам и месяцам. Рассмотрены результаты диагностирования длительно работающих трансформаторов и проведена оценка технического состояния. Выявлено, что основным отказом является витковое замыкание, которое длительное время не оказывает существенного влияния на работу потребителей электрической энергии, но может понижать надежность электроснабжения, увеличивая расходы на обслуживание силовых трансформаторов при их ремонте. Безотказность трансформаторов, установленных в сетях 10 кВ, в основном зависит от состояния внутренней изоляции (главная, витковая), отказы из-за дефектов которой составляют 70,8% от общей повреждаемости трансформаторов, а из-за дефектов витковой – 55,2%. Пробой изоляции при внутренних перенапряжениях составляет 34,4%, при грозовых – 20,8%. Возникающие перенапряжения и воздействия окружающей среды, как правило, вызывают витковые замыкания высоковольтной обмотки, которые приводят к ухудшению изоляции обмоток относительно корпуса.*

*Предложена стратегия обслуживания трансформаторов по данным оценки технического состояния на основе результатов диагностирования. Определена структура рациональной стратегии технического обслуживания силовых трансформаторов 10/0,4 кВ и установлен план, содержащий следующие основные элементы: составление функциональной модели исследования трансформаторов с учетом региональных (климатических) особенностей эксплуатации и проведение ТО и ТР по фактическому состоянию; определение экономического критерия оптимальности для всех альтернативных подходов (в статье рассматриваются 3 подхода); оптимизация экономического критерия оптимальности альтернативных подходов и выбор управляющих воздействий на объект исследования на основе минимизации; реализация системы ТО и ТР силовых трансформаторов по фактическому состоянию.*

В последние годы в литературных источниках со ссылкой на иностранные издания появляются материалы управления основными фондами [5] ЕАМ (Enterprise Asset Management), которые необходимы для таких отраслей, как предприятия электроэнергетики (электроснабжение сельского хозяйства, электроснабжение городов и промышленных предприятий), жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), транспортные предприятия и др. Для указанных отраслей требуются значительные материальные и финансовые средства для поддержания работоспособности большого объема сложного оборудования.

В целях минимизации затрат на эксплуатацию сложных объектов необходима разработка оптимального уровня обслуживания на весь период их эксплуатации с учетом затрат на профилактическое обслуживание, ремонт,

комплектование запасными частями, вспомогательными материалами, средствами диагностики и оптимального числа обслуживающего персонала.

В настоящее время большинство крупных предприятий различных отраслей переходят на самостоятельную систему электроснабжения, что затрудняет создание управления производственными активами в вопросах совершенствования стратегии технического обслуживания, ремонта оборудования. Поэтому необходим учет специфики отрасли и региональных климатических условий, т.е. необходима модернизация стратегий обслуживания для каждого крупного сложного технического комплекса с учетом региональных особенностей условий эксплуатации.

Выполненный нами анализ статистического материала оценки технического состояния силовых трансформаторов 10/0,4 кВ показывает, что ежегодный их отказ составляет 7,5% от установленных [1, 2, 4, 6, 8, 9, 10].

На состояние силовых трансформаторов в распределительных сетях существенное влияние оказывают факторы окружающей среды и эксплуатационные параметры (рис. 1).



Рис. 1. Факторы, воздействующие на силовые трансформаторы 10/0,4 кВ

Большинство силовых трансформаторов, эксплуатирующихся в сельских сетях 10 кВ, подвержено воздействию грозowych, внутренних перенапряжений, действию сверхтоков, перегрузок, коммутационных перенапряжений в питаю-

щих сетях, влажности окружающей среды, температуры воздуха и солнечной радиации. Причинами отказов силовых трансформаторов являются: грозовые перенапряжения – 20,8%, внутренние перенапряжения, короткие замыкания в сетях – 34,4%, перегрузки – 7%, снижение уровня изоляции в процессе эксплуатации – 12%, асимметрия токов нагрузки по фазам – 0,67% [7].

Распределение числа отказов силовых трансформаторов 10/0,4 кВ по причинам, местам их возникновения и месяцам года приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Распределение числа отказов трансформаторов 10/0,4 кВ по причинам, местам их возникновения и месяцам года**

Причина отказов	Общее число отказов		В том числе по месяцам года, шт.											
	шт.	%	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Витковые замыкания	212	55,2	8	4	12	24	32	32	36	16	20	12	12	4
Пробой при внутренних перенапряжениях	132	34,4	8	4	12	16	16	12	12	8	16	12	12	4
Пробой при грозовых перенапряжениях	80	20,8	-	-	-	8	16	20	24	8	4	-	-	-
Дефект проходной изоляции (вводы ВН и НН)	26	6,8	1	2	2	4	3	3	3	3	1	1	1	2
Междуфазное замыкание, перегрузка	25	6,6	6	-	-	-	-	-	7	-	-	-	6	6
Прочие причины (магнитопровод, переключатели и др.)	10	2,4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	5
Дефект главной изоляции	60	15,6	2	2	3	7	7	9	11	5	5	2	3	4
Место и причина отказов не установлены	52	13,4	2	2	3	5	5	8	10	4	4	2	3	4
Итого	385		19	10	20	40	47	59	65	28	30	17	25	25
Процент от общего числа		100	4,9	2,6	5,2	10,4	12,2	15,3	16,9	7,3	7,8	4,4	6,5	6,5

Как видно из табл. 1, безотказность трансформаторов, установленных в сетях 10 кВ, в основном зависит от состояния внутренней изоляции (главная, витковая), отказы из-за дефектов которой составляют 70,8% от общей повреждаемости трансформаторов, а из-за дефектов витковой – 55,2%. Пробой изоляции при внутренних перенапряжениях составляет 34,4%, при грозовых – 20,8%. Возникающие перенапряжения и воздействия окружающей среды, как правило, вызывают витковое замыкание высоковольтной обмотки, которые приводят к ухудшению изоляции обмоток относительно корпуса, что совершенно не учитывается при заводских испытаниях (табл. 2) [8, 11]. В условиях эксплуатации сказываются особенности работы трансформаторов в связи с увлажнением, а также наличием асимметрии токов по фазам.

Ослабление изоляции витка катушки вызывают дефект провода, заложенного до ввода трансформатора в эксплуатацию, деформация катушек под воздействием токов короткого замыкания, недостаточная толщина витковой изоляции при низком качестве поверхности медной жилы проводника, недопустимые электрические и тепловые воздействия, увлажнение и загрязнении изоляции.

При совместном воздействии этих факторов вероятность появления витковых замыканий возрастает под воздействием вибрации, и при некачественном проводе с течением времени также возможно появление виткового замыкания.

Витковое замыкание может возникнуть от естественного старения при длительной эксплуатации трансформатора, перегрузок, но чаще всего витковое замыкание – следствие динамических нагрузок, воспринимаемых обмоткой при коротких замыканиях со вторичной обмотки трансформатора.

Распределение отказов обмоток по месту повреждения в трансформаторах приведено в табл. 2.

Таблица 2

**Распределение отказов обмоток трансформаторов I-II габаритов**

<b>Обмотки</b>	<b>Процентное распределение отказов, %</b>
1ВН	30-64
2ВН	9-11
3ВН	20-34,4
1ВН+1НН	1,92
3ВН+1НН	4-5
3ВН+2НН	2-9,45
3ВН+3НН	16-20
1НН	0,48
3НН	0,96

На рис. 2, *а* и *б* показаны соотношения отказов обмоток ВН и НН трансформаторов в зависимости от их мощности.

Витковые замыкания в таких трансформаторах могут существовать длительное время, не нарушая нормальной работы потребителей.

Поэтому своевременная информация о витковых замыканиях и замена трансформатора на начальной стадии появления дефекта позволяют сократить время перерыва электроснабжения потребителей и затраты на ремонтные работы, т.е. способствуют обеспечению работоспособности трансформаторов, установленных в сельских электрических сетях 10 кВ.

Наиболее важными моментами при оценке состояния трансформаторов являются обоснование диагностических параметров, выбор системы диагностирования и на этой основе разработка стратегии обслуживания. Из вышеизложенного видно, что наиболее характерным дефектом для силовых трансформаторов, установленных в сельских сетях, является витковое замыкание, для которого характерным диагностическим признаком является вибрация. Для определения дефектов распространен метод вибродиагностики.

В данной статье рассмотрен вариант стратегии обслуживания силового электрооборудования для предприятия агропромышленного комплекса при проведении технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) силовых трансформаторов, подключенных к распределительным сетям 10 кВ. В настоящее время используется большое количество трансформаторов I и II габаритов в различных климатических регионах РФ. Отсутствие учета отраслевых и региональных особенностей к проведению ТО и ТР вызывает ряд негативных последствий:

- ежегодный отказ силовых трансформаторов в сельских распределительных сетях;

- значительные финансовые и материальные затраты на ремонт трансформаторов, что делает существующую систему ТО и ТР малоэффективной;
- разные подходы к проведению ТО и ТР для одних и тех же видов трансформаторов на предприятиях;
- стихийно сложившиеся пропорции между подходами к проведению ТО и ТР;
- недостаточный учет задач, решаемых технической диагностикой (контроль работоспособности (КР), поиск места и определение причины дефекта, прогнозирование изменения состояния (ПИС)), и их использование в практике современных методов и средств ремонта трансформатора.

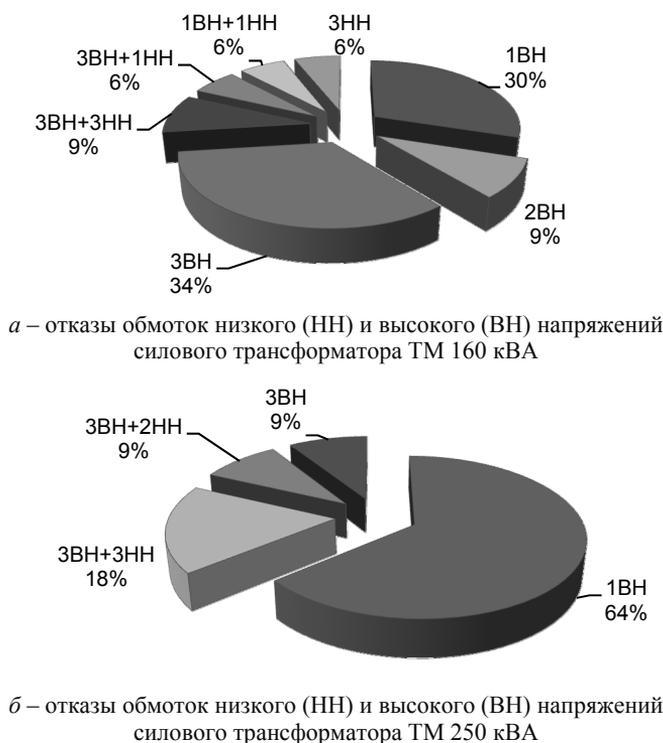


Рис. 2. Соотношение отказов обмоток ВН и НН трансформаторов в зависимости от их мощности

Вследствие этого возникла естественная необходимость разработки рациональной стратегии проведения ТО и ТР, учитывающей сложные климатические и технологические условия эксплуатации, которая бы снимала все отрицательные стороны каждого из существующих подходов стратегии обслуживания [2].

Под рациональной стратегией ТО силовых трансформаторов 10/0,4 кВ понимается общий план, содержащий следующие основные элементы:

- составление функциональной модели исследования трансформаторов с учетом региональных (климатических) особенностей эксплуатации и проведение ТО и ТР по фактическому состоянию;

- определение экономического критерия оптимальности для всех альтернативных подходов (в статье рассматриваются 3 подхода);
- оптимизация экономического критерия оптимальности альтернативных подходов и выбор управляющих воздействий на объект исследования на основе минимизации;
- реализация системы ТО и ТР силовых трансформаторов по фактическому состоянию.

Метод разработки рациональной стратегии ТО и ТР заключается в следующем [11]:

1. Определяется несколько стратегий эксплуатации силовых трансформаторов 10/0,4 кВ из числа существующих, которые объединяются в классы по общему признаку – подходу проведения ТО и ТР (эксплуатация до отказа) ( $C_1$ ); проведение ТО и ТР по временным интервалам (по графику ППР) ( $C_2$ ); проведение ТО и ТР по результатам диагностирования ( $C_3$ ).

2. Рациональная стратегия включает в себя все рассмотренные классы.

3. Составляется экономическая модель эффективности стратегии.

4. Определяется рациональная стратегия ТО и ТР.

Основой математической модели измерения эффективности стратегий является экономическое обоснование существующих подходов к проведению ТО и ТР силовых трансформаторов 10/0,4 кВ.

В настоящее время силовые трансформаторы 10/0,4 кВ эксплуатируются на основе следующих подходов: ТР после «отказа»; ТО и ТР плановый, комплексный ремонт по техническому состоянию. Рациональная стратегия ТО и ТР должна учитывать все подходы на базе сравнения численных значений минимальных суммарных затрат на эксплуатацию по различным подходам  $C_1$ - $C_3$  на основе характеристик надежности и стоимости ТО и ТР с учетом составляющих ущерба, прогнозирования состояния и обоснования дальнейшей эксплуатации отработавших свой нормативный срок.

Модель эффективности представляет собой следующее отношение:

$$M(P) = \frac{C_{iуд}}{C_{1уд}},$$

где  $C_{iуд}$ ,  $C_{1уд}$  – удельные затраты на эксплуатацию за время  $t$   $i$ -й стратегии и стратегии «после отказа», соответственно.

Задача решается путем сравнения численных значений показателей  $i$ /1 отношения суммарных затрат на эксплуатацию по различным (конкурирующим) подходам  $C_1$ , ( $C_2$ ,  $C_3$ ) к затратам, возникающим при эксплуатации силовых трансформаторов 10/0,4 кВ по стратегии  $C_1$  «до отказа». Для определения условия предпочтительности  $i$ -го и  $j$ -го подходов при эксплуатации трансформаторов определяется соотношение

$$P_{i/j} = \frac{\min C_i}{C_j},$$

где  $P_{i/j}$  – безразмерный показатель эффективности;  $\min C_i$  – минимальные затраты на эксплуатацию для  $i$ -й стратегии;  $C_j$  – затраты на эксплуатацию для  $j$ -й «нулевой» стратегии, в качестве которой целесообразно принять стратегию  $C_3$  «после отказа» ( $C_3$ ).

Рациональная стратегия ТО и ТР для силовых трансформаторов 10/0,4 кВ определяется из условия  $P_{i,j} > 1$ , где  $j > I > 1$ .

Рациональная стратегия ТО и ТР силовых трансформаторов 10/0,4 кВ может быть представлена в виде наглядной схемы, которая является основой организационной части системы обслуживания (рис. 3).

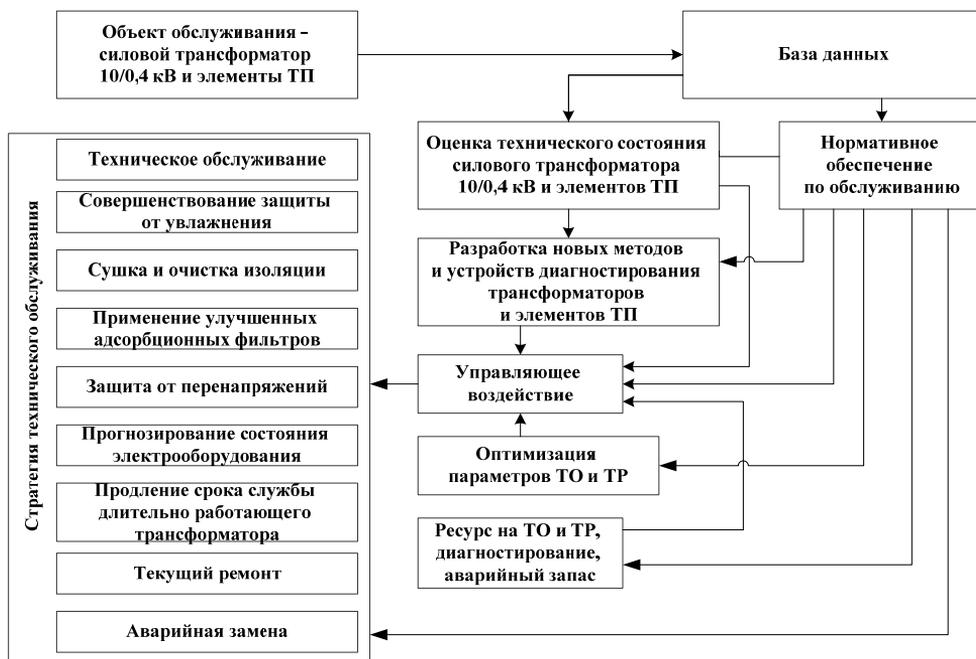


Рис. 3. Схема стратегии обслуживания трансформаторов 10/0,4 кВ сельскохозяйственного назначения по результатам диагностирования технического состояния

Рациональная стратегия обслуживания силовых трансформаторов распределительных сетей определяется из условия минимального значения  $M_d(P)$ .

На основании представленных выше выражений расчетным путем определяется эффективность стратегии  $S_3$  (по результатам диагностирования) для обслуживания силовых трансформаторов 10/0,4 кВ.

На объект осуществляется управляющее воздействие. Для выработки правильных управляющих воздействий производятся сбор, преобразование, хранение и передача информации с объекта обслуживания путем осмотра, обхода, диагностических обследований, а также информации, хранящейся в существующей базе данных. Функционирование ТО и ТР опирается на разработанную нормативную базу, которая включает в себя все необходимые справочные данные по информационному обеспечению принятой стратегии ТО и ТР силовых трансформаторов. Рассмотренная функциональная схема ТО и ТР дает научно обоснованную базу для организации обслуживания силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе разработанной рациональной стратегии ТО и ТР.

**Выводы.** 1. Анализ статистического материала оценки технического состояния силовых трансформаторов 10/0,4 кВ показывает, что ежегодный отказ составляет 7,5% от установленных.

Вследствие этого возникла естественная необходимость разработки рациональной стратегии проведения ТО и ТР, учитывающей сложные климатические и технологические условия эксплуатации.

2. На состояние силовых трансформаторов и элементов распределительных сетей существенное влияние оказывают факторы окружающей среды и эксплуатационные параметры.

Произведена оценка влияния внешних воздействующих факторов на безотказность силовых трансформаторов в распределительных сетях 10 кВ, имеющих практическое значение при обосновании мероприятий по созданию запаса для замены отказавших элементов; в период май–август количество отказов будет определяться количеством осадков, числом грозových часов, взаимодействием количества осадков и грозových часов, а также взаимодействием величины относительной влажности воздуха, количества осадков и грозových часов. Полученные закономерности позволяют в процессе эксплуатации регулировать резерв запасных элементов с учетом сезонности проявления осадков.

Наиболее важными моментами при оценке состояния электроустановок являются выбор диагностических параметров и разработка системы диагностирования применительно к оборудованию.

Рациональная стратегия обслуживания силовых трансформаторов определяется из условия минимального значения  $M_d(P)$ .

Рассмотренная функциональная схема ТО и ТР дает научно обоснованную базу для организации обслуживания силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе разработанной рациональной стратегии ТО и ТР.

Разработана рациональная стратегия обслуживания силовых трансформаторов по результатам диагностирования технического состояния, которая обеспечивает повышение работоспособности распределительных сетей с одновременным снижением затрат на ремонтно-восстановительные работы. Эту стратегию целесообразно использовать для обслуживания потребителей первой и второй категории надежности.

#### Литература

1. Котиков В.И., Рыбаков Л.М., Столяров С.В. Анализ технического состояния распределительных сетей 10-35 кВ // Методы и средства технической диагностики: сб. науч. ст. междунар. межвуз. шк.-семинара. Йошкар-Ола, 2000. Вып. XVII. С. 140–145.
2. Кустов С.С. Совершенствование системы капитальных ремонтов трансформаторов на напряжение 6-35 кВ распределительных электрических сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 173 с.
3. Макарова Н.Л., Рыбаков Л.М. Комплексная оценка состояния силовых трансформаторов // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLIX Междунар. науч.-техн. конф. / ЧГАА. Челябинск, 2010. Ч. 2. С. 335–341.
4. Макарова Н.Л., Ахметшин Р.С. Диагностирование состояния изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. 90 с.
5. Невский А. Управление активами энергетики // Энергорынок. 2006. № 10. С. 1–8.

6. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. Киев: Изд-во УХСА, 1990. 168 с.

7. Рыбаков Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ. М.: Энергоатомиздат, 2004. 422 с.

8. Рыбаков Л.М., Сошников А.Е., Соловьев Д.Г. Анализ причин аварийных отключений в распределительных сетях 10-35 кВ // Электрика. 2001. № 3. С. 16–20.

9. Рыбаков Л.М., Шумелева Е.С., Соловьев Д.Г. Анализ повреждений в распределительных сетях 10 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003. № 1. С. 25–27.

10. Рыбаков Л.М., Столяров С.В., Наумов Е.Н. Техническое состояние сетей 10 кВ // Электрика. 2002. № 2. С. 19–21.

11. Сушков В.В., Ровкина Н.Г., Зябкин А.А. Исследование причин возникновения дефектов силовых трансформаторов, питающих установки погружных электроцентробежных насосов нефтяных скважин // Омский научный вестник. 2012. № 3(113). С. 231–235.

---

**КАНЮГИН ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (kanyugin@mail.ru).

**МАКАРОВА НАДЕЖДА ЛЕОНИДОВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (eef@marsu.ru).

---

**O. KANYUGIN, N. MAKAROVA**

**MAINTENANCE STRATEGY OF POWER TRANSFORMERS  
IN RURAL ELECTRIC NETWORKS OF 10 kV ACCORDING TO RESULTS  
OF DIAGNOSTICS**

**Keywords:** power transformers, diagnostics, maintenance strategy, servise object, technical state, maintenance strategy, current maintenance, emergency stock, spire circuit, internal insulation, influencing factors.

*The analysis of statistical material of technical state evaluation of power transformers of 10/0,4 kV is made. The factors which influence on the efficiency of power equipment are defined. The results of experimental research in case of failure of power transformers 10/0,4 kV in rural electric networks are given. The classification of failure is represented according to the elements, reasons and months of the year. The results of diagnostics of long-working transformers are examined and the evaluation of the technical state is made. It is found that the vain failure is the spire circuit which can exist for a long time without influence on the electricity and increasing expenses for servise of power transformers in case of their maintenance. Non-failure operation of the internal insulation (main, spiral), failure of which is 70,8% of the part of spiral is 55,2%. The break-down of insulation in case of internal overstrain is 34,4%, in case of storm is 20,8%. The overstrains and the influence of the environment as a rule cause spire circuit of high voltage winding, which lead to worsening of windings of the relative body.*

*The strategy of transformers maintenance according to the evaluation of the technical state on the basis of the results of the diagnostics is offered. The structure of the efficient strategy of technical servise of power transformers 10/0,4 kV is defined and the plan containing the next main elements is made: functional modeling of research of the transformers according to regional (climate) peculiarities of exploration and taking Technical Servise and Technical Regulations in real condition; determination of the economic optimal criterion for all the alternative approaches (there are 3 approaches in the article); optimisation of economic optimal criterion of the alternative approaches and the choice of the controlling influence on the object under research on the basis of minimization; realization of the system of Technical Servise and Technical Regulations of the power transformers according to the real state.*

## References

1. Kotikov V.I., Rybakov L.M., Stolyarov S.V. *Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya raspreditel'nykh setei 10-35 kV* [Analysis of technical condition of distributive networks of 10-35 kV]. *Metody i sredstva tekhnicheskoi diagnostiki: sb. nauch. st. Mezhdunar. mezhvuz. shk.-seminara* [Methods and means of technical diagnostics: collection of scientific articles of the international interuniversity workshop]. Yoshkar-Ola, 2000, iss. XVII, pp. 140–145.
2. Kustov S.S. *Sovershenstvovanie sistemy kapital'nykh remontov transformatorov na napryazhenie 6-35 kv raspreditel'nykh elektricheskikh setei: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of system of capital repairs of transformers on voltage of 6-35 kV of distributive electric networks. Diss. Abstract]. Moscow, 1981, 173 p.
3. Makarova N.L., Rybakov L.M. *Kompleksnaya otsenka sostoyaniya silovykh transformatorov* [Complex assessment of a condition of power transformers]. *Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: materialy XLIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of XLIX Inr. Sci. Conf. «Achievements of science – to agro-industrial production »]. Chelyabinsk, 2010, part. 2, pp. 335–341.
4. Makarova N.L. Akhmetshin R.S. *Diagnostirovanie sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov sel'skikh elektricheskikh setei* [Diagnosing of a condition of isolation of power transformers of rural electric networks]. Moscow, 2012, 90 p.
5. Nevskii A. *Upravlenie aktivami energetiki* [Management of power assets]. *Energorynok*, 2006, no. 10, pp. 1–8.
6. Ovcharov V.V. *Ekspluatatsionnye rezhimy raboty i nepreryvnaya diagnostika elektricheskikh mashin v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve* [Operational operating modes and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production]. Kiev, 1990, 168 p.
7. Rybakov L.M. *Metody i sredstva obespecheniya rabotosposobnosti elektricheskikh raspreditel'nykh setei 10 kV* [Methods and means of ensuring of operability of electric distributive networks of 10 kV]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004, 422 p.
8. Rybakov L.M., Soshnikov A.E., Solov'ev D.G. *Analiz prichin avariinykh otklyuchenii v raspreditel'nykh setyakh 10-35 kV* [The analysis of the reasons of emergency shutdowns in distributive networks of 10-35 kV]. *Elektrika* [Electrician], 2001, № 3, pp. 16–20.
9. Rybakov L.M., Shumeleva E.S., Solov'ev D.G. *Analiz povrezhdenii v raspreditel'nykh setei 10 kV* [The analysis of damages in distributive networks of 10 kV]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva* [Mechanization and electrification of agriculture], 2003, no. 1, pp. 25–27.
10. Rybakov L.M., Stolyarov S.V., Naumov E.N. *Tekhnicheskoe sostoyanie setei 10 kV* [Technical condition of networks of 10 kV]. *Elektrika* [Electrician], 2002, no. 2, pp. 19–21.
11. Sushkov V.V., Rovkina N.G., Zyabkin A.A. *Issledovanie prichin vozniknoveniya defektov silovykh transformatorov, pitayushchikh ustanovki pogruchnykh eletkrotsentrobezhnykh nasosov neftyanykh skvazhin* [Research of the causes of defects of the power transformers feeding installations submersible the eletkrotsentrobezhnykh of pumps of oil wells]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk scientific bulletin], 2012, no. 3(113), pp. 231–235.

---

**KANYUGIN OLEG – Post-Graduate Student of Power Supply and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (kanyugin@mail.ru).**

**MAKAROVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Power Supply and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (cef@marsu.ru).**

---

**Ссылка на статью:** *Канюгин О.И., Макарова Н.Л.* Стратегия обслуживания силовых трансформаторов в сельских электрических сетях 10 кВ по результатам диагностирования // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 58–67.

УДК 621.313  
ББК 31.261.62

М.В. КИПЕРВАССЕР, Ш.Р. ГУЛАМОВ

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ГИДРОАГРЕГАТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ, ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛОМОК

*Ключевые слова:* гидротурбина, синхронный генератор, контроль электрических и механических параметров, функциональная схема, система защиты.

*Предложен метод косвенного определения неисправностей механической части гидрогенератора путем контроля электрических параметров. Разработана математическая модель турбины и синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку. Получены графики переходных процессов в момент возникновения механической поломки. Предложена система защиты гидроагрегата от механических поломок. Описана работа системы защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку.*

Одним из направлений развития альтернативной электроэнергетики является использование одиночных установок для преобразования гидравлической энергии в электрическую. Основными причинами использования таких гидроагрегатов являются: отсутствие традиционных электрических сетей в удалённых и труднодоступных районах местности, надёжность электроснабжения в случаях протяжённых сетей малой мощности, рост тарифов на электроэнергию.

Подобные одиночные гидроагрегаты после монтажа и запуска в работу, как правило, постоянно не наблюдаются и не обслуживаются квалифицированным персоналом. При этом сами установки являются достаточно сложными электротехническими комплексами, включающими в себя гидравлические и сопряжённые с ними электрические машины [2].

В этой связи обеспечение надёжной и бесперебойной работы этих агрегатов является актуальной задачей.

Известно, что для контроля и защиты от аварийных режимов механической части электротехнического комплекса, имеющего в своем составе электрическую машину, можно использовать косвенный метод, основанный на измерении электрических параметров электромашин [2].

Разработка подобных схем защиты может быть основана на предварительной оценке изменения контролируемых электрических параметров в различных аварийных ситуациях. С этой целью была составлена математическая модель электромеханического комплекса, имеющего в своем составе гидравлическую турбину малого расхода и синхронный генератор, работающий на автономную нагрузку.

В качестве среды моделирования использовался программный комплекс Matlab Simulink.

При моделировании нагрузка синхронного генератора (СГ) принималась чисто активной. Это объясняется тем, что одиночные гидроагрегаты в отда-

ленных и труднодоступных местах работают в основном на активную нагрузку, обеспечивая электропитанием системы освещения и отопления. Функциональная схема математической модели турбины и синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, содержит следующие блоки: 1 – блок задания момента гидротурбины; 2 – блок задания скачка момента, связанного с механической поломкой; 3 – блок задания тока возбуждения; стандартный блок 4 моделирования синхронного генератора; 5 – блок моделирования активной нагрузки активная нагрузка синхронного генератора; 6 – блок измерительных приборов (рис. 1) [3].

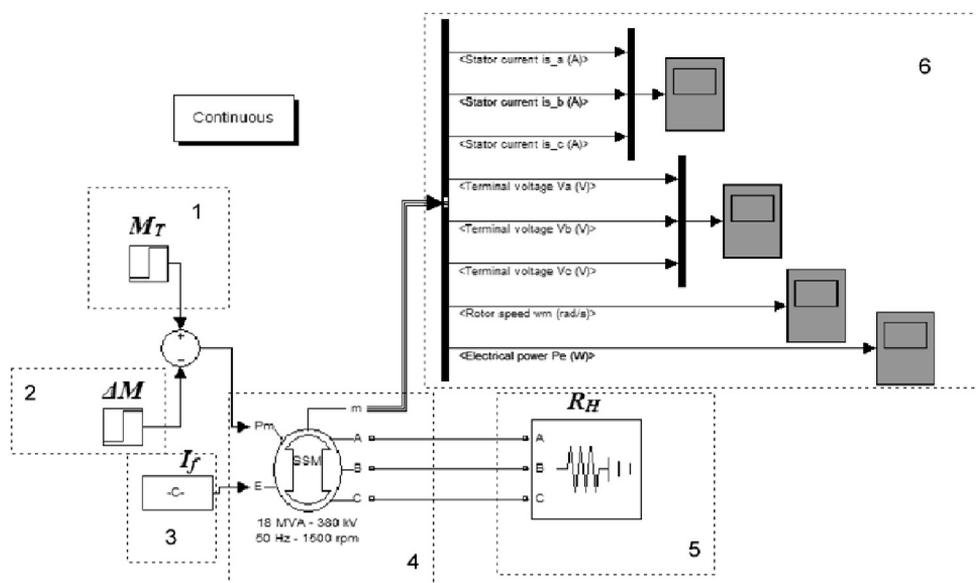


Рис. 1. Функциональная схема математической модели турбины и синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку

Моделирование производилось для синхронного генератора мощностью 15 кВт. В ходе моделирования исследовалась динамика переходных процессов электрических и механических параметров при возникновении механической поломки или попадании инородного тела в гидротурбину. Изменение механического момента при работе на автономную нагрузку задавалось как 20% от номинального момента гидротурбины. Заданное время появления аварийной ситуации 2,2 с. Аварийная ситуация моделировалась при номинальной мощности синхронного генератора, результаты моделирования приведены на рис. 2 и 3.

Анализ полученных графиков переходных процессов на рис. 2 и 3 показывает, что изменение механического момента на валу гидроагрегата, обусловленное механической поломкой или попаданием инородного тела в гидротурбину, приводит к изменению всех параметров синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку. Скорость вращения гидроагре-

гата снижается, что приводит к снижению напряжения фазных обмоток статора. В свою очередь, это приводит к уменьшению фазных токов в статорных обмотках и уменьшению вырабатываемой мощности и электромагнитного момента СГ.

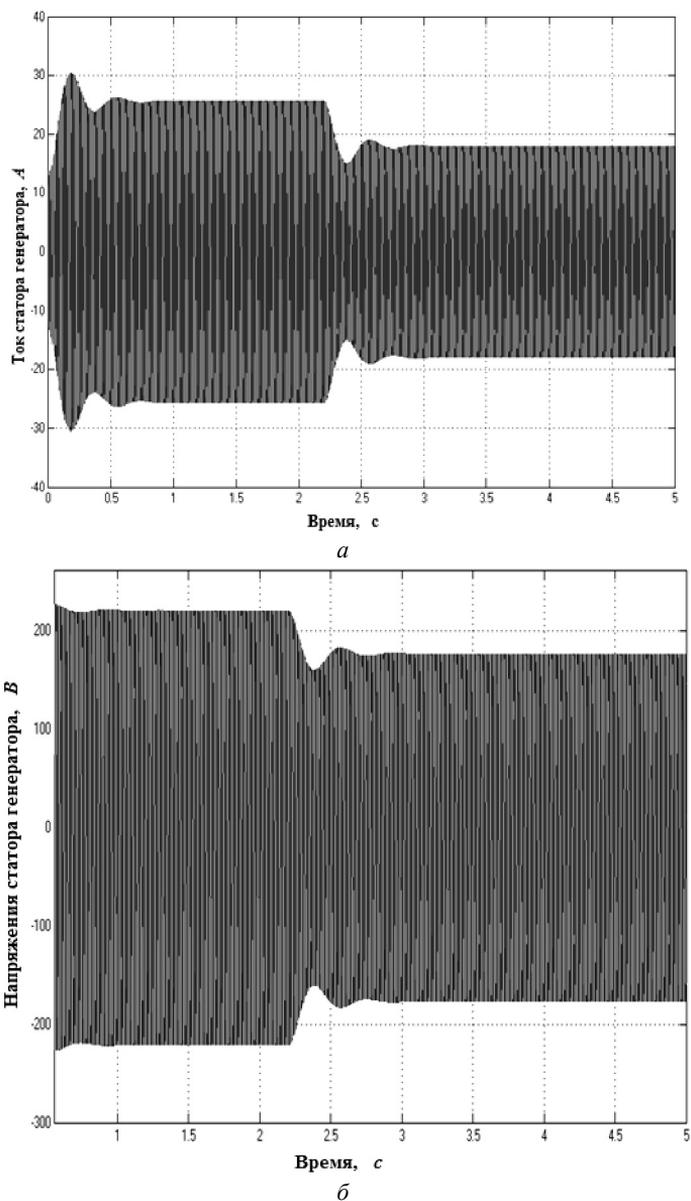


Рис. 2. Графики переходного процесса изменения трехфазного тока статора (а), напряжения на зажимах статорной обмотки (б) синхронного генератора до и после механической поломки

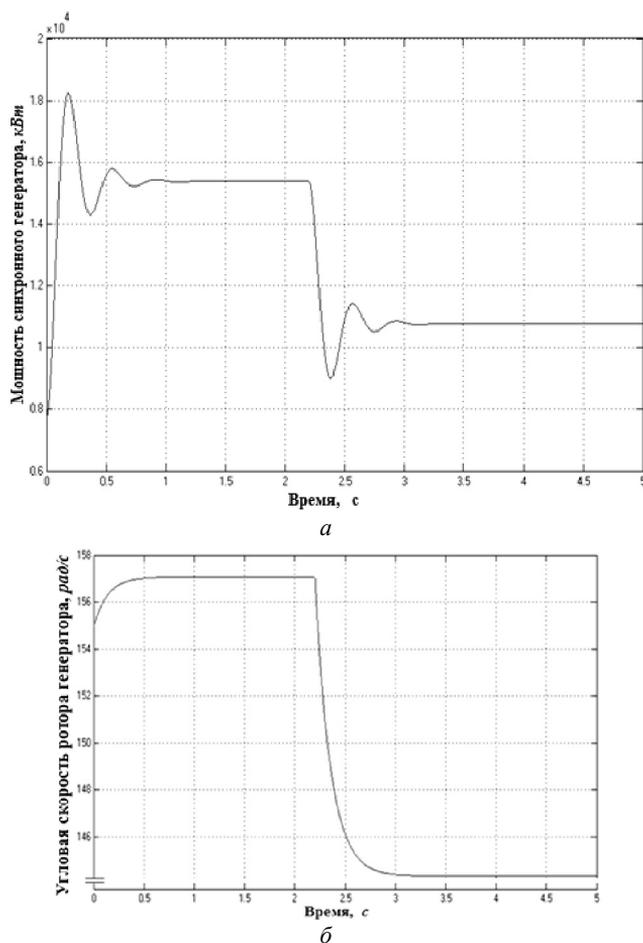


Рис. 3. Графики переходного процесса изменения вырабатываемой мощности (*a*), угловой скорости (*б*) синхронного генератора до и после механической поломки

Изменение электрических параметров синхронного генератора в момент возникновения механической поломки происходит при неизменном угле открытия задвижки в напорном водоводе. В момент механической поломки происходит изменение давления в напорном трубопроводе по причине увеличения момента сопротивления на валу гидроагрегата. Совокупность вышеуказанных изменений электрических и механических параметров можно использовать для разработки новой системы защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину гидроагрегата малой ГЭС.

Для контроля аварийных ситуаций предлагаемая система защиты использует следующие параметры гидроагрегатов: фазные токи статорной обмотки; ток обмотки возбуждения; давление и угол открытия задвижки водонапорного трубопровода. Функциональная схема системы защиты гидроагрегата малой ГЭС, работающего на автономную нагрузку, приведена на рис. 4 [1].

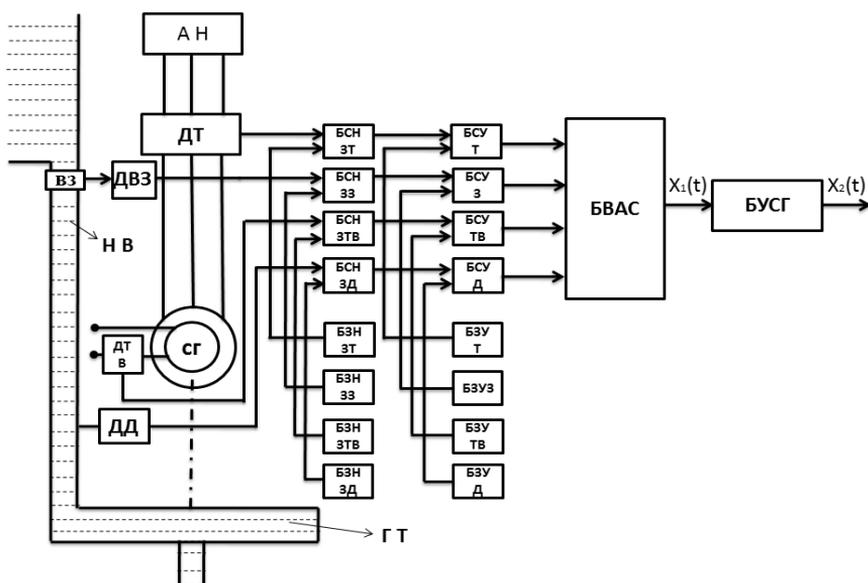


Рис. 4. Функциональная схема системы защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку

На рис. 4 приняты следующие сокращения: ВЗ – водяная задвижка в напорном водоводе; ДТ – датчик тока статора синхронного генератора; ДВЗ – датчик угла открытия водяной задвижки; ДД – датчик давления; ДТВ – датчик тока возбуждения; СГ – синхронный генератор; БЗУТ – блок задания уставки по току статора; БЗУД – блок задания уставки по давлению в напорном водоводе; БЗУЗ – блок задания уставки по углу открытия задвижки в напорном водоводе; БЗУТВ – блок задания уставки по току возбуждения; БЗНЗТ – блок задания нормального значения тока статора синхронного генератора; БЗНЗД – блок задания нормального значения давления в напорном трубопроводе; БЗНЗЗ – блок задания нормального значения угла открытия задвижки; БЗНЗТВ – блок задания нормальных значений тока возбуждения; БСНЗТ – блок сравнения с нормальными значениями тока статора; БСНЗЗ – блок сравнения с нормальными значениями по углу открытия задвижки; БСНЗД – блок сравнения с нормальным значением давления в трубопроводе; БСНЗТВ – блок сравнения с нормальными значениями тока возбуждения; БСУТ – блок сравнения с уставкой и определения знака отклонения по току статора; БСУД – блок сравнения с уставкой и определения отклонения по давлению в трубопроводе; БСУЗ – блок сравнения с уставкой и определения отклонения по углу открытия задвижки; БСУЗТВ – блок сравнения с уставкой и определения отклонения по току возбуждению; БВАС – блок выработки аварийного сигнала; БУСГ – блок управления синхронного гидроагрегата; ГТ – гидротурбина; НВ – напорный водовод; АН – автономная нагрузка.

На рис. 5 приведены временные диаграммы следующих параметров: угловой скорости гидроагрегата, тока обмотки статора, тока обмотки возбуж-

дения, давления, угла открытия задвижки в напорном водоводе, выходных сигналов блока выработки аварийного сигнала и блока управления синхронного гидроагрегата.

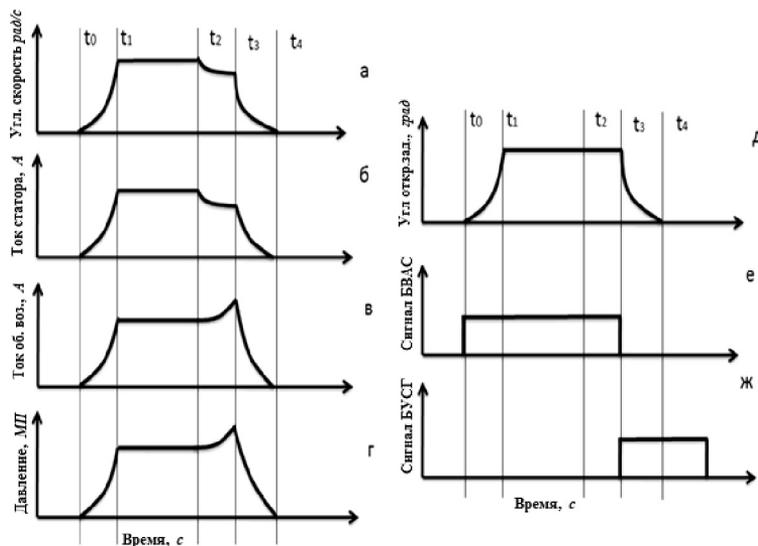


Рис. 5. Временные диаграммы циклов: угловой скорости гидроагрегата (а), тока статора (б), тока обмотки возбуждения (в), давления (г), угла открытия задвижки в напорном водоводе (д); выходного сигнала блока выработки аварийного сигнала (е); выходного сигнала блока управления синхронного гидроагрегата (ж)

Система защиты синхронного гидроагрегата от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину, работающего на автономную нагрузку, функционирует следующим образом.

Включение системы (условно принято с момента времени  $t = 0$ ) происходит по сигналу (Пуск гидротурбины), поступающему с управляющего входа схемы управления гидротурбины. Сигнал управления подается с пульта управления оператором.

На рис. 5, а приведен график изменения угловой скорости вращения гидротурбины и синхронного генератора. Весь цикл работы состоит из четырех участков:

1. Первый участок ( $t_0$  до  $t_1$ ) – участок разгона, где гидроагрегат движется с ускорением до момента  $t_1$  набора номинальной скорости вращения гидроагрегата с включенной нагрузкой.
2. Второй участок ( $t_1$  до  $t_2$ ) – установившийся режим работы гидроагрегата и синхронного генератора.
3. Третий участок (от  $t_2$  до  $t_3$ ) – режим работы при возникновении механической поломки или попадании инородного тела в гидротурбину.
4. Четвертый участок (от  $t_3$  до  $t_4$ ) – остановка синхронного гидроагрегата под нагрузкой. При остановке синхронного гидроагрегата снижается напор в

напорном водоводе, тем самым уменьшаются скорость вращения синхронного гидрогенератора и ток статора, а ток обмотки возбуждения увеличивается для поддержания постоянства напряжения статорной обмотки.

Выходы датчиков токов, давления и угла открытия задвижки являются информационными входами системы защиты синхронного гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку, от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину.

Появление аварийного сигнала обеспечивается последовательным срабатыванием девяти блоков при контроле значений тока статора, угла открытия задвижки, тока обмотки возбуждения и давления, величины отклонения. При собственном срабатывании аналоговых блоков  $5 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-5}$  полное время срабатывания устройств будет определяться в основном собственным временем срабатывания блока управления системами гидротурбины и синхронного генератора, составляющим 0,07-0,09 с, и временем срабатывания датчика давления. Время срабатывания датчика давления составляет 0,12-0,14 с, а полное время срабатывания устройства составит 0,19-0,23 с.

Таким образом, предлагаемая система защиты синхронного гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку, от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину позволяет распознать аварийную ситуацию на ранних стадиях и увеличивает быстродействие срабатывания защиты, что позволит минимизировать последствие аварии.

#### Литература

1. Пат. 2566613 РФ. (51) МПК F03B 15/00 (2006.01), H02H 7/00 (2006.01). Устройство защиты гидротурбины от выхода из строя опорного подшипника / Пугачев Е.В. Кипервассер М.В. Гуламов Ш.Р.; патентообладатель Сибирский гос. индустриальный ун-т. № 201450744/06(081372); заявл. 15.12.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.
2. Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Гуламов Ш.Р. Косвенное оценивание неисправностей механической части гидроагрегатов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 2(108). С. 122–127.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

---

**КИПЕРВАССЕР МИХАИЛ ВЕНИАМИНОВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования, Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Новокузнецк (kipervasser2012@yandex.ru).

**ГУЛАМОВ ШУХРАТ РАХМАТУЛЛОЕВИЧ** – аспирант кафедры электротехники и электрооборудования, Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Новокузнецк (Shuhrat\_83\_1@mail.ru).

---

**M. KIPERVASSER, Sh. GULAMOV  
DEVELOPING OF HYDRALIC UNIT PROTECTION SYSTEM WORKING  
ON AN AUTONOMOUS LOAD TO AVOID MECHANICAL FAILURES**

**Key words:** hydraulic turbine, synchronous generator, control of the electrical and mechanics parameters, functional scheme, protection system.

*The article suggests the method of indirect malfunction definition of the generators mechanical system via controlling the electrical parameters. The mathematical model of the turbine and synchronous generator is designed, the latter working on an autonomous load. Graphic of the main parameters during mechanical malfunction has been got. Pro-*

*tection system of the hydraulic unit from mechanical failures is proposed. The functioning of the protection system from mechanical failure or entering the external element into unit of the hydraulic turbine working on the autonomous load is shown.*

#### References

1. Pugachev E.V., Kipervasser M.V., Gulamov Sh.R. *Ustroistvo zashchity gidroturbiny ot vykhoda iz stroya opornogo podshipnika* [Device protecting the hydroturbine against failure of bearing reference]. Patent RF, no. 2566613, 2015.
2. Pugachev E.V., Kipervasser M.V., Gulamov Sh.R. *Kosvennoe otsenivanie neispravnostei mekhanicheskoi chasti gidroagregatov* [Indirect estimation of the mechanical part faults of the hydro-generators]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2015, no. 2(108), pp. 122–127.
3. Chernyh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPower Systems i Simulink* [Modeling of electrotechnical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2007, 288 p.

---

**KIPERVASSER MICHAIL** – Candidate of Technica Sciences, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk (kipervasser2012@yandex.ru).

**GULAMOV SHUHRAT** – Post-Graduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk (Shuhrat\_83\_1@mail.ru).

---

**Ссылка на статью:** Кипервассер М.В., Гуламов Ш.Р. Разработка системы защиты гидроагрегатов, работающих на автономную нагрузку, от механических поломок // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 68–75.

УДК 621.314.58

ББК 31.15

Г.В. МАЛИНИН, А.В. СЕРЕБРЯННИКОВ

## СЛЕЖЕНИЕ ЗА ТОЧКОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ\*

**Ключевые слова:** точка максимальной мощности, фотовольтаика, солнечная батарея, преобразователь постоянного напряжения, частичное затемнение, система управления.

*Известно, что недостатком фотовольтаической системы является низкая отдача мощности солнечного излучения из-за изменений условий окружающей среды. Недорогим и практичным решением для преобразования солнечной энергии является отслеживание точки максимальной мощности солнечной батареи. В работе выполнен обзор методов поиска точки максимальной мощности, основанных на возмущении фотовольтаической системы. Проведен сравнительный анализ методов, выявлены их достоинства и недостатки. Показан пример построения аналоговой системы управления преобразователем постоянного напряжения гистерезисного типа. Рассмотрена работа солнечной батареи в условиях частичного затемнения, приводящего к трудностям отслеживания глобальной точки максимальной мощности, и способы решения этой проблемы.*

Известно, что мировое потребление электроэнергии ежегодно увеличивается, и, как ожидается, дальнейший рост будет обусловлен ростом численности населения и возрастающими требованиями современного образа жизни. Увеличение спроса на электроэнергию приводит к быстрому истощению традиционных ископаемых видов топлива и обостряет проблему загрязнения окружающей среды. Поэтому существует необходимость в развитии альтернативных (возобновляемых) источников энергии для обеспечения устойчивых энергопоставок потребителю, а также для уменьшения локальных и глобальных загрязнений окружающей среды.

Солнечная энергия является одним из наиболее подходящих вариантов генерации электроэнергии, поскольку она неисчерпаема, абсолютно бесплатна (с точки зрения ее доступности) и экологически чистая. Многие страны переходят к использованию фотовольтаических (ФВ) систем выработки электрической мощности даже при высокой их себестоимости. За всю историю фотовольтаики были достигнуты большие успехи в улучшении технологии ФВ ячеек, однако общая эффективность солнечного модуля все еще остается на низком уровне. На вольт-амперной характеристике (ВАХ) солнечного модуля существует уникальная точка с координатами ( $U_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) (рис. 1), в которой ее выходная мощность достигает своего максимума. Поэтому для достижения максимальной эффективности солнечного модуля при построении ФВ системы необходимо использовать алгоритм слежения за точкой максимальной мощности (ТММ, в зарубежной литературе *MPPT – maximum power point*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 15-48-02189-р\_поволжье\_а.

*tracking*), чтобы передавать в нагрузку максимально возможную при данных условиях мощность солнечного модуля. Выполнение этой задачи осложняется нелинейной зависимостью генерируемого солнечным модулем тока от его выходного напряжения, зависимостью генерируемой мощности от солнечного излучения и температуры, проблемой частичного затенения модулей (*PS – partial shading*), входящих в состав солнечной батареи [23].

В зарубежной литературе описаны многочисленные методы МРРТ различной сложности [2, 8]. В коммерческих изделиях наиболее широко используются методы *возмущения и наблюдения* (*perturbation and observation – P&O*) и *возрастающей проводимости* (*incremental conductance – IC*) [4, 9] из-за их простых управляющих структур и удобства реализации. Для ФВ систем с низким уровнем точности отслеживания ТММ находят применение такие методы, как метод *постоянного напряжения* (*constant voltage – CV*) и *тока* [15, 18, 26], *короткого замыкания* (*short-current pulse – SC*) [19], *напряжения холостого хода* (*open circuit voltage – OC*) [16]. Эти методы требуют меньшего количества датчиков и недороги в реализации. С развитием компьютерной техники стали популярными методы поиска ТММ на основе вычислительного интеллекта (*computational intelligence – CI*) благодаря своей адаптивной природе, которые очень эффективны при работе в условиях частичного затенения солнечных модулей и быстрого изменения освещенности. Методы *CI*, как правило, делятся на методы искусственного интеллекта (*artificial intelligence – AI*) и эволюционных вычислений (*evolutionary computation – EC*).

В работе рассмотрены некоторые алгоритмы отслеживания ТММ для фотовольтаических систем с целью достижения ими оптимального КПД в широком диапазоне эксплуатационных условий.

**Традиционные алгоритмы слежения за ТММ и их вариации.** Все рассматриваемые ниже традиционные методы слежения за ТММ можно классифицировать как методы возмущения и наблюдения. Основным звеном ФВ системы, представленной на рис. 2, является преобразователь постоянного напряжения (ППН), согласующий выходное сопротивление солнечного модуля или батареи (СБ) с сопротивлением нагрузки. В результате измерения (наблюдения) параметров СБ алгоритм поиска ТММ корректирует опорное напряжение  $U_{ref}$ , являющееся задающим для формирования нового значения выходного напряжения СБ и возмущающим фотовольтаическую систему. В качестве регулятора напряжения, как правило, используется пропорционально-интегральный регулятор или регулятор гистерезисного типа. В более простых реализациях методов слежения за ТММ регулятор напряжения может быть удален из

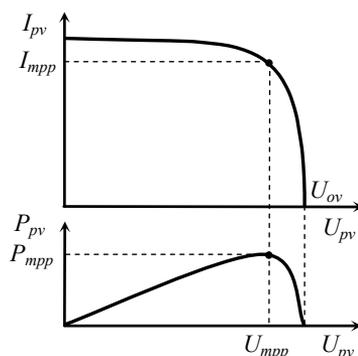


Рис. 1. Статические характеристики солнечного модуля

представленной структуры, а широтно-импульсный (ШИМ) модулятор будет формировать длительность открытого состояния силового ключа ППН по результатам работы алгоритма поиска ТММ, например, изменяя эту длительность с постоянным шагом в сторону увеличения/уменьшения.

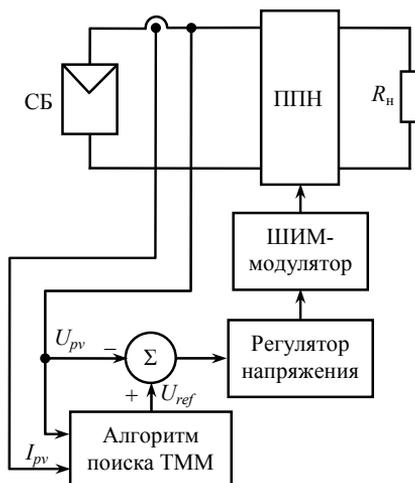


Рис. 2. Типовая структура управления для традиционных методов слежения за ТММ

При анализе эффективности того или иного метода поиска ТММ проводят сравнительный анализ генерируемой солнечным модулем мощности при одинаковых прочих условиях. В этом случае используемый ППН (понижающего или повышающего типа) должен обеспечить реализацию каждого метода без изменения силовых элементов. В работе [4] предложена схематехника повышающего ППН (рис. 3) с микроконтроллерной системой управления, позволяющей реализовать рассмотренные ниже алгоритмы.

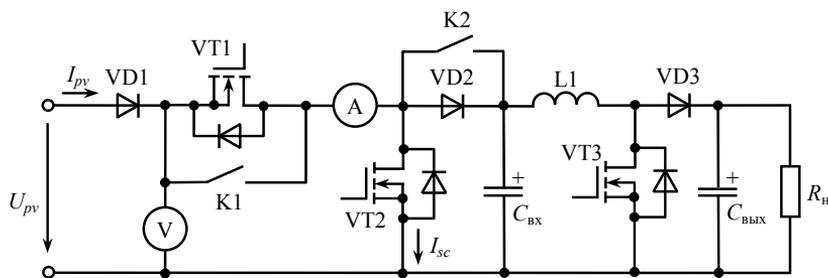


Рис. 3. Схема преобразователя постоянного напряжения

Основой схемы являются силовой транзистор VT3, диод VD3, дроссель L1 и конденсатор C<sub>вых</sub>. Диод VD1 является защитным диодом, не позволяющим току протекать из ППН в солнечный модуль. Датчики тока и напряжения солнечной панели представлены на рис. 3 амперметром и вольтметром. Остальные элементы схемы предназначены для реализации алгоритмов поиска ТММ. При реализации алгоритма *OV* посредством размыкания транзистора VT1 фиксиру-

ется напряжение холостого хода, при реализации алгоритма  $SC$  ток короткого замыкания солнечного модуля фиксируется через открытый VT2 и замкнутый ключ K1; включение диода VD2 обязательно для исключения разряда входного конденсатора  $C_{вх}$ . В ходе реализации других методов поиска ТММ транзистор VT2 остается разомкнутым, в то время как транзистор VT1 и диод VD2 коротко замкнуты через K1 и K2 для повышения КПД преобразователя.

*Метод постоянного напряжения (CV).* Алгоритм постоянного напряжения является одним из самых простых алгоритмов поиска ТММ. Рабочая точка солнечного модуля удерживается вблизи ТММ за счет регулирования выходного напряжения солнечного модуля, соответствующего оптимальному постоянному значению источника напряжения  $U_{opt}$  (рис. 4). Это напряжение устанавливается равным напряжению ТММ в соответствии с характеристиками солнечного модуля. Алгоритм предполагает, что изменения режима работы солнечного модуля, такие как температура и солнечное излучение, не являются существенными (положение ТММ варьируется в пределах лишь 2%), и постоянное напряжение  $U_{opt}$  является достаточным для достижения оптимальных характеристик солнечного модуля вблизи ТММ. По этой причине на практике алгоритм  $CV$  никогда не работает точно в ТММ при изменении условий окружающей среды. Во время инсталляции ФВ системы необходимо как можно более точно определить напряжение  $U_{opt}$ , особенно это важно при работе алгоритма с массивом солнечных модулей. В условиях низкой освещенности, как было замечено в работах [8, 24], метод постоянного напряжения более эффективен, чем методы  $P\&O$  и  $IC$ , рассматриваемые ниже, поэтому метод  $CV$  часто комбинируют с другими методами поиска ТММ.

На рис. 4  $U_{pv}(k)$  – выходное напряжение солнечного модуля на  $k$  интервале поиска ТММ;  $U_{ref}(k)$  – опорное напряжение фотовольтаической системы, задающее напряжение на выходе солнечного модуля;  $\Delta U_{ref}$  – приращение опорного напряжения.

*Метод холостого хода (OV).* Алгоритм основан на том наблюдении, что напряжение, соответствующее ТММ, всегда близко к напряжению холостого хода солнечного модуля [8]. Алгоритм  $OV$  заключается в том, что оптимальное напряжение устанавливается на уровне 76% от напряжения холостого хода  $U_{ov}$  и считается оптимальным рабочим напряжением, при котором может быть получена максимальная выходная мощность. Контроллер ТММ на этапе инсталляции ФВ системы должен определить напряжение холостого хода солнечного модуля. Это, в простейшем случае, требует кратковременного периодического размыкания выходной цепи солнечного модуля, приводящего к потере мощности. В работе [11] для слежения за напряжением холостого хода при изменении температуры предлагается использовать последовательную цепочку из полупроводниковых диодов с  $p-n$ -переходом, напряжение которой подбирается пропорциональным  $0,76U_{ov}$ . Такой подход основан на предположении, что температурная зависимость напряжения диодной цепочки аналогична зависимости для солнечного модуля. Предлагаемый способ избавляет контроллер ТММ периодически измерять напряжение холостого хода и вычислять оптимальное напряжение. Блок-схема, соответствующая методу холостого хода, изображена на рис. 5.

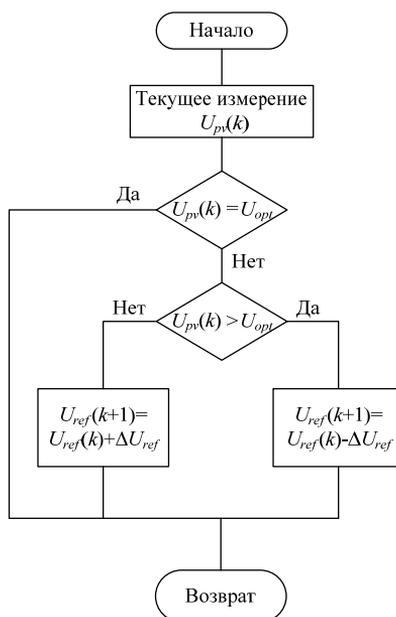


Рис. 4. Блок-схема метода постоянного напряжения (CV)

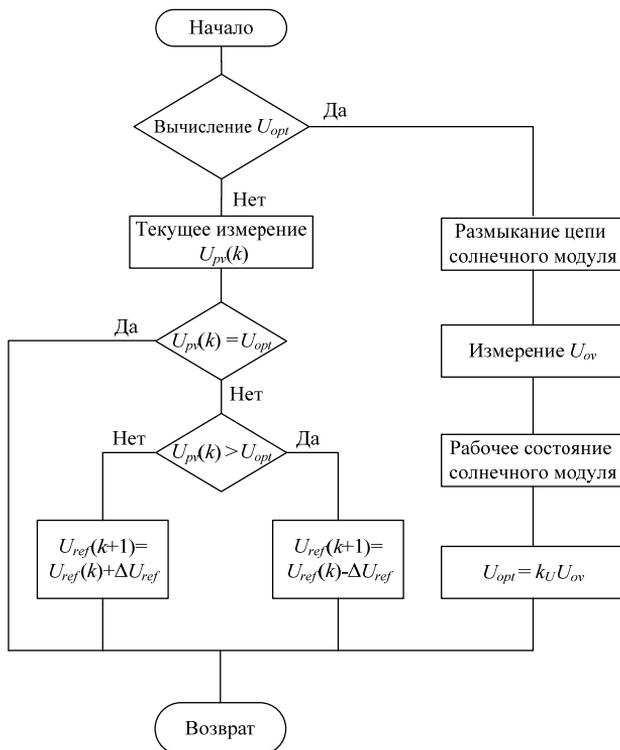


Рис. 5. Блок-схема метода холостого хода (OV)

Метод короткого замыкания (SC). В отличие от метода холостого хода в методе короткого замыкания фиксируется ток солнечного модуля. Считается, что оптимальное значение выходного тока солнечного модуля прямо пропорционально току короткого замыкания  $I_{sc}$  при различных уровнях освещенности в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Коэффициент пропорциональности  $k_I$  (рис. 6) составляет примерно 0,92 [8]. Таким образом, контроллер ТММ на этапе инсталляции ФВ должен определить ток короткого замыкания солнечного модуля. Это, в простейшем случае, требует кратковременного периодического замыкания выходной цепи солнечного модуля, приводящего к потере мощности. Как и в предыдущем способе, контроллер формирует опорное напряжение  $U_{ref}$ , соответствующее оптимальному току  $I_{opt}$  на выходе солнечного модуля.

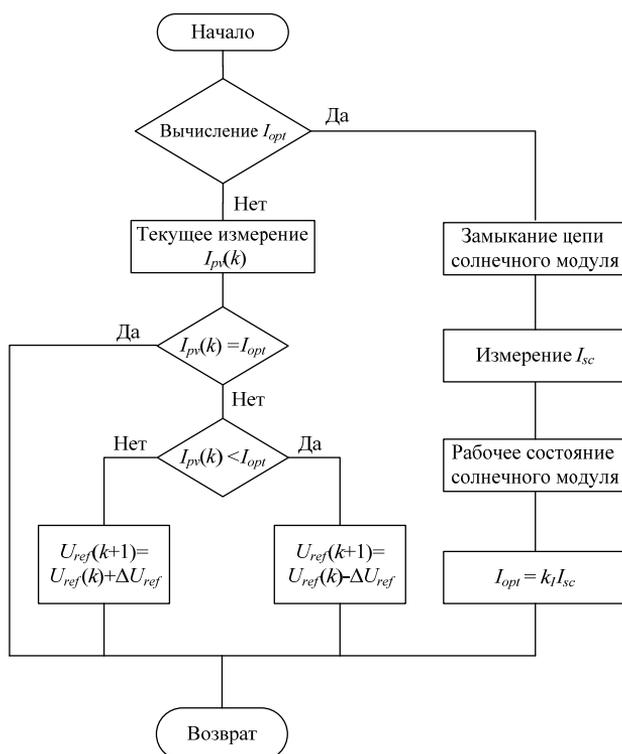


Рис. 6. Блок-схема метода короткого замыкания (SC)

Метод короткого замыкания находит широкое распространение на практике в силу его реализации средствами аналоговой схемотехники [3]. Рассмотрим пример построения системы управления силовым ключом преобразователя постоянного напряжения (рис. 2) повышающего типа, являющегося звеном постоянного тока при преобразовании солнечной энергии в энергию переменного тока [1]. Обобщенная структурная схема системы управления гистерезисного типа представлена на рис. 7, а, из которого следует, что посредством регулирования длительности открытого состояния силового ключа

ток солнечной панели  $I_{pv}$  будет следовать за оптимальным (эталонным) током  $I_{opt}$  (рис. 7, б) в пределах заданного коридора тока (точки  $A_1$  и  $A_2$ ).

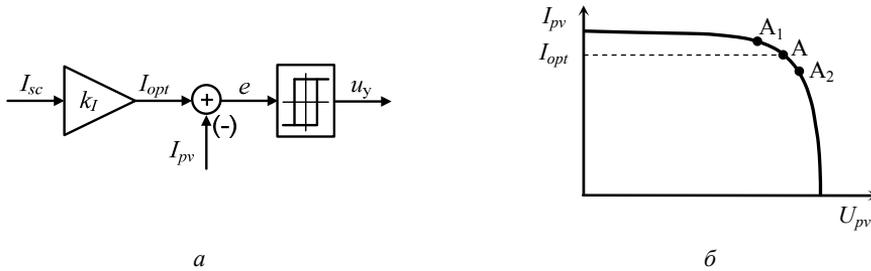


Рис. 7. Обобщенная структурная схема системы управления (а) и положения рабочей точки на ВАХ солнечного модуля (б)

Система поиска ТММ методом короткого замыкания (рис. 8) состоит из следующих блоков: датчика тока (ДТ), например LA25, для считывания тока солнечного модуля; определителя ошибки  $e$ , пропорциональной разности токов  $I_{opt} - I_{pv}$ ; регенеративного компаратора на операционном усилителе DA3, формирующем на своем выходе логический сигнал  $u_k$  для управления силовым ключом регулятора напряжения; схемы оптической развязки, построенной на микросхеме DA4, например HCPL-3101; драйвера силового ключа, например IR2112.

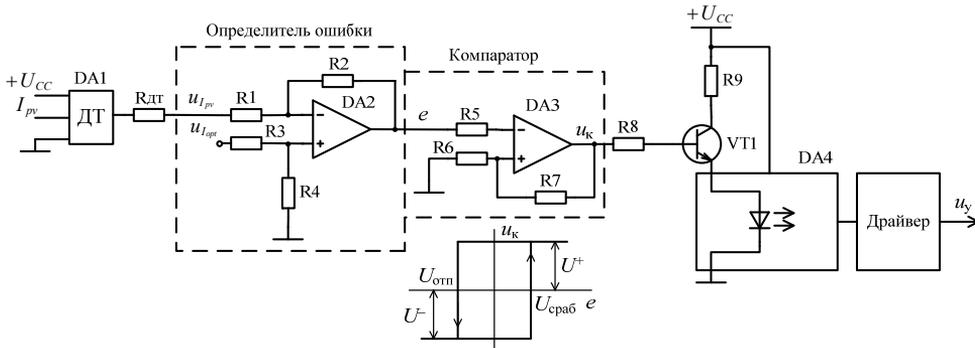


Рис. 8. Аналоговая система регулирования положения рабочей точки солнечного модуля

Принцип действия системы управления заключается в следующем. В установившемся режиме рабочая точка солнечной панели  $A$  движется между своими предельными значениями  $A_1$  и  $A_2$ . Если ток солнечной панели становится ниже тока, соответствующего точке  $A_2$ , ошибка  $e > U_{сраб} = R_6 U^+ / (R_6 + R_7)$ , на выходе компаратора формируется положительный уровень напряжения  $u_k$ , приводящий к отпиранию силового ключа регулятора напряжения и увеличению тока солнечного модуля. В случае, когда ток солнечного модуля становится больше тока, соответствующего точке  $A_1$ , ошибка  $e < U_{отп} = -R_6 U^- / (R_6 + R_7)$ , на выходе компаратора формируется отрицательный (или нулевой) уровень напряжения, приводящий к запираанию силового ключа регулятора напряжения и уменьшению тока солнечного модуля.

Алгоритм возмущения и наблюдения (*perturbation and observation – P&O*). Классический алгоритм возмущения и наблюдения [8, 17, 22] предполагает увеличение или уменьшение опорного напряжения  $U_{ref}$  фотовольтаической системы с целью возмущения системы через равные промежутки времени и дальнейшее сравнение выходной мощности солнечного модуля на  $k$  и  $k-1$  этапах работы. Если при изменении выходного напряжения солнечного модуля на  $k$ -м интервале измерения его мощность возрастает (переходы  $A_2 \rightarrow A_1$ ,  $B_2 \rightarrow B_1$  на рис. 9, а), то система управления продолжает перемещать рабочую точку солнечного модуля в этом направлении; в противном случае знак приращения опорного напряжения  $\Delta U_{ref}$  изменяется, и рабочая точка солнечного модуля перемещается в противоположном направлении. На каждом следующем этапе возмущения алгоритм (рис. 10) продолжает работать таким же образом. Основным преимуществом такого подхода является простота реализации алгоритма. На рис. 10  $U_{pv}(k)$ ,  $I_{pv}(k)$ ,  $P_{pv}(k)$  – напряжение, ток и мощность солнечного модуля на  $k$  интервале поиска ТММ;  $U_{ref}(k)$  – опорное напряжение ФВ системы, задающей напряжение на выходе солнечного модуля.

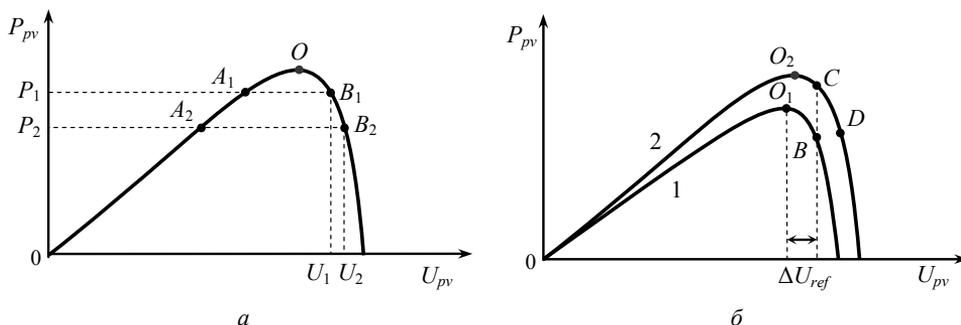


Рис. 9. Движение рабочей точки солнечного модуля в условиях постоянного (а) и переменного (б) солнечного излучения

Как было отмечено выше, регулирование мощности солнечного модуля осуществляется с применением повышающего или понижающего преобразователя постоянного напряжения. Если считать выходное напряжение преобразователя неизменным, напряжение солнечной панели будет изменяться в соответствии с известными равенствами  $U_{pv} = U_{вых}(1 - \gamma)$  для повышающего преобразователя и  $U_{pv} = U_{вых} / \gamma$  для понижающего преобразователя, где  $U_{вых}$  – выходное напряжение преобразователя напряжения, на вход которого поступает напряжение с выхода солнечного модуля  $U_{pv}$ ,  $\gamma$  – относительная длительность открытого состояния силового ключа преобразователя напряжения. При движении рабочей точки от  $A_2$  к  $A_1$  (рис. 9) напряжение солнечного модуля  $U_{pv}$  увеличивается (система управления получает положительное приращение  $\Delta U_{ref}$ ), что соответствует уменьшению  $\gamma$  (система управления получает отрицательное приращение  $\Delta \gamma$ ). И, наоборот, при движении рабочей точки к ТММ  $O$  от  $B_2$  к  $B_1$  напряжение солнечного модуля  $U_{pv}$  уменьшается (система управления получает отрицательное приращение  $\Delta U_{ref}$ ), что соответствует увеличению  $\gamma$  (система управления получает положительное приращение  $\Delta \gamma$ ).

В своей простейшей форме этот алгоритм, как правило, обладает хорошими характеристиками при условии, что солнечное излучение не изменяется слишком быстро. В установившемся состоянии рабочая точка колеблется вокруг номинального напряжения, соответствующего ТММ. Эти установившиеся колебания сильно зависят от размера шага возмущения и частоты возмущения. Частота возмущений должна быть достаточно низкой, чтобы ФВ система могла достичь установившегося состояния до следующего возмущения. Размер шага возмущения должен быть достаточным для того, чтобы на контроллер ТММ не оказывали существенного влияния помехи при генерации нового значения выходного напряжения [6, 10].

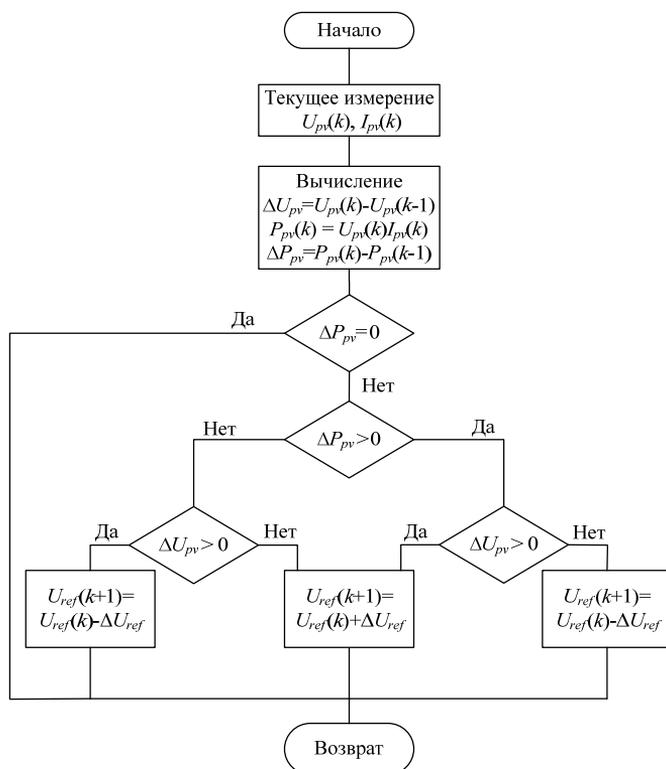


Рис. 10. Блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения (*P&O*)

Недостатком классического алгоритма *P&O* является его невысокая эффективность при низком солнечном излучении. По этой причине были предложены альтернативные решения. Например, в работе [5] алгоритм *P&O* объединен с алгоритмом постоянного напряжения (*CV*) для отслеживания ТММ с высокой эффективностью как при низких, так и при высоких уровнях солнечного излучения. Алгоритм увеличивает длительность открытого состояния силового ключа преобразователя постоянного напряжения до тех пор, пока выходное напряжение солнечного модуля не станет равным примерно 76% от напряжения холостого хода, являющегося отправной точкой для контроллера ТММ. Затем алгоритм вычисляет выходной ток солнечного модуля.

При превышении током уровня, соответствующего минимальной мощности солнечного излучения, алгоритм использует метод *P&O*; если же ток ниже, то алгоритм использует метод *CV*. Результаты моделирования [5] показывают, что эффективность отбора солнечной энергии составляет от 95% до 99% в широком диапазоне солнечного излучения.

Алгоритм *P&O* склонен к неустойчивому поведению в условиях быстрого изменения уровня освещенности, поскольку любое изменение последнего воспринимается алгоритмом как результат изменения опорного напряжения на предыдущем этапе. Это может привести к медленному или неправильному отслеживанию ТММ. Например, рис. 9, б поясняет уход алгоритма от правильного направления поиска ТММ. Пусть  $O_1$  является начальной точкой поиска. В предположении, что знак возмущения  $\Delta U_{ref}$  является положительным, новой рабочей точкой будет  $B$ . При неизменной освещенности алгоритм обнаружит уменьшение мощности солнечного модуля и изменит знак возмущения. Однако если освещенность увеличится (переход от кривой 1 к кривой 2) на  $k$ -м интервале выборки, новой рабочей точкой будет точка  $C$ , а не  $B$ . Приращение мощности солнечного модуля воспримется как результат возмущения, и направление приращения сохранится. Следовательно, новой рабочей точкой будет точка  $D$ , которая явно дальше от истинной ТММ  $O_2$ . Если наблюдается устойчивый рост освещенности, рабочая точка будет по-прежнему уходить в сторону от истинной ТММ.

Для решения указанной проблемы были предложены различные модификации алгоритма *P&O*. Например, в работе [25] предложен трехточечный метод, который сравнивает мощность солнечного модуля в контрольной точке с мощностью, измеренной до и после контрольной точки. В работе [10] для уменьшения колебаний около ТММ и снижения проблемы быстроизменяющегося солнечного излучения показано, как параметры алгоритма *P&O* (в частности, частота выборок тока и напряжения солнечного модуля) могут быть оптимизированы для динамического поведения конкретного преобразователя напряжения.

В работе [22] предложено простое и эффективное решение проблемы в слежении за ТММ в неправильном направлении – алгоритм *dP-P&O*. В этом алгоритме измерение мощности деконструировано для выявления различных источников изменения мощности солнечного модуля – в результате возмущения или изменения солнечного излучения. В алгоритме учитываются только изменения мощности, вызванные действиями со стороны контроллера ТММ по результатам выполнения его команд. Алгоритм *dP-P&O* предполагает дополнительное измерение мощности  $P_x$  солнечного модуля в точке, соответствующей середине периода выборки  $T$ , как показано на рис. 11.

Изменение мощности солнечного модуля  $\Delta P_2$  обусловлено изменением только солнечного излучения, а изменение  $\Delta P_1$  обусловлено мощностью, вызванной возмущением со стороны контроллера ТММ, и изменением солнечного излучения. В предположении, что скорость изменения солнечного излучения является величиной постоянной в пределах одной итерации опорного

напряжения (это соответствует одинаковому наклону кривых на рис. 9), приращение мощности, обусловленное действием контроллера ТММ, может быть вычислено по формуле

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = (P_x - P_{k-1}) - (P_k - P_x) = 2P_x - P_k - P_{k-1}. \quad (1)$$

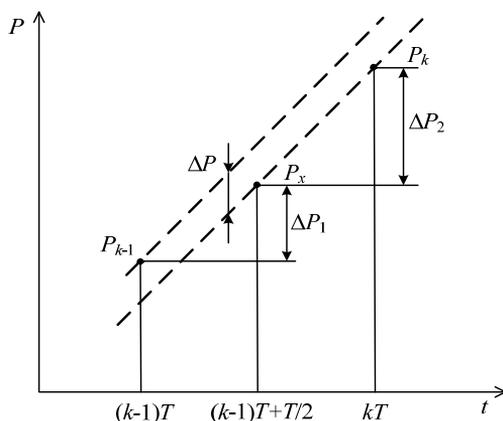


Рис. 11. Иллюстрация вычисления приращения мощности алгоритма  $dP$ -P&O

В алгоритме  $dP$ -P&O вычисление приращения мощности  $\Delta P_{pv} = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)$ , свойственное алгоритму P&O (рис. 10), заменено на вычисление приращения мощности по формуле (1). Авторы работы [22] показывают, что метод  $dP$ -P&O способен предотвратить слежение в неправильном направлении, свойственное алгоритму P&O во время быстрого изменения излучения, и сопровождается значительным увеличением скорости слежения.

*Алгоритм возрастающей проводимости (IC).* Известно, что в точке максимальной мощности выполняется равенство

$$\frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} = \frac{d(U_{pv}I_{pv})}{dU_{pv}} = I_{pv} + U_{pv} \frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = 0,$$

которое может быть преобразовано к виду

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} + \frac{I_{pv}}{U_{pv}} = 0, \quad (2)$$

где  $I_{pv}$  и  $U_{pv}$  – ток и напряжение солнечного модуля;  $I_{pv}/U_{pv}$  – проводимость солнечного модуля;  $dI_{pv}/dU_{pv}$  – инкрементная (возрастающая) проводимость. Выполнение условия (2) при отсутствии изменения тока солнечного модуля ( $dI_{pv}=0$ ), вызванное изменением интенсивности солнечного излучения, позволяет системе управления поддерживать найденное таким образом номинальное напряжение солнечного модуля без дополнительного возмущения.

Алгоритм на  $k$ -м интервале работы начинается с измерения текущих значений тока  $I_{pv}(k)$  и напряжения  $U_{pv}(k)$  солнечного модуля (рис. 12). Затем с использованием соответствующих значений, полученных на  $k-1$  интервале работы, вычисляются приращения тока  $\Delta I_{pv}$  и напряжения  $\Delta U_{pv}$ . Основным является проверка выполнения равенства (2), по результатам которой будет



$$\left| \frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} + \frac{I_{pv}}{U_{pv}} \right| \leq \varepsilon.$$

Значение ошибки  $\varepsilon$  определяется из компромисса между нахождением ТММ «точь-в-точь» и перспективой колебаний рабочей точки вокруг ТММ.

Таким образом, как и в алгоритме *P&O*, для перемещения рабочей точки по вольт-амперной характеристике солнечного модуля требуется периодическое возмущение управляющей переменной (в данном случае опорного напряжения). Однако непрерывная проверка условия (2) позволяет определить положение рабочей точки относительно ТММ. Это, в свою очередь, исключает начальную регулировку опорного напряжения в неправильном направлении, что имеет место в алгоритме *P&O*, работающем по принципу «проб и ошибок». Рассмотренному алгоритму *IC* свойственны быстрая и корректная система реагирования на изменяющиеся условия работы солнечного модуля, более точное отслеживание ТММ и меньшие колебания вокруг нее по сравнению с алгоритмом *P&O* [7, 21]. Однако алгоритму *IC* присущ недостаток, заключающийся в нестабильности, которая может появиться из-за использования операции дифференцирования в алгоритме. Также следует отметить, что при низких уровнях солнечного излучения операция дифференциация сложна и склонна к измерению шума, поэтому результаты поиска ТММ могут быть неудовлетворительными.

В общем, алгоритм *IC* при слежении за ТММ использует фиксированный размер шага итерации  $\Delta U_{ref}$ , который определяется требованиями точности и скорости слежения. В работе [14] предложен модифицированный алгоритм *IC* с переменным размером шага. Такой подход автоматически регулирует размер шага при движении к рабочей точке солнечного модуля. Когда рабочая точка считается расположенной далеко от ТММ, модифицированный алгоритм увеличивает размер шага для быстрого приближения рабочей точки к ТММ, и наоборот, когда рабочая точка находится вблизи ТММ, размер шага уменьшается. Путем варьирования размера шага повышаются точность и скорость алгоритма. Модель малого сигнала подтверждает стабильность системы практически во всех случаях [14].

**Работа солнечной батареи в условиях частичного затенения.** Для получения желаемого напряжения и тока солнечные модули включаются последовательно и параллельно, образуя СБ. Для предотвращения обратного тока через параллельный модуль (или цепь последовательно соединенных модулей) включают блокирующий диод  $VD_{\text{бл}}$  [12] (рис. 13). При неодинаковых условиях освещенности солнечных модулей (модуль PV2 на рис. 13 частично затенен) такие диоды блокируют обратный ток через слабоосвещенный модуль (заштрихованные участки на рис. 14), тем самым предотвращая уменьшение результирующего тока  $I_0$  через нагрузку.

На рис. 14 показаны характеристики двух параллельно включенных солнечных модулей (а) с блокирующими диодами (сплошная линия) и без них (пунктирная линия), а также зависимости мощности солнечной батареи от напряжения (б). Включение блокирующих диодов позволяет увеличить напряжение холостого хода СБ и ее выходную мощность  $P_0$ .

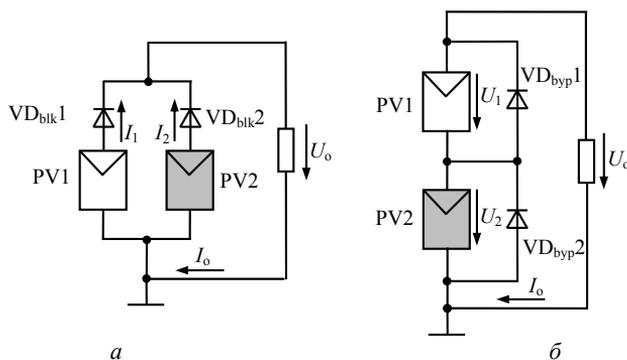


Рис. 13. Солнечные батареи

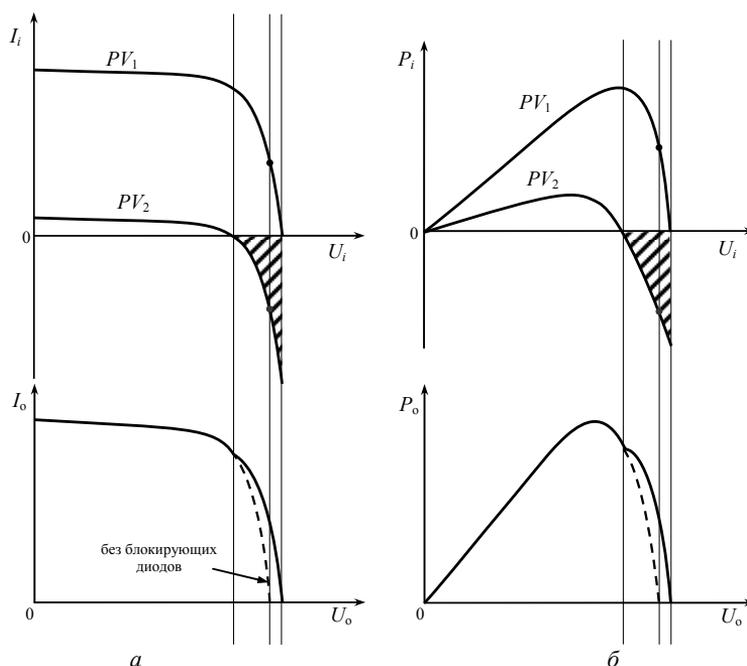


Рис. 14. Характеристики солнечных модулей, соединённых параллельно: вольт-амперная характеристика (а), зависимость мощности от напряжения (б)

При последовательном соединении солнечных модулей параллельно каждому модулю на практике включают обходной диод  $VD_{бyp}$  [12] (рис. 13, б). Назначение обходного диода – создание цепи протекания тока в обход солнечного модуля, находящегося при худших условиях освещенности. На рис. 15 показаны характеристики солнечных модулей (а), соединенных последовательно, и результирующая ВАХ СБ (б). В случае если ток нагрузки  $I_0$  превышает ток короткого замыкания последовательно включенного солнечного модуля, выходное напряжение этого модуля становится отрицательным, позволяя включиться соответствующему параллельно подключенному обходному диоду. Последнее обстоятельство увеличивает генерируемую СБ мощность.

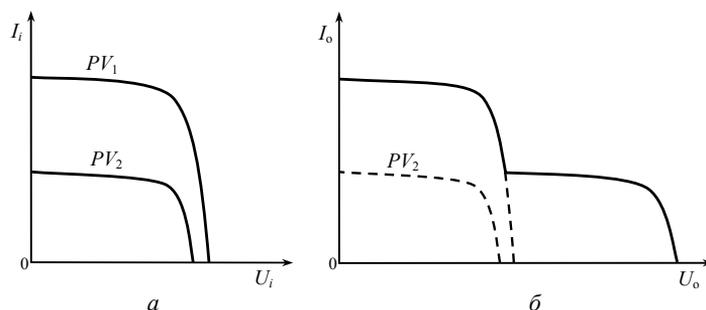


Рис. 15. ВАХ солнечных модулей, соединённых последовательно

Из приведенных рассуждений понятно, что характеристики СБ, модули которой находятся в разных условиях освещенности, при включении блокирующих и обходных диодов могут быть весьма разнообразны с многочисленными локальными ТММ. В условиях неодинаковой освещенности модулей вышеприведенные алгоритмы поиска ТММ, основанные на возмущении и наблюдении, могут давать неверные результаты поиска глобальной ТММ, «оседавая» на локальных максимумах.

**Выводы.** 1. Контроллеры ТММ играют важную роль в ФВ системах, нагрузкой которых является либо аккумуляторная батарея, либо промышленная сеть. При построении автономных безаккумуляторных систем необходимость в отслеживании ТММ отсутствует.

2. Слежение за ТММ осуществляется с помощью импульсного преобразователя постоянного напряжения с аналоговой или цифровой системой управления, позволяющей реализовать рассмотренные в работе алгоритмы.

3. Обзор алгоритмов поиска ТММ показывает, что традиционные алгоритмы обладают такими недостатками, как пульсации вокруг ТММ, ошибки в отслеживании ТММ при резких изменениях условий окружающей среды. Поэтому на практике применяют модификации традиционных алгоритмов.

4. При работе СБ возникает проблема частичного затенения солнечных модулей, приводящая к появлению локальных максимумов на характеристике  $P_{pv}(U_{pv})$  и осложняющая поиск глобальной ТММ с использованием традиционных алгоритмов.

#### Литература

1. Малинин Г.В., Белов Г.А. Системы управления преобразователями для солнечных модулей на базе инверторов с ШИМ // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 68–80.
2. Babaa S., Armstrong M., Pickert V. Overview of maximum power point tracking control methods for PV systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 2, pp. 59–72. doi: 10.4236/jpee.2014.28006.
3. Djeghloud H., Guellout O., Larakeb M., Bouteldja O., Boukebbous S., Bentounsi A. Practical study of a laboratory undersized grid-connected PV system. *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA)*, 2014, pp. 618–623. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873863.
4. Dolara A., Faranda R., Leva S. Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems. *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, no. 3, pp. 152–162. doi: 10.4236/jemaa.2009.13024.
5. Dorofte C., Borup U., Blaabjerg F. A Combined two-method MPPT control scheme for grid-connected photovoltaic systems. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Dresden, 2005, pp. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219714.

6. Elgendy M.A., Zahawi B., Atkinson D.J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, 2012, pp. 21–33. doi: 10.1109/TSTE.2011.2168245.
7. Esram T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, 2007, pp. 439–449. doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
8. Faranda R., Leva S. Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 3, iss. 6, 2008, pp. 447–455.
9. Femia N., Granozio D., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Optimized one-cycle control in photovoltaic grid connected applications. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2006, vol. 42, iss. 3, pp. 954–972. doi: 10.1109/TAES.2006.248205.
10. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973. doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.
11. Kobayashi K., Matsuo H., Sekine Y. A novel optimum operating point tracker of the solar cell power supply system. *Power Electronics Specialists Conference, PESC 04, 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 2147–2151. doi: 10.1109/PESC.2004.1355451.
12. Kota K., Hirota K. A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 241–244. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168615.
13. Koutroulis E., Blaabjerg F. A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 184–190. doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578.
14. Lee J.H., Bae H., Cho B.H. Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2006*, 2006, pp. 603–607. doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778466.
15. Leedy AW, Liping G, Aganah K.A. A constant voltage MPPT method for a solar powered boost converter with DC motor load. *Proceedings of IEEE, Southeastcon*, 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/SECon.2012.6196885.
16. Lopez-Lapena O, Penella M.T. Low-power FOCV MPPT controller with automatic adjustment of the sample&hold. *Electronics Letters*, 2012, vol. 48, iss. 20, pp. 1301–1303. doi: 10.1049/el.2012.1345.
17. Narendiran S. Grid tie inverter and MPPT – a review. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2013, pp. 564–567. doi: 10.1109/ICCPCT.2013.6529017.
18. Pandey A., Dasgupta N., Mukerjee A.K. A simple single-sensor MPPT solution. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 698–700. doi: 10.1109/TPEL.2007.892346.
19. Park M., Yu I.K. A study on optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell. *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE*, 2004, vol. 3, pp. 2040–2045. doi: 10.1109/IECON.2004.1432110.
20. Patel H, Agarwal V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008; vol. 55, iss. 4, pp. 1689–1698. doi: 10.1109/TIE.2008.917118.
21. Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells 90*, 2005, pp. 1555–1578. doi:10.1016/j.solmat.2005.10.023.
22. Sera D, Kerekes T., Teodorescu R., Blaabjerg F. Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, 2006, pp. 1420–1425. doi: 10.1109/ISIE.2006.295680.
23. Tajuddin M.F.N., Arif M.S., Ayob S.M., Salam Z. Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, iss. 12, pp. 1153–1178. doi: 10.1002/er.3289.
24. Tse K.K., Chung H.S.H., Hui S.Y.R., Ho M.T. A Novel maximum power point tracking technique for PV panels. *IEEE 32<sup>nd</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001*, 2001, vol. 4, pp. 1970–1975. doi: 10.1109/PESC.2001.954410.
25. Ying-Tung H, China-Hong C. Maximum power tracking for photovoltaic power system. *37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2002, vol. 2, pp. 1035–1040. doi: 10.1109/IAS.2002.1042685.

26. Yuansheng X, Suxiang Q, Jianming X. Research on constant voltage with incremental conductance MPPT method. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific*, 2012, pp. 1–4. doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307155.

**МАЛИНИН ГРИГОРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (malgrig6@mail.ru).

**СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (alex-silver@mail.ru).

G. MALININ, A. SEREBRYANNIKOV

### MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PV ARRAY

**Key words:** maximum power point (MPP), photovoltaic (PV), PV array, DC-DC converter, partial shading, control system.

The PV system is popularly known to suffer from low-energy harvesting due to the change of environment conditions. An inexpensive and practical solution to extract the energy from the PV array is improving the maximum power point tracking (MPPT) technique. This paper presents a review of the MPPT techniques based on the perturbative photovoltaic system. The comparative analysis of methods to determine their strengths and weaknesses is made. There is an example of control analog circuit by DC-DC converter of hysteresis method. Solar array work under partial shading results in difficulties to track a global MPP and ways to solve this problem.

#### References

1. Malinin G.V., Belov G.A. *Sistemy upravleniya preobrazovatelyami dlya solnechnykh modulei na baze invertorov s ShIM* [Converters control system for solar modules based on PWM inverter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 68–80.
2. Babaa S., Armstrong M., Pickert V. Overview of maximum power point tracking control methods for PV systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 2, pp. 59–72. doi: 10.4236/jpee.2014.28006.
3. Djeghloud H., Guellout O., Larakeb M., Bouteldja O., Boukebbous S., Bentounsi A. Practical study of a laboratory undersized grid-connected PV system. *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA)*, 2014, pp. 618–623. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873863.
4. Dolara A., Faranda R., Leva S. Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems. *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, no. 3, pp. 152–162. doi: 10.4236/jemaa.2009.13024.
5. Dorofte C., Borup U., Blaabjerg F. A Combined two-method MPPT control scheme for grid-connected photovoltaic systems. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Dresden, 2005, pp. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219714.
6. Elgendy M.A., Zahawi B., Atkinson D.J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, 2012, pp. 21–33. doi: 10.1109/TSTE.2011.2168245.
7. Esram T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, 2007, pp. 439–449. doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
8. Faranda R., Leva S. Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 3, iss. 6, 2008, pp. 447–455.
9. Femia N., Granozio D., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Optimized one-cycle control in photovoltaic grid connected applications. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2006, vol. 42, iss. 3, pp. 954–972. doi: 10.1109/TAES.2006.248205.
10. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973. doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.

11. Kobayashi K., Matsuo H., Sekine Y. A novel optimum operating point tracker of the solar cell power supply system. *Power Electronics Specialists Conference, PESC 04, 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 2147–2151. doi: 10.1109/PESC.2004.1355451.
12. Kota K., Hirota K. A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 241–244. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168615.
13. Koutroulis E., Blaabjerg F. A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 184–190. doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578.
14. Lee J.H., Bae H., Cho B.H. Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2006*, 2006, pp. 603–607. doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778466.
15. Leedy AW, Liping G, Aganah K.A. A constant voltage MPPT method for a solar powered boost converter with DC motor load. *Proceedings of IEEE, Southeastcon*, 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/SECon.2012.6196885.
16. Lopez-Lapena O, Penella M.T. Low-power FOCV MPPT controller with automatic adjustment of the sample&hold. *Electronics Letters*, 2012, vol. 48, iss. 20, pp. 1301–1303. doi: 10.1049/el.2012.1345.
17. Narendiran S. Grid tie inverter and MPPT – a review. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2013, pp. 564–567. doi: 10.1109/ICCPCT.2013.6529017.
18. Pandey A., Dasgupta N., Mukerjee A.K. A simple single-sensor MPPT solution. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 698–700. doi: 10.1109/TPEL.2007.892346.
19. Park M., Yu I.K. A study on optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell. *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE, 2004*, vol. 3, pp. 2040–2045. doi: 10.1109/IECON.2004.1432110.
20. Patel H, Agarwal V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008; vol. 55, iss. 4, pp. 1689–1698. doi: 10.1109/TIE.2008.917118.
21. Salas V., Olias V., Barrado A., Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells 90*, 2005, pp. 1555–1578. doi:10.1016/j.solmat.2005.10.023.
22. Sera D, Kerekes T., Teodorescu R., Blaabjerg F. Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, 2006, pp. 1420–1425. doi: 10.1109/ISIE.2006.295680.
23. Tajuddin M.F.N., Arif M.S., Ayob S.M., Salam Z. Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, iss. 12, pp. 1153–1178. doi: 10.1002/er.3289.
24. Tse K.K., Chung H.S.H., Hui S.Y.R., Ho M.T. A Novel maximum power point tracking technique for PV panels. *IEEE 32<sup>nd</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001*, 2001, vol. 4, pp. 1970–1975. doi: 10.1109/PESC.2001.954410.
25. Ying-Tung H, China-Hong C. Maximum power tracking for photovoltaic power system. *37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2002, vol. 2, pp. 1035–1040. doi: 10.1109/IAS.2002.1042685.
26. Yuansheng X, Suxiang Q, Jianming X. Research on constant voltage with incremental conductance MPPT method. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific*, 2012, pp. 1–4. doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307155.

---

**MALININ GRIGORIY – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**SEREBRYANNIKOV ALEKSANDR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

Ссылка на статью: Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 76–93.

УДК 621.318.3

ББК 3264.36

О.А. НИКИТИНА

**СИНТЕЗ МИНИМИЗИРОВАННОГО ПО ВЫСОТЕ  
ФОРСИРОВАННОГО БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА  
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВНЕДРЯЮЩИМСЯ ЯКОРЕМ  
В СХЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ С БАЛЛАСТНЫМ РЕЗИСТОРОМ\***

*Ключевые слова:* синтез, форсированное управление, высота электромагнита, оптимизация.

*С целью получения математических расчетных выражений основных геометрических размеров форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения, управляемого по схеме с балластным резистором, проведен вычислительный эксперимент с использованием разработанной программы, реализующей алгоритм параметрического синтеза оптимизированного электромагнита. Эксперимент проведен методами теории планирования, результаты которого представлены в соответствии с теорией подобия в безразмерном относительном виде. В качестве базисного размера электромагнита принят диаметр его якоря. Проанализировано влияние исходных данных проектирования (критическое значение рабочего воздушного зазора; соответствующее ему противодействующее усилие; температура окружающей среды; допустимая температура нагрева обмотки). Установлено, что минимальная высота электромагнита зависит от оптимальных значений высоты обмотки и диаметра якоря.*

Броневые электромагниты с внедряющимся якорем (рис. 1, а) нашли широкое применение в системах автоматики, управления, в том числе в автономных объектах [4, 8, 10 и др.], к которым предъявляются повышенные требования по массогабаритным, компоновочным показателям, потребляемой мощности. Реализация этих противоречивых условий возможна при форсированном управлении обмотками таких электромагнитов [1 и др.] и выбором оптимальных его размеров [3, 4, 10 и др.]. Отметим, что зарубежные фирмы [2, 5 и др.] разрабатывают электронные схемы интеллектуального управления приводными электромагнитами контакторов. Они построены [1, 2, 5 и др.] на принципе широтно-импульсной модуляции напряжения питания.

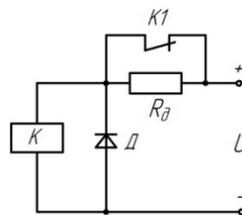
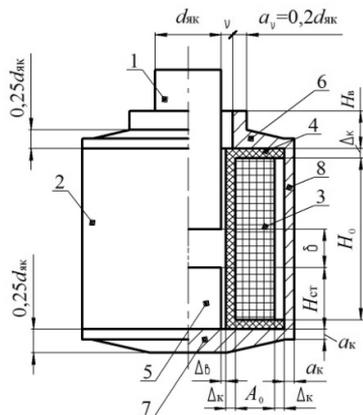
Оптимизация по критерию «высота» ( $H$ ) электромагнита (рисунок, а) выполнена в соответствии с уравнением:

$$H = H_0 + 2\Delta_k + H_B + 0,5d_{як}. \quad (1)$$

Основу оптимизационной методики синтеза составила методика проектного расчета форсированного втяжного электромагнита [7], управляемого по схеме (рисунок, б) с балластным резистором. Возможности указанной методики расширены путем обеспечения двукратного сканирования [6] факторного пространства относительных размеров электромагнита:  $1,8 \leq H^* = H_0 / d_{як} \leq 3,8$ ;  $0,28 \leq A^* = A_0 / d_{як} \leq 0,92$ ;  $0,02 \leq H_{ст}^* = H_{ст} / H_0 \leq 0,48$ ;  $0,21 \leq H_B^* = H_B / d_{як} \leq 0,49$ . Неизменными поддерживались:  $\Delta^* = \Delta_k / d_{як}$ ;  $v^* = v / d_{як} = 0,012$ .

\* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 2014/256 от 19.03.2014 г. «Синтез оптимальных ресурсо-энергосберегающих приводов электрических аппаратов».

С целью математического описания результатов оптимизационных расчетов проведен вычислительный эксперимент над разработанной и кратко описанной выше методикой синтеза с использованием методологии активного эксперимента [9].



К – обмотка;  
 К1 – контакт форсировочный;  
 R<sub>д</sub> – добавочный резистор, шунтируемый в период включения;  
 Д – диод.

а

б

Эскиз магнитной системы бронированного электромагнита (а) и схема управления им (б):  
 1 – яркорь; 2 – магнитопровод (с внешним воротничком); 3 – обмотка;  
 4 – каркас катушки; 5 – стоп; 6 – проходной фланец; 7 – опорный фланец; 8 – корпус

Получены:

$$\delta^* = \frac{\delta_{кр}}{d_{як.опт}} = 10^{-4} (56,84 + 6,79z_1 - 3,42z_2 - 1,25z_3 - 1,69z_4 + 1,03z_5 + 1,48z_7 + 0,83z_8 + 1,35z_2^2); \quad (2)$$

$$H_* = \frac{H_0 \text{ опт}}{d_{як \text{ опт}}} = 1,80; \quad (3)$$

$$A_* = \frac{A_0 \text{ опт}}{d_{як \text{ опт}}} = 0,92; \quad (4)$$

$$H_{ст*} = \frac{H_{ст \text{ опт}}}{H_0 \text{ опт}} = 10^{-2} (45,4 + 1,14z_2); \quad (5)$$

$$H_{в*} = \frac{H_{в \text{ опт}}}{d_{як \text{ опт}}} = 10^{-2} (32,3 + 0,66z_2 + 0,64z_4); \quad (6)$$

где

$$z_1 = 0,51\delta_{кр} - 4,082; \quad 4 \text{ мм} \leq \delta_{кр} \leq 12 \text{ мм};$$

$$z_2 = 0,1573P_{мх.кр} - 2,36; \quad 2 \text{ Н} \leq P_{мх.кр} \leq 28 \text{ Н};$$

$$z_3 = 1,364P_{мх*} - 5,457; \quad 2,5 \leq P_{мх*} = P_{мх.к}/P_{мх.кр} \leq 5,5;$$

$$z_4 = 0,0682T_0 - 3,749; \quad 25^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 85^\circ\text{C};$$

$$z_5 = 0,1\Theta_{доп} - 13,5; \quad 115^\circ\text{C} \leq \Theta_{доп} \leq 155^\circ\text{C};$$

$$z_7 = 20,45k - 9,2025; \quad 0,35 \leq k \leq 0,55;$$

$$z_8 = 20K_3 - 9; \quad 0,348 \leq K_3 \leq 0,552.$$

Использованные выше буквенные обозначения расшифрованы в публикации [7].

Для расчета оптимальных геометрических соотношений в проектируемом электромагните необходимо определить  $z_i$ . Затем последовательно на основании выражений (2)–(6) определить  $d_{\text{як. опт}}$ ,  $A_{0 \text{ опт}}$ ,  $H_{\text{ст опт}}$ ,  $H_{\text{в опт}}$  и  $\Delta_{\text{к опт}}$ ,  $V_{\text{опт}}$ .

Результаты оптимизационных расчетов основных размеров броневое электромагнита с втяжным якорем при фиксированных  $P_{\text{мх кр}} / P_{\text{мх кр}} = 4$ ;  $k_{\text{max}} = 1,5$ ;  $k = 0,45$ ;  $K_3 = 0,5$  приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

**Расчетные оптимальные значения диаметра якоря ( $d_{\text{як. опт}}$ ),  
минимизирующие высоту форсированного броневое электромагнита  
в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м**

$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх кр}}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	12,72	15,12	16,36	16,93	17,10
		8,5 (Н)	17,12	19,64	20,68	20,93	20,75
		15 (Н)	21,20	23,66	24,38	24,25	23,71
		21,5 (Н)	23,40	25,75	26,26	25,91	25,71
		28 (Н)	22,59	24,98	25,57	25,31	24,64
	70	2 (Н)	14,45	16,92	18,11	18,56	18,60
		8,5 (Н)	19,85	22,35	23,19	23,19	22,77
		15 (Н)	25,03	27,28	27,61	27,09	26,20
		21,5 (Н)	27,86	29,88	29,88	29,06	27,89
		28 (Н)	26,81	28,92	29,05	28,34	27,28
155	40	2 (Н)	11,04	13,32	14,59	15,25	15,53
		8,5 (Н)	14,53	17,01	18,19	18,64	18,67
		15 (Н)	17,69	20,22	21,22	21,42	21,19
		21,5 (Н)	19,35	21,86	22,74	22,79	22,41
		28 (Н)	18,74	21,26	22,18	22,29	21,97
	70	2 (Н)	12,43	14,80	16,06	16,64	16,83
		8,5 (Н)	16,66	19,18	20,25	20,54	20,39
		15 (Н)	20,57	23,05	23,82	23,76	23,28
		21,5 (Н)	22,67	25,06	25,64	25,37	24,69
		28 (Н)	21,89	24,32	24,98	24,78	24,18

Оптимальное значение диаметра якоря ( $d_{\text{як. опт}}$ ) при допустимой температуре нагрева 115°C и 155°C обмотки, температуре 40°C и 70°C окружающего воздуха в диапазоне изменения  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 21,5 Н с ростом критического значения рабочего воздушного зазора (табл. 1) монотонно увеличивается; при  $P_{\text{мх кр}} \leq 28$  Н эта зависимость имеет слабовыраженный минимум. Существенное нарастание  $d_{\text{як. опт}}$  имеет место при увеличении  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 21,5 Н.

В табл. 2 представлены результаты расчетов ( $H_{\text{в опт}}$ ) высоты воротничка электромагнита.

При фиксированном значении  $\delta_{\text{кр}}$  оптимальная высота  $H_{\text{в опт}}$  внешнего воротничка монотонно увеличивается с ростом  $P_{\text{мх кр}}$  (табл. 2). Интенсивно увеличивается  $H_{\text{в опт}}$  с ростом  $P_{\text{мх кр}}$  от 2 до 21,5 Н. В меньшей степени изменяется  $H_{\text{в опт}}$  с увеличением  $\delta_{\text{кр}}$ ,  $T_0$ .

Сведения об оптимальной высоте ( $H_{\text{ст опт}}$ ) стопа представлены в табл. 3.

Таблица 2

Расчетные оптимальные значения высоты воротничка ( $H_{в. опт}$ ),  
минимизирующие высоту форсированного броневго электромагнита  
в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{доп}, ^\circ C$	$T_0, ^\circ C$	$P_{мх.кр}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	3,85	4,58	4,96	5,13	5,18
		8,5 (H)	5,30	6,08	6,41	6,48	6,43
		15 (H)	6,71	7,49	7,71	7,68	7,50
		21,5 (H)	7,56	8,32	8,49	8,37	8,13
		28 (H)	7,45	8,24	8,44	8,35	8,13
	70	2 (H)	4,57	5,35	5,72	5,87	5,88
		8,5 (H)	6,41	7,22	7,49	7,49	7,35
		15 (H)	8,25	8,99	9,10	8,93	8,63
		21,5 (H)	9,37	10,05	10,05	9,77	9,38
		28 (H)	9,20	9,92	9,97	9,72	9,36
155	40	2 (H)	3,34	4,03	4,42	4,62	4,71
		8,5 (H)	4,50	5,27	5,63	5,77	5,78
		15 (H)	5,60	6,40	6,71	6,78	6,71
		21,5 (H)	6,25	7,06	7,35	7,37	7,24
		28 (H)	6,18	7,01	7,32	7,35	7,25
	70	2 (H)	3,93	4,68	5,07	5,26	5,32
		8,5 (H)	5,38	6,19	6,54	6,63	6,58
		15 (H)	6,78	7,60	7,85	7,83	7,67
		21,5 (H)	7,62	8,43	8,62	8,53	8,30
		28 (H)	7,51	8,34	8,57	8,50	8,29

Таблица 3

Расчетные оптимальные значения высоты стопа ( $H_{ст. опт}$ ),  
минимизирующие высоту форсированного броневго электромагнита  
в схеме управления с балластным резистором,  $10^{-3}$  м

$T_{доп}, ^\circ C$	$T_0, ^\circ C$	$P_{мх.кр}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$				
			4	6	8	10	12
115	40	2 (H)	9,86	11,72	12,68	13,13	13,25
		8,5 (H)	13,63	15,64	16,47	16,67	16,52
		15 (H)	17,33	19,33	19,92	19,82	19,38
		21,5 (H)	19,61	21,58	22,01	21,72	21,10
		28 (H)	19,41	21,46	21,97	21,74	21,17
	70	2 (H)	11,20	13,12	14,04	14,39	14,42
		8,5 (H)	15,81	17,80	18,46	18,47	18,13
		15 (H)	20,45	22,29	22,56	22,14	21,41
		21,5 (H)	23,35	25,04	25,05	24,35	23,38
		28 (H)	23,04	24,85	24,96	24,35	23,43
155	40	2 (H)	8,56	10,32	11,31	11,82	12,04
		8,5 (H)	11,57	13,54	14,48	14,84	14,87
		15 (H)	14,46	16,52	17,34	17,50	17,31
		21,5 (H)	16,22	18,32	19,06	19,10	18,79
		28 (H)	16,10	18,26	19,06	19,15	18,88
	70	2 (H)	9,63	11,48	12,45	12,90	13,05
		8,5 (H)	13,26	15,27	16,12	16,35	16,24
		15 (H)	16,81	18,84	19,47	19,42	19,02
		21,5 (H)	19,00	21,00	21,49	21,26	20,70
		28 (H)	18,81	20,89	21,46	21,29	20,77

При малых значениях механического (противодействующего) усилия ( $P_{\text{мх кр}} = 2 \text{ Н}$ ) наблюдается монотонное незначительное увеличение  $H_{\text{ст опт}}$  с изменением  $\delta_{\text{кр}}$  от 4 до 12 мм. При  $P_{\text{мх кр}} > 2 \text{ Н}$  в зависимости  $H_{\text{ст опт}}$  от  $\delta_{\text{кр}}$  имеет место слабовыраженный минимум в области  $8 \div 10 \text{ мм}$ .

В области  $4 \leq \delta_{\text{кр}} \leq 6 \text{ мм}$  с увеличением  $P_{\text{мх кр}}$  имеет место экстремум (максимум). Больше влияние на  $H_{\text{ст опт}}$  оказывают  $P_{\text{мх кр}}$ ,  $T_0$ ,  $T_{\text{доп}}$ .

**Выводы.** 1. Основными размерами, определяющими при максимальной толщине обмотки минимальную высоту электромагнита, являются диаметр якоря, высота воротничка и обмотки.

2. Для расчета высоты форсированного броневго втяжного электромагнита необходимо заменить в выражении (1)  $d_{\text{як}}$ ;  $H_0$ ;  $H_{\text{в*}}$ , соответственно, на  $d_{\text{як опт}}$ ;  $H_{0 \text{ опт}}$ ;  $H_{\text{в опт}}$ , а также иметь в виду, что  $\Delta_{\text{к*}} = 0,1d_{\text{як опт}}$ .

#### Литература

1. Зайцев Ю.М., Иванов И.П., Никитина О.А., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. Методика синтеза форсированного броневго электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 52–61.
2. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 184 с.
3. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
4. Коц Б.Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой. М.: Энергия, 1973. 80 с.
5. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
6. Никитенко А.Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 136 с.
7. Никитенко А.Г., Пеккер И.И., Алексеева А.П. К расчету оптимальных параметров электромагнитов постоянного тока с форсированным включением // Известия вузов. Сер. Электромеханика. 1971. № 6. С. 644–647.
8. Новые контакторы серии АF с электронной системой управления // Академия энергетики. 2013. № 6(56). С. 82–83.
9. Heyun Lin, Xianbing Wang, Shuhua Fang, Ping Jin, Ho S.L. Design, Optimization, and Intelligent Control of Permanent-Magnet Contactor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, vol. 60, no. 11.
10. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Petrov O.A., Prikazshchikov A.V., Russova N.V., Svintsov G.P. Minimizing the Power Consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation. Russian Electrical Engineering, 2015, vol. 86, no 8, pp. 474–478.

---

**НИКИТИНА ОЛЕСЯ АЛЕКСЕЕВНА** – аспирантка кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (oanikitina@vniir.ru).

---

#### O. NIKITINA

#### SYNTHESIS OF FORCED ARMORED ELECTROMAGNET OF DC VOLTAGE MINIMIZED ON HEIGHT IMPLEMENTING WITH TAKING ROOT ANCHOR IN SCHEME WITH BALLAST RESISTOR

**Key words:** synthesis, forced management, height of electromagnet, optimization.

An experiment was carried out in order to get mathematical calculations of the main geometrical dimensions of forced armored electromagnet of d.c. voltage controlled ac-

cording to the scheme with ballast resistor. The experiment applied the method worked out to realize the algorithm of parametric synthesis of optimized electromagnet. The experiment was carried out using the methods of planning theory.

The article considers the results of minimization of the forced armored DC electromagnet with a plunging armature in the scheme with a ballast resistor and criterion of an optimality is electromagnet height. Tables with values of parameters which exert the main impact on electromagnet height are provided. Significant influence on height of an electromagnet of an anchor diameter, winding and collar heights is established.

#### References

1. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Nikitina O.A., Russova N.V., Svintsov G.P. *Metodika sinteza forsirovannogo bronevogo elektromagnita postoyannogo napryazheniya s vnedryayushchimsya yakorem v skheme s ballastnym rezistorom* [A technique of synthesis of the forced armored electromagnet of constant tension with the taking root anchor in the scheme with the ballast resistor]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 52–61.
2. Ivobotenko B.A., Il'inskiy N.F., Kopylov I.P. *Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike* [Experimental Design in electrical engineering]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 184 p.
3. Klimenko B.V. *Forsirovannye elektromagnitnye sistemy* [The forced electromagnetic systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 160 p.
4. Kots B.E. *Elektromagnitny postoyannogo toka s forsirovkoj* [Direct Current Electromagnets with Forced Management]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 80 p.
5. Lyubchik M.A. *Optimal'noe proektirovanie silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal design of the power of electromagnetic mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 392 p.
6. Nikitenko A.G. *Proektirovanie optimal'nykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Designing optimal electromagnetic mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 136 p.
7. Nikitenko A.G., Pekker I.I., Alekseeva A.P. *K raschetu optimal'nykh parametrov elektromagnitov postoyannogo toka s forsirovannym vklyucheniem* [The calculation of the optimal parameters of electromagnets DC forced inclusion]. *Izvestiya vuzov Elektromekhanika* [News electrician universities], 1971, no. 6, pp. 644–647.
8. *Novye kontaktory serii AF s elektronnoi sistemoi upravleniya* [New contactors of the AF series with an electronic control system]. *Akademiya Energetiki* [Energy Academy], 2013, no. 6(56), pp. 82–83.
9. Heyun Lin, Xianbing Wang, Shuhua Fang, Ping Jin, Ho S.L. Design, Optimization, and Intelligent Control of Permanent-Magnet Contactor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 11.
10. Zaitsev Yu.M., Ivanov I.P., Petrov O.A., Prikazhshchikov A.V., Russova N.V., Svintsov G.P. Minimizing the Power Consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no 8, pp. 474–478.

---

**NIKITINA OLESYA – Post-Graduate Student of Electric and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** *Никитина О.А.* Синтез минимизированного по высоте форсированного броневоегo электромагнита постоянного напряжения с внедряющемся якорем в схеме управления с балластным резистором // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 94–99.

УДК 621.3.06  
ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, С.В. ВОЛКОВ, А.А. САВЕЛЬЕВ

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВА ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ НЕСИММЕТРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ\*

**Ключевые слова:** несимметрия напряжений, несимметричная нагрузка, коэффициент несимметрии, симметричные составляющие, качество электрической энергии, потери электрической энергии.

*Рассматриваются результаты анализа влияния устройства выравнивания нагрузки, работающего по принципу ее перераспределения по фазам, на показатели несимметрии электрической сети. Предложены структура устройства и его алгоритм управления для случая подключения через устройство нагрузки, не требующей соблюдения порядка чередования фаз. Путем компьютерного моделирования и обработки результатов определены соотношения мощностей нагрузок, подключаемых к сети через устройство выравнивания нагрузок и непосредственно, при котором коэффициенты несимметрии токов, оказывающих влияние на несимметрию напряжений электрической сети, минимальны.*

Несимметрия напряжений в большинстве случаев обусловлена несимметрией электрических нагрузок и имеет как систематический, так и вероятностный характер. Отклонения напряжений, возникающие вследствие несимметрии, создают риск преждевременных отказов или сокращения срока службы однофазных электроприемников. С.П. Курилин отмечает, что прямые потери электроэнергии сельского хозяйства РФ в связи с несимметричными режимами составляют около 1 млрд кВт·ч в год [4].

При анализе несимметричных режимов работы оборудования используют метод симметричных составляющих [11]. Несимметрия напряжений характеризуется рядом показателей, к основным из них относятся коэффициенты несимметрии по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям. В отношении уровней этих коэффициентов национальный стандарт Российской Федерации согласуется со стандартами Европейского Союза, Китая, США [1]. Отклонения напряжений, вызванные неравномерностью электрических нагрузок по фазам, могут превышать установленные стандартом<sup>1</sup> значения. Таким образом, проблема неравномерности нагрузки по фазам электрической сети приводит к существенным экономическим потерям и должна быть решена.

В настоящее время для решения проблемы несимметрии напряжений применяются симметрирующие трансформаторы типа ТМГСУ, ТСТ и др. По данным производителей, сопротивление нулевой последовательности трансформаторов серии ТМГСУ отличается от аналогов без симметрирующего

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0204) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

<sup>1</sup> ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

устройства в среднем в 3 раза. Результаты экспериментальных исследований, опубликованные в работе [9], показывают, что трансформатор с симметрирующим устройством позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в самом трансформаторе в 1,5 раза, повысить качество напряжения в сети 0,38 кВ, уменьшая коэффициент нулевой последовательности в 2-4 раза в зависимости от вида нагрузки, а отклонения напряжения – на 8-10%.

Известны также изобретения симметрирующих устройств трансформаторного типа, представленные, например, в работах [7, 8]. К общим недостаткам этих и других симметрирующих устройств трансформаторного типа относятся: громоздкость конструкции, высокая стоимость; возможность симметрирования только части нагрузки электрической сети, непосредственно подключенной к устройству.

Радикальное решение проблемы качества электроэнергии, включая проблему несимметрии токов и напряжений, заключается в применении устройств типа СТАТКОМ, сетевых кондиционеров или активных фильтров гармоник [10]. Однако высокая стоимость таких устройств ограничивает их распространение в российских распределительных сетях 0,38 кВ. Еще одним недостатком подобных устройств является наличие небольших неустраняемых рабочих потерь в полупроводниковых ключах.

Существуют изобретения, направленные на выравнивание нагрузок по фазам электрической сети путем ее перераспределения. Пример такого изобретения описан в работе [6]. Однако, как отмечают авторы, реализация указанного изобретения требует прерывания подачи напряжения, что вызывает перебои в поставке электроэнергии потребителям. Устройство не выравнивает нагрузку питающей электрической сети в целом, поскольку симметрирование выполняется только для непосредственно подключенной к устройству нагрузки.

Известны также работы С.В. Венедиктова, посвященные разработке и исследованию устройств выравнивания нагрузки, работающих по принципу переключения электрических нагрузок с более нагруженной фазы на менее нагруженную, в том числе, с возможностью сохранения исходного порядка чередования фаз [2, 3]. Так, в работе [3] дается описание устройства, устанавливаемого в определенной точке фидера с целью снижения потерь в линии электропередачи. Следует отметить, что реализация предлагаемых в работах [2, 3] устройств и алгоритмов управления может привести к циклическим перекоммутациям. Подключение фазы электрической нагрузки, потребляющей большой ток, к фазе электрической сети, ток в которой минимальный, влияет на состояние электрической сети в целом и может привести к изменению фазных напряжений и, как следствие, фазных токов самой коммутируемой нагрузки. Вновь установившиеся фазные токи нагрузки могут вызвать необходимость обратной коммутаций к первоначальному состоянию. Далее процесс циклически повторяется, что может привести к опасным для электроприемников циклическим перекоммутациям.

Существуют работы, в которых приводится описание устройства симметрирования нагрузки [5]. Алгоритм работы устройства направлен на выравнивание нагрузки электрической сети в целом и состоит в соединении фаз нагрузки с наибольшим действующим значением тока с фазой электрической

сети с наибольшим действующим значением напряжения. Таким образом, устройство направлено на симметрирование электрической сети в целом. Однако реализация подобного устройства также создает определенный риск циклических перекоммутаций.

Вопросы эффективности применения устройств выравнивания нагрузки, работающих по принципу перераспределения нагрузки по фазам электрической сети, недостаточно освещены в литературных источниках.

**Цель работы** состоит в снижении указанных недостатков путем количественной оценки влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии трехфазной электрической сети.

**Научная новизна** работы состоит в обосновании области эффективного применения устройства выравнивания нагрузки электрической сети, допускающего возможность изменения порядка чередования фаз, и его алгоритма управления.

Устройство выравнивания нагрузки электрической сети предназначено для выравнивания электрической нагрузки по фазам с целью симметрирования. На рис. 1, а изображена однолинейная схема, которая демонстрирует положение устройства выравнивания нагрузки (УВН), относительно узла трехфазной электрической сети, а также его основные конструктивные элементы. В рассматриваемом узле электрической сети соединяются отходящие линии устройства выравнивания нагрузки и другие отходящие линии с электрической сетью. Устройство выравнивания нагрузки УВН содержит следующие конструктивные элементы: модуль коммутации МК, контроллер К, датчики напряжения ДН фаз электрической сети и нейтрального провода, датчики фазных токов электрической сети ДТЭс и датчики фазных токов отходящей линии симметрирующего устройства ДТл.

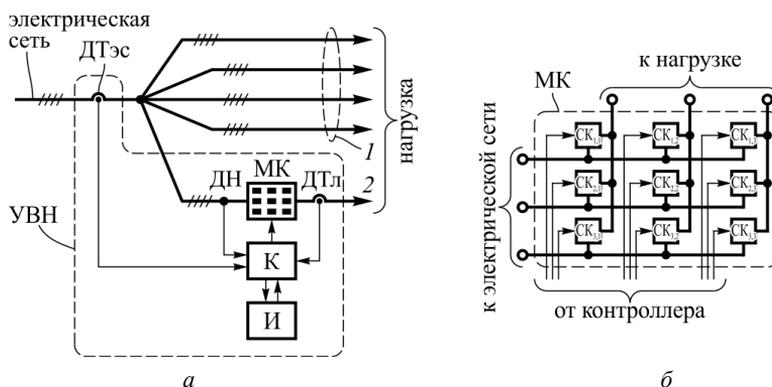


Рис. 1. Блок-схема схема УВН электрической сети (а):

МК – модуль коммутации, К – контроллер,

И – интерфейс пользователя, ДТЭс – датчик тока электрической сети,

ДТл – датчик тока отходящей линии симметрирующего устройства;

ДН – датчик напряжения, 1 – нагрузка, подключенная к электрической сети

непосредственно, 2 – нагрузка, подключенная к электрической сети

через устройство выравнивания нагрузки;

блок-схема схема модуля коммутации МК (б):  $СК_{ij}$  – силовой ключ

Модуль коммутации МК, структура которого показана на блок-схеме (рис. 1, б) содержит 9 силовых ключей СК<sub>ij</sub>, где *i* и *j* – номера фаз электрической сети и отходящей линии симметрирующего устройства, соответственно, которые служат для выполнения коммутаций. Каждый силовой ключ может находиться в проводящем или непроводящем состоянии в зависимости от управляющих сигналов, подаваемых контроллером К. Совокупность силовых ключей СК модуля коммутации МК обеспечивает различные варианты схем присоединения фаз отходящей линии устройства выравнивания нагрузки к фазам электрической сети, а также изменение этих схем без перерыва в электроснабжении нагрузки, подключенной к отходящим линиям устройства.

Алгоритм работы устройства выравнивания нагрузки трехфазной электрической сети состоит в следующем. Контроллер К на основании сигналов от датчиков напряжения ДН, датчиков фазных токов электрической сети ДТэс и устройства выравнивания нагрузки ДТл вычисляет действующие значения токов в каждой фазе электрической сети, каждой фазе отходящей линии устройства выравнивания нагрузки, действующие значения фазных напряжений между каждой фазой электрической сети и нейтральным проводом.

Далее контроллер К вычисляет значения проводимостей каждой фазы электрической сети  $G_{s,i}$  и каждой фазы отходящей линии устройства выравнивания нагрузки  $G_{l,i}$  по формулам

$$G_{s,i} = I_{s,i} / U_i \text{ и } G_{l,i} = I_{l,i} / U_i,$$

где  $G_{s,i}$  – проводимость *i*-й фазы электрической сети;  $G_{l,i}$  – проводимость *i*-й фазы отходящей линии устройства выравнивания нагрузки;  $I_{s,i}$  – действующее значение тока в *i*-й фазе электрической сети;  $I_{l,i}$  – ток в *i*-й фазе отходящей линии устройства выравнивания нагрузки;  $U_i$  – действующее значение напряжения между *i*-й фазой электрической сети и нейтральным проводом.

Контроллер К вычисляет значения проводимостей каждой фазы отходящих линий, подключенных к электрической сети непосредственно,  $G_{L,i}$  по формуле

$$G_{L,i} = G_{s,i} - G_{l,i},$$

где  $G_{L,i}$  – проводимость *i*-й фазы других отходящих линий;  $G_{s,i}$  – проводимость *i*-й фазы электрической сети;  $G_{l,i}$  – проводимость фазы отходящей линии устройства выравнивания нагрузки, подключенной к *i*-й фазе электрической сети.

Затем контроллером К выполняются следующие операции. Фазы отходящей линии устройства выравнивания нагрузки сортируются по убыванию их проводимостей  $G_{l,i}$ , затем нумеруются последовательно, начиная от фазы с наибольшей проводимостью к фазе с наименьшей проводимостью. Фазы электрической сети сортируются по возрастанию проводимостей отходящих линий  $G_{L,i}$ , подключенных к электрической сети непосредственно, затем нумеруются последовательно, начиная от фазы электрической сети с наименьшей проводимостью к фазе электрической сети с наибольшей проводимостью. Контроллер К подает управляющие сигналы модулю коммутации МК, который выполняет соединения фаз электрической сети и фаз отходящей линии устройства выравнивания нагрузки, имеющих одинаковые номера.

При выполнении указанного алгоритма фазы отходящей линии устройства выравнивания нагрузки с наименьшими проводимостями  $G_{L,i}$  подключаются, соответственно, к фазам электрической сети, в которых проводимости других отходящих линий  $G_{L,i}$ , подключенных к электрической сети непосредственно, наибольшие. В результате проводимости всех фаз электрической сети оказываются максимально близкими друг к другу по величине, что обеспечивает выравнивание нагрузки электрической сети в целом в рамках контролируемого диапазона и ведет к симметрированию напряжений сети. Помимо выравнивания нагрузки электрической сети также устраняется риск циклических перекоммутаций в случае линейной нагрузки. При нелинейной нагрузке указанный риск значительно снижается по сравнению с устройствами и алгоритмами их управления, представленными в работах [2, 3].

С целью количественной оценки влияния предложенного устройства на показатели несимметрии выполнен анализ его влияния на несимметрию нагрузок трехфазной электрической сети.

**Методы исследования** основывались на численном компьютерном моделировании вероятностной несимметрии электрических нагрузок и реакции устройства на эту несимметрию. Методологическую основу исследования составляли теоретическая электротехника и методическое обеспечение обработки статистических данных.

Исследовались результаты работы алгоритма в случае, если нагрузка не содержит трехфазных электроприемников, требующих соблюдения порядка чередования фаз. Численное моделирование и обработка результатов выполнены в компьютерной программе, созданной авторами, написанной на языке Python. Рассматривался узел электрической сети (рис. 2, а), в котором соединяется нагрузка, подключенная к сети непосредственно (нагрузка 1) и через устройство выравнивания нагрузки (нагрузка 2). Полная мощность нагрузки  $S_{1\phi}$ , подключенной к электрической сети непосредственно, в каждой фазе менялась в экспериментах случайно с равномерным распределением плотности вероятности в пределах от  $S_{\min 1}$  до  $S_{\max 1}$ . Аналогично нагрузка  $S_{2\phi}$ , подключенная к сети через устройство выравнивания нагрузки, имела границы диапазона случайных изменений  $S_{\min 2}$  и  $S_{\max 2}$ :

$$S_{1\phi} = S_{\min 1} + (S_{\max 1} - S_{\min 1}) \cdot X \text{ и } S_{2\phi} = S_{\min 2} + (S_{\max 2} - S_{\min 2}) \cdot X,$$

где  $X$  – случайная величина, имеющая равномерное распределение плотности вероятности в диапазоне  $[0; 1]$ . Рассматривался ряд распределений мощностей  $S_{1\phi}$  и  $S_{2\phi}$ , представляющих различные соотношения диапазонов их случайных изменений  $(S_{\max 2} - S_{\min 2}) / (S_{\max 1} - S_{\min 1})$ . Мощности выражены в относительных единицах. Диапазон случайных значений мощностей для нагрузки 1 ограничен  $S_{\min 1} = 2$ ,  $S_{\max 1} = 3$ , для нагрузки 2 минимальное значение диапазона  $S_{\min 2} = 0$ , максимальное значение  $S_{\max 2}$  принималось различным в диапазоне от 0 до 1,5 с шагом 0,1. Для каждого соотношения  $(S_{\max 2} - S_{\min 2}) / (S_{\max 1} - S_{\min 1})$  выполнено по 50 000 численных экспериментов. Напряжение в узловой точке общего присоединения нагрузок 1 и 2 задавалось неизменным, коэффициент мощности нагрузки принимался равным единице. При таком характере несимметрии амплитуды симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей одинаковы, но могут отличаться их фазы колебаний; со-

ставляющие прямой последовательности изменяются только по модулю, их фазы колебаний совпадают с исходным сигналом.

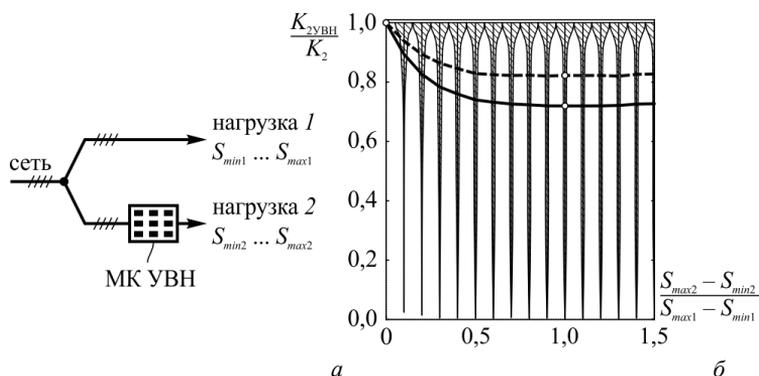


Рис. 2. Узел электрической сети (а):

МК УВН – модуль коммутации устройства выравнивания нагрузки, нагрузка 1 – нагрузка, подключенная к сети непосредственно, нагрузка 2 – нагрузка, подключенная к сети через устройство выравнивания нагрузки; распределения отношений коэффициентов несимметрии, средние арифметические (сплошная линия) и медианы этих распределений (пунктирная линия) при различных соотношениях диапазонов мощностей (б)

Анализировались коэффициенты несимметрии токов по обратной  $K_2$  (нулевой  $K_0$ ) последовательностям при наличии устройства выравнивания нагрузки и без него для различных соотношений диапазонов мощностей  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1})$ . Если нагрузка 2 подключается без использования устройства выравнивания нагрузки, аналогично нагрузке 1, то средние арифметические значения и медианы распределений находятся в диапазоне 4,0-8,4%. При использовании устройства выравнивания нагрузки диапазон средних значений и медиан распределений снижается до 4,4-5,8%.

В каждом численном эксперименте определялось отношение коэффициентов несимметрии токов по обратной (нулевой) последовательности при наличии устройства выравнивания нагрузки и без него ( $K_{2УВН} / K_2$ ). Это отношение характеризует эффективность применения устройства и может служить критерием выбора оптимального диапазона мощности нагрузок, подключенных через устройство. Распределение указанных отношений ( $K_{2УВН} / K_2$ ) при различных соотношениях  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1})$  представлено на рис. 2, б. Среднее арифметическое значение распределений ( $K_{2УВН} / K_2$ ) минимально при  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1}) = 1$  и составляет 0,72, медиана распределений минимальна при  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1}) = 1$  и составляет 0,82. При  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1}) > 1$  значения среднего арифметического и медианы распределений практически не изменяются.

Распределения отношений коэффициентов несимметрии ( $K_{2УВН} / K_2$ ) и, соответственно, параметры этих распределений практически не зависят от абсолютных значений границ диапазонов  $S_{min1}$ ,  $S_{max1}$  и  $S_{min2}$ ,  $S_{max2}$ . Вместо этого на отношение ( $K_{2УВН} / K_2$ ) влияют соотношение диапазонов изменений мощностей  $(S_{max2} - S_{min2}) / (S_{max1} - S_{min1})$  и вид распределения исходных величин.

Снижение коэффициентов несимметрии токов в результате использования устройства выравнивания нагрузки приводит к снижению несимметрии напряжений. Степень этого влияния зависит от параметров электрической сети.

С точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат целесообразен как можно меньший диапазон мощностей, контролируемый устройством выравнивания нагрузки, в связи с чем оптимальное отношение  $(S_{\max 2} - S_{\min 2}) / (S_{\max 1} - S_{\min 1})$  находится в пределах от 0 до 1. В каждом случае отношение  $(S_{\max 2} - S_{\min 2}) / (S_{\max 1} - S_{\min 1})$  должно определяться в результате технико-экономического обоснования.

**Практическая значимость** результатов исследования состоит в определении соотношений мощностей нагрузок, подключаемых к сети через устройство выравнивания нагрузок и непосредственно, при котором коэффициенты несимметрии токов, оказывающих влияние на несимметрию напряжений электрической сети, минимальны.

**Перспективным направлением** дальнейших исследований является разработка алгоритма работы устройства выравнивания нагрузок, обеспечивающего сохранение исходного порядка чередования фаз. Подобный алгоритм работы может применяться при наличии в составе нагрузки, подключаемой к сети через устройство, трехфазных электроприемников, требующих неизменный порядок чередования фаз, например, трехфазных электродвигателей переменного тока.

**Выводы.** 1. Неравномерность нагрузки по фазам электрической сети создает риск преждевременных отказов или существенного сокращения срока службы электроприемников.

2. Предложенное устройство выравнивания нагрузки электрической сети, через которое подключается к узловой точке электрической сети часть электрической нагрузки, и его алгоритм управления позволяют снизить коэффициенты несимметрии токов и напряжений и отклонения напряжений в узловой точке электрической сети.

3. Наибольшее снижение коэффициентов несимметрии токов, а следовательно, напряжений возможно, если диапазон случайных изменений мощностей нагрузки, подключенной через устройство выравнивания нагрузки, равен диапазону случайных изменений мощностей нагрузки, подключенной к сети непосредственно. Это позволяет снизить коэффициенты несимметрии фазных токов электрической сети  $K_2$  и  $K_0$  в среднем на 28% при наличии и отсутствии нагрузки с неизменным порядком чередования фаз. Величина снижения коэффициентов несимметрии фазных напряжений зависит от параметров электрической сети.

4. Экономически целесообразная доля нагрузки, подключаемая через предложенное устройство выравнивания нагрузки, не превышает доли нагрузки, подключаемой к сети непосредственно. Эта доля должна определяться в результате технико-экономического обоснования.

#### Литература

1. Бодруг Н.С. Сравнительный анализ российских стандартов и стандартов Евросоюза по качеству электроэнергии // Вестник Амурского государственного университета. 2015. Вып. 69: Сер. Естественные и экономические науки. С. 48–55.

2. Венедиктов С.В., Державин А.С. Модели, алгоритмы и функционал комбинированных переключателей // Наука и инновации – 2014: материалы IX междунар. научной школы. Йошкар-Ола, 2014, С. 166–177.

3. Венедиктов С.В., Иванов П.В., Андреева З.А., Державин А.С. Алгоритм функционирования и расчетная модель автоматического коммутатора нагрузки // Наука и инновации – 2015: материалы X междунар. научной школы. Йошкар-Ола, 2015, С. 93–99.

4. Курилин С.П. Развитие теории несимметричных режимов и энергетических процессов асинхронных двигателей сельскохозяйственных электроустановок: дис. докт. техн. наук. М., 2005. 367 с.

5. Пат. 162639 РФ, МПК H02J 1/00 (2006.01) Устройство симметрирования нагрузки / Орлов А.И., Савельев А.А.; заявитель и патентообладатель Орлов А.И., Савельев А.А. № 2015146070/07, заявл. 26.10.2015; опубл. 20.06.2016 Бюл. № 17. 2 с.

6. Пат. 2200364 РФ, МПК H02J 1/10 (2000.01) Устройство равномерного распределения электрической нагрузки по  $n$ -фазной сети распределения электроэнергии / Яир Д., Лупу В.; заявитель и патентообладатель ТАРДЖЕТ-ХАЙ-ТЕК ЭЛЕКТРОНИКС ЛТД. № 99115774/09, заявл. 05.12.1997; опубл. 10.03.2003. Бюл. № 7. 20 с.

7. Пат. 2321133 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01) Симметрирующий трехфазно-однофазный трансформатор напряжения / Василенко В.Д., Евдокимов В.В.; патентообладатель ООО «Компания Интер Электро». № 2006121104/09, заявл. 16.06.2006; опубл. 27.03.2008. Бюл. № 9. 6 с.

8. Пат. 2453965 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01) Трехфазное симметрирующее устройство / Василенко В.Д.; заявитель и патентообладатель Василенко В.Д. № 2010139219/07, заявл. 23.09.2010; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17. 6 с.

9. Теремецкий М.Ю. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке с помощью трансформатора «звезда-звезда с нулем с симметрирующим устройством»: автореф. канд. техн. наук. СПб.; Пушкин, 2011. 19 с.

10. Akagi H. Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Wiley-IEEE Press, 2007. 379 p.

11. Fortescue Ch.L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *AIEE Transactions*, 1918, vol. 37, part II, pp. 1027–1140.

---

**ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com).

**ВОЛКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (eef@marsu.ru).

**САВЕЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ** – магистр направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (savelich94@gmail.com).

---

**A. ORLOV, S. VOLKOV, A. SAVELYEV**

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF LOAD BALANCING UNIT ON INDICATORS OF POWER SUPPLY UNBALANCE**

**Key words:** voltage unbalance, unbalanced load, asymmetry coefficient, symmetrical components, power quality, loss of electrical power.

The article considers results of analysis showing influence of load balancing unit operating on principle of its redistributing in phases, on indicators of power supply unbalance. The structure of the device and its control algorithm in case of connection through the electrical load does not require compliance with the phase sequence. Computer simulation and data processing identified the relation between the load connected to the power supply through the load balancing unit, and directly, the current unbalance factors influencing on asymmetry of voltage power supply are minimal.

## References

1. Bodrug N.S. *Sravnitel'nyi analiz rossiiskikh standartov i standartov Evrosoyuza po kachestvu elektroenergii* [Comparative analysis of the Russian standards and EU standards on power quality]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Amur State University], 2015, iss. 69, pp. 48–55.
2. Venediktov S.V., Derzhavin A.S. *Modeli, algoritmy i funktsional kombinirovannykh pereklyuchatelei* [Models, algorithms, and functionality of the combined switches]. *Nauka i innovatsii – 2014: materialy IX mezhdunarod. nauch. shkoly* [Proc. of IX Int. Sci. School «Science and innovation – 2014»]. Yoshkar-Ola, 2014, pp. 166–177.
3. Venediktov S.V., Ivanov P.V., Andreeva Z.A., Derzhavin A.S. *Algoritm funktsionirovaniya i raschetnaya model' avtomaticheskogo kommutatora nagruzki* [Models, algorithms and functionality of combined switches]. *Nauka i innovatsii – 2015: materialy X mezhdunarod. nauch. shkoly* [Proc. of X Int. Sci. School «Science and innovation – 2015»]. Yoshkar-Ola, 2015, pp. 93–99.
4. Kurilin S.P. *Razvitie teorii nesimmetrichnykh rezhimov i energeticheskikh protsessov asinkhronnykh dvigatelei sel'skokhozyaistvennykh elektroustanovok: dis. dokt. tekhn. nauk.* [Development of the theory of asymmetric modes and energy processes asynchronous engines of agricultural electrical. Doct. Diss.]. Moscow, 2005, 367 p.
5. Orlov A.I., Savel'ev A.A. *Ustroistvo simmetrirovaniya nagruzki* [Load balancing unit]. Patent RF 162639, no. 162639, 2016.
6. David Yair, Vittner Lupu *Ustroistvo ravnomernogo raspredeleniya elektricheskoi nagruzki po n-faznoi seti raspredeleniya elektroenergii* [Device for uniform distribution of the electrical load to the n-phase power distribution network]. Patent PF, no. 2200364, 2003.
7. Vasilenko V.D., Evdokimov V.V. *Simmetriruyushchii trekhfazno-odnofaznyi transformator napyazheniya* [Balancing three-phase, single-phase voltage transformer]. Patent RF, no. 2321133, 2008.
8. Vasilenko V.D. *Trekhfaznoe simmetriruyushchee ustroistvo* [Three-phase balancing unit]. Patent RF, no. 2453965, 2012.
9. Teremetskii M.Yu. *Snizhenie poter' i povyshenie kachestva elektroenergii v sel'skikh raspredelitel'nykh setyakh 0,38 kV pri nesimmetrichnoi nagruzke s pomoshch'yu transformatora «zvezda-zvezda s nulem s simmetriruyushchim ustroistvom»: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Reduction of losses and increase power quality in rural distribution power supply 0,38 kV at asymmetrical load by a transformer «star-star with a zero with balancing unit». Abstract of PhD thesis]. St. Petersburg, Pushkin, 2011, 19 p.
10. Akagi H. Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p.
11. Fortescue, Charles. L. *Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*. *AIEE Transactions*, 1918, vol. 37, part II, pp. 1027–1140.

---

**ORLOV ALEKSANDR** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electro-Mechanics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com).

**VOLKOV SERGEY** – Candidate of Technical Sciences, Head of Electro-Mechanics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (eef@marsu.ru).

**SAVELYEV ALEKSEI** – Masters Program Student, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (savelich94@gmail.com).

---

**Ссылка на статью:** Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 100–108.

УДК 621.7.044:539.37  
ББК К500.7

М.В. ПЕТРОВ, В.А. АВРЕЛЬКИН

### МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ТИПА ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, деформирование, заготовка, индуктор, методика, программа.

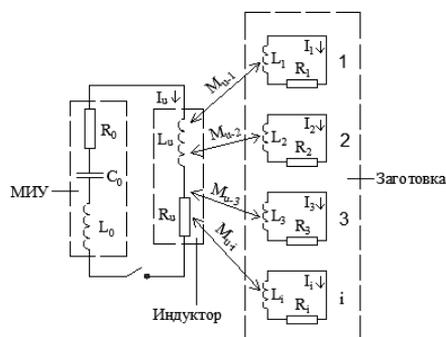
*Цель исследования – развитие магнитно-импульсной обработки заготовок сложной геометрической формы. Задача формоизменения заготовки решается в связанной постановке, так как процессы деформирования и электромагнитные взаимосвязаны. Заготовка принята в виде тонкостенной оболочки вращения. Расчетом определяются геометрические размеры индуктора, позволяющие выполнить раздачу заготовки таким образом, чтобы радиальные перемещения заготовки были одинаковыми по всей длине. Таким образом можно разрабатывать технологические процессы изготовления деталей типа оболочки вращения с криволинейной образующей.*

На машиностроительных предприятиях применяется уникальный метод изготовления деталей – магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ), который имеет ряд преимуществ перед другими электрофизическими методами. Исследования процессов МИОМ делятся на теоретические разработки [1–3] и экспериментальные работы [4–10]. Теоретические работы выполнялись с использованием теории электромагнитного поля или по теории цепей с сосредоточенными параметрами. Экспериментальные исследования выполнялись с целью определения электрических параметров МИОМ или для разработки технологических процессов изготовления цилиндрических или плоских деталей.

Работа выполнена с целью развития теории МИОМ и возможностей МИОМ для обработки заготовок сложной геометрической формы.

Основными элементами МИОМ являются магнитно-импульсная установка (МИУ), индуктор, заготовка. Эквивалентная схема замещения системы МИУ – индуктор-заготовка представлена на рисунке.

На рисунке введены следующие обозначения:  $L_0, R_0, C_0$  – индуктивность, омическое сопротивление, емкость МИУ, соответственно,  $L_u, R_u, I_u$  – индуктивность; омическое сопротивление, электрический ток индуктора, соответственно,  $L_i, R_i, I_i$  – индуктивность, омическое сопротивление, электрический ток в контурах заготовки,  $M_{u-i}$  – взаимная индуктивность между индуктором и контурами заготовки. Систему магнитно-импульсную установку – индуктор – заготовку можно рассматривать как многоконтурную схему замещения, при-



Многоконтурная эквивалентная  
схема замещения системы  
МИУ – индуктор – заготовка

няв систему МИУ – индуктор за один контур, а кольцевые элементы заготовки – за другие взаимосвязанные контуры. Батарея конденсаторов МИУ разряжается на индуктор, взаимодействие токов в индукторе и заготовке создают пондеромоторные силы, деформирующие заготовку [2, 3].

Магнитно-импульсные процессы формоизменения заготовок описываются уравнениями электродинамики и динамическими уравнениями механики деформируемого твердого тела. Электрический ток, который наводится в заготовке разобьем на элементарные нити тока, деля заготовку вдоль образующей на  $T_1$  кольцевых контуров. Будем считать, что электромагнитное поле квазистационарное, цепи линейные, материалы заготовки и индуктора немагнитные, диэлектрическая и магнитная проницаемость среды постоянны.

Для  $i$ -го контура с емкостью в цепи квазистационарного тока закон сохранения энергии выражается уравнением [5, 7]

$$E_i I_i = R_i I_i^2 + \frac{e_i I_i}{C_i} + \frac{d}{dt} F_{ii} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{d}{dt} F_{ij}, \quad (1)$$

где  $E_i$  – электродвижущая сила;  $e_i$  – заряды на обкладках конденсатора;  $I_i$  – электрический ток;  $R_i$  – омическое сопротивление контура;  $C_i$  – емкость;  $F_{ii}$  – собственная свободная энергия токов;  $F_{ij}$  – энергия взаимодействия токов;  $t$  – время.

В выражении (1) в силу линейности уравнения поля магнитное поле представлено в виде суммы полей, которые создавались бы каждым током в отдельности, если бы в остальных проводниках токи отсутствовали.

Для линейных проводников имеем

$$F_{ii} = \frac{1}{2} \mu \oint_{l_i} \oint_{l_i} \frac{dl_i dl_i}{d} I_i^2; \quad F_{ij} = \mu \oint_{l_i} \oint_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{d} I_i I_j, \quad (2)$$

где  $dl$  – элемент длины;  $d$  – расстояние между контурами;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

В формулах (2):

$$L_i = \mu \oint_{l_i} \oint_{l_i} \frac{dl_i dl_i}{d}; \quad M_{ij} = \mu \oint_{l_i} \oint_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{d}, \quad (3)$$

где  $L_i$  – коэффициент самоиндукции;  $M_{ij}$  – коэффициент взаимной индукции контуров.

С учетом (2) и (3) преобразовав выражение (1), получим для контура «МИУ – индуктор» и контуров движущейся заготовки уравнения:

$$\begin{cases} (R_u + R_0) I_u + (L_u + L_0) \dot{I}_u + \frac{1}{C_0} \int_0^t I_u dt + \sum_{j=1}^{T_1-1} (M_{uj} \dot{I}_j + I_j \dot{M}_{uj}) = V_0; \\ R_i I_i + L_i \dot{I}_i + I_i \dot{L}_i + I_u \dot{M}_{ui} + M_{ui} \dot{I}_u + \sum_{j=1, j \neq i}^{T_1-1} (I_j \dot{M}_{ij} + M_{ij} \dot{I}_j) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, T_1$ ;  $V_0$  – напряжение зарядки МИУ;  $(\dot{\phantom{x}})$  – означает дифференцирование по времени. Начальные условия при  $t = 0$ ;  $I_u = I_i = 0$ .

Пондеромоторная сила взаимодействия между индуктором и  $i$ -м элементом заготовки определяется как производная энергии магнитного поля по направлению движения заготовки:

$$P_i = \frac{1}{2} I_i^2 \frac{dL_i}{d\xi_i} + I_u I_i \frac{dM_{ui}}{d\xi_i}. \quad (5)$$

Давление магнитного поля, приложения к срединной поверхности заготовки:

$$q_i = P_i / 2\pi r_i \Delta S, \quad (6)$$

где  $\Delta S$  – длина образующей элемента заготовки;  $r_i$  – радиус.

Для описания деформации заготовки примем общую цилиндрическую систему координат  $(r, \beta, z)$  и местную систему  $(s, \beta, \xi)$ , связанную с деформированной срединной поверхностью [1]:  $r$  – координаты срединной поверхности заготовки в общем базисе;  $z$  – ось вращения;  $s$  – длина дуги меридиана;  $\beta$  – азимут;  $\xi$  – расстояние точки от срединной поверхности. Обе системы координат связаны соотношениями:

$$S = r\psi_z - z\psi_r, \quad \xi = r\psi_r + z\psi_z,$$

где  $\psi_r = -\frac{\partial z}{\partial s}$ ,  $\psi_z = \frac{\partial r}{\partial s}$  – направляющие косинусы нормали к срединной поверхности.

Геометрическая нелинейность учитывается пошаговой перестройкой геометрии и толщины заготовки.

Текущая геометрия заготовки вычисляется следующим образом:

$$r = r^* + U_r; \quad z = z^* + U_z; \quad ds = [(dr)^2 + (dz)^2]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $r^* = r^*(s)$ ,  $z^* = z^*(s)$  – начальная геометрия;  $U_r = U_r(s, t)$ ,  $U_z = U_z(s, t)$  – компоненты вектора перемещений;  $h = h(s, t)$  – толщина стенки заготовки.

Зададим распределение скоростей перемещений по толщине заготовки в виде

$$\dot{U}_s(s, \xi, t) = \dot{U}_s(s, t) + \xi \dot{U}_\varphi(s, t); \quad \dot{U}_\xi(s, \xi, t) = \dot{U}_\xi(s, t),$$

где  $\dot{U}_s(s, t)$ ,  $\dot{U}_\xi(s, t)$  – скорости перемещения срединной поверхности в направлении касательной и нормали;  $\dot{U}_\varphi(s, t)$  – угловая скорость поворота поперечного сечения.

При малых изгибных и сдвиговых деформациях скорости деформаций вычислим по формулам, которые учитывают большие деформации срединной поверхности [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varepsilon}_{ii} = \dot{\varepsilon}_{ii}^0 + \xi \dot{k}_{ii}, \quad i = 1, 2; \quad \dot{\varepsilon}_{11}^0 = \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial S} \psi_z - \frac{\partial \dot{U}_z}{\partial S} \psi_r; \quad \dot{\varepsilon}_{22}^0 = \frac{\dot{U}_r}{r}; \\ \dot{k}_{11} = \frac{\partial \dot{U}_\varphi}{\partial S}; \quad \dot{k}_{22} = \frac{\dot{U}_\varphi}{r} \psi_z; \\ \dot{\gamma}^0 = \dot{U}_\varphi + \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial S} \psi_r + \frac{\partial \dot{U}_z}{\partial S} \psi_z; \\ 2\dot{\varepsilon}_{13} = \dot{\gamma}^0 \left[ 1 - \left( \frac{2\xi}{h} \right)^2 \right], \end{array} \right.$$

где  $\varepsilon_{ii}^0$  – скорость мембранной деформации срединной поверхности;  $k_{ii}$  – скорость деформации изгиба.

Полные деформации  $\varepsilon_{ij}(i, j=1,2,3)$  определяются интегрированием скоростей деформаций по времени, что дает в результате логарифмические деформации.

Законом Гука компоненты напряжений  $\sigma_{ij}$  связаны с упругими деформациями. Пластические деформации определяются вариантом теории течения с линейным кинематическим упрочнением.

Вариационное уравнение движения заготовки в предположении произвольности вариаций  $\delta\dot{U}_r, \delta\dot{U}_z, \delta\dot{U}_\varphi$  приводится к системе трех уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^L \left[ (N_1\psi_r - Q\psi_z)\delta\dot{U}_{z,s} + (M_p\ddot{U}_z - q_z)\delta\dot{U}_z \right] r dS - (rP_z\delta\dot{U}_z)_{s=0,L} = 0; \\ \int_0^L \left[ (N_1\psi_r - Q\psi_r)\delta\dot{U}_{r,s} + (N_2r^{-1} + M_p\ddot{U}_r - q_r)\delta\dot{U}_r \right] r dS - (rP_r\delta\dot{U}_r)_{s=0,L} = 0; \\ \int_0^L \left[ M_1\delta\dot{U}_{\varphi,s} + (M_2r^{-1}\psi_z + Q + I_p\ddot{U}_\varphi)\delta\dot{U}_\varphi \right] r dS - (rM^0\delta\dot{U}_\varphi)_{s=0,L} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где  $N_1, N_2, Q, M_1, M_2$  – соответственно, мембранные усилия, перерезывающая сила и изгибающие моменты определяются интегралами по толщине от соответствующих компонент напряжений;  $q_r = q_r(s, t), q_z = q_z(s, t)$  – компоненты электромагнитного давления в общем координатном базисе;  $P_r = P_r(t); P_z = P_z(t), M^0 = M^0(t)$  – статические граничные условия на контурных сечениях

заготовки,  $L$  – длина заготовки;  $M_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho d\xi = \rho h; J_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho \xi^2 d\xi = \rho \frac{h^3}{12}$  – масса и

момент инерции. Запятая в нижнем индексе означает дифференцирование по пространственной координате.

Начальные условия для ненапряженной в исходном состоянии заготовки записываются в виде  $U_\alpha(s, 0) = U_\alpha^0(s); \dot{U}_\alpha(s, 0) = \dot{U}_\alpha(s); \alpha = r, z, \varphi$ .

Граничные условия на торцах заготовки ( $s = 0, L$ ) принимаются: либо заделка  $\dot{U}_r = \dot{U}_z = \dot{U}_\varphi = 0$ , либо свободный край  $M^0 = P_r = P_z = 0$ .

Процесс формоизменения заготовки решается численно. По пространственной координате дискретизация производится в соответствии с введенным ранее разбиением заготовки на  $T_1$  кольцевых элементов длиной  $\Delta S_i$ . Толщина делится на ряд слоев  $\Delta h = h/T_2$ . Таким образом имеем основную сетку из  $(T_1 + 1)(T_2 + 1)$  узлов. Вводится еще промежуточная сетка, смещенная на половину шага  $\Delta S_i$  по отношению к основной. Тензоры скоростей деформаций, напряжений, полных и пластических деформаций, моменты, внутренние усилия подсчитываются в узлах промежуточной сетки, перемещения и скорости перемещений вычисляются в узлах основной разностной сетки. Дискретизация по времени производится по явной схеме «крест».

В результате аппроксимации (8) со вторым порядком точности с помощью разностных операторов получается система уравнений для определения перемещений и толщины стенки заготовки на  $t^{k+1}$  момент времени:

$$\begin{cases} \left(\dot{U}_\alpha\right)_n^{k+1/2} = \left(U_\alpha\right)_n^{k-1/2} + [\Phi_\alpha + q_\beta(r\Delta S)]_n^k \frac{\Delta t^{k+1} + \Delta t^k}{2(\Phi_M)_n^k}; \\ \left(U_\alpha\right)_n^{k+1} = \left(U_\alpha\right)_n^k + \left(\dot{U}_\alpha\right)_n^{k+1/2} \Delta t^{k+1}; \alpha = r, z, \varphi; \beta = r, z; \\ h_i^{k+1} = h_i^k \left[ 1 + \left(\varepsilon_{zz}^0\right)^{k+1/2} \Delta t^{k+1} \right], \end{cases} \quad (9)$$

где  $\Phi_\alpha, \Phi_M$  – обобщенные силы и массы;  $n$  – номер узла основной сетки;  $(r, \Delta S)$  – грузовая площадь  $n$ -го узла;  $\Delta t^{k+1} = t^{k+1} - t^k$  – временной шаг.

В исходном состоянии при  $t = 0, \dot{U}_r = \dot{U}_z = \dot{U}_\varphi = 0$  во всех узлах основной сетки, напряжения и деформации равны нулю.

Для решения системы уравнений (4) использована следующая разностная схема:

$$\begin{cases} (L_u + L_0)\dot{I}_u + \sum_{j=1}^{T_1-1} M_{uj} \dot{I}_j = B_0; \\ M_{ui} \dot{I}_i + L_i \dot{I}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{T_1-1} M_{ij} \dot{I}_j = B_i, (i=1, 2, \dots, T_1), \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\begin{cases} B_0 = V_0 - (R_u + R_0)I_u - \frac{1}{C_0} \sum_{t=0}^t I_u \Delta t - \sum_{j=1}^{T_1-1} \dot{M}_{uj} I_j; \\ B_i = -M_{ui} I_u - (R_i - \dot{L}_i) I_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{T_1-1} \dot{M}_{ij} I_j. \end{cases}$$

При решении системы (10) параметры МИУ  $L_0, R_0, C_0, V_0$  считаются заданными. Индуктивности  $L_i$ , взаимоиндуктивности  $M_{ij}, M_{ij}, L_i, M_{ij}, M_{ui}$ , токи  $I_u, I_i$  берутся с нижнего временного слоя  $t = t^k$ . На каждом шаге по времени осуществляется решение системы (10) относительно скоростей токов,  $I_u, I_i$  значения полных токов на новом временном слое  $t = t^{k+1}$  определяются:

$$I_u = I_u + \dot{I}_u \Delta t, I_i = I_i + \dot{I}_i \Delta t, (i=1, 2, 3, \dots, T_1).$$

Зная значения токов из формул (5), (6), вычислим давление. Обобщенные силы в заготовке складываются с пондеромоторными и по формуле (9) определяются скорости движения заготовки, полные деформации, напряжения. Новая геометрия заготовки вычисляется по (7), и расчет повторяется для следующего временного слоя.

Для примера рассмотрим задачу трубчатой заготовки с криволинейной образующей.

Заготовка из алюминиевого сплава Д16М длиной  $40,5 \cdot 10^{-3}$  м, толщиной стенки  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Необходимо раздать заготовку импульсным магнитным по-

лем таким образом, чтобы получилось одинаковое радиальное перемещение по всей длине заготовки. Используем индуктор на раздачу длиной  $45 \cdot 10^{-3}$  м, навитый из медной шины числом витков – шесть.

Примем начало координат на оси индуктора на середине его длины. Ось  $Z$  совместим с продольной осью индуктора,  $r$  – радиус. Координаты срединной поверхности заготовки в равноотстоящих точках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Координаты срединной поверхности заготовки в равноотстоящих точках

$Z, \text{ см}$	2,025	1,575	1,125	0,675	0,225	-0,225	-0,675	-1,125	-1,575	-2,025
$r, \text{ см}$	2,00	2,50	3,50	3,75	3,80	3,90	3,90	4,20	4,50	5,375

Расчетом определяются координаты токового слоя индуктора в равноотстоящих точках, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Координаты токового слоя индуктора в равноотстоящих точках

$Z, \text{ см}$	2,25	1,50	0,75	0,00	-0,75	-1,50	-2,25
$r, \text{ см}$	1,60	1,50	3,40	3,20	3,10	-4,25	-4,95

При энергии зарядки магнитно-импульсной установки МИУ-5, равной 2,312 кДж, конечное радиальное перемещение всех элементов заготовки получилось равным  $1,5 \pm 0,3$  мм.

Методики и программа расчета позволяют решать разнообразные задачи и разрабатывать всевозможные технологические процессы МИОМ осесимметричных трубчатых и плоских заготовок.

Научная новизна заключается в развитии теории МИОМ, решении задачи МИОМ в связанной постановке для заготовок типа оболочки вращения с криволинейной образующей. Этим самым в перспективе расширяются возможности МИОМ для практического применения.

**Выводы.** Создавая различные геометрические зазоры между индуктором и заготовкой, можно деформировать заготовку типа оболочки вращения с криволинейной образующей для получения изделия с заданными размерами и формой.

#### Литература

1. Баженов В.Г., Ломунов В.К. Большие деформации оболочек вращения с учетом моментности напряженного состояния // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статистика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб. Горький: Изд-во ГГУ, 1983. С. 55–63.
2. Баженов В.Г., Ломунов В.К., Петров М.В. Математическая модель магнитно-импульсных процессов деформирования цилиндрических оболочек // Вестник Нижегородского университета. 1999. № 1. С. 55–63.
3. Баженов В.Г., Ломунов В.К., Петров М.В. Математическое моделирование процессов МИОМ для цилиндрических оболочек // Ресурсосберегающие технологии и автоматизация штамповочного производства: тез. докл. Тула: Изд-во ТулГУ, 1999. С. 141–147.
4. Гречников Ф.В., Черников Д.Г. Компьютерное моделирование формообразующих операций магнитно-импульсной обработки металлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 5 (36). С. 223–227.

5. Калантаров П.А., Нейман Л.П. Теоретические основы электротехники. М.: Госэнергоиздат, 1951. Т. 3. 464 с.
6. Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Анализ существующих путей интенсификации процесса магнитно-импульсной обработки // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2014. Вып. 1. С. 99–102.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 625 с.
8. Fen-Qiang Li, Jian-Hua Mo, Jian-Jun Li, Liang Huang, Hai-Yang Zhou. Formability of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet in magnetic pulse bulging. *Materials and Design*, 2013, vol. 52, pp. 337–344.
9. Quanliang Cao, Xiaotao Han, Zhipeng Lai, Qi Xiong, Xiao Zhang, Qi Chen, Houxiu Xiao, Liang Li. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 225, pp. 185–194. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.02.006.
10. Thibaudeau E., Kinsey B.L. Analytical design and experimental validation of uniform pressure actuator for electromagnetic forming and welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, pp. 251–263.

---

**ПЕТРОВ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tanusha2884@mail.ru).

**АВРЕЛЬКИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики и инженерной графики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (nuts2002@br.ru).

---

M. PETROV, V. AVRELKIN

#### MAGNETIC PULSE MACHINING OF SHELL ROTATION TYPE

**Key words:** magnetic-pulse treatment, deformation, workpiece, inductor, technique, program.

The work is dedicated to the development of magnetic-pulse machining. The problem of forming the workpiece is solved in a related statement, as the electromagnetic and deformation processes are interrelated. The procurement is adopted in the form of a thin-walled shell of revolution. Calculation determines the geometrical dimensions of the inductor, enabling to execute the distribution of the workpiece in such a way that the radial movement of the preform to be the same throughout. Thus, it is possible to develop technological processes of manufacturing parts of a revolution shell type with a curvilinear generatrix.

#### References

1. Bazhenov V.G., Lomunov V.K. *Bol'shie deformatsii obolochek vrashcheniya s uchetom momentnosti napryazhennogo sostoyaniya* [Large deformation of shells of revolution taking into account momentsthe stress state]. In: *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Statistika i dinamika deformiruemyykh sistem: Vsesoyuz. mezhvuz. sb.* [Applied problems of strength and plasticity. Statistics and dynamics of deformable systems]. Gor'kii, 1983, pp. 55–63.
2. Bazhenov V.G., Lomunov V.K., Petrov M.V. *Matematicheskaya model' magnitno-impul'snykh protsessov deformirovaniya tsilindricheskikh obolochek* [Mathematical model of magnetic-pulse processes of deformation of cylindrical shells]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University], 1999, no. 1, pp. 55–63.
3. Bazhenov V.G., Lomunov V.K., Petrov M.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov MIOM dlya tsilindricheskikh obolochek* [Mathematical modeling of the processes of the FIBROIDS for cylindrical shells]. *Resursosberegayushchie tekhnologii i avtomatizatsiya shtampovochnogo proizvodstva: tez. dokl.* [Proc. of Conf. «Resource-saving technologies and automation of die forging»]. Tula< Tula University Publ., 1999, pp. 141–147.
4. Grechnikov F.V., Chernikov D.G. *Komp'yuternoe modelirovanie formoobrazuyushchikh operatsii magnitno-impul'snoi obrabotki metallov* [Computer simulation of shaping operations mag-

netic-pulse treatment of metals]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of the Samara State Aerospace University], 2012, no. 5(36), pp. 223–227.

5. Kalantarov P.A., Neiman L.R. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1951, vol. 3, 464 p.

6. Kukhar' V.D., Kireeva A.E. *Analiz sushchestvuyushchikh putei intensivatsii protsessa magnitno-impul'snoi obrabotki* [Analysis of existing ways of intensification of the process of magnetic-pulse processing]. *Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Series: Technical Sciences], 2014, iss. 1, pp. 99–102.

7. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow, Nauka Publ., 1982, p. 625.

8. Fen-Qiang Li, Jian-Hua Mo, Jian-Jun Li, Liang Huang, Hai-Yang Zhou. Formability of Ti–6Al–4V titanium alloy sheet in magnetic pulse bulging. *Materials and Design*, 2013, vol. 52, pp. 337–344.

9. Quanliang Cao, Xiaotao Han, Zhipeng Lai, Qi Xiong, Xiao Zhang, Qi Chen, Houxiu Xiao, Liang Li. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 225, pp. 185–194. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.02.006.

10. Thibaudeau E., Kinsey B.L. Analytical design and experimental validation of uniform pressure actuator for electromagnetic forming and welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, pp. 251–263.

---

**PETROV MIKHAIL – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (tanusha2884@mail.ru).**

**AVRELKIN VLADIMIR – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (nuts2002@br.ru).**

---

**Ссылка на статью:** Петров М.В., Аврелькин В.А. Магнитно-импульсная обработка заготовок типа оболочки вращения // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 109–116.

УДК 658.264  
ББК 3350.7-420.7

В.В. ТАРАСОВА, В.В. АФАНАСЬЕВ, В.Г. КОВАЛЕВ,  
В.А. ТАРАСОВ, А.Г. КАЛИНИН

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА\*

*Ключевые слова:* автоматизированный тепловой пункт, отопление, статистическая обработка данных, влияние температуры наружного воздуха.

*Приведены результаты экспериментальных исследований режимов отопления здания с использованием автоматизированного теплового пункта с серийным программируемым контроллером ОВЕН ПЛК 150. Проведен анализ взаимосвязей температур и расхода прямой и обратной воды и мощности системы отопления и температуры наружного воздуха. Определена фактическая удельная отопительная характеристика здания. Показано, что система автоматического управления обеспечивает в здании комфортные условия в течение всего отопительного периода.*

Для экспериментальных исследований статических и динамических процессов в системе теплоснабжения здания и алгоритмов управления отоплением создан автоматизированный тепловой пункт с серийным программируемым контроллером ОВЕН ПЛК 150, использующим среду разработки CODESYS и совместимую измерительную периферию ОВЕН. Индивидуальный автоматизированный тепловой пункт для теплоснабжения корпуса «Д» размещается в технологическом помещении (Д-104) одного из корпусов Чувашского государственного университета.

Система теплоснабжения корпуса выполнена по зависимой схеме со смешением теплоносителя с помощью насоса, что позволяет применить наиболее энергосберегающие автоматизированные решения по регулированию систем абонента, учесть погодные факторы по датчику температуры наружного воздуха, тепловые характеристики здания и теплогидравлические характеристики системы. Появляется возможность не только качественного, но и качественно-количественного (смешанного) регулирования режимов отопления в широком диапазоне с учетом специфики теплового режима здания при одновременном сокращении потребляемого теплоносителя. Насосная схема присоединения системы отопления позволяет более точно, чем элеваторная, поддерживать необходимую температуру воздуха в отапливаемых помещениях, так как в этом случае возможно более совершенное регулирование подачи тепла на отопление путем изменения коэффициента подмешивания.

Применение насосного побуждения за счет универсальности и гибкости управления позволяет решать любые задачи регулирования систем абонента. Насос размещен на подающем трубопроводе. Необходимая температура теп-

---

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грант УМНИК 2015.

лоносителя в системе отопления устанавливается путем воздействия на двухходовой клапан регулятора. Функциональная схема автоматизированного теплового пункта приведена на рис. 1.

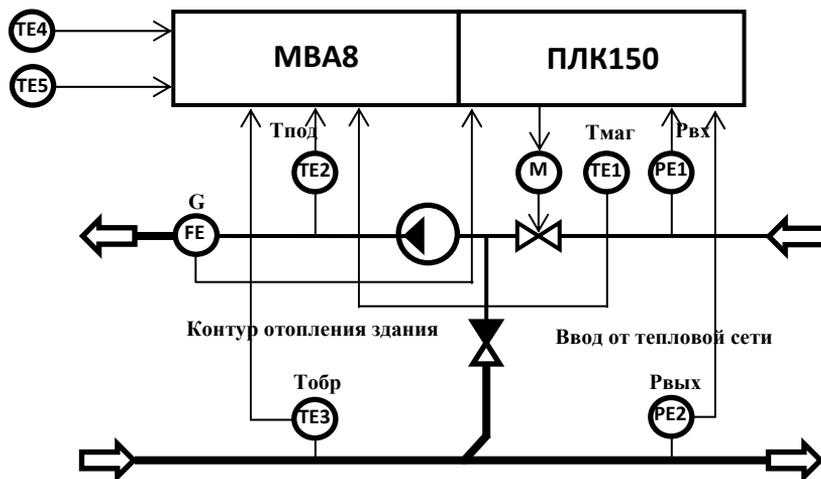


Рис. 1. Схема автоматизированного теплового пункта

Система автоматического управления отоплением включает в себя [2]:

- программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 150;
- модуль ввода аналоговый ОВЕН МВА8;
- датчики температуры воды в подающей магистрали (ТЕ1), на входе в систему отопления здания (ТЕ2), на выходе из системы отопления (ТЕ3) ТСП-L60 Pt 100;
- датчики температуры наружного (ТЕ4) и внутреннего (ТЕ5) воздуха ДТС 3005-PT1000;
- электромагнитный преобразователь расхода ПРЭМ (FE);
- преобразователи полного давления на входе в тепловой пункт (РЕ1) и на выходе из теплового пункта (РЕ2) ПД-Р;
- насос циркуляционный Wilo TOP – S 30/10;
- клапан регулирующий двухходовой с электроприводом (М);

Система позволяет реализовывать непрерывный контроль расхода и температуры прямой и обратной воды из подающей магистрали, непрерывный контроль расхода и температуры прямой воды, поступающей в систему отопления, непрерывный контроль давления воды на входе и выходе из тепловой сети. Реализуется также непрерывный контроль температуры наружного воздуха, температуры воздуха внутри помещения и температуры внутри стены. Сигналы с датчиков сходятся в шкаф автоматики и обрабатываются контроллером и его периферией. Согласно заданному алгоритму контроллер генерирует аналоговый управляющий сигнал на двухходовой клапан в подающем трубопроводе.

Экспериментальный сбор данных с теплового пункта проводился с 12 октября 2015 г. по 13 апреля 2016 г. Проводились как пассивные эксперимен-

ты по сбору данных, так и активные эксперименты по испытанию различных алгоритмов адаптивного управления отоплением. Из архива ПЛК извлечено более 80 файлов, содержащих все параметры, измеряемые и рассчитываемые по программе, разработанной в среде CODESYS. Периоды опроса датчиков ПЛК варьировались от 10 до 30 с. В архиве данные сохранялись в текстовом формате, извлеченные из архива данные обрабатывались в Excel. Исследовано более 160 ч работы системы с ПЛК с визуализацией данных в режиме реального времени. Итоговый объем анализируемых в Excel строк – более 5000.

Для непрерывного контроля и регистрации температуры и относительной влажности в различных помещениях корпуса «Д» использовались автономные регистраторы температуры ОВЕН Логгер100-ТВ. Обработка результатов измерений проводилась на персональном компьютере при помощи программного обеспечения (ПО), входящего в комплект поставки. С. Период опроса от 2 с до 24 ч.

Для анализа процессов теплопередачи через ограждающие конструкции использовались также данные по метеоусловиям г. Чебоксары с сайта <http://pogoda21.ru>, которые приведены на рис. 2. Во время отопительного периода разница между дневной и ночной среднемесячными температурами достигает 4°C.

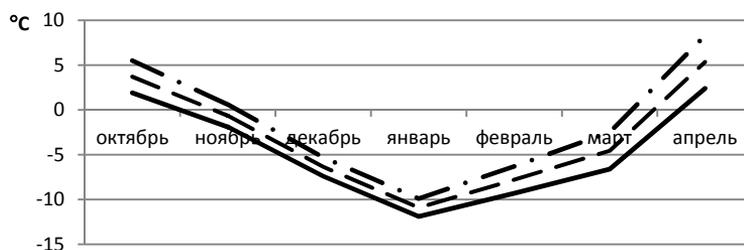


Рис. 2. Изменение среднемесячной дневной (· · ·), среднесуточной (---) и ночной (—) температур наружного воздуха в Чебоксарах в течение отопительного периода 2015–2016 гг.

Статистическая обработка архива данных ПЛК и метеоданных позволила получить зависимость мощности системы отопления корпуса «Д» и температур прямой и обратной воды в подающей магистрали от температуры наружного воздуха. Очевидно, что взаимосвязь температур прямой и обратной воды и температуры наружного воздуха должна определяться утвержденным температурным графиком 150/70. Из рис. 3 видно, что температурный график в отопительный период в основном соблюдался. Теплопотребление на отопление имеет корреляцию с температурой наружного воздуха (рис. 3, 4).

Результаты статистической обработки данных узла учета ПЛК автоматизированного теплового пункта корпуса «Д» показали, что фактическая мощность системы отопления зависит от температуры прямой воды (коэффициент корреляции  $r = 0,94$ ) и расхода воды (коэффициент корреляции  $r = 0,56$ ), от температуры обратной воды мощность практически не зависит (коэффициент корреляции  $r = 0,04$ ).

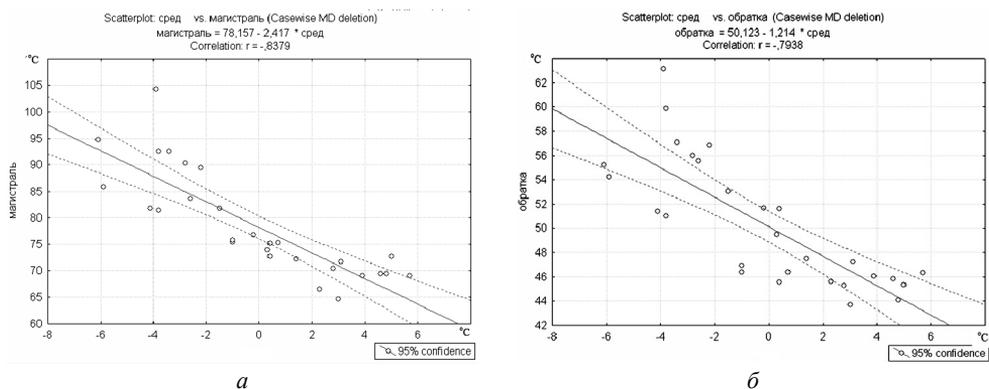


Рис. 3. Корреляционная зависимость значений температуры прямой воды в магистрали (а) и обратной воды (б) от температуры наружного воздуха

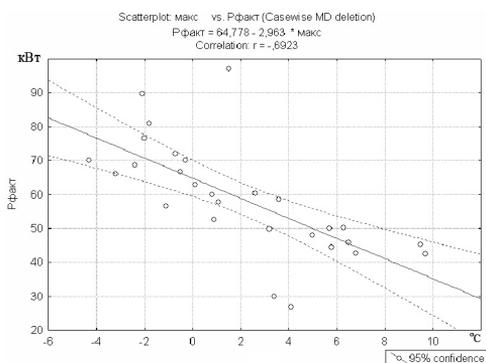


Рис. 4. Корреляционная зависимость фактической мощности системы отопления от температуры наружного воздуха

Эксперименты показали, что увеличение расхода воды в подающей магистрали вызывает лишь незначительное возрастание расхода воды в системе отопления. При этом существенно возрастает температура прямой воды в системе отопления здания при практически неизменной температуре обратной воды, вследствие этого возрастает мощность системы отопления. Таким образом, количественное регулирование расхода воды в подающей магистрали на входе в тепловой пункт здания приводит к местному качественному регулированию мощности отопления за счет изменения разности температур прямой и обратной воды в системе [1].

Статистическая обработка архива данных ПЛК позволила путем регрессионного анализа определить фактическую удельную тепловую характеристику корпуса «Д» с учетом влияния на тепловые потери конфигурации здания, показателя компактности, инсоляции, влияния на скорость движения воздушных потоков вблизи зданий растительности в качестве ветрозащитных барьеров. Регрессионный анализ зависимостей потребления тепловой мощности от температуры наружного воздуха (рис. 3) позволил определить фактическую отопительную характеристику корпуса «Д», которая учитывает все факторы, влияющие на тепловые потери.

По результатам регрессионного анализа данных архива ПЛК по потреблению тепловой энергии во время отопительного периода 2015–2016 гг. фактическая отопительная характеристика корпуса «Д» составляет  $0,3274 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \text{ К})$ , что отличается от проектной.

Максимальная мощность системы отопления по результатам регрессионного анализа данных архива ПЛК при температуре наружного воздуха  $-32^\circ\text{C}$  должна быть 147 кВт, средняя мощность за отопительный период при средней температуре наружного воздуха  $-4,9^\circ\text{C}$  составляет 70,5 кВт. Годовой расход тепла на отопление корпуса «Д» составит 316 Гкал. До установки автоматизированного теплового узла корпус «Д» не имел автоматического управления отоплением и индивидуального приборного учета потребления тепловой энергии, что не позволяет точно определить экономию от внедрения автоматического управления. Рассчитанный ООО «Коммунальные технологии» по данным узла коммерческого учета зданий и сооружений, находящихся по адресу г. Чебоксары, Московский просп., д. 15, и устаревшим проектным данным годовой расход тепловой энергии на отопление корпуса «Д» составлял 435 Гкал.

Обработкой данных архива узла учета определено среднее давление воды на входе в тепловой узел 6,17 атм, на выходе – 4,04 атм, перепад давлений менялся от 1,87 атм до 2,25 атм, в среднем 2,107 атм. Расход воды в системе отопления корпуса «Д» менялся незначительно и составлял в среднем  $6,87 \text{ м}^3/\text{ч}$ , расход воды в подающей магистрали менялся от  $1,21 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $2,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ , в среднем  $1,865 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Средний суточный расход воды в подающей магистрали составлял  $44,76 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , максимальный –  $62,4 \text{ м}^3/\text{сут.}$  Гидравлическое сопротивление теплового узла корпуса «Д» менялось от  $0,718 \text{ атм}/(\text{м}^3/\text{ч})$  до  $2,6 \text{ атм}/(\text{м}^3/\text{ч})$ , в среднем  $1,61 \text{ атм}/(\text{м}^3/\text{ч})$ . Средний коэффициент подмеса системы отопления менялся от 1,6 до 3,17, в среднем 2,67.

На рис. 5 приведены результаты статистической обработки извлеченных из архива ПЛК экспериментальных данных по средней мощности системы отопления корпуса «Д» и средней температуре наружного воздуха. Из рис. 5 видно, что при снижении температуры наружного воздуха программа в ПЛК согласно разработанному и реализованному алгоритму адаптивного управления увеличивает мощность системы отопления, а при повышении температуры наружного воздуха – уменьшает, вследствие чего температура в помещениях весь период поддерживалась в пределах  $19-21^\circ\text{C}$ , не было ни перетопов, ни недотопов.

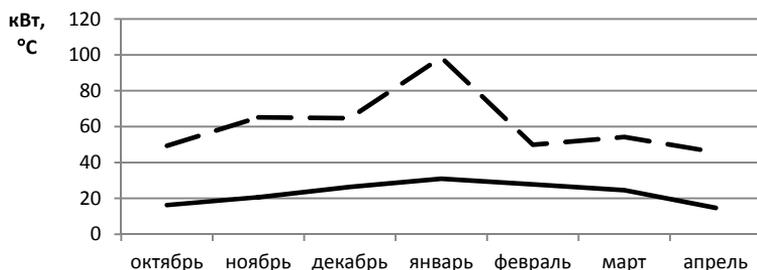


Рис. 5. Средняя мощность системы отопления (---) и средняя разность температур наружного воздуха и заданной температуры помещения (—) по месяцам

Измеренная с помощью Логгера 100-ТВ относительная влажность в помещениях за весь отопительный период находилась в пределах 32–45%, что значительно меньше рассчитанных по программе<sup>1</sup> [3] предельных значений относительных влажностей воздуха в помещениях, при которых начинается конденсация на стенке водяных паров.

**Выводы.** Автоматизированный тепловой пункт с серийным программируемым контроллером ОВЕН ПЛК 150 позволяет с помощью разработанной в среде CODESYS программы вести непрерывный контроль и запись в архив всех параметров режима теплоснабжения здания. Определены основные характеристики системы отопления корпуса «Д».

С помощью статистической обработки архива данных проведен регрессионный анализ зависимостей температур и расхода прямой и обратной воды и мощности системы отопления от температуры наружного воздуха. Определены фактическая удельная отопительная характеристика здания и расход тепла в течение отопительного периода. Показано, что система автоматического управления позволяет обеспечивать в здании комфортные условия в течение всего отопительного периода без перетопов и недотопов.

#### Литература

1. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В., Федоров Д.Г. Исследование расхода тепловой энергии на отопление зданий // Вестник Чувашского университета. 2014. № 3. С. 10–18.

2. Тарасов В.А., Калинин А.Г., Федоров Д.Г., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасова В.В. Модернизация теплового пункта корпуса с установкой системы автоматического управления отоплением с программируемым контроллером // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. Вып. XI. С. 152–160.

---

**ТАРАСОВА ВАЛЕНТИНА ВЛАДИМИРОВНА** – аспирантка кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([charming\\_cerl@rambler.ru](mailto:charming_cerl@rambler.ru)).

**АФАНАСЬЕВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([avvteo@mail.ru](mailto:avvteo@mail.ru)).

**КОВАЛЕВ ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([espp21@mail.ru](mailto:espp21@mail.ru)).

**ТАРАСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([tarwol@yandex.ru](mailto:tarwol@yandex.ru)).

**КАЛИНИН АЛЕКСЕЙ GERMAHOVIЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления электроприводами, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([humanoid1984@yandex.ru](mailto:humanoid1984@yandex.ru)).

---

<sup>1</sup> Расчет параметров процессов теплопередачи через ограждения с учетом теплопроводности, конвекции и излучения. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014618236 от 13.08.2014. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». Авторы: Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А.

V. TARASOVA, V. AFANASYEV, V. KOVALEV, V. TARASOV, A. KALININ  
EXPERIMENTAL STUDIES  
IN AUTOMATED THERMAL POINTS OF HEATING MODE

**Key words:** automatic heater, heating, statistical data processing, influence of outside temperature.

*The results of experimental studies of the building heating mode using an automated thermal point with the serial programmable controller OWEN PLC 150 are given. There is an analysis of the relationship of temperature, direct flow of water and return water, the power of the heating system and outdoor temperature. It determines the actual specific characteristics of the building heating. It is shown that the automatic control system provides comfort conditions in the entire heating period.*

References

1. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Tarasov V.A., Tarasova V.V., Fedorov D.G. *Issledovanie rashoda teplovoi energii na otoplenie zdaniy* [Statistical analysis of the heat flow in heating]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 10–18.
2. Tarasov V.A., Kalinin A.G., Fedorov D.G., Afanas'ev V.V., Kovalev V.G., Tarasova V.V. *Modernizatsiya teplovogo punkta korpusa s ustanovkoi sistemy avtomaticheskogo upravleniya otopleniem s programmiruемым controllerom* [Modernization of the substation enclosure system with automatic control of heating with programmable controller]. *Cheboksary, Chuvash University Publ.*, 2015, iss. XI, pp. 152–160.

---

**TARASOVA VALENTINA** – Post-Graduate Student, Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**AFANASYEV VLADIMIR** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**KOVALEV VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Head of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**TARASOV VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**KALININ ALEXEY** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Automatic Electric Drives Control Systems Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

---

**Ссылка на статью:** *Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Калинин А.Г.* Адаптивное управление режимом теплоснабжения здания с помощью автоматизированного теплового пункта // *Вестник Чувашского университета.* – № 3. – С. 117–123.

УДК 658.264  
ББК 3350.7-420.7

В.А. ТАРАСОВ, А.Г. КАЛИНИН,  
В.В. ТАРАСОВА, В.В. АФАНАСЬЕВ, В.Г. КОВАЛЕВ  
**ДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ\***

*Ключевые слова:* нестационарные температурные поля, распределенные параметры, передаточные функции, постоянные времени, среднеинтегральная температура.

*Показано, что стена здания является объектом с распределенными параметрами, температура в каждом слое которого является суммой слагаемых, каждое из которых удовлетворяет граничным условиям третьего рода. Передаточная функция для слоя на любой глубине стены может быть представлена как сумма инерционных звеньев с различными коэффициентами передачи и постоянными времени. Среднеинтегральная температура полностью характеризует тепловое состояние стены и может быть использована в качестве возмущающего параметра регулирования автоматизированных тепловых пунктов. Характеристики для среднеинтегральной температуры по форме близки к характеристикам инерционного звена.*

Для разработки алгоритмов оптимального управления системами отопления зданий и сооружений необходимы динамические тепловые характеристики ограждающих конструкций, которые являются объектами с распределенными параметрами. Тепловые поля в таких объектах описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Для математического моделирования нестационарных процессов теплопередачи через ограждения решается уравнение теплопроводности при граничных условиях 3-го рода, когда задаются температуры среды и коэффициенты теплоотдачи [5, 6]. В условиях несимметричного теплообмена плоская стена здания толщиной  $\delta$  (рис. 1) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкостью  $c$  и

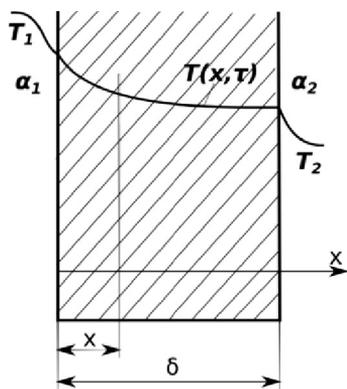


Рис. 1. Теплопередача через плоскую стену

плотностью  $\rho$  омывается с внутренней поверхности средой с температурой  $T_1$ , с внешней поверхности – средой с температурой  $T_2$ . При этом  $T_2 \neq T_1$ .

Передача тепла от воздуха в помещении к внутренней поверхности стены характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_1$ . Передача тепла от внешней поверхности стены к наружному воздуху характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_2$ . В общем случае несимметричного теплообмена  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  [5, 6].

Для одномерного нестационарного температурного поля в области  $0 < x < \delta$  при  $\tau > 0$  температурное поле описывается уравнением:

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грант УМНИК 2015.

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Начальное условие  $0 \leq x \leq \delta$  и  $\tau = 0$

$$T(x, 0) = f(x). \quad (2)$$

Граничные условия:

при  $x = 0$  
$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \alpha_1 [T_1 - T(0, \tau)] = 0; \quad (3)$$

при  $x = \delta$  
$$\lambda \frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 [T(\delta, \tau) - T_2] = 0.$$

Для расчета нестационарного температурного поля в стене при несимметричных граничных условиях третьего рода и любых начальных условиях решение уравнения (1) находится в виде конечной суммы, каждое слагаемое которой удовлетворяет уравнению (1) и граничным условиям третьего рода [5].

$$T(x, \tau) = (A_k - B_k x) + \sum_{n=1}^m \left[ C_n \left( \cos(\mu_n x) + \frac{\alpha_1}{\lambda \mu_n} \sin(\mu_n x) \right) \exp(-a \mu_n^2 \tau) \right]. \quad (4)$$

При изменении условий теплообмена, когда меняются температуры наружного воздуха или (и) температуры воздуха внутри помещения, происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Во время теплового переходного процесса распределение температуры по толщине стены является нелинейным (рис. 2).

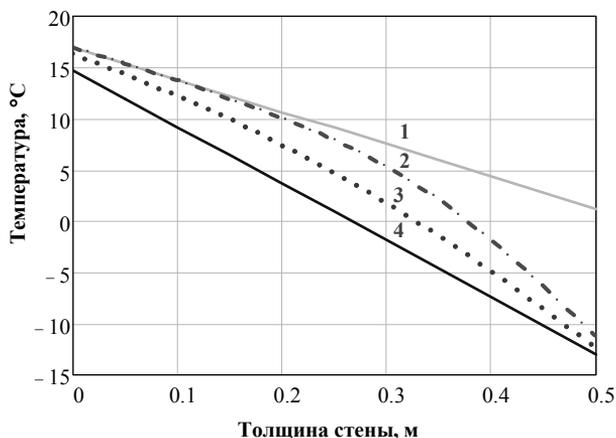


Рис. 2. Распределение температуры по толщине стены в различные моменты времени при похолодании:

- 1 – начальное стационарное распределение температуры перед началом теплового переходного процесса;
- 2 – распределение температуры через 6 ч после начала теплового переходного процесса;
- 3 – распределение температуры через 18 ч после начала теплового переходного процесса;
- 4 – конечное стационарное распределение температуры после окончания теплового переходного процесса

Формула (4) может быть представлена в виде

$$T(x, \tau) = v(x) + w(x, \tau). \quad (5)$$

Функция  $v(x)$  описывает установившийся стационарный режим с линейным распределением температуры по толщине стены, а функция  $w(x, \tau)$  – переходный тепловой процесс, по окончании которого функция  $w(x, \tau)$  стремится к нулю.

Функция  $w(x, \tau)$  имеет вид

$$w(x, \tau) = \sum_{n=1}^m C_n U_n \exp(-a\mu_n^2 \tau), \quad (6)$$

где  $U_n = \cos \mu_n x + \frac{\alpha_1}{\mu_n \lambda} \sin \mu_n x$ ,  $\mu_n$  определяется при решении характеристического уравнения [5]:

$$\operatorname{tg} \mu \delta = \frac{\mu \delta (1 + \sigma) Bi_1}{(\mu \delta)^2 - \sigma Bi_1^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma = \alpha_2 / \alpha_1$  – критерий несимметричности теплообмена;  $Bi_1 = \alpha_1 \delta / \lambda$  – критерий Био для внутренней поверхности стены.

Коэффициенты  $C_n$  определяются из начальных условий [5].

При исследованиях переходных процессов в системах автоматического регулирования применяется операторный метод с использованием преобразования Лапласа, при этом обычные дифференциальные уравнения преобразуются в алгебраические уравнения [1]. Математические модели ограждающих конструкций как объектов с сосредоточенными параметрами, которые описываются обычными дифференциальными уравнениями, позволяют разрабатывать только упрощенные алгоритмы управления системами теплоснабжения зданий и сооружений [3, 4]. Для решений дифференциального уравнения (1) в частных производных преобразование Лапласа может быть применено для функций, описывающих зависимость температуры от времени на определенной глубине.

Функция  $w(x, \tau)$  может быть представлена в виде

$$w(x, \tau) = \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{T_n} \exp\left(-\frac{\tau}{T_n}\right), \quad (8)$$

где  $k_n$  – коэффициент передачи, зависящий от координаты  $x$ ;  $T_n$  – постоянные времени, зависящие от коэффициента температуропроводности стены  $a$  и корней  $\mu_n \delta$  характеристического уравнения (7)

$$T_n = \frac{1}{a\mu_n^2}.$$

Изображение по Лапласу функции  $w(x, y)$  может быть представлено в виде

$$W(p) = \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{T_n p + 1}. \quad (9)$$

Согласно формулам (6) и (9) передаточная функция для слоя на любой глубине стены может быть представлена как сумма передаточных функций инерционных звеньев с различными постоянными времени и различными коэффициентами передачи. Постоянные времени зависят только от граничных условий, коэффициенты передачи зависят как от граничных, так и от началь-

ных условий. Поскольку корни характеристического уравнения (7) образуют возрастающую последовательность (см. таблицу), постоянные времени слагаемых суммы (6) убывают, что позволяет ограничиться несколькими слагаемыми суммы (8).

**Корни характеристического уравнения (7)  
и постоянные времени слагаемых суммы (8)**

Номер слагаемого	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Корень $\mu\delta$	2,552	5,209	7,986	13,79	16,767	19,78	22,82	25,88	28,948	32,03
Постоянная времени $T_n$ , ч	22,9	5,47	2,32	0,78	0,528	0,379	0,285	0,222	0,177	0,145

С течением времени все слагаемые суммы (8) становятся исчезающе малыми по сравнению с первым, наступает регулярный режим, когда любой слой стены можно считать инерционным звеном с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}.$$

Колебания температуры наружного воздуха вызывают изменения температуры и тепловых потоков в толще и на внутренней поверхности наружного ограждения. По мере удаления от наружной поверхности колебания температуры в толще ограждения уменьшаются по величине и запаздывают во времени [6]. Колебания температуры внутренней поверхности непосредственно влияют на температуру помещения. Свойство теплоустойчивости сквозному прониканию температурных колебаний характеризуют показателем затухания, который определяет, во сколько раз амплитуда изменения температуры на внутренней поверхности ограждения  $T_m(0)$  меньше амплитуды колебания наружной температуры  $T_m(\delta)$ .

$$\nu = \frac{T_m(\delta)}{T_m(0)}.$$

Из общего решения уравнения (1) определяются амплитуды температур на внутренней и внешней поверхностях стены, что позволяет определить показатель сквозного затухания  $\nu$  [5]. При периоде 24 ч, что соответствует суточному изменению температуры воздуха, для стены толщиной 0,5 м показатель сквозного затухания  $\nu = 44$ . Таким образом, даже при разности максимальной и минимальной суточных температур наружного воздуха, равной 15°C, амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности стены не превысит 0,35°C, при средней в течение отопительного периода разности максимальной и минимальной суточных температур наружного воздуха 5,7°C амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности стены не превысит 0,13°C.

Расчеты нестационарных тепловых полей показали, что стена является объектом с распределенными параметрами, температура на внешней поверхности стены достигает установившегося значения через несколько часов, на внутренней поверхности через десятки часов после начала теплового переходного процесса. При резком похолодании, когда температура снаружи по-

низилась на  $15^{\circ}\text{C}$  при неизменной температуре в помещении, температура на внутренней поверхности оставалась практически неизменной в течение 16 ч. Температура наружной поверхности стены в течение первых 4 ч снизилась на  $12^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Процесс выхода стены толщиной  $d = 0,5$  м на установившийся тепловой режим занимает более 2 суток [2]. Поэтому температура внутренней поверхности стены не может быть непосредственно использована в качестве параметра регулирования температуры в помещении. Температура наружной поверхности стены вследствие влияния на нее случайных изменений климатических условий также не может быть непосредственно использована в качестве параметра регулирования температуры.

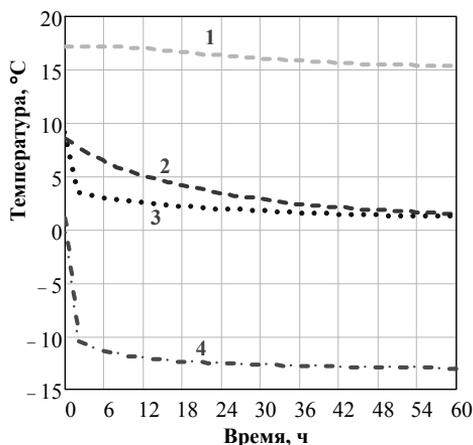


Рис. 3. Временные зависимости температуры на внутренней поверхности стены (1); среднеинтегральной температуры (2); средней по сечению температуры стены (3) и температуры на наружной поверхности стены (4)

Изменение во времени теплосодержания стены в течение переходного процесса характеризуется среднеинтегральной температурой [2, 5]

$$T_{sr} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(x, \tau) dx, \quad (10)$$

$$T_{sr} = A_k - \frac{B_k \delta}{2} + \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \sum_{n=1}^m \left[ C_n \left( \cos(\mu_n x) + \frac{\alpha_1}{\lambda \mu_n} \sin(\mu_n x) \right) \exp(-a \mu_n^2 \tau) \right] dx. \quad (11)$$

При протекании теплового переходного процесса от одного установившегося режима к другому среднеинтегральная температура и, соответственно, теплосодержание стены меняются. Изменение аккумулированного стеной тепла при переходе от одного установившегося теплового режима к другому определяется изменением среднеинтегральной температуры

$$\Delta Q = c \rho V_{cm} (T_{srk} - T_{srn}),$$

где  $V_{cm}$  — объем стены.

Среднеинтегральная температура стены вследствие затухания случайных колебаний температуры в объеме стены, вызванных быстрыми незначитель-

ными изменениями климатических условий, полностью характеризует тепловое состояние стены и может быть использована в качестве возмущающего параметра систем регулирования автоматизированных тепловых пунктов и определения удельной динамической тепловой характеристики здания и сооружения [2]. В упрощенных математических моделях, когда ограждающие конструкции рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами, используется средняя по сечению стены температура [3]. Вследствие нелинейного закона распределения температуры по сечению в начале переходного процесса средняя по сечению и среднеинтегральная температура стены различаются и становятся одинаковыми только по окончании переходного процесса (рис. 3).

Расчет нестационарного теплового поля стены дает аналитическую зависимость (11) от времени среднеинтегральной температуры в течение теплового переходного процесса при любых начальных условиях. Преобразование Лапласа позволяет получить передаточную функцию  $W(p)$ .

Амплитудно-фазочастотная характеристика  $W(j\omega)$  для среднеинтегральной температуры

$$W(j\omega) = \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{T_n(j\omega) + 1},$$

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega).$$

На рис. 4 приведены рассчитанные по выражению (9) частотные характеристики  $W(j\omega)$  для среднеинтегральной температуры кирпичной стены толщиной 0,5 м.

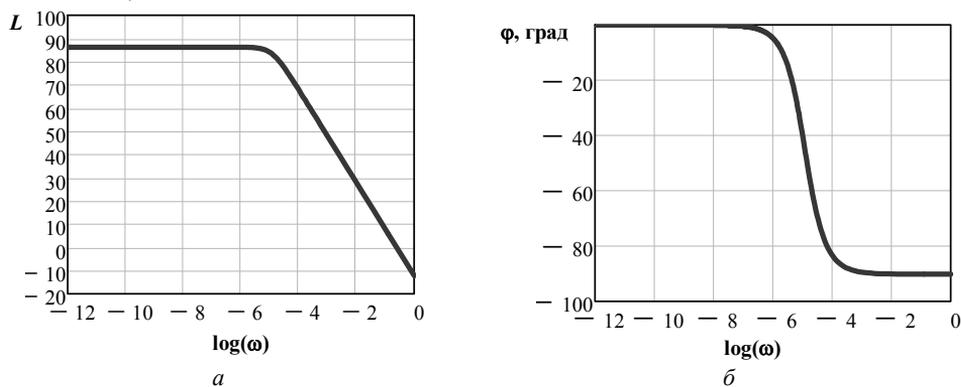


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная (а) и логарифмическая фазово-частотная (б) характеристики для среднеинтегральной температуры

Из рис. 4 видно, что амплитудно-фазовые частотные характеристики для среднеинтегральной температуры по форме близки к характеристикам инерционного звена.

**Выводы.** Стена здания и сооружения является объектом с распределенными параметрами, температура в каждом слое которого выражается в виде суммы слагаемых, каждое из которых удовлетворяет граничным условиям третьего рода. Передаточная функция для слоя на любой глубине стены может быть представлена как сумма передаточных функций инерционных звеньев с различными коэффициентами передачи и постоянными времени. При наступлении регулярного режима любой слой стены можно считать инерционным звеном. Среднеинтегральная температура стены вследствие затухания случайных колебаний температуры в объеме стены, вызванных быстрыми незначительными изменениями климатических условий, полностью характеризует тепловое состояние стены и может быть использована в качестве возмущающего параметра регулирования автоматизированных тепловых пунктов, а также для определения удельной динамической тепловой характеристики зданий и сооружений и аккумулированного стеной тепла.

#### Литература

1. Автоматическое управление электротермическими установками / под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1990. 416 с.
2. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Тарасова В.В., Федоров Д.Г. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 20–29.
3. Панферов В.И., Анисимова Е.Ю., Нагорная А.Н. К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2006. № 14. С. 128–133.
4. Прокочук Е.Л. Синтез системы упреждающего управления процессом подачи тепла на отопление здания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дзержинск, 2009.
5. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8. С. 265–269.
6. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопередачи // Региональная энергетика: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 9. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. С. 128–144.

---

**ТАРАСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tarwol@yandex.ru).

**КАЛИНИН АЛЕКСЕЙ GERMAHOVIЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления электроприводами, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (humanoid1984@yandex.ru).

**ТАРАСОВА ВАЛЕНТИНА ВЛАДИМИРОВНА** – аспирантка кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (charming\_cerl@rambler.ru).

**АФАНАСЬЕВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (avvteo@mail.ru).

**КОВАЛЕВ ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (espp21@mail.ru).

---

V. TARASOV, A. KALININ, V. TARASOVA, V. AFANASYEV, V. KOVALEV  
DYNAMIC THERMAL PERFORMANCE OF FENCING STRUCTURES

**Key words:** *unsteady temperature fields, distributed parameters, transfer functions, time constants, the average integral temperature.*

*The building wall is shown to be an object with distributed parameter, the temperature in each layer being a sum of terms, each of which satisfies the boundary conditions of the third kind. The transfer function for the layer in any depth of the walls can be represented as the sum of inertial links with different transmission ratios and time constants. Average integral temperature fully characterizes the thermal state of the wall and can be used as a disturbance parameter to control automated thermal points. Specifications for the average integral temperature of the shape are close to that of the inertial unit.*

References

1. Svenchanskii A.D., ed. *Avtomaticheskoe upravlenie elektrotermicheskimi ustanovkami* [Automatic control of electrothermal installations]. Moscow, Energoizdat Publ., 1990, 416 p.
2. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Tarasov V.A., Tarasova V.V., Fedorov D.G. *Issledovanie nestatsionarnykh teplovykh rezhimov otopeniya zdaniy i sooruzheniy* [The study of non-stationary thermal modes of heating of buildings and structures]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 20–29.
3. Panferov V.I., Anisimova E.Yu., Nagornaya A.N. *K teorii matematicheskogo modelirovaniya teplovogo rezhima zdaniy* [The theory of mathematical modeling of the thermal regime of buildings]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, no. 14, pp. 128–133.
4. Prokopchuk E.L. *Sintez sistemy uprezhdayushchego upravleniya protsessom podachi tepla na otopenie zdaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Synthesis of proactive management of process heat supply system for heating the building. Diss. Abstract]. Dzerzhinsk, 2009.
5. Tarasova V.V. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh teplovykh protsessov v ograzhdayushchikh konstruktsiyakh zdaniy* [Mathematical modeling of non-stationary thermal processes in the building envelope]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2016, no. 8, pp. 265–269.
6. Tarasova V.V. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teploperedachi* [Mathematical modeling of transient heat transfer processes]. *Regional'naya energetika: problemy i resheniya: sb. nauch. tr. Vyp. 9*. [Regional power engineering and electrical engineering: problems and decisions: Collected papers, issue 9]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2013. pp. 128–144.

---

**TARASOV VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**KALININ ALEXEY** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Automatic Electric Drives Control Systems Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**TARASOVA VALENTINA** – Post-Graduate Student, Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**AFANASYEV VLADIMIR** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Heat and Power Plants Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**KOVALEV VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Head of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

---

**Ссылка на статью:** *Тарасов В.А., Калинин А.Г., Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г. Динамические тепловые характеристики ограждающих конструкций // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 124–131.*

УДК 621.3.011.7  
ББК 3211

В.А. ЩЕДРИН, П.Л. ВОРОНОВ

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СЕТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

*Ключевые слова:* электрические и магнитные величины, единицы в системах измерений, параметры режима, энергия, мощность, инвариантность мощности, пространственно-временная система физических величин.

*Приведены формулы размерности и таблицы соотношений между электромагнитными параметрами режима электротехнических комплексов и сетей в системах единиц СИ и СГС, показана их связь с пространственно-временной системой физических величин Р.О. Бартини, раскрыт физический смысл формул размерности применительно к электрическим и магнитным величинам, выявлена связь основных единиц с природой и характером физических явлений, исследуемых при анализе режимов работы электротехнических комплексов и систем.*

**1. Физические величины и их единицы.** Измерить какую-либо физическую величину означает получить экспериментальным путём отношения её значения к некоторому стандартному значению. При этом важно соблюсти однозначный характер измерения с тем, чтобы искомое отношение двух однородных физических величин не зависело от принятых единиц.

Между тем на практике подчас используются и некоторые условные числовые характеристики, которые в принципе не являются единицами физических величин. Например, в системах автоматического регулирования результат измерения выдаётся не в виде числа, а преобразуется в определённую команду, управляющую системой устройств или механизмов. В электротехнике, как правило, информацию об измеряемых физических величинах получают по показаниям приборов в делениях шкалы, т.е. фактически по значениям линейных или угловых отклонений стрелок приборов. По существу, измерение электрической величины напряжения, тока, мощности и т.д. сводится к линейному или угловому измерению, осуществляемому через ряд промежуточных звеньев. В какой-то мере применяемые измерительные приборы подобны аналоговым вычислительным машинам.

Цифровые измерительные комплексы и приборы на базе современных ЦВМ выдают измеряемые значения физических величин не только в виде числа, но и в форме числовых функций. Особенностью новых измерительных устройств является то, что между единицами разных физических величин автоматически устанавливаются зависимости на основе законов, которые связывают между собой измеряемые величины.

Однако следует различать уравнения связи между физическими величинами и уравнения связи между числовыми значениями. Если первый вид связей даёт соотношения независимо от единиц физических величин, то во втором случае уравнения связи могут представляться в разной форме, включая коэффициенты

пропорциональности. При этом для установления самих единиц непременно должны быть использованы уравнения между числовыми значениями.

Исходя из сказанного, можно в принципе создать произвольную (желаемую) систему единиц. Для этого достаточно выбрать основные единицы системы совершенно произвольно и независимо друг от друга. Установив затем размеры основных единиц, найти определяющие соотношения, которые связывают основные единицы с производными, причём так, чтобы эти соотношения выполнялись между числовыми значениями. Для этого вводятся соответственно необходимые коэффициенты пропорциональности и определяющие соотношения. Таким способом были построены многочисленные системы единиц. Особой логичностью и последовательностью отличается система СГС (сантиметр, грамм, секунда), созданная Гауссом, и две ее разновидности (СГСЭ и СГСМ), которые находят до сих пор широкое применение в физике, астрономии, электротехнике и ряде смежных наук. При описании электромагнитных явлений в системе СГС присутствует лишь одна константа – это скорость света. Расчеты и вычисления в этой системе выполняются гораздо проще, нежели в Международной системе единиц СИ (метр, килограмм, секунда, ампер), преимущество которой проявляется лишь в том, что она базируется на использовании практических единиц (сила тока, разность потенциалов, заряд, момент, мощность). В системе СИ соблюдается единство выражений для энергии как при механических, так и при электромагнитных процессах (джоуль = ньютон метр = вольт кулон = ампер вебер), что удобно при решении ряда числовых задач.

Однако из-за ввода в систему единиц СИ двух размерных постоянных  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  теряются простота и наглядность записи уравнений динамических процессов в электротехнических комплексах и системах, а именно уравнений электродинамики Максвелла. Самое неприятное заключается в том, что векторные характеристики электромагнитного поля  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$ , будучи по физическому смыслу однородными, теряют в системе СИ свойство однородности и приобретают разные размерности.

Заметим, что к проблемам размерностей величин и физическому содержанию формул размерностей было обращено внимание многих видных ученых [3, 7–9 и др.]. В этом плане представляют интерес суждения выдающихся физиков М. Планка и А. Зоммерфельда. Планк придерживался той точки зрения, что размерность какой-либо величины не есть свойство, связанное с существом её, а представляет собой просто некоторую условность, определяемую выбором системы измерений. Отсюда следует, что нет ничего особенного в том, что в разных системах единиц одна и та же величина имеет различные размерности и разные числовые значения. Возражая Планку, Зоммерфельд утверждал, что выбор основных величин и их размерностей связан с их физической сущностью, что число основных единиц задаётся природой и характером физических явлений, которые исследуются.

Ясно, что использование разных систем единиц требует постоянного внимания в процессе вычислений и измерений, а произвольный выбор основных единиц ведет к изменению производных единиц и создает практические труд-

ности при необходимости их определения и перевода единиц из одной системы измерений в другую. Задача определения производных единиц при изменении основных не всегда является тривиальной процедурой. Для ее осуществления используются соответствующие формулы размерности. Между тем существуют разные подходы к выбору и обоснованию основных единиц физических величин. Например, некоторые исследователи считают, что вполне достаточно иметь лишь одну основную единицу (длину), другие указывают на целесообразность выбора двух единиц (длина и время), а кое-кто предлагает обходиться бесконечным числом основных единиц физических величин. Однако, на наш взгляд, из всех этих предложений особого внимания заслуживает система физических величин Р.О. Бартини [1], содержащая лишь две размерности (длина  $L$ , и время  $T$ ). Ниже в данной статье будет приведена расширенная таблица (матрица) этой системы физических величин с соответствующими пояснениями.

**2. Основные и производные единицы, формулы размерности физических величин.** Определение производных единиц с помощью формул размерностей физических величин в одной системе осуществляется достаточно просто. Например, используя закон Кулона, можно установить в системе СГС формулу размерности электрического заряда в виде

$$q = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1},$$

где  $L$  – длина;  $M$  – масса;  $T$  – время.

Эта формула определяется посредством соотношения

$$q^2 = Fr^2 = Mar^2 \Rightarrow MLT^2L^2 = L^3MT^2,$$

где  $a$  – ускорение.

При решении числовых задач на практике возникают, прежде всего, трудности с выбором коэффициентов в формулах размерностей, связанных с использованием различных систем электрических и магнитных величин, поскольку даже в симметричной системе СГС иногда для электромагнитных параметров применяют две дополнительные системы (СГСЭ и СГСМ), которые заметно отличаются. Поэтому важно знать, как принципиально построены системы единиц в СИ и СГС, чтобы безошибочно находить соотношения между величинами этих систем. Незнание соотношений нередко приводит к досадным ошибкам в расчетах, особенно при преобразованиях физических величин, сопоставляемых тензорам, и в ряде других случаев.

Когда речь идет о взаимодействиях в электростатике, для определения производных величин удобно использовать закон Кулона:

$$F_{\text{Э}} = k_1 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2},$$

где  $q_1, q_2$  – величины зарядов;  $r$  – расстояние между зарядами;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $k_1$  – размерный коэффициент.

В системе СГС коэффициент  $k_1 = 1$ , а величина заряда, определяемая через единицы длины и силы, не имеет специального наименования. Заметим, что в СИ она называется кулоном и определяется количеством электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника в одну секунду при силе тока в 1 А. Как известно сила тока во всех системах измерения представляет

собой производную  $dQ/dt$ . С помощью других уравнений электростатики могут быть установлены единицы напряженности электрического поля, емкости, разности потенциалов и т.д.

Гораздо сложнее выбрать уравнения для описания взаимодействия токов, протекающих в обмотках или контурах электротехнических устройств. Опыт показывает, что между двумя обмотками, оси которых расположены на одной прямой, сила взаимодействия равна

$$F_M = -k_2 \mu \frac{I_1 I_2 s_1 s_2 w_1 w_2}{r^4}, \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – токи в обмотках;  $s_1$  и  $s_2$  – сечения проводов обмоток;  $w_1$  и  $w_2$  – количество витков обмоток;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $k_2$  – размерный коэффициент.

Взаимодействие токов можно отнести к фундаментальным явлениям, как и тяготение или взаимодействие зарядов, которое существенно усложняется ферромагнитными свойствами материалов, используемых в электротехнике. При этом надо учитывать, что взаимодействие электрического и магнитного полей с веществом заметно отличаются. Если в вакууме уравнения электромагнитного поля по отношению к векторам  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  симметричны, то в отношении источников поля, связанных с веществом, имеет место несимметрия, обусловленная отсутствием в природе магнитных зарядов. Единственными источниками магнитных полей являются электрические токи, и всюду выполняется уравнение  $\text{div } \mathbf{B} = 0$ . Поля создаются замкнутыми петлями токов. Петли или контуры характеризуются дипольными магнитными моментами (ток  $\times$  площадь), что отражено в формуле (1). Магнитное поле петли с током по своей конфигурации существенно отличается от конфигурации поля двух разведенных на расстояние зарядов разного знака. Попытка заменить в (1) токи магнитными массами полюсов

$$F_M = k_2 \mu \frac{m_{01} / \mu_1 m_{02} / \mu_2}{r^2} \quad (2)$$

и получить на основе законов электромагнетизма системы единиц и отношения между ними представляется физически некорректной процедурой. Проще и вполне обоснованно можно было бы для этой цели использовать уравнение взаимодействия двух параллельных проводников с токами

$$F_M = k_3 \frac{I_1 I_2 l}{d},$$

где  $l$  – длина проводов;  $d$  – расстояние между проводами;  $k_3$  – размерный коэффициент.

Но обычно решение задачи по определению взаимодействия токов разбивают на два этапа. Сначала исследуется взаимодействие тока  $I_1$  контура (проводника) с внешним полем, созданным другим источником магнитного поля (током  $I_2$ ). Поскольку контур тока  $I_1$  обладает свойствами диполя, то на него действует внешнее поле, вызывая вращающий момент, который равен

$$m = k_4 B I_1 s w \sin \alpha,$$

где  $m$  – момент;  $B$  – магнитная индукция магнитного поля источника;  $\alpha$  – угол между положительным направлением нормали к плоскости контура в

исходном положении и направлением нормали, когда магнитный момент равен нулю.

Положительное направление нормали легко определяется правилом буравчика. Подчеркнём, что подобно тому, как напряжённость электрического поля включает в себя электрическую проницаемость, магнитная индукция включает в себя магнитную проницаемость.

Затем на втором этапе определяют индукцию  $B$ , создаваемую в произвольной точке контуром, по которому проходит ток  $I_2$ . Значение индукции находят по закону Био, Савара и Лапласа

$$B = k_5 \mu \oint \frac{I_2 \sin \theta}{r^2} dl, \quad (3)$$

где  $k_5$  – коэффициент;  $dl$  – элемент контура;  $r$  – радиус-вектор от элемента до точки, в которой находят магнитную индукцию  $B$ , а угол  $\theta$  образован положительными направлениями  $dl$  и  $r$ .

Следовательно, из (2) и (3) получаем выражение момента в виде

$$m = k_4 k_5 \mu \oint \frac{I_1 I_2 s w \sin \alpha \sin \theta}{r^2} dl. \quad (4)$$

Очевидно, что произведение коэффициентов  $k_4 \cdot k_5$  отличается лишь числовым множителем от коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$ . В целом записанное выражение (4) для момента по смыслу аналогично формуле закона Кулона. Используя эту аналогию, можно составить два семейства уравнений:

$$1) F_3 = q_1 E; E = k_1 \frac{q_2}{\varepsilon \cdot r^2}; D = k_6 \cdot \varepsilon \cdot E;$$

$$2) m = k_4 B I_1 s w \sin \alpha, B = k_5 \mu \oint \frac{I_2 \sin \theta}{r^2} dl; H = k_7 \frac{B}{\mu}.$$

Отсюда нетрудно установить соответствия между векторами  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ ;  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$ , а также между величинами  $\varepsilon$  и  $1/\mu$ .

Попутно заметим, что принятое и исторически сложившееся соответствие в названиях векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  не имеет физического обоснования. Естественным является соответствие векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ . Помимо высказанного замечания принципиальным является вопрос о физическом содержании соотношений между векторами  $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}$  и  $\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}$ , где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  – параметры, характеризующие среду, в которой исследуются физические явления. Дело в том, что понимание векторов  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{D}$  в веществе должно быть расширено до уравнений  $\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 - \mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}$ , где в последние выражения введены два новых вектора:  $\mathbf{M}$  – намагниченности,  $\mathbf{P}$  – поляризации, которые могут быть обусловлены физическими причинами вне влияния электромагнитного поля. В этой связи возникает вопрос о несоответствии размерностей векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$  в системе СИ.

Интегральная форма записи первого и второго уравнений Максвелла, широко используемая на практике, имеет вид:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int \mathbf{J} ds, \quad \oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{B} ds.$$

Эти два уравнения называют законами полного тока и электромагнитной индукции, соответственно. Они содержат предельные переходы, не требующие никаких оговорок. Однако это справедливо тогда, когда подынтегральные выражения в них непрерывные и дифференцируемые функции. Между тем введение среды и векторов  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{P}$  нарушает это условие и требует дополнительных уравнений к уравнениям Максвелла в интегральной форме.

При решении числовых примеров и задач на практике часто возникают трудности с выбором коэффициентов в формулах размерностей, связанных с использованием различных систем электрических и магнитных величин. Даже в рамках одной симметричной гауссовой системы единиц (СГС), как уже отмечалось, сложились исторически две системы: электростатическая (СГСЭ) и электромагнитная (СГСМ), которые заметно отличаются и, несмотря на введение международной системы единиц СИ, во многих случаях используются до сих пор.

**3. Выбор коэффициентов в формулах размерности.** В системе СГСЭ введённые выше коэффициенты в формулах размерностей принимаются равными:  $k_1 = k_4 = k_6 = 1$ ,  $k_5 = \mu_0$ . Ранее произведение  $\mu_0\mu$  объединяли и называли абсолютной магнитной проницаемостью  $\mu$ , а безразмерную магнитную проницаемость называли относительной магнитной проницаемостью. Ее обозначали как  $\mu_r$ , принимая для вакуума равной единице. Введение коэффициента  $k_1 = 1$  позволяет определить электростатическую единицу количества электричества и электростатическую единицу силы тока.

В уравнении (4) для момента  $m$  имеют место единицы для всех входящих в него величин. Поэтому экспериментально необходимо было найти только величину  $\mu_0$ . Развита Максвеллом электромагнитная теория света позволила установить, что в системе СГСЭ магнитная проницаемость  $\mu_0 = 1 / c^2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме ( $c = 2,997925 \cdot 10^8$  м/с).

В СГСМ введённые коэффициенты принимаются равными:  $k_4 = k_5 = k_7 = 1$ ,  $k_6 = 1 / k_1 = \epsilon_0$ . При сделанном выборе оказывается, что значение силы тока в этой системе будет в  $c$  раз больше, где  $c$  – это скорость света в вакууме [см/с]. Тогда единица заряда в СГСМ оказывается приблизительно в  $3 \cdot 10^{10}$  раз больше единицы заряда в СГСЭ. Если подставить соответствующие значения в выражение закона Кулона, то получим, что  $\epsilon_0 = 1 / c^2$ . Заметим, что произведение  $\epsilon_0\epsilon$  ранее аналогично произведению  $\mu_0\mu$  называлось абсолютной диэлектрической проницаемостью (обозначалось  $\epsilon$ ), а безразмерная проницаемость  $\epsilon_r$  именовалась относительной диэлектрической проницаемостью.

Размерные коэффициенты в системе СГС имеют следующие значения:  $k_1 = k_6 = k_7 = 1$ ;  $k_4 = k_5$ . В данном случае единицы заряда и силы тока совпадают с соответствующими единицами в системе СГСЭ. Коль скоро при этом  $k_4 \cdot k_5 = 1 / c$ , а сами коэффициенты  $k_4$  и  $k_5$  одинаковы, каждый из них будет равен  $1 / c$ . Обратим внимание на то, что в системе СГС  $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ ; в системе СГСЭ  $\epsilon_0 = 1$ ,  $\mu_0 = 1 / c^2$ , а в системе СГСМ  $\epsilon_0 = 1 / c^2$ ,  $\mu_0 = 1$ . Отсюда в системе СГС выражения для момента и индукции будут:

$$m = \frac{1}{c} B I_1 s w \sin \alpha, \quad B = \frac{1}{c} \mu \oint \frac{I_2 \sin \theta}{r^2} dl.$$

Отметим, что в электротехнической и радиотехнической литературе широкое распространение получила так называемая рационализированная форма записи уравнений электромагнетизма Максвелла. Она же принята за основу и при построении международной системы СИ. Это отразилось на изменении коэффициентов  $k_1$  и  $k_5$ :

$$k_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad k_5 = \frac{\mu_0}{4\pi}.$$

Изменились и другие коэффициенты:  $k_4 = 1$ ;  $k_6 = \epsilon_0$ ;  $k_7 = 1 / \mu_0$ , а также видоизменились и вышеприведённые формулы для величин электрического и магнитного полей, которые стали записывать как

$$E = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}; \quad B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \oint \frac{I_2 \sin \theta}{r^2} dl.$$

При этом оказалось, что сила взаимодействия двух проводников с токами в 1 [А] на расстоянии 1 [м] и при длине проводников  $l = 1$  [м] равна 1 ньютону, [Н], что соответствует определению силы электрического тока в СИ. В этой системе единиц закон Кулона и формулы Ампера приобрели, соответственно, вид:

$$F_9 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, \quad F_M = \frac{\mu_0\mu I^2 l}{2\pi a}, \quad F_M = BI l \sin \alpha,$$

где  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м ( $A^2 c^2 / M^2 H$ );  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м ( $H / A^2$ ).

Заметим, что из метрологических соображений необходимо различать параметры  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$ . Величина магнитной проницаемости  $\mu_0$  по международному соглашению принимается неизменной, а значение  $\epsilon_0$  вычисляется с точностью до определения скорости света из выражения  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$ , где размерность  $c$  [м/с].

**4. Соотношения между электромагнитными единицами в системах СИ и СГС.** В настоящее время, как правило, применяется международная система единиц СИ, в которой в качестве четвёртой основной единицы физической величины была принята единица  $I$  – сила тока (ампер). Формулы размерности предшествующей системы МКСМ полностью совпадают с системой СГСМ, но существенно отличаются от системы СИ, хотя все единицы физической величины в них одни и те же. Поскольку, как уже отмечалась, в электротехнике нередко применяется и система СГС, то важно установить связь между 1[А] и силой тока в этой системе, а также найти отношения между другими единицами обеих систем.

Взяв два параллельных проводника длиной  $l = d$ , где  $d$  – расстояние между проводниками, получим при силе тока в проводниках 1 А силу взаимодействия между ними в системе СИ

$$F_M = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1^2 \cdot d}{2\pi \cdot d} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Тогда эта же сила взаимодействия, но в системе СГС, будет вычисляться по выражению

$$F_M = \frac{1}{c^2} \frac{2I^2l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} 10^5 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ [дин]}.$$

Из полученного равенства находим, что  $1 \text{ [A]} = \sqrt{10^{-2} \cdot c^2} = 0,1c = 3 \cdot 10^9$  [ед. СГС]. Отсюда следует, что единица заряда в СИ составляет  $c / 10$  единицы заряда в СГС, где  $c$  – скорость света.

Для определения единицы разности потенциалов воспользуемся выражением мощности  $P = U \cdot I$ . По определению мощность в 1 [Вт] выделяется на участке проводника, по которому проходит ток  $I = 1 \text{ [A]}$  и который находится под напряжением 1 [В]. Поскольку  $1 \text{ [Вт]} = 10^7 \text{ [эрг/с]}$  и  $1 \text{ [A]} = 0,1 \cdot c$ , то получаем, что в системе СГС  $1 \text{ [В]} = 10^7 / 0,1c = 1/300$  [ед. СГС]. Для единицы напряжённости электрического поля в системе СИ, следовательно, имеем:  $E = 1 \text{ [Н/Кл]} = 1 \text{ [В/м]} = 1/300 \cdot 100 = 1/3 \cdot 10^4 = 3,33 \cdot 10^5$  [ед. СГС]. Это значит, что 1 [В] составляет  $3,33 \cdot 10^{-5}$  [ед. СГС], а 1 [В/м] напряжённости электрического поля  $3,33 \cdot 10^{-5}$  [ед. СГС].

В системе СИ ёмкость обычно вычисляется через заряд и разность потенциалов  $C = q/U$  [Ф]. Переводя эти величины в единицы СГС, находим  $1 \text{ [Ф]} = 1 \text{ [Кл/В]} = \frac{0,1 \cdot c}{1/300} = 30 \cdot c = 9 \cdot 10^{11}$  [ед. СГС]. Аналогично для электрического сопротивления  $R = U/I$  получаем, что  $1 \text{ [Ом]} = 1 \text{ [В/A]} = 1/(300 \cdot 3 \cdot 10^9) = 1,1 \cdot 10^{-10}$  [ед. СГС].

При сравнении соотношений между единицами в системах СГС и СИ обнаруживается некоторая особенность, вызывающая вопрос о соответствии физических свойств вещества. Например, нетрудно записать формулу размерности напряжённости электрического поля

$$[E] = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}.$$

Тогда, если взаимодействие происходит не в вакууме, а в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , которая не имеет размерности, то электрическое смещение  $D = \epsilon \cdot E$ , или электрическая индукция, будет иметь ту же размерность, что и напряженность поля  $E$ , а сила взаимодействия уменьшится в  $\epsilon$  раз, так как

$$D = \frac{F_{\text{Э}}}{\epsilon q}.$$

Поскольку в системе СИ электрическое смещение определяется формулой  $D = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E$ , а  $\epsilon_0$  имеет размерность, то величины  $D$  и  $E$  отличаются: размерность  $[D] = L^{-2} T I$ , а размерность  $[E] = L M T^{-3} I^{-1}$ . Следовательно, разные размерности двух величин в одной и той же системе единиц заставляют предполагать и наличие различного физического смысла этих величин. И в то же время размерности обеих величин  $E$  и  $D = \epsilon \cdot E$  в системе СГС совпадают. В принципе разные величины могут иметь одинаковые размерности в пределах как одной, так и разных систем, но разные размерности у величин одинаковой физической природы могут быть только в разных системах единиц. Следовательно, физическая трактовка величин  $D$  и  $E$  в СГС и СИ должна отличаться.

Ранее было обращено также внимание на физическое явление поляризации в диэлектриках. Возникновение вектора поляризации  $\mathbf{P}$  связано с появлением под действием поля  $E$ , вызванного свободными зарядами, поверхностной плотности поляризационных зарядов  $\sigma_{\text{пр}} = P$ . Очевидно, что электрическое поле  $E$  в диэлектрике равно полной поверхностной плотности заряда, делённой на  $\varepsilon_0$  (теорема Гаусса). Следовательно,

$$E = \frac{\sigma_{\text{св}} - \sigma_{\text{пр}}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{св}} - P}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{св}} - \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{св}}}{\varepsilon_0} - \chi \cdot E,$$

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Коль скоро  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0(1 + \chi)\mathbf{E}$ , то, принимая в системе СГС выражение  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ , можем записать, что  $\varepsilon = (1 + \chi)\varepsilon_0$ . Постоянная величина  $\varepsilon$  по определению описывает диэлектрические свойства материалов. Если по каким-либо соображениям удобства или нежелания вникать в глубину происходящих явлений и процессов исследователи ограничиваются выделением лишь части зарядов, то всегда можно представить уравнения в любой форме. Но, записав  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ , необходимо понимать, что оно физически неправильное или приближённое, поскольку пропорциональность между  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$  зависит и от вектора  $\mathbf{E}$ , и от скорости его изменения.

В системе СИ смещение  $\mathbf{D}$  будет иметь, согласно формуле размерности, размерность поверхностной плотности заряда [Кл/м<sup>2</sup>], т.е.  $\mathbf{D} = \boldsymbol{\sigma}$ . Согласно этому равенству обычно единицу смещения  $\mathbf{D}$  определяют как смещение в плоском конденсаторе при плотности тока на его пластинах [Кл/м<sup>2</sup>]. В системе СГС при этом  $D = 4\pi \cdot 10^5$  [ед. СГС].

Приведём теперь соотношения между некоторыми основными единицами в СИ и СГС, относящиеся к магнитным параметрам поля и вещества.

Единица магнитной индукции  $B$  в системе СИ измеряется в теслах [Т]. Она характеризует поле, в котором каждый метр проводника, расположенного перпендикулярно направлению вектора индукции, с током в 1 А испытывает силу 1 Н. В системе СГС  $1[\text{Т}] = 3,33 \cdot 10^{-7}$  [ед. СГС]. В СГС введена специальная единица магнитной индукции  $1[\text{СГС}] = 3 \cdot 10^{10}$  [Гс], тогда  $1[\text{Т}] = 10^4$  [Гс]. Формула размерности для магнитной индукции очевидно, будет  $[B] = \text{МТ}^{-2}\Gamma^{-1}$ .

Для магнитного потока в системе СИ принята единица вебер – [Вб] = [В·с] = [Т·м<sup>2</sup>]. При переходе к системе СГС получаем  $1[\text{Вб}] = 1/300 = 3,33 \cdot 10^{-3}$  [ед. СГС]. В этой системе введена специальная единица для магнитного потока – максвелл – 1 [Мкс] =  $10^{-8}$  [Вб].

В качестве единиц индуктивности и взаимной индуктивности в системе СИ принята единица 1 [Гн] = 1 [Вб/А] = [Ом/с] =  $1,11 \cdot 10^{-12}$  [ед. СГС]. В системе СГС и СГСМ принята специальная единица – сантиметр – 1 [см] =  $10^{-9}$  [Гн].

Определим теперь единицу Н – напряжённости магнитного поля. В системе СИ её называют ампер на метр [А/м]. Следовательно, формула размер-

ности имеет вид  $[H] = L^{-1}I$ . Из следствий закона Био, Савара и Лапласа можно найти соотношение – 1  $[A/M] = 3,77 \cdot 10^8$  (СГСЭ), а в системе СГС, где введена специальная единица – эрстед – 1  $[Э] = 3 \cdot 10^{10}$  [ед. СГСЭ], следовательно, имеем  $1[A/M] = 1,26 \cdot 10^{-2} [Э]$ .

Здесь вновь необходимо заметить, что размерности векторных величин **B** и **H** в системе СГС совпадают, как это имело место и для величин **E** и **D**. Однако в системе СИ для величин **B** и **H** характерна та же форма несоответствия, как и для напряжённости электрического поля **E** и смещения **D** в этой же системе. Устранить отмеченное несоответствие можно было бы путем введения в уравнение для напряжённости магнитного поля постоянной величины  $\mu_0$ . В таком случае закон Био, Савара, Лапласа можно было бы представлять в виде

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I \sin \theta}{r^2} dl,$$

а связь между  $B$  и  $H$  записывать как  $B = \mu \cdot H$ . Напомним, не вдаваясь в рассуждения о природе происходящих процессов в ферромагнитных материалах, заметим лишь, что магнитная проницаемость материалов  $\mu$  является сложной функцией от изменения как напряжённости магнитного поля, так и намагничённости.

В заключение данного раздела коснёмся ещё двух понятий, особенности которых важно учитывать при решении практических задач.

Одним из них является магнитный момент, который определяется двояким способом: либо по выражению для механического момента, который испытывает контур с током в магнитном поле, либо по выражению для магнитного момента контура непосредственно. Согласно первому определению, единицей магнитного момента является момент контура, который в магнитном поле с индукцией 1 Т испытывает максимальный вращающий момент, равный 1 Н·м. Во втором случае под единицей момента понимают момент плоского контура, обтекаемого током 1 А и имеющего площадь, равную 1 м<sup>2</sup>. Обе единицы имеют одинаковую формулу размерности  $[m] = L^2I$ . Единица магнитного момента в системе СИ не имеет специального названия и обозначается как А·м<sup>2</sup>. Если же единицу  $[A \cdot m^2]$  представить и однозначно выразить как  $[Н \cdot м / Т]$ , то в системе СГС получаем  $1 [A \cdot m^2] = 1 [Н \cdot м / Т] = 10^5 [дин] \times 10^2 [см] / 10^4 [Гс] = 10^3 [дин \cdot см / Гс]$ . Поскольку при расчёте магнитодвижущей силы за её размерность принимают ток  $I [A]$ , то в СГС магнитная сила будет  $F_m = 3 \cdot 10^9 [СГС] = 1,26$  гильберт (Гб). Связь между основными единицами систем СИ и СГС представлена в табл. 1.

Естественно, что магнитная сила взаимодействия токов и магнитный момент отличаются. Если какое-либо тело поместить в магнитное поле, то каждый элемент этого тела приобретает магнитный момент, причём тело из ферромагнитного материала оказывается намагничённым, даже если действие поля снято. Его состояние в данном случае характеризуется петлёй гистерезиса, которая определяет остаточную индукцию  $B_r$  и коэрцитивную силу  $H_c$ , как правило, измеряемых в гауссах и эрстедах. С магнитной же прони-

цаемостью связана ещё одна характеристика магнитных свойств – магнитная восприимчивость к полю, определяемая как  $\chi_M = (\mu - 1) / 4\pi$ . Эта безразмерная величина в СГС в  $4\pi$  раз больше соответствующей единицы СИ.

Таблица 1

Связь между основными единицами в системах СИ и СГС

Величина	Обозначение	Единица СИ	Единица СГС
Электрический заряд	$q$	Кулон (Кл)	$3 \cdot 10^9$
Напряжённость электрического поля	$E$	Вольт на метр (В/м)	$3,34 \cdot 10^{-5}$
Поверхностная плотность заряда	$\sigma$	Кулон на кв. метр (Кл/м <sup>2</sup> )	$3 \cdot 10^5$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	$D$	Кулон на кв. метр (Кл/м <sup>2</sup> )	$3,77 \cdot 10^6$
Поток электрического смещения	$\Psi_d$	Кулон (Кл)	$3,77 \cdot 10^{10}$
Разность потенциалов, ЭДС, напряжение	$\varphi, E, U$	Вольт (В)	$3,33 \cdot 10^{-3}$
Сила тока	$I$	Ампер (А)	$3 \cdot 10^9$
Ёмкость	$C$	Фарада (Ф)	$8,99 \cdot 10^{11}$
Активное сопротивление	$R$	Ом (Ом)	$1,11 \cdot 10^{-12}$
Индуктивность	$L$	Генри (Г)	см ( $10^9$ )
Магнитная индукция	$B$	Тесла (Т)	гаусс ( $10^4$ )
Магнитный поток	$\Phi$	Вебер (Вб)	максвелл ( $10^8$ )
Напряжённость магнитного поля	$H$	Ампер на метр (А/м)	эрстед ( $1,26 \cdot 10^{-2}$ )
Магнитодвижущая сила (циркуляция напряженности поля)	$F$	Ампер (А)	гильберт (1,26)

Подчёркивая отсутствие однозначной связи между формулами размерности и их конкретным определением, приведём ещё один важный для практики пример. Речь пойдёт о так называемом волновом сопротивлении. Известно, что одним из важнейших объектов электротехники являются электромагнитные волны, распространяющиеся в вакууме со скоростью света

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ , а в среде с проницаемостями  $\varepsilon$  и  $\mu$  медленнее в  $\sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{\varepsilon_0 \mu_0}}$  раз.

Длина волны в вакууме  $\lambda = \frac{c}{f}$  и в некоторой среде  $\lambda = \frac{c}{f} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 / \varepsilon \mu}$ . Отношение амплитуд напряженностей изменяющихся электрических и магнитных полей  $E_m$  и  $H_m$  принято называть волновым сопротивлением, которое для вакуума в системе СИ будет равно

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{4\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{16}} = 4\pi \cdot 30 = 120\pi,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [Г/м] и  $\varepsilon_0 = 1 / 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{16}$  [Ф/м]. Заменяя [Г/м] на [В·с/А·м] и [Ф/м] на [А·с/В·м], находим, что волновое сопротивление  $Z_c = 377$  [Ом].

Вместе с этим, если воспользоваться системой единиц МКСМ в рационализованной форме, в которой  $\mu_0 = 10^{-7}$  [Г/м] и  $\varepsilon_0 = 1 / 9 \cdot 10^9$  [Ф/м], то получим уже  $Z_c = 30$  [Ом]. Противоречие между значениями сопротивлений объясняется тем, что наименование сложной единицы вовсе не является определением этой единицы. Наименование полученного нами в результате пре-

образования единиц [В/м] и [А/м] отношения [В/А] сопротивлением некорректно трактовать как единицу сопротивления. Само понятие волнового сопротивления вакуума вряд ли имеет физический смысл, но оказывается вполне удобной заменой выражения  $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ . Интересно, что если осуществить связь между векторами **E** и **B**, то можно получить соотношения  $\sqrt{\epsilon_0\epsilon} \cdot E = B/\sqrt{\mu_0\mu}$  и  $B = \sqrt{\mu_0\mu\epsilon_0\epsilon} \cdot E$ , которые сохраняются при изменении единиц. Неизменность формул размерности обеспечивается требованием равенства размерностей левой и правой частей уравнений. Это требование вытекает из необходимости соблюдения ковариантности тензорных уравнений. Следовательно, при решении задач необходимо следить за строгим выполнением этого требования. Если оно не соблюдено, то в решении имеет место ошибка. Однако совпадение только размерностей еще не служит критерием правильности полученных результатов вычислений и не гарантирует тензорности уравнений.

**6. Универсальная система пространственно-временных величин.** В последние годы все чаще исследователи стали обращаться к так называемой минимальной системе физических величин, которая включает в себя две основные единицы размерности [LT], представляющие *длину* и *время*. Эта система естественным образом связана с пространством и временем, а все физические величины, выраженные в ней через радикалы L, T, называют универсальными. Можно сказать, что начало создания такой системы единиц физических величин было положено Максвеллом [5, 6], который, оперируя с системой основных единиц (L – длина, T – время, M – масса), выразил массу в пространственно-временных единицах L, T, исключив ее тем самым из числа основных размерных единиц. Он исходил из двух уравнений Ньютона для силы *F*:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{L^2}, \quad F = aM,$$

где коэффициент гравитации *G* принял в качестве безразмерной величины, а размерность ускорения *a* как [LT<sup>-2</sup>]. Следовательно, размерность массы стала удовлетворять условию универсальности и приобрела вид

$$M = \left[ L^2 \frac{L}{T^2} \right] = [L^3 T^{-2}] = \left[ \frac{M^3}{c^2} \right].$$

В своем «Трактате» Максвелл стремился описать электромагнитные и другие физические явления и процессы в электротехнических устройствах с помощью измеряемых величин с тем, чтобы проследить математические соотношения между ними.

Дальнейшее развитие эти идеи получили в работе [1], в которой Р.О. Бартини аналитически определил физические константы и соотношения между ними, а также предложил, по сути, кинематическую универсальную систему физических величин [L<sup>R</sup>T<sup>S</sup>], где размерности R и S – целые положительные или отрицательные числа. Позже совместно П.Г. Кузнецовым [2] им была составлена матрица пространственно-временных величин и сделано предположение о том, что каждый элемент данной матрицы соответствует определенному закону природы и отображает собой инвариантную величину.

	$\Gamma^6$	$\Gamma^5$	$\Gamma^4$	$\Gamma^3$	$\Gamma^2$	$\Gamma^1$	$\Gamma^0$	$\Gamma^1$	$\Gamma^2$	...	$\Gamma^6$
$L^6$	$L^{6\Gamma^6}$	$L^{6\Gamma^5}$	$L^{6\Gamma^4}$	$L^{6\Gamma^3}$	$L^{6\Gamma^2}$	$L^{6\Gamma^1}$	$L^{6\Gamma^0}$	$L^{6\Gamma^1}$	$L^{6\Gamma^2}$	...	$L^{6\Gamma^6}$
$L^5$	$L^{5\Gamma^6}$	$L^{5\Gamma^5}$	$L^{5\Gamma^4}$	$L^{5\Gamma^3}$	$L^{5\Gamma^2}$	$L^{5\Gamma^1}$	$L^{5\Gamma^0}$	$L^{5\Gamma^1}$	$L^{5\Gamma^2}$	...	$L^{5\Gamma^6}$
$L^4$	$L^{4\Gamma^6}$	$L^{4\Gamma^5}$	$L^{4\Gamma^4}$	$L^{4\Gamma^3}$	$L^{4\Gamma^2}$	$L^{4\Gamma^1}$	$L^{4\Gamma^0}$	$L^{4\Gamma^1}$	$L^{4\Gamma^2}$	...	$L^{4\Gamma^6}$
$L^3$	$L^{3\Gamma^6}$	$L^{3\Gamma^5}$	$L^{3\Gamma^4}$	$L^{3\Gamma^3}$	$L^{3\Gamma^2}$	$L^{3\Gamma^1}$	$L^{3\Gamma^0}$	$L^{3\Gamma^1}$	$L^{3\Gamma^2}$	...	$L^{3\Gamma^6}$
$L^2$	$L^{2\Gamma^6}$	$L^{2\Gamma^5}$	$L^{2\Gamma^4}$	$L^{2\Gamma^3}$	$L^{2\Gamma^2}$	$L^{2\Gamma^1}$	$L^{2\Gamma^0}$	$L^{2\Gamma^1}$	$L^{2\Gamma^2}$	...	$L^{2\Gamma^6}$
$L^1$	$L^{1\Gamma^6}$	$L^{1\Gamma^5}$	$L^{1\Gamma^4}$	$L^{1\Gamma^3}$	$L^{1\Gamma^2}$	$L^{1\Gamma^1}$	$L^{1\Gamma^0}$	$L^{1\Gamma^1}$	$L^{1\Gamma^2}$	...	$L^{1\Gamma^6}$
$[L^{R\Gamma^S}] = L^0$	$L^{0\Gamma^6}$	$L^{0\Gamma^5}$	$L^{0\Gamma^4}$	$L^{0\Gamma^3}$	$L^{0\Gamma^2}$	$L^{0\Gamma^1}$	$L^{0\Gamma^0}$	$L^{0\Gamma^1}$	$L^{0\Gamma^2}$	...	$L^{0\Gamma^6}$
$L^{-1}$	$L^{-1\Gamma^6}$	$L^{-1\Gamma^5}$	$L^{-1\Gamma^4}$	$L^{-1\Gamma^3}$	$L^{-1\Gamma^2}$	$L^{-1\Gamma^1}$	$L^{-1\Gamma^0}$	$L^{-1\Gamma^1}$	$L^{-1\Gamma^2}$	...	$L^{-1\Gamma^6}$
$L^{-2}$	$L^{-2\Gamma^6}$	$L^{-2\Gamma^5}$	$L^{-2\Gamma^4}$	$L^{-2\Gamma^3}$	$L^{-2\Gamma^2}$	$L^{-2\Gamma^1}$	$L^{-2\Gamma^0}$	$L^{-2\Gamma^1}$	$L^{-2\Gamma^2}$	...	$L^{-2\Gamma^6}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$L^{-6}$	$L^{-6\Gamma^6}$	$L^{-6\Gamma^5}$	$L^{-6\Gamma^4}$	$L^{-6\Gamma^3}$	$L^{-6\Gamma^2}$	$L^{-6\Gamma^1}$	$L^{-6\Gamma^0}$	$L^{-6\Gamma^1}$	$L^{-6\Gamma^2}$	...	$L^{-6\Gamma^6}$

В настоящей статье приводится модернизированная и расширенная матрица пространственно-временных величин  $[L^R, \Gamma^S]$  для  $R = 6$  и  $S = 6$ , а также таблица соответствий ее элементов ряду электромагнитных величин, относящихся к параметрам электротехнических комплексов и систем. В ней (табл. 2) указаны формулы размерностей электромагнитных величин в системах единиц СИ, СГС и  $[L^{R\Gamma^S}]$ .

Заметим, что в ряде публикаций приводятся ошибочные соответствия отдельных элементов матрицы электромагнитным параметрам. Однако анализ этих ошибок не является предметом рассмотрения в данной статье. Она преследует практическую цель: привлечь к моделированию и исследованию физических процессов преобразования энергии в электротехнических комплексах и системах тензорный анализ, топологию дифференцируемых многообразий на основе физических величин  $[L^{R\Gamma^S}]$ , а также комплексный подход, объединяющий теорию электромагнитного поля и электрических цепей с учетом фундаментальных сил взаимодействия.

Нетрудно заметить, что одни и те же элементы матрицы  $[L^{R\Gamma^S}]$  содержат несколько физических величин, имея одинаковую размерность. Каждую из них можно рассматривать как инвариант. Например, инвариант  $[L^{5\Gamma^5}]$  имеет физическую размерность потока энергии (мощности), причем в каждой предметной области инвариант является произведением соответствующих пар продольных и поперечных (ортогональных) величин. В электротехнике – это ток  $[L^{3\Gamma^3}]$  и напряжение  $[L^{2\Gamma^2}]$ , в механике – это сила  $[L^{4\Gamma^4}]$  и скорость  $[L^{1\Gamma^1}]$ , в газодинамике – это скорость изменения объема –  $[L^{3\Gamma^1}]$  и давление –  $[L^{2\Gamma^4}]$ . На основе инвариантности мощности при преобразованиях  $\Gamma$ . Крон развил тензорную теорию электрических машин и сетей [9], используя свойство двойственности сете-

вых моделей, образующих топологические структуры (конфигурации) взаимосвязанных элементов (ветвей). Эти структуры тоже в определенных отношениях отображают состояния исследуемых систем и их элементов.

Таблица 2

Размерности электромагнитных величин в системах СИ, СГС и [L<sup>R</sup>T<sup>S</sup>]

Наименование физической величины	Обозначение	Единица СИ	Размерность СИ	Единица СГС	Размерность СГС	Система [L <sup>R</sup> T <sup>S</sup> ]
Электрический заряд	$\rho$	Кл	T	ед. СГС	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^3T^{-2}$
Поверхностный заряд	$\sigma$	Кл/м <sup>2</sup>	$L^{-2}T$	ед. СГС	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^1T^{-2}$
Объемная плотность заряда	$\rho$	Кл/м <sup>3</sup>	$L^{-3}T$	ед. СГС	$L^{-3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^0T^{-2}$
Напряженность электрического поля	$E$	В/м	$LMT^{-3}T^{-1}$	ед. СГС	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^1T^{-2}$
Электрическая проницаемость	$\epsilon_0$	Ф/м	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	ед. СГС	1	$L^0T^0$
Электрическое смещение (индукция)	$D$	Кл/м <sup>2</sup>	$L^{-2}T$	ед. СГС	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^1T^{-2}$
Разность потенциалов, ЭДС	$U$	В	$L^2MT^{-3}T^{-1}$	ед. СГС	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^2T^{-2}$
Электрическая проводимость	$g$	См	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	ед. СГС	$LT^{-1}$	$L^1T^{-1}$
Электрическое сопротивление	$R$	Ом	$L^2M^1T^{-3}I^{-2}$	ед. СГС	$L^{-1}T$	$L^{-1}T^1$
Емкость электрическая	$C$	Ф	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	см	L	$L^1T^0$
Удельная проводимость	$\gamma$	Ом <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup>	$L^{-3}M^{-1}T^{-3}I^{-2}$	ед. СГС	$T^{-1}$	$L^0T^{-1}$
Линейный электрический заряд	$\tau$	Кл/м	$L^{-1}T$	ед. СГС	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^2T^{-2}$
Сила электрического тока	$I$	А	I	ед. СГС	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	$L^3T^{-3}$
Плотность электрического тока	$j$	А/м <sup>2</sup>	$L^{-2}I$	ед. СГС	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-2}$	$L^1T^{-3}$
Напряженность магнитного поля	$H$	А/м	$L^{-1}I$	эрстед	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^2T^{-3}$
Магнитная проницаемость	$\mu$	Гн/м	$LMT^{-2}I^{-2}$	ед. СГС	1	$L^{-2}T^2$
Магнитная индукция	$B$	Тл	$MT^{-2}I^{-1}$	гаусс	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^0T^{-1}$
Магнитная проводимость	$\Lambda$	Вб/А	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	ед. СГС	L	$L^{-1}T^2$
Магнитное сопротивление	$R_M$	А/Вб	$L^{-2}M^{-1}T^2I$	ед. СГС	$L^{-1}$	$L^1T^{-2}$
Магнитный поток	$\Phi$	Вб	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	максвелл	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^2T^{-1}$
Индуктивность	$L$	Гн	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	см	L	$L^{-1}T^2$
Магнитодвижущая сила (МДС)	$F_M$	А	I	гильберт	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	
Потокосцепление	$\psi$	Вб	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	ед. СГС	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^2T^{-1}$
Векторный (магнитный) потенциал	$A$	Вб/м	$L^1MT^{-2}I^{-1}$	ед. СГС	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^{-1}T^{-1}$
Электрический момент диполя	$p_e$	Кл м	LT	ед. СГС	$L^{5/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^4T^{-2}$
Магнитный момент диполя	$p_m$	А/м <sup>2</sup>	$L^{-2}I$	ед. СГС	$L^{5/2}M^{1/2}T^{-1}$	$L^5T^{-3}$
Частота	$f$	Гц	$T^{-1}$	ед. СГС	$T^{-1}$	$L^0T^{-1}$
Энергия	$W$	Дж	$L^2M^1T^{-2}$	эрг	$L^2M^1T^{-2}$	$L^5T^{-4}$
Мощность	$P$	Вт	$L^2M^1T^{-3}$	эрг/с	$L^2M^1T^{-3}$	$L^5T^{-5}$

Аналогично и Р.О. Бартини рассматривал в топологических конфигурациях отображения вероятностные состояния некоторого введенного им целостного объекта А. Не вдаваясь в глубину теоретических рассуждений, доказательств и выводов Р.О. Бартини, заметим лишь, что они основывались на базовых положениях квантовой электродинамики, топологии и теории вероятности. Они привели его к фундаментальному понятию экстремального распределения элементарных образов реальных объектов природы в 6-мерном про-

странстве. Он также пришел к заключению о том, что уравнения физики принимают наиболее простой вид, если в качестве системы измерений принять систему  $[L^R T^S]$ . Р.О. Бартини не называл введенный им объект **A**, например, фотоном, но полагал, что такой объект реален, определяем из опыта и является частицей, которая квантуется со скоростью света. Он счел необходимым, несмотря на жесткие ограничения к объему публикации в докладах АН СССР, привести соотношения между основными единицами в системах СГС и  $[L^R T^S]$ :  $1 [см] = 3,548041 \cdot 10^{12} [L]$ ;  $1 [с] = 1,0639006 \cdot 10^{23} [T]$ ;  $1 [г] = 3,2975325 \cdot 10^{-15} [L^3 T^2]$ .

В настоящее время одной из фундаментальных частиц, отвечающей свойствам объекта **A**, является фотон Эйнштейна, обладающий протяженностью  $l$ , временем действия  $t$  и вращательным движением вокруг своей оси со скоростью света. Поскольку фотон – это элементарное электромагнитное возмущение, то его длина волны может быть любой. Следовательно, параметры фотонов определяются частотой. Они могут быть рассчитаны по законам электродинамики. В качестве примера определим параметры фотона при частоте  $5 \cdot 10^{13}$  Гц, используя физическую постоянную Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  [Кл Вб]. Имеем в системе СИ:

$$\text{квант электрического потока} - e = 1,602 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}];$$

$$\text{квант магнитного потока} - \Phi_0 = \frac{h}{2e} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,07 \cdot 10^{-15} [\text{Вб}];$$

$$\text{ЭДС} - U = 2\nu\Phi_0 = 2 \cdot 5 \cdot 10^{13} \cdot 2,07 \cdot 10^{-15} = 20,7 \cdot 10^{-2} [\text{В}];$$

$$\text{ток смещения} - I_{cm} = 2e\nu = 21,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{13} = 16,02 \cdot 10^{-6} [\text{А}];$$

$$\text{мощность} - P = UI = 20,7 \cdot 10^{-2} \cdot 16,02 \cdot 10^{-6} = 3,316 \cdot 10^{-6} [\text{Вт}];$$

$$\text{энергия электрического потока} - W_э = e\Phi_0\nu = eU/2 = 16,58 \cdot 10^{-21} [\text{Дж}];$$

$$\text{энергия магнитного потока} - W_M = e\Phi_0\nu = 16,58 \cdot 10^{-21} [\text{Дж}];$$

$$\text{электромагнитная энергия} - W_э + W_M = 33,16 \cdot 10^{-21} [\text{Дж}];$$

$$\text{электромагнитный импульс} - p = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0} \cdot W = 1,105 \cdot 10^{-28} [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}];$$

$$\text{электромагнитная масса} - M = \epsilon_0 \epsilon \mu_0 W = 36,87 \cdot 10^{-38} [\text{кг}];$$

$$\text{магнитный момент} - m_M = e / 2\pi\nu\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0 = 5,1 \cdot 10^{-18} [\text{Дж} / \text{Т}];$$

$$\text{длина волны} - \lambda = \frac{2e\Phi_0}{W} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0}} = 5,998 \cdot 10^{-6} [\text{м}].$$

Из анализа вычисленных параметров рассматриваемого фотона следует, что он характеризуется электрическим и магнитным потоками равных энергий, зависящих от частоты, т.е. двумя составляющими, образующими единый электромагнитный квант. У фотона нет электрического заряда, поэтому для определения соотношений между величинами заряда в [1] вычислены параметры не фотона, а электрона в системе СГС: классический радиус –  $2,81785 \cdot 10^{-13} [см^1 г^0 с^0]$ ; масса –  $9,1083 \cdot 10^{-28} [см^0 г^1 с^0]$ ; заряд –  $4,8028 \cdot 10^{-10} [см^{3/2} г^{-1} с^{1/2}]$ . Там же указаны эти параметры и в системе  $[L^R T^S]$ , соответственно:  $1 [L^0 T^0]$ ;  $3,0034916 \cdot 10^{-43} [L^3 T^{-2}]$ ;  $1,7330584 \cdot 10^{-21} [L^3 T^{-2}]$ , причем за квант пространства может быть принят классический радиус электрона, равный в СИ –  $2,81785 \cdot 10^{-15} [м]$ , а за квант времени – время, за которое свет проходит

расстояние в 1 квант. Следовательно, квант времени будет равен  $2,81785 \cdot 10^{-15} / 2,99725 \cdot 10^8 = 0,94 \cdot 10^{-23}$  [с].

Кинетическая система физических величин раскрывает многообразие инвариантов для групп движений, соответствующих различным классам явлений природы, а также их пространственно-временные характеристики и свойства. Ею подтверждены многие открытые ранее инварианты, законы и теории. Например, выделяя элемент  $[L^5T^{-3}]$ , получаем закон сохранения момента, элемент  $[L^5T^{-4}]$  – закон сохранения энергии, элемент  $[L^5T^{-5}]$  – закон сохранения мощности, доказанный еще Максвеллом. Нет ничего удивительного в том, что система  $[L^R T^S]$  нашла понимание в среде специалистов в области электродинамики, столкнувшихся с проблемой описания полей, скрытых в глубинах сверхмалых масштабов измерений и с попытками объединения в одной теории всех четырех взаимодействий.

Из иерархии величин матрицы  $[L^R T^S]$  можно выделить элементы, размерность длины и времени (с отрицательным знаком) у которых совпадает: константа  $[L^0T^0]$ , скорость  $[L^1T^{-1}]$ , разность потенциалов  $[L^2T^{-2}]$ , ток  $[L^3T^{-3}]$ , сила  $[L^4T^{-4}]$ , мощность  $[L^5T^{-5}]$ . Они представляют собой верхнюю часть диагонали матрицы, и мощность имеет среди них наивысший порядок, охватывая наибольший класс электротехнических систем и устройств. В тензорной методологии исследования электрических машин и сетей Г. Крона не случайно инвариантность мощности образует фундамент, на котором конструктивные и топологические изменения объектов рассматриваются как преобразования координат.

**Выводы.** 1. Разработка современных математических методов моделирования и анализа сложных электротехнических комплексов и систем требует более глубокого проникновения в сущность физических явлений и процессов, адекватно описываемых и измеряемых в различных системах единиц и координат.

2. Топологические структуры физических процессов могут включать в себя измерения, свернутые в малых объемах, которые практически невозможно обнаружить измерительными приборами, поэтому эффективность математических методов в области электротехники во многом может быть достигнута определением правильных соотношений между измеряемыми или рассчитываемыми физическими величинами и выбором их основных единиц.

3. Универсальная система пространственно-временных величин, несущая в себе эвристическую функцию определения инвариантов и естественных законов, должна войти в арсенал исследователей электротехнических комплексов и систем.

#### Литература

1. *Бартини Р.О.* Некоторые соотношения между физическими константами // Доклады Академии наук СССР. 1964. Т. 163, № 4. С. 861–864.
2. *Бартини Р.О., Кузнецов П.Г.* О множественности геометрий и множественности физик // Проблемы современной научной методологии. Свердловск: Урал. науч. центр. АН СССР, 1978. С. 55–65.
3. *Зоммерфельд А.* Электродинамика: пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 504 с.
4. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: пер. с англ. М.: Сов. радио, 1979. 720 с.
5. *Максвелл Д.К.* Трактат об электричестве и магнетизме: в 2 т. М.: Наука, 1989. Т. 1. 416 с.
6. *Максвелл Д.К.* Трактат об электричестве и магнетизме: в 2 т. М.: Наука, 1989. Т. 2. 437 с.
7. *Планк М.* Введение в теоретическую физику. Ч. 1. Общая механика: пер. с нем. М.: ГТТИ, 1932. 200 с.

8. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1976. 536 с.  
9. *Сена Л.А.* Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977. 440 с.

---

**ЩЕДРИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([chedrin@chuvsu.ru](mailto:chedrin@chuvsu.ru)).

**ВОРОНОВ ПАВЕЛ ЛЕОНИДОВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([plv911@mail.ru](mailto:plv911@mail.ru)).

---

V. SHCHEDRIN, P. VORONOV  
PRESENTATION MODE PARAMETERS  
ELECTRO-TECHNICAL COMPLEXES AND NETWORKS  
IN SPACE-TIME SYSTEM OF PHYSICAL QUANTITIES

*Key words:* electrical and magnetic quantities, units, mode parameters, energy, power, power invariance spatio-temporal system of physical quantities.

*There are formulas of dimension and tables of relations between the electromagnetic parameters of the mode of electrical systems and networks in SI units and GHS, they being connected with spatio-temporal system of physical quantities of R. O. Bartini. Physical sense of the dimension formulas is disclosed in relation to the electric and magnetic values. The connection of basic units with the nature and character of the physical phenomena being studied in the analysis of modes of electrotechnical complexes and systems is revealed.*

References

1. Bartini R.O. *Nekotorye sootnosheniya mezhdu fizicheskimi konstantami* [Some relations between physical constants]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1964, vol. 163, no. 4, pp. 861–864.
2. Bartini R.O. Kuznecov P.G. *O mnozhestvennosti geometrij i mnozhestvennosti fizik* [On the multiplicity of geometries and multiplicity physicist]. In: *Problemy sovremennoj nauchnoj metodologii* [Problems of modern scientific methodology]. Sverdlovsk, AN USSR Publ., 1978, pp. 55–65.
3. Sommerfeld A. von. *Elektrodynamik*. Leipzig, Akad. Verl.-Ges. Geest und Portig, 1949 (Russ. ed.: *Jelektrodinamika*. Moscow, 1958, 504 p.).
4. Kron G. *Tensor analysis of networks*. N.Y.; L., 1965 (Russ. ed.: *Tenzornyj analiz setei*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1979, 720 p.).
5. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford, Clarendon Press, 1873, vol. 1 (Russ. ed.: *Traktat ob elektrichestve i magnetizme*. Moscow, Nauka Publ., 1989, vol. 1, 416 p.).
6. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford, Clarendon Press, 1873, vol. 2 (Russ. ed.: *Traktat ob elektrichestve i magnetizme*. Moscow, Nauka Publ., 1989, vol. 2, 437 p.).
7. Planck M. *Einführung in die Theoretische Physik Band I: Einführung in die Allgemeine Mechanik*. Leipzig, Hirzel, 1928 (Russ. ed.: *Vvedenie v teoreticheskuyu fiziku*. Ch. 1. *Obshhaja mehanika*. Moscow, 1932, 200 p.).
8. Sedov L.I. *Metody podobija i razmernosti v mehanike* [Similarity and dimensional methods in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 536 p.
9. Sena L.A. *Edinicy fizicheskikh velichin i ih razmernosti* [Units of physical quantities and their dimensions]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 440 p.

---

**SHCHEDRIN VLADIMIR** – Candidate of Technical Sciences, Professor of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**VORONOV PAVEL** – Post-Graduate Student of Industrial Enterprises Power Supply Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

---

**Ссылка на статью:** Щедрин В.А., Воронов П.Л. Представление параметров режима электро-технических комплексов и сетей в пространственно-временной системе физических величин // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 132–148.

УДК 697.921.4:537.871.7.08

ББК 3766:3873-5

О.Н. ЯДАРОВА, Е.О. ФЕДОРОВ, Б.М. ГИЛЬДЕНБЕРГ,  
В.О. СУЧКОВ, Л.А. СЛАВУТСКИЙ**КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ С ЗАСЛОНКАМИ**

*Ключевые слова:* вентилятор, воздушный поток, турбулентность, доплеровский ультразвуковой контроль, передаточные функции, переходные режимы.

*Приводятся результаты комплексных лабораторных измерений при контроле переходных режимов работы вентиляторной установки. Показана возможность регулирования режимов вентиляторной установки с учетом скорости потока (расхода) воздуха. Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможности доплеровского ультразвукового контроля расхода воздуха при переходных режимах в системе вентиляции с заслонками. Исследуются связи между скоростью вращения вентилятора и пространственно-временными параметрами воздушного потока при изменении аэродинамического сопротивления системы, рассматриваются основные передаточные звенья системы регулирования.*

Повышение эффективности работы вентиляторных установок за счет разработки системы автоматического регулирования производительностью вентиляторов является актуальной задачей. При этом расход воздуха зависит от положения заслонок, штор, задвижек и т.д. [1]. Режимы работы вентиляторных установок, кроме скорости вращения вентилятора, зависят от положения заслонок, жалюзи, аэродинамического сопротивления системы и т.д. Поэтому регулирование и автоматизированное управление должны осуществляться с учетом этих параметров. В работе показана возможность регулирования режимов вентиляторной установки с учетом скорости потока (расхода) воздуха [4, 5]. Такой контроль может осуществляться дистанционными и контактными методами [2, 3, 8]. Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможности доплеровского ультразвукового контроля расхода воздуха при переходных режимах в системе вентиляции с заслонками.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. В установке использован промышленный вентилятор Dospel WK200 (B) с диаметром отверстия 0,15 м, который представляет собой канальный центробежный вентилятор с мощностью 170 Вт, производительностью 1200 м<sup>3</sup>/ч и номинальной частотой вращения 2430 об./мин. Частота вращения контролировалась датчиком Холла. Кроме того, для калибровки частоты вращения вентилятора используется цифровой фототахометр DT2234B, который позволяет бесконтактно измерять частоту вращения вентилятора с разрешением 0,1 об./мин (менее 1000 об.), 1,0 об./мин (более 1000 об.) и погрешностью  $\pm 0,05\%$ . Для изменения режимов работы на выходе воздуховода установлена заслонка, положение которой менялось в процессе измерений. Экспериментальные измерения потока воздуха на выходе вентилятора проводились при изменении положения заслонки и в разгонных режимах вентилятора. Кроме того, осуществлялся контроль пространственной и временной изменчивости потока при помощи анемометра

X-Line AeroTemp. Значения скорости измерялись в разных точках потока вдоль (в 11 позициях) и поперек потока (в 5 позициях) в течение 20 с с дискретностью 0,25 с.

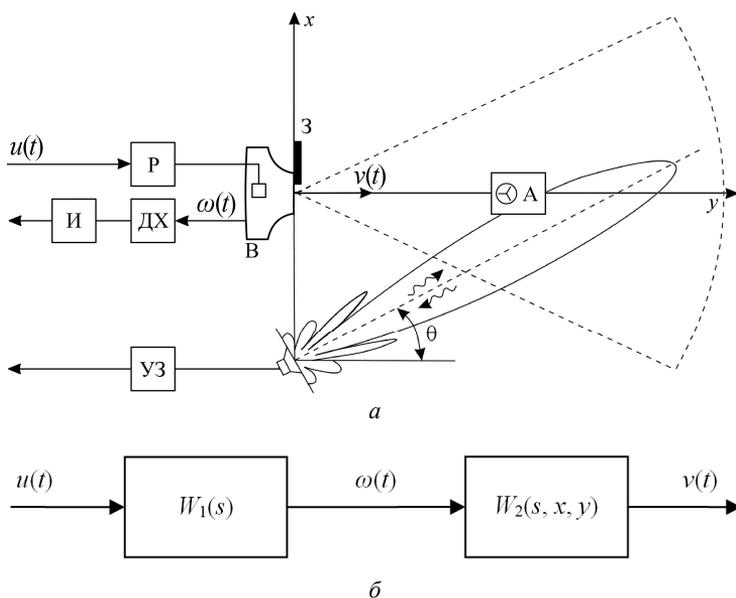


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и основные передаточные звенья (б):

В – вентилятор; З – заслонка, Р – регулятор; ДХ – датчик Холла;

И – измеритель оборотов; УЗ – прибор ультразвукового контроля; А – анемометр

Дистанционный ультразвуковой контроль осуществлялся специально разработанным доплеровским прибором с несущей частотой ультразвука 40 кГц [6, 7]. Рассеянный на турбулентных флуктуациях потока доплеровский сигнал характеризуется двумя основными параметрами: изменением амплитуды, которая зависит от турбулентности и пространственно-временной изменчивости потока, и средневзвешенным доплеровским сдвигом частоты, который определяется интегральной скоростью потока в области его пересечения с диаграммой рассеяния УЗ преобразователей [8].

На рис. 2 показаны примеры скорости вращения вентилятора, осциллограмм УЗ сигнала и характерные временные зависимости средневзвешенного доплеровского сдвига  $f$  и интенсивности УЗ сигнала  $I$  в режиме разгона вентилятора и при открытии/закрытии заслонки. Измерения проводились на разгонном участке потока в области повышенной турбулентности. Полученные результаты показывают, что доплеровские ультразвуковые измерения позволяют отследить изменение скорости потока и степени его турбулентности с изменением положения заслонки и оборотов привода вентилятора. При этом амплитудные и частотные характеристики сигналов позволяют оценить временные задержки при изменении этих параметров в переходных режимах и могут использоваться при синтезе системы автоматического регулирования вентиляционными установками.

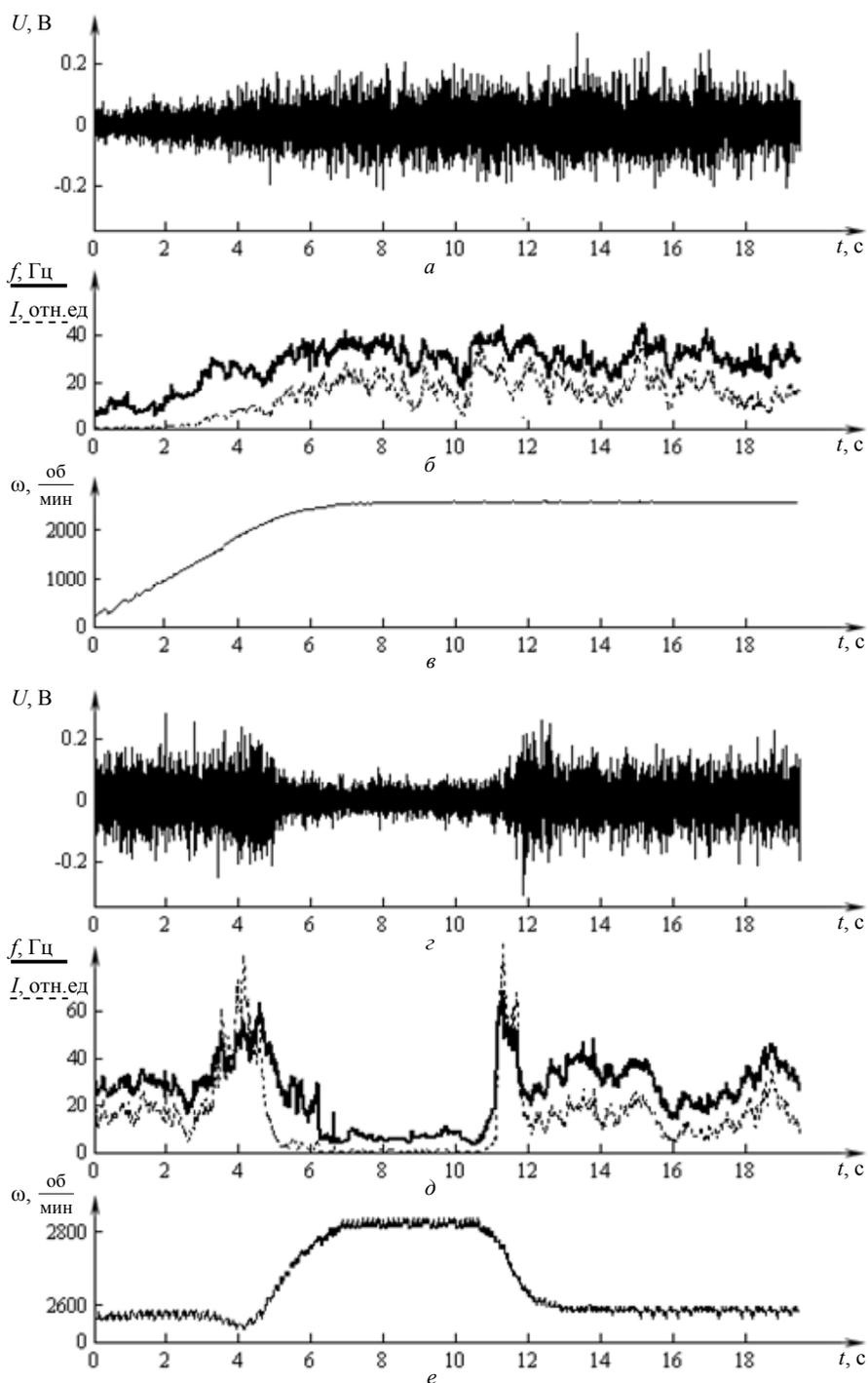


Рис. 2. Осциллограммы сигнала с ультразвуковых преобразователей (*a, z*), средневзвешенный доплеровский сдвиг (сплошная) и интенсивность (пунктир) сигнала (*б, д*), скорость вращения (*в, е*) в разгонном режиме (*a-в*) и при открытии/закрытии заслонки (*z-е*)

Схема экспериментальных измерений и основные передаточные звенья системы регулирования показаны на рис. 1. Вентиляторную систему с входом  $u(t)$  (питающее напряжение) и выходом  $v(t)$  (скорость потока) можно рассматривать в виде двух последовательно соединенных нелинейных звеньев  $W_1(s)$  и  $W_2(s, x, y)$ , где  $x, y$  – координаты точки, в которой измеряется скорость потока;  $\omega(t)$  – скорость вращения ротора. Будем искать передаточные функции звеньев в виде:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{(T_{1,1}s + 1)(T_{1,2}s + 1)}; \quad W_2(s, x, y) = \frac{K_2(x, y)}{T_2s^2 + 2T_2\xi s + 1} e^{-s\tau(x, y)},$$

где  $\tau(x, y)$  – задержка выходного сигнала.

Экспериментально обнаружено, что изменение положения заслонки на выходе вентилятора не только существенно меняет пространственно-временную структуру потока [9], но и влияет на нагрузку, а соответственно, и на скорость вращения вентилятора (см. рис. 2). На рис. 3, *а* показана скорость вращения вентилятора в разгонных режимах при открытой (сплошная) и частично закрытой (пунктир) заслонке. Перекрытие заслонки уменьшает «активную» и создает «реактивную» нагрузку на вентилятор, что приводит к увеличению скорости вращения. На рис. 3, *б* показаны примеры соответствующих зависимостей скорости потока при разном пространственном расположении анемометра. Как видно из сравнения экспериментальных и расчетных данных, предлагаемые модели передаточных функций достаточно адекватно описывают переходные процессы. При дистанционном ультразвуковом контроле потока вентиляторной установки необходимо учитывать изменение турбулентности потока на разгонном участке при разных положениях заслонок.

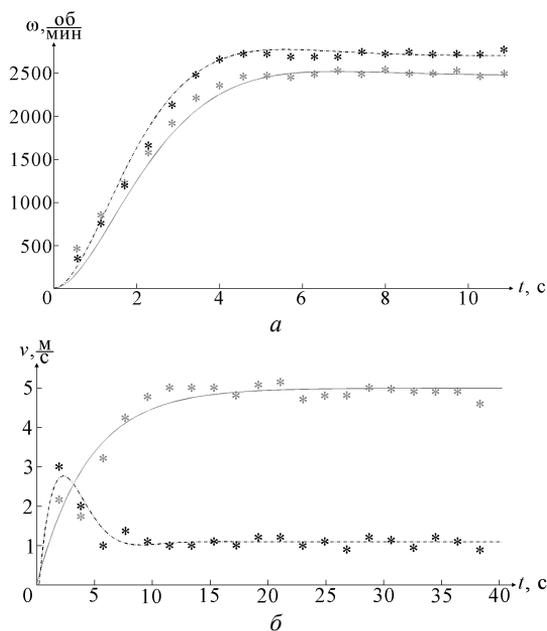


Рис. 3. Примеры экспериментальных (точки) и расчетных переходных режимов скорости вращения (*а*) и скорости потока (*б*)

Таким образом, для построения системы автоматического управления вентиляторной установкой могут быть использованы предлагаемые модели передаточных звеньев. При этом их численные параметры должны учитывать положение заслонок, пространственное положение и способ измерения скорости потока, изменение аэродинамической нагрузки на вентилятор.

#### Литература

1. Батицкий В.А., Лупоедов В.И., Рыжков А.А. Автоматизация производственных процессов и АСУТП в горной промышленности. М.: Недра, 1991. 303 с.
2. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения (методы и приборы). М.: Наука, 1964. 720 с.
3. Городецкий О.А., Гуральник И.И., Ларин В.В. Метеорология, методы и технические средства наблюдений. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 338 с.
4. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 415 с.
5. Шенелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
6. Ядарова О.Н., Алексеев А.П., Славутский Л.А. Контроль нестационарного воздушного потока вентиляторной установки // Вестник Чувашского университета. 2014. № 3. С. 148–153.
7. Ядарова О.Н., Славутский Л.А. Доплеровский ультразвуковой контроль открытого воздушного потока // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 240–243.
8. Ядарова О.Н., Славутский Л.А. Контроль воздушного потока на основе доплеровского рассеяния ультразвука // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 3. С. 55–59.
9. Ядарова О.Н., Сучков В.О., Славутский Л.А. Дистанционный ультразвуковой контроль воздушного потока с фазовыми включениями // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 129–134.

---

**ЯДАРОВА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА** – аспирантка кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (o\_lala\_la@mail.ru).

**ФЕДОРОВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ** – магистрант кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (genek-phodorov@mail.ru).

**ГИЛЬДЕНБЕРГ БОРИС МОИСЕЕВИЧ** – доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (bor-gildenberg@yandex.ru).

**СУЧКОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕГОВИЧ** – магистрант кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (lainx@mail.ru).

**СЛАВУТСКИЙ ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (las\_co@mail.ru).

---

**O. YADAROVA, E. FEDOROV, B. GILDENBERG,  
V. SUCHKOV, L. SLAVUTSKII**  
**COMPLEX PARAMETERS CONTROL TO REGULATE  
FAN SYSTEM WITH SHUTTERS**

*Key words: fan, air flow, turbulence, Doppler ultrasound control, transition functions, transient conditions.*

*The results of complex laboratory measurements for the control of the transitional modes of the fan system are presented. The possibility to control operating modes of the fan system using air flow parameters is shown. The experimental results demonstrate the possibility of Doppler ultrasonic control of the airflow in transient conditions in the fan system with shutters. There is a studied relationship between the fan speed and the space-time airflow parameters while changing the aerodynamic resistance of the system, the basic transmission elements of the control system.*

#### References

1. Batitskii V.A. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov i ASUTP v gornoy promyshlennosti* [Automation of production processes in the mining industry]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 303 p.
2. Gorlin S.M., Slezinger I.I. *Aeromekhanicheskie izmereniya (Metody i pribory)* [Aeromechanical measurement (Methods and devices)]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 720 p.
3. Gorodetskii O.A., Gural'nik I.I., Larin V.V. *Meteorologiya, metody i tekhnicheskie sredstva nablyudenii. 2-e izd.* [Meteorology, methods and technical tools of observation. 2<sup>nd</sup> ed.]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 338 p.
4. Cherkasskii V.M. *Nasosy, ventilyatory, kompressory. 2-e izd., pererab. i dop.* [Pumps, fans, compressors. 2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 415 p.
5. Shepelev I.A. *Aerodinamika vozdushnykh potokov v pomeshchenii* [Aerodynamics of air flows in the room]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 144 p.
6. Yadarova O.N., Alekseev A.P., Slavutskii L.A. *Kontrol' nestatsionarnogo vozdushnogo potoka ventilyatornoi ustanovki* [The control of non-stationary air flow of the fan system]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 148–153.
7. Yadarova O.N., Slavutskii L.A. *Doplerovskii ul'trazvukovoi kontrol' otkrytogo vozdushnogo potoka* [The doppler ultrasonic control of the open air flow]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 240–243.
8. Yadarova O.N., Slavutskii L.A. *Kontrol' vozdushnogo potoka na osnove doplerovskogo rassyaniya ul'trazvuka* [The air flow control by ultrasonic doppler backscattering]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics], 2013, no. 3, pp. 55–59.
9. Yadarova O.N., Suchkov V.O., Slavutskii L.A. *Distsionnii ul'trazvukovoi kontrol' vozdushnogo potoka s fazovymi vkluchenyami* [The remote ultrasonic control of air flow with phase inclusions]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 129–134.

---

**YADAROVA OLGA** – Post-Graduate Student of Power Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**FEDOROV EVGENII** – Master's Program Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**GILDENBERG BORIS** – Associated Professor, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**SUCHKOV VLADISLAV** – Master's Program Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**SLAVUTSKII LEONID** – Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

---

**Ссылка на статью:** Ядарова О.Н., Федоров Е.О., Гильденберг Б.М., Сучков В.О., Славутский Л.А. Комплексный контроль параметров регулирования системы вентиляции с заслонками // Вестник Чувашского университета. – № 3. – С. 149–154.

УДК 004.8:620.95  
ББК 32.973-018+32.813

В.С. АБРУКОВ, А.В. КОЧЕРГИН, Д.А. АНУФРИЕВА

**ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ  
КАК СРЕДСТВО ОБОБЩЕНИЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

***Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, экспериментальные данные, моделирование, обобщение.*

*Обобщение данных многофакторного эксперимента требует применения современных информационных технологий. Целью работы было исследование возможностей искусственных нейронных сетей для создания моделей, обобщающих комплекс экспериментальных данных многофакторного эксперимента. В работе впервые получены многофакторные вычислительные модели, обобщающие на принципиально новом уровне экспериментальные данные по горению разнообразных биотоплив в различных условиях. Полученные модели позволяют решать прямые и обратные задачи – вычислять скорость горения различных газовых смесей в различных внешних условиях и определять необходимый состав горючей смеси и внешние условия, необходимые для достижения требуемой скорости горения. Эти модели могут найти применение в биоэнергетике при организации сжигания различных видов биотоплива. Перспективы работы связаны с применением методологии работы для обобщения экспериментальных данных в различных областях науки и техники.*

Эксперимент лежит в основе как фундаментальных, так и прикладных исследований. При этом важно представить результаты эксперимента не только в виде таблицы или графиков, но и в виде вычислительной модели полученных экспериментальных данных, которая бы обобщала в удобном виде связи и зависимости между всеми переменными эксперимента – характеристиками объекта или процесса, и условиями (параметрами), в которых существует объект или реализуется процесс.

Таблицы и графики – традиционные способы представления моделей экспериментальных данных, которые не позволяют в удобном виде проводить вычисления одних переменных эксперимента через другие; решать, как прямые задачи моделирования экспериментальных данных, так и обратные.

Особенно неудобны традиционные способы представления моделей экспериментальных данных в случае многофакторного эксперимента, когда число переменных эксперимента более трех.

Эти проблемы могут быть устранены, если для моделирования экспериментальных данных использовать искусственные нейронные сети (ИНС) [4, 5], позволяющие реализовывать именно вычислительные модели экспериментальных данных и именно – многофакторного эксперимента. Число факторов при этом не имеет решающего значения [6].

Цель работы – изложение методологии моделирования экспериментальных данных многофакторного эксперимента.

В качестве примера были выбраны экспериментальные данные по горению в различных условиях разных типов углеводов, получаемых при переработке биологических отходов.

Конкретной задачей работы было создание с помощью ИНС многофакторных вычислительных моделей, обобщающих на принципиально новом уровне комплекс экспериментальных данных по горению различных углеводов в разных условиях, позволяющих решать прямые и обратные задачи горения – вычислять скорость горения различных газовых смесей в различных внешних условиях и определять необходимый состав горючей смеси и внешние условия, необходимые для достижения требуемой скорости горения.

Исследование возможностей использования различных видов биотоплив в энергетике является в настоящее время очень актуальной задачей во многих странах мира. В процессе переработки биологических отходов получается смесь различных углеводов, которые затем смешиваются с энергетическими добавками (водород), окислителем (обычно, воздух), и полученные горючие смеси используются в различного рода сжигающих устройствах. Сложный состав горючих смесей приводит к тому, что скорость горения зависит от многих факторов, совместное влияние которых на скорость горения нельзя описать с помощью классических математических (аналитических или численных) методов моделирования.

**Методологии моделирования экспериментальных данных многофакторного эксперимента.** ИНС – представляют собой универсальные «аппроксиматоры» экспериментальных функций нескольких переменных. Они позволяют создавать модели, способные определять конкретные значения целевых функций задачи для различных наборов факторов; зависимости целевых функций от какого-либо одного фактора при фиксированных значениях других; решать как прямые, так и обратные, по отношению к целевым функциям, задачи. ИНС – модели позволяют экстраполировать полученные закономерности за пределы полученных экспериментальных результатов и тем самым получать новые «экспериментальные» результаты. Они способны адаптироваться к новым экспериментальным данным («дообучаться») [1–3, 6].

Для создания многофакторных вычислительных моделей были использованы результаты экспериментальных работ, проведенных в рамках одного из проектов стран Европейского Союза.

В нашей работе эти данные были переработаны и дополнены. Для создания моделей использовалась отечественная аналитическая платформа «Deductor» производства BasegroupLab, г. Рязань ([www.basegroup.ru](http://www.basegroup.ru)).

На рис. 1–7 представлена технология и результаты по созданию многофакторных вычислительных ИНС-моделей в виде скриншотов аналитической платформы «Deductor», отличительной особенностью которой является то, что одновременно с вычислением целевых функций модели она выдает и графики зависимости целевой функции от различных факторов.

$\phi$	SI	Temp	P	C	H	O	N	H <sub>2</sub>	D-fuel
0.65	12	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.7	16.7	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.75	21.5	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.8	25.8	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.85	29.6	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.9	32.7	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.95	34.9	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1	36.4	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.05	37.2	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.1	37	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.15	36.6	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.2	32.7	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.25	29.9	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.3	23	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.35	18.9	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.4	15.6	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.45	13.3	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
1.5	11.6	298	101325	100	400	41.8	159.8	0	0
0.7	19	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.75	23.8	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.8	28.2	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.85	32.2	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.9	35.1	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.95	37.6	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1	39.2	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.05	40.1	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.1	40.1	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.15	38.9	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.2	36.2	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.25	31.8	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.3	26.7	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.35	20.9	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.4	17.4	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.45	14.5	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
1.5	12.3	298	101325	90	360	41.8	159.8	20	0
0.6	11.4	298	101325	80	320	41.8	159.8	40	0

Рис. 1. Пример экспериментальных данных по горению различных газовых смесей

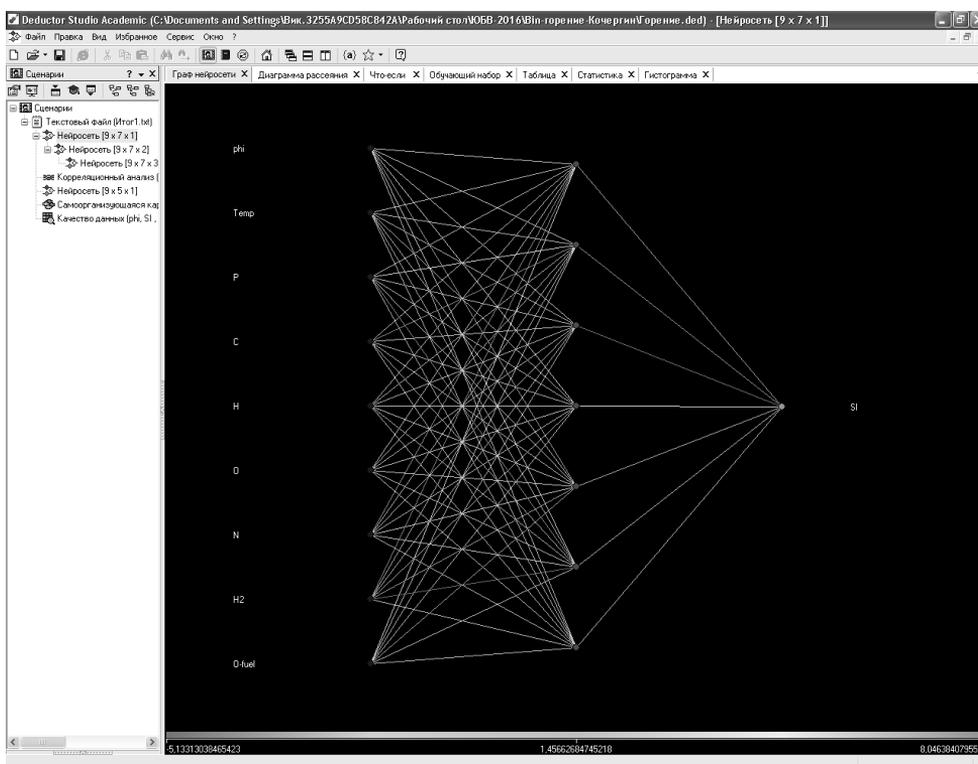


Рис. 2. Структура многофакторной вычислительной ИНС-модели определения скорости горения (справа) по экспериментальным данным об условиях экспериментов (слева)

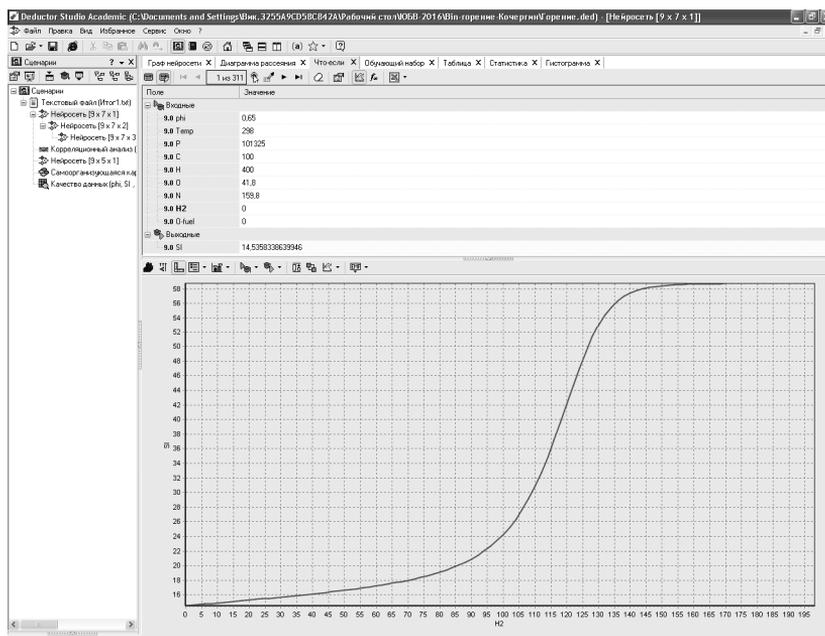


Рис. 3. Результат вычисления скорости горения (нижняя строка над графиком), соответствующий конкретному набору параметров горючей смеси и внешних условий (верхние строки над графиком). График зависимости скорости горения от содержания молекул водорода в горючей смеси

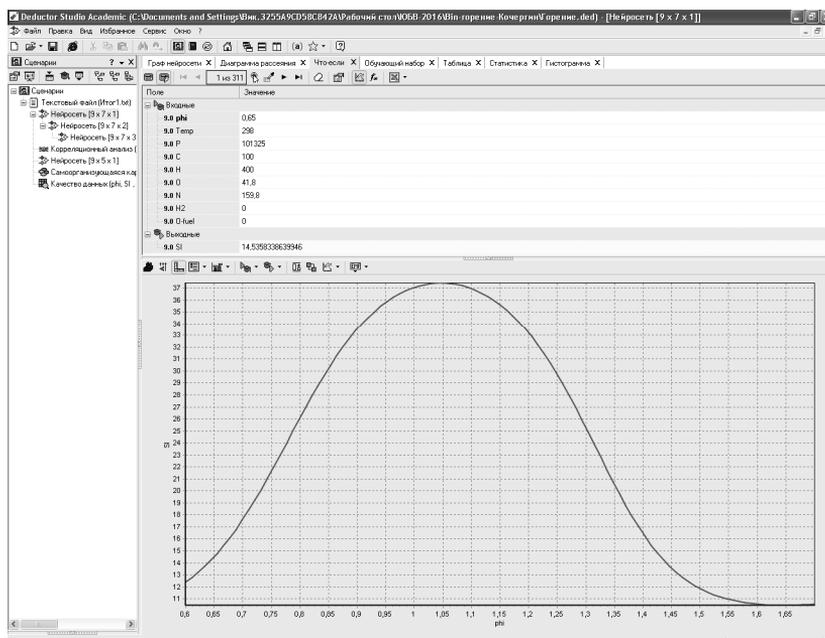


Рис. 4. Результат вычисления скорости горения (нижняя строка над графиком), соответствующий конкретному набору параметров горючей смеси и внешних условий (верхние строки над графиком). График зависимости скорости горения от коэффициента избытка окислителя в горючей смеси

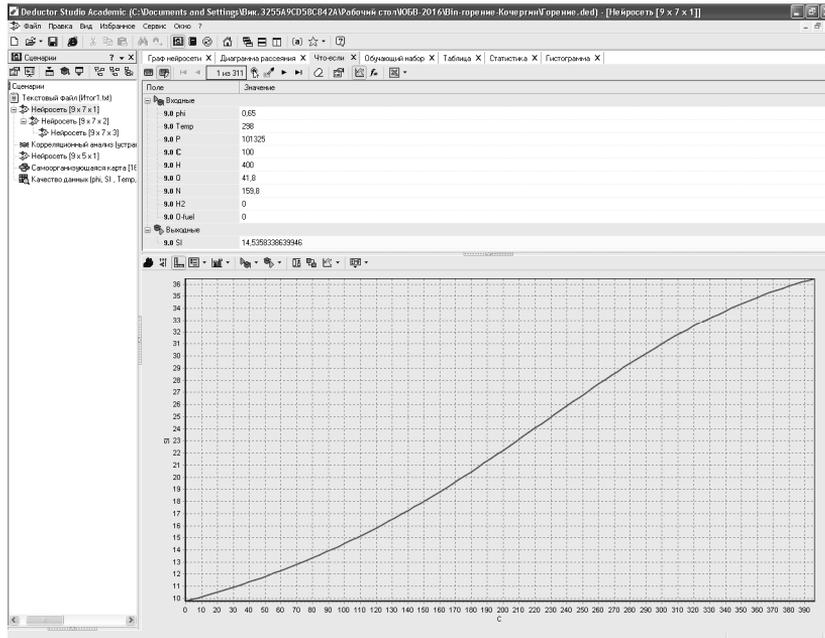


Рис. 5. Результат вычисления скорости горения (нижняя строка над графиком), соответствующий конкретному набору параметров горючей смеси и внешних условий (верхние строки над графиком). График зависимости скорости горения от условного содержания углерода в горючей смеси

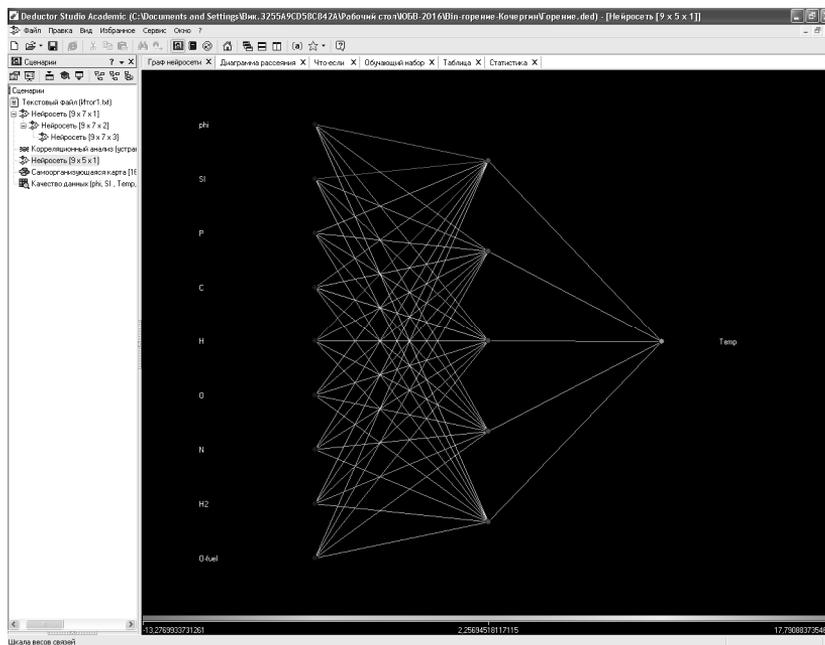


Рис. 6. Структура многофакторной вычислительной ИНС-модели решения одного из вариантов обратной задачи

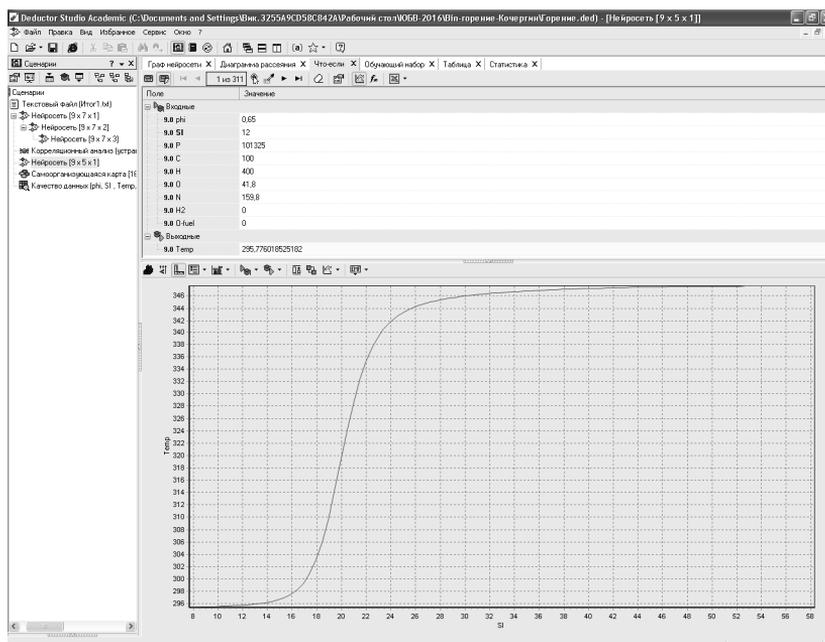


Рис. 7. Иллюстрация решения обратной задачи в виде численных данных и графика

На рис. 1 приведены данные по коэффициенту избытка окислителя в горючей смеси ( $\phi$ ), линейной скорости горения ( $SI$ , см/с), исходной температуре горючей смеси ( $Temp$ , К) и давлению ( $P$ , Па), при котором сжигалось топливо. Эти данные были в исходных экспериментальных данных. Для обобщения данных вместо конкретных названий углеводородов (метан, пропан, бутан и т.д.), не имеющих прямо выраженного физического смысла, и их количества в смеси мы использовали (для придания более ясного физического смысла экспериментальным данным) данные по относительному количеству содержания атомов углерода, водорода, кислорода, азота в горючей смеси, а также данные по относительному количеству молекул водорода в горючей смеси и количеству атомов кислорода в углеводородном топливе.

На рис. 2 представлен пример структуры ИНС, использованной для решения прямой задачи – определения скорости горения. ИНС-модель имеет 9 входных нейронов, на которые подаются значения входных факторов, 7 внутренних (скрытых) нейронов и один выходной нейрон, который выдает численное значение скорости горения.

На рис. 3–7 представлены примеры ИНС-моделей вычисления скорости горения и выявленные зависимости скорости горения от различных факторов.

Аналогичные результаты могут быть получены для любого набора факторов, оказывающих влияние на скорость горения. В этом заключается одно из главных достоинств полученных многофакторных моделей, обобщающих все закономерности, содержащиеся в экспериментальных данных на принципиально новом уровне.

На рис. 6 представлена структура многофакторной вычислительной ИНС-модели решения одного из вариантов обратной задачи – определения того, какая исходная температура горючей смеси (справа на рисунке) может обеспечить требуемое значение скорости горения при различных наборах значений остальных переменных задачи (слева на рисунке).

Рис. 7 иллюстрирует решение обратной задачи (рис. 6) в виде численных данных и графика, определяющего, какое значение температуры надо использовать для достижения требуемой скорости горения. Аналогичные результаты могут быть приведены для определения значений любого из факторов, обеспечивающих требуемое значение скорости горения.

**Выводы.** 1. Получены многофакторные вычислительные модели, позволяющие решать прямые и обратные задачи исследования горения газовых горючих смесей различного состава в различных условиях.

2. Показано, что искусственные нейронные сети позволяют обобщать результаты экспериментальных исследований на принципиально новом уровне.

#### Литература

1. Аbruков В.С., Аbruков С.В., Карлович Е.В., Семенов Ю.В. База знаний процессов горения: будущее мира горения // Вестник Чувашского университета. 2013. № 3. С. 46–52.

2. Аbruков В.С., Аbruков С.В., Смирнов А.В., Карлович Е.В. База знаний: эксперимент, интеллектуальный анализ данных, искусственные нейронные сети // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-го поколения: сб. тр. II Всерос. науч. конф., 22-24 мая 2014 г. / Министерство образования и молодежной политики Чувашской Республики, Ассоциация молодых физиков Чувашии и др. Чебоксары, 2014. С. 15–21.

3. Аbruков В.С., Аbruков С.В., Смирнов А.В., Карлович Е.В. Методы интеллектуального анализа данных при создании баз знаний // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 140–146.

4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2001.

5. Нейронные сети. Методология и технологии современного анализа данных / под ред. В.П. Боровикова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия-Телеком, 2008.

6. Abruков V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Y.V., Abruков S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2010, vol. 9, no. 5, pp. 385–396.

---

**АБРУКОВ ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики и нанотехнологий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (abrukov@yandex.ru).

**КОЧЕРГИН АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ** – студент III курса факультета прикладной математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tem47@mail.ru).

**АНУФРИЕВА ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА** – магистр по направлению «Физика наносистем», старший делопроизводитель кафедры прикладной физики и нанотехнологий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (kafedra.pfn@mail.ru).

---

V. ABRUKOV, A. KOCHERGIN, D. ANUFRIEVA  
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AS A MEANS OF GENERALIZATION  
OF EXPERIMENTAL DATA

**Key words:** artificial neural networks, experimental data, simulation, synthesis.

Generalization of multifactor experiment data requires the use of modern information technologies. The work aim was to study possibilities of artificial neural networks to create models that generalize a set of experimental data of multifactor experiment. In the work the multiple-factor computing models generalizing experimental data on burning of various bio fuels in different conditions are received for the first time at an essentially new level. These models allow us to solve direct and inverse problems – to calculate the burning rate of various gas mixtures in different environments and to determine the desired composition of the fuel mixture and external conditions necessary to achieve the desired burning rate. These models can be used in a bioenergetics for an organization of combustion of various types of bio fuels. The work prospects are connected with the working methodology using for the generalization of the experimental data in various fields of science and technology.

References

1. Abrukov V.S., Abrukov S.V., Karlovich E.V., Semenov Yu.V. *Baza znaniy protsessov goreniya: budushchee mira goreniya* [A combustion knowledge base is future of combustion world]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 46–52.
2. Abrukov V.S., Abrukov S.V., Smirnov A.V., Karlovich E.V. *Baza znaniy: eksperiment, intellektual'nyi analiz dannykh, iskusstvennyye neironnyye seti* [Knowledge base: experiment, data mining, artificial neural networks]. *Nanostrukturirovannyye materialy i preobrazovatel'nye ustroystva dlya solnechnoy energetiki 3-go pokoleniya: sb. tr. II Vseros. nauch. konf., 22-24 maya 2014 g.* [Proc. of II Rus. Sci. Conf. « Nanostructured materials and converting devices for solar energy 3<sup>rd</sup> generation», 2014, May 22-24]. Cheboksary, 2014, pp. 15–21.
3. Abrukov V.S., Abrukov S.V., Smirnov A.V., Karlovich E.V. *Metody intellektual'nogo analiza dannykh pri sozdanii baz znaniy* [Data mining techniques as means of creating knowledge bases]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 140–146.
4. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennyye neironnyye seti. Teoriya i praktika* [An artificial neural network. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2001.
5. Borovikov V.P., ed. *Neironnyye seti. Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh. 2-e izd., pererab. i dop.* [Neural network. Methodology and technology of modern data analysis. 2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2008.
6. Abrukov V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Y.V., Abrukov S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2010, vol. 9, no. 5, pp. 385–396.

---

**ABRUKOV VICTOR – Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor of Applied Physics and Nanotechnology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**KOCHERGIN ARTEM – 3<sup>rd</sup> year Student, Faculty of Applied Mathematics, Physics and Information Technologies, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**ANUFRIEVA DARYA – Master's Degree in «Physics of Nanosystems», Senior Account Executive of Applied Physics and Nanotechnology Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

Ссылка на статью: Аbruchов В.С., Кочергин А.В., Ануфриева Д.А. Искусственные нейронные сети как средство обобщения экспериментальных данных // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 155–162.

УДК 519.237.7:004  
ББК В172.6:3971.3

Д.В. БОБИН

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ БАЗЫ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНА\*

*Ключевые слова:* математическое моделирование, факторный анализ, системно-квалиметрический анализ, энергоэффективность.

*Математическую основу разрабатываемой аналитической информационной системы анализа энергоэффективности региона составляют системно-квалиметрический подход и многомерные статистические методы. Энергоэффективность региона оценивается комплексно по линейно не связанным между собой факторам, отражающим экономические, социальные и экологические характеристики процессов функционирования социально-экономической системы. Модель опирается на методы корреляционного анализа, квалиметрии, факторного анализа, анализа иерархий.*

**Описание проблемы.** В управлении крупными объектами – территориями, регионами, предприятиями, где требуются непрерывный сбор и обработка больших массивов данных, надежность и оперативность выполнения процессов помогают обеспечить информационно-аналитические системы (ИАС). Поскольку такие системы позволяют мониторить и анализировать текущие процессы, прогнозировать их развитие, то ИАС могут способствовать решению проблемы повышения энергоэффективности регионов. Требования к разрабатываемой системе не ограничиваются учетом расходования энергоресурсов. Она должна давать адекватные оценки энергоэффективности с учетом корреляций между входными данными. Поэтому при разработке математической базы ИАС необходимо учесть следующую особенность математических моделей: по числу одновременно учитываемых переменных, характеризующих энергоэффективность социально-экономических систем, можно выделить два подхода получения количественной оценки – монотетический и политетический.

При монотетическом подходе энергоэффективность систем оценивается с помощью одного показателя, например, энергоемкости, энергосбережения или потерь энергии при ее транспортировке или передаче. Однако часто объект, хороший по одному критерию, может оказаться плохим по другим. Тогда общая оценка энергоэффективности или сравнение различных объектов становятся весьма затруднительными.

Политетический подход подразумевает оценивание объектов одновременно по всем показателям, «свернутым» в один обобщающий (интегральный) показатель в аддитивной или мультипликативной форме. При этом исследователь неизбежно сталкивается с коррелированностью этих показателей, что ведет к искажению объективной картины. Например, включение положительно коррелированных показателей эффективности в одно уравнение

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-36-00365мол\_а).

способствует улучшению положения некоторых объектов относительно среднего уровня, что приводит к еще большей дифференциации регионов.

Проект направлен на решение проблем, возникающих при политетическом подходе к анализу энергоэффективности систем, и базируется на разработке методологии оценки энергоэффективности по линейно не связанным между собой факторам, отражающим экономические, социальные и экологические характеристики процессов функционирования социально-экономической системы. Это позволит адекватно измерить эффективность энергообмена в системе «производитель-потребитель».

Современное восприятие энергоэффективности связано с традиционным пониманием категории «эффективность» и стремлением свести ее к одному показателю. Энергоэффективность – это оценка эффективности использования различных видов энергии в виде отношения полученного эффекта на выходе к затратам энергии на входе (рис. 1). Эффект выражается по-разному: в виде дошедшей до потребителей электроэнергии по каналам передачи, в виде выработанного тепла, в виде прибыли/доходов или объемов производства и т.д. Таким образом, подходы к оценке энергоэффективности региона тоже могут различаться.



Рис. 1. Формирование энергоэффективности

Социо-эколого-экономическая сущность энергоэффективности заключается в эффективном достижении социальных, экономических и экологических задач потребления энергоресурсов, что выражается тремя группами целевых показателей [2]:

1) экономические – энергоемкость продукции, энерговооруженность труда в экономике, электроемкость ВВП, КПД оборудований и др.;

2) социальные – конечное потребление домашних хозяйств, освещенность улиц, среднее число бытовых электрических приборов, потребление электроэнергии на душу населения и др.;

3) экологические – доля альтернативных источников энергии, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, загрязнение сточных вод, потери энергии при передаче и др.

**Алгоритм построения модели.** Оценка энергоэффективности и потенциала энергосбережения начинается с анализа топливно-энергетического баланса (ТЭБ). Структура ТЭБ показывает, где добываются и как производятся энергетические ресурсы региона (страны), как они распределяются и преобразуются, где теряются и сколько их потребляют.

ТЭБ состоит из трех блоков:

- а) информация о добыче и производстве ресурсов, их запасов, импорте и экспорте – первичные энергоресурсы;
- б) преобразование добытых ресурсов в другие виды энергии;
- с) транспортировка энергоносителей и их конечное потребление в отраслях народного хозяйства.

Следующей задачей является разработка соответствующей методики для оценки энергоэффективности региона, отвечающей политике повышения энергоэффективности и энергосбережения как в отраслевом, так и в территориальном разрезе.

В данной работе приводится попытка построения модели, отвечающей цели создания в перспективе энергоэффективного общества. Энергоэффективность в смысле степени рационального потребления энергоресурсов схожа с понятием качество, а в ряде случаев может являться одним из параметров качества исследуемого объекта или процесса [3]. Поэтому и для решения задач, связанных с энергоэффективностью, могут успешно применяться методы квалиметрии [1, 4]. Для этого территория представляется как целенаправленная система в многомерном признаковом пространстве. Оптимальное управление такими объектами требует формирования множества признаков-показателей, вектора их развития, показателей значимости исходных признаков в достижении общей цели, а также способов получения данных множеств и алгоритма их последовательной трансформации в интегральную оценку состояния системы. Показатели важности признаков определяются методом анализа иерархий.

На рис. 2 представлены уровни иерархии оценки энергоэффективности социо-эколого-экономической (СЭЭ) системы. Первый уровень иерархии – общая энергоэффективность СЭЭ-системы. Второй уровень – экономическая, социальная и экологическая подсистемы СЭЭ-системы. Нижний уровень представлен частными показателями эффективности подсистем  $X_p^{(r)}$ . Принятые обозначения:  $p$  – номер показателя в  $r$ -й подсистеме,  $p = \overline{1..k_r}$ ,  $r = \{1, 2, 3\}$ ;  $k_r$  – количество частных показателей  $r$ -й подсистемы;  $w_p^{(r)}$  – приоритет  $p$ -го частного показателя  $X_p^{(r)}$ , показывающий его вклад в  $r$ -ю подсистему;  $w_r$  – вклад подсистемы в систему.

Веса показателей в блоках, а также веса различных подсистем определяются по матрицам предпочтений экспертов. Для более точной оценки объекты сравниваются попарно, а сами оценки структурируются и обрабатываются по следующей схеме:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

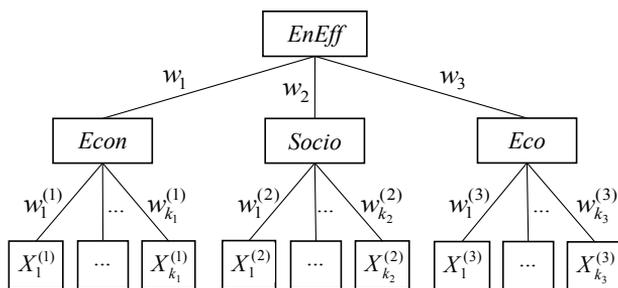


Рис. 2. Дерево свойств для оценки энергоэффективности системы:

$EnEff$  – интегральный показатель энергоэффективности;  
 $Econ$ ,  $Socio$ ,  $Eco$  – комплексные показатели экономической,  
 социальной и экологической подсистем

В квадратной матрице  $A = \{a_{ij}\}$  элемент  $a_{ij}$  показывает степень предпочтения  $i$ -го объекта над  $j$ -м по шкале Саати от 1 до 9: 1 – равноценность, 9 – абсолютное превосходство [5].

Свойства оценок  $a_{ij}$ :

- 1)  $a_{ij} = 1$  при  $i = j$ ;
- 2)  $a_{ij} = 1 / a_{ji}$ ;
- 3)  $a_{il} = a_{ij} \cdot a_{jl}$ .

Промежуточная матрица  $B = \{b_i\}$  в формуле (1) необходима для приближенного вычисления вектора весов  $W = \{w_i\}$ ,  $b_i$  – усредненная оценка элементов вектора  $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ . Веса  $w_i$  выводятся из оценок  $b_i$  нормировкой:  $w_i = b_i / \sum b_i$ .

Показатели нижнего уровня иерархии стандартизуются, поскольку часто выражаются в разных системах исчисления и/или распределены в разных числовых интервалах. Стандартизованные значения показателей  $Xs_p$  обобщаются сначала в комплексные оценки подсистем  $I_r$ , которые, в свою очередь, обобщаются в интегральную оценку энергоэффективности ССЭ-системы  $I_{EE}$  по аддитивной (2) или мультипликативной (3) формулам:

$$I_r = \sum_{p=1}^{k_r} w_p Xs_p, \quad I_{EE} = \sum_{r=1}^3 w_r I_r, \quad (2)$$

$$I_r = \prod_{p=1}^{k_r} (Xs_p)^{w_p}, \quad I_{EE} = \prod_{r=1}^3 (I_r)^{w_r}. \quad (3)$$

Наличие тесных связей между показателями одного уровня, по которым строится интегральный показатель верхнего уровня, приводит к нежелательным последствиям. В случае положительной корреляции пары переменных в одной матрице объект, имеющий высокую оценку по одной из них, будет автоматически «хорошим» и по другой. Включая все больше положительно коррелированных переменных, можно выводить конкретные объекты на желаемые позиции. Устранить эффект мультиколлинеарности и дать оценку системы по линейно независимым показателям позволяют методы факторного анализа многомерных данных, в частности, метод главных компонент.

Концептуальная схема модели количественного анализа с использованием многомерных статистических методов и системно-квалиметрического анализа:

Шаг 1. Факторный анализ частных показателей внутри каждого блока методом главных компонент –

$$(X_1^{(r)}, \dots, X_{k_r}^{(r)}) \rightarrow F^{(r)}, \quad r = \{1, 2, 3\};$$

Шаг 2. Стандартизация векторов значений главных компонент –

$$F^{(r)} \rightarrow F_S^{(r)};$$

Шаг 3. Комплексирование стандартизованных главных компонент по весовым коэффициентам  $w_r$  –

$$I_{EE} = f(w, F_S).$$

Формула  $f(w, F_S)$  может быть линейной или нелинейной. Линейная форма имеет вид

$$f(w, F_S) = \sum_{r=1}^3 w_r F_S^{(r)}.$$

**Выводы.** Разрабатываемая методика оценки энергоэффективности СЭЭ-систем объективно учитывает многомерность оцениваемых объектов и присущие им свойства. В перспективе с помощью кластерного анализа по интегральному показателю возможно определение классов энергоэффективности СЭЭ-систем, что необходимо для проведения целенаправленной политики повышения энергоэффективности и управления устойчивым развитием хозяйственных систем.

ИАС в области энергоэффективности, основанный на приведенной математической основе, позволит не только повысить энергосбережение за счет планирования и оптимизации энергопотребления регионами, но и сократить время обработки данных и принятия управленческих решений.

#### Литература

1. Азгальдов Г.Г., Беляков В.А., Рассада Л.В. Квалиметрия в социально-экономической проблематике. Ижевск: Изд-во ИГУ, 2011. 142 с.

2. Бобин Д.В. Энергоэффективность социально-экономических систем и разработка многомерных методов ее комплексной оценки // Проблемы и перспективы развития социально-экономического потенциала российских регионов: материалы 5-й Всерос. электр. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 15 апреля – 15 мая 2016 г.). Чебоксары: Пегас, 2016. С. 358–362.

3. Данилов И.П., Никитин В.В., Кузьмичев А.И., Бобин Д.В., Назаров А.А. Разработка и исследование эконометрических моделей прогнозирования социально-экономических проблем энергоэффективности. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. 162 с.

4. Azgaldov G.G., Kostin A.V. The ABC of Qualimetry. Moscow, Ridero Publ., 2015, 167 p.

5. Saaty T.L., Vargas L.G. Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. N.Y., Springer Publ., 2013, 363 p.

---

**БОБИН ДМИТРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ** – старший преподаватель кафедры актуарной и финансовой математики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([dimbobin@mail.ru](mailto:dimbobin@mail.ru)).

---

D. BOBIN

DEVELOP A MATHEMATICAL BASE  
OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM  
FOR RATING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE REGION

**Key words:** *mathematical modeling, factor analysis, system-qualitative analysis, energy efficiency.*

*The mathematical basis of the developed analytical information system for the analysis of energy efficiency of the region is a systemic-qualitative approach and multivariate statistical methods. Energy efficiency in the region is estimated comprehensively for linearly unrelated factors reflecting the economic, social and environmental characteristics of the functioning processes of the socio-economic system. The model is based on methods of correlation analysis, quality control, factor analysis, analytic hierarchy process.*

References

1. Azgal'dov G.G., Beljakov V.A., Rassada L.V. *Kvalimetriya v sotsial'no-ekonomicheskoi problematike* [Qualimetry in the socio-economic issues]. Izhevsk, 2011, 142 p.
2. Bobin D.V. *Energoeffektivnost' sotsial'no-ekonomicheskikh sistem i razrabotka mnogomernykh metodov ee kompleksnoi otsenki* [Energy efficiency socio-economic systems and developing multidimensional methods for integrated assessment]. *Problemy i perspektivy razvitiya sotsial'no-ekonomicheskogo potentsiala rossiiskikh regionov: materialy 5-i Vseros. elektr. nauch.-prakt. konf. (Cheboksary, 15 aprelya – 15 maya 2016 g.)* [Proc. of the 5<sup>th</sup> Rus. Sci. Conf. «Problems and prospects of socio-economic potential of the Russian regions»]. Cheboksary, 2016, pp. 358–362.
3. Danilov I.P., Nikitin V.V., Kuz'michev A.I., Bobin D.V., Nazarov A.A. *Razrabotka i issledovanie ekonometricheskikh modelei prognozirovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh problem energoeffektivnosti* [Development and research of econometric models of forecasting of socio-economic problems of energy efficiency]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2012, 162 p.
4. Azgal'dov G.G., Kostin A.V. *The ABC of Qualimetry*. M, 2015, 167 p.
5. Saaty T.L., Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. N.-Y., Springer, 2013, 363 p.

---

**BOBIN DMITRIY – Senior Teacher of the Insurance and Financial Mathematics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** *Бобин Д.В.* Разработка математической базы информационно-аналитической системы оценки энергоэффективности региона // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 163–168.

УДК 004.31:517.443:681.5  
ББК 3811

Н.А. ГАЛАНИНА, Н.Н. ИВАНОВА, А.В. ЩИПЦОВА

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ СПЕКТРОВ  
ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ В ТРАДИЦИОННОЙ ПОЗИЦИОННОЙ  
СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ И ПРИ ИХ КОДИРОВАНИИ  
ОСТАТКАМИ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ**

*Ключевые слова:* цифровая обработка сигналов (ЦОС), система остаточных классов (СОК), программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), дискретное преобразование Фурье (ДПФ), быстрое преобразование Фурье (БПФ).

*Обозначены проблемы синтеза устройств ЦОС в реальном времени. Обосновано применение предварительного кодирования сигналов остатками СОК, а также использование в проектировании гибкой структуры ПЛИС. Проведены тестирование написанных программных кодов и сравнительный анализ вариантов реализации устройства по быстрдействию. Показано, что решение задачи синтеза алгоритмов спектрального анализа с использованием СОК в среде Quartus является актуальным и востребованным.*

Цифровая обработка сигналов в настоящее время стала важным инструментом во многих областях науки и техники, таких как биомедицина, акустика, звуковая локация, радиолокация, сейсмология, связь, системы передачи данных, ядерная техника и др.

Как известно, существует две области представления сигналов: временная и частотная. Анализ формы электрических сигналов широко используется для получения информации о качестве различных устройств. Однако зависимость от времени в ряде случаев не обладает достаточно высокой чувствительностью к изменениям сигнала. Значительно более чувствительной является форма спектра сигнала. Представление сигнала в частотной области как суммы гармонических составляющих с различными частотами, амплитудами и начальными фазами необходимо при решении проблемы электромагнитной совместимости. Спектральный анализ также широко применяется в телефонии, промышленности, радиолокационных и гидроакустических системах, системах распознавания речи.

Преобразование Фурье является одной из основных операций ЦОС. В большинстве случаев в задачах спектрального анализа требуется вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Важным моментом является скорость нахождения ДПФ. В целях уменьшения времени расчета ДПФ применяется ряд алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), позволяющих ускорить вычисления ДПФ в 100 и более раз по сравнению с прямым методом вычисления [2].

Для создания цифровых интегральных схем используются ПЛИС. В отличие от обычных цифровых микросхем логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования, для чего

используются программатор и IDE (отладочная среда). Они позволяют задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры, к которым относятся Verilog, VHDL, AHDL и др.

Гибкость ПЛИС позволяет широко использовать их для построения различных по сложности и возможностям цифровых модулей (устройств, имеющих большое количество портов ввода-вывода; видео-, аудиоаппаратуры; устройств, выполняющих передачу данных на высокой скорости; систем защиты информации; устройств, выполняющих роль коммутаторов между системами с различной логикой и напряжением питания; устройств, выполняющих моделирование квантовых вычислений и др.).

**Проектирование в среде Quartus.** Программное обеспечение *Altera Quartus II* представляет собой полную мульти-платформенную среду проектирования, которая может быть легко перенастроена под конкретные требования и является идеальной средой для проектирования на основе ПЛИС [3–5, 7].

Компилятор пакета *Quartus II* состоит из ряда модулей, выполняющих проверку проекта на наличие ошибок, логический синтез, размещение и разводку проекта в ПЛИС; генерацию выходных файлов для моделирования проекта, анализ временных характеристик и программирование.

В начале компиляции проекта из него извлекается информация об иерархических связях между составляющими его файлами и проверяется на наличие основных ошибок описание проекта. Затем создается организационная карта проекта и все файлы преобразуются в единую базу данных, с которой впоследствии и будет работать система.

Компиляция может выполняться с учетом заданных требований, к которым относятся обеспечение требуемых временных характеристик проекта, увеличение быстродействия и оптимизация используемых ресурсов ПЛИС.

Компилятор создает файлы для программирования и конфигурирования ПЛИС фирмы *Altera*. Промежуточные и окончательные результаты компиляции в системе *Quartus II* можно посмотреть в окне «Отчет о компиляции». Программирование и конфигурирование ПЛИС фирмы *Altera* могут быть выполнены как с помощью встроенных средств пакета, так и с использованием стандартных промышленных средств программирования.

В настоящее время наблюдается бурное развитие языков описания аппаратуры. Одним из таких языков является язык *Verilog*.

Основной единицей языка *Verilog* является модуль. Все модели цифровых устройств, модели отдельных частей цифровой системы и сама цифровая система представляются в виде отдельных модулей.

**Непозиционная система счисления – система остаточных классов.** Непозиционная система счисления – это система счисления, в которой значение цифры не изменяется в зависимости от ее расположения. Примером непозиционной системы счисления служит римская система, в которой вместо цифр используются латинские буквы. К таким системам можно также отнести и систему остаточных классов (СОК), иногда называемую как система

вычетов (СВ), или модулярной арифметикой (МА). В системе остаточных классов сложение, вычитание и умножение выполняются без учета переноса, так как каждая цифра результата – это функция только одной цифры из каждого операнда, которая не зависит от всех остальных цифр.

В основе всей непозиционной системы счисления в остаточных классах лежит понятие сравнимости чисел по модулю  $m$ .

Модулярная арифметика базируется на китайской теореме об остатках (КТО). КТО формулируется следующим образом: для любой системы взаимно простых чисел  $p_1, \dots, p_n$  любое число  $X$  из диапазона  $[0; M)$ , где  $M = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$ , представимо в виде вектора  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , где  $a_i = \langle X \rangle p_i$  ( $\langle X \rangle p_i$  – операция взятия остатка от целочисленного деления  $X$  на  $p_i$ ), где  $p_1, \dots, p_n$  – модули системы,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – остатки (вычеты) числа по заданной системе модулей.

Если задан ряд положительных чисел  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ , называемых основанием системы, то под системой счисления в остаточных классах будем понимать такую систему, в которой целое положительное число представляется в виде набора остатков (вычетов) по выбранным основаниям [1]:

$$N = (a_1, a_2, \dots, a_n).$$

Главным преимуществом СОК является то, что в отличие от обобщенной позиционной системы в ней образование цифры каждого разряда проводится независимо друг от друга.

**Арифметические операции в системе остаточных классов.** Сложение остаточных представлений по модулю осуществляется по простым правилам. Приведем для примера табл. 1 сложения для  $m = 5$  по модулю 5.

Суммируемые величины  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  принимают значения от 0 до 4. Табл. 1 симметрична относительно главной диагонали. Каждая последующая строка в табл. 1 повторяет предыдущую со сдвигом влево.

Умножение остаточных представлений по модулю  $m$  также осуществляется по простым правилам. Рассмотрим пример умножения для  $m = 5$ . Перемножаемые величины  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  изменяются от 0 до 4. Табл. 2 симметрична относительно обеих диагоналей и имеет порядок на единицу меньше модуля –  $(m - 1)$ .

Выше упоминалось, что для вычислений с большей точностью в СОК должно быть взято несколько модулей. Следует подчеркнуть, что при выполнении операций сложения и умножения, называемых модульными операциями, полностью отсутствуют взаимосвязи между модульными каналами. Поэтому в СОК проблема переносов, свойст-

Таблица 1  
Сложение чисел  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  в СОК по модулю 5

$\alpha_i$	$\alpha_j$				
	0	1	2	3	4
0	0	1	2	3	4
1	1	2	3	4	0
2	2	3	4	0	1
3	3	4	0	1	2
4	4	0	1	2	3

Таблица 2  
Умножение чисел  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  в СОК по модулю 5

$\alpha_i$	$\alpha_j$				
	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4
2	0	2	4	1	3
3	0	3	1	4	2
4	0	4	3	2	1

Таблица 3  
Вычитание числа  $\alpha_j$  из числа  $\alpha_i$   
в СОК по модулю 5

$\alpha_i$	$\alpha_j$				
	0	1	2	3	4
0	0	4	3	2	1
1	1	0	4	3	2
2	2	1	0	4	3
3	3	2	1	0	4
4	4	3	2	1	0

венная позиционному представлению информации, отсутствует. Операция вычитания  $\alpha_i - \alpha_j$  представлена в табл. 3. Табл. 3 симметрична относительно побочной диагонали.

**Преимущества умножения чисел в СОК.** При вычислении БПФ умножение – одна из часто выполняемых операций, и вследствие этого у процессора уходит на нее большое количество времени. Кроме умножения целых чисел при вычислении БПФ процессору часто приходится сталкиваться с умножением дробных и комплексных чисел, что приводит к значительному снижению быстродействия процессора [8]. Как указывалось выше, при умножении больших чисел в процессоре происходит значительное количество сдвигов, что также снижает скорость выполнения операций и повышает разрядность чисел. Например, при умножении двух 8-битных чисел получается 16-битное число, а при умножении двух 16-битных чисел получается 32-битное число. Из-за большого количества сдвигов процессор не может проводить параллельное вычисление, что тоже снижает производительность. Все вычисления процессор производит в позиционной системе счисления. Преимущество СОК заключается в том, что при умножении не происходит переносов, и вследствие этого можно одновременно вычислять несколько отчетов сигнала [6, 9].

**Вычисление ДПФ и БПФ в ПСС, БПФ в СОК на ПЛИС.** Созданные программные коды ПЛИС фирмы *Altera* в среде *Quartus II* состоят из нескольких модулей, каждый из которых реализует один из методов вычисления БПФ либо является вспомогательным модулем. Тестирование программных кодов проводилось путем подачи на вход системы обработки трех различных по разрядности 8-точечных сигналов.

Для вычисления ДПФ сначала были найдены поворачивающие множители по формуле

$$W^n = \exp\left(-j \frac{2\pi n}{N}\right)$$

с помощью программы, написанной на языке высокого уровня С в программной среде Visual Studio.

На рис. 1 показаны результаты вычисления поворачивающих множителей.

```

k= 0 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
k= 1 1000 707 0 -707 -1000 -707 0 707
k= 2 1000 0 -1000 0 1000 0 -999 0
k= 3 1000 -707 0 707 -999 707 0 -707
k= 4 1000 -1000 1000 -999 999 -999 999 -999
k= 5 1000 -707 0 707 -999 707 0 -707
k= 6 1000 0 -999 0 999 0 -999 0
k= 7 1000 707 0 -707 -999 -707 0 707
Для продолжения нажмите любую клавишу . . .

```

Рис. 1. Вычисление поворачивающих множителей

**Вычисление ДПФ в Quartus II.** Непосредственное вычисление ДПФ происходит в модуле *dpfp8*, представленном на рис. 2, на вход которого поступает 8 значений сигнала, которые умножаются на поворачивающие множители, найденные ранее, и записываются в переменную *out*. Переменная *out* содержит 137 бит: таким образом, на каждый отсчёт приходится 15 бит.

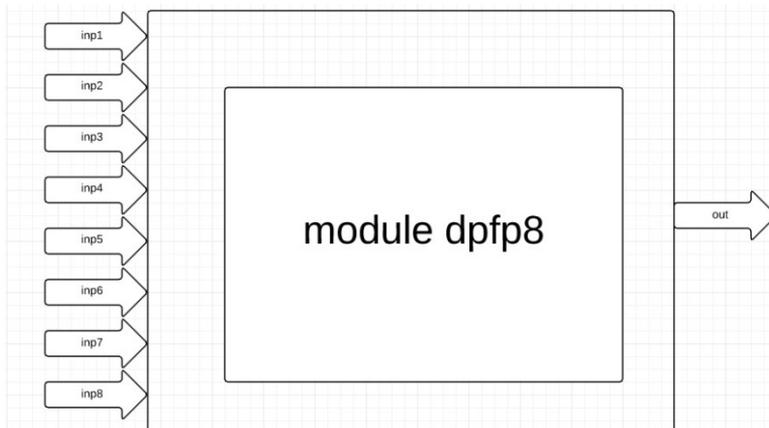


Рис. 2. Модуль вычисления преобразования Фурье

На вход подаются числа с разрядностью 1, 2 и 3 в десятичной системе счисления: для этого переменным входа достаточно выделить по 5, 8 и 11 бит, соответственно.

Результаты выполнения программы представлены на рис. 3–5.

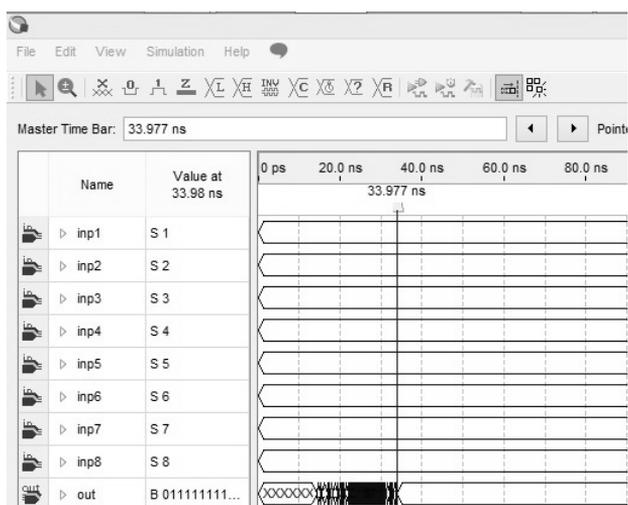


Рис. 3. Результат выполнения ДПФ для разрядности входных данных 1

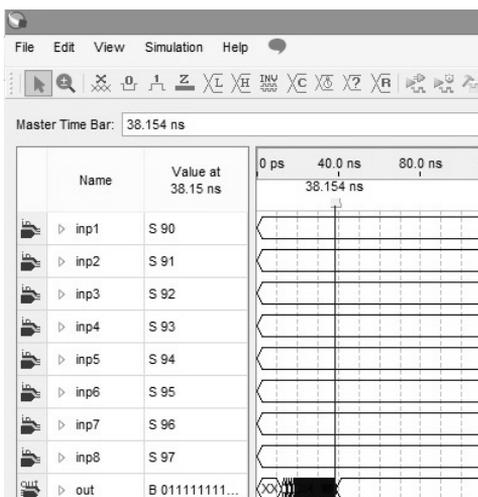


Рис. 4. Результат выполнения ДПФ для разрядности входных данных 2

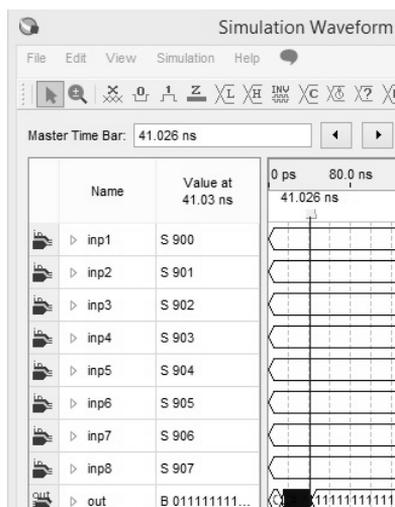


Рис. 5. Результат выполнения ДПФ для разрядности входных данных 3

Из рис. 3–5 видно, что время, затраченное на вычисление, равно 33,977, 38,154 и 41,026 нс.

**Вычисление БПФ-ПСС в Quartus II.** Схема вычисления 8-точечного БПФ представлена на рис. 6 [8, 10].

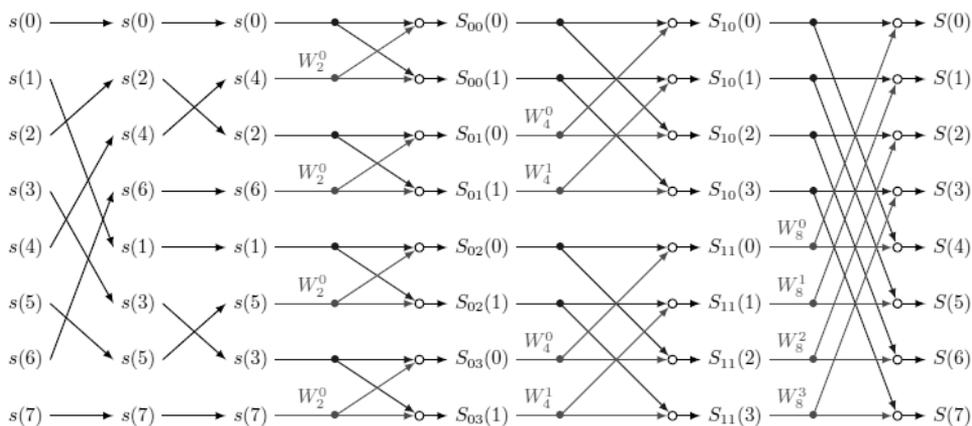


Рис. 6. Вычисление 8-точечного БПФ

Для вычисления БПФ необходимо определить коэффициенты  $W_2^0$ ,  $W_4^0$ ,  $W_8^0$ ,  $W_8^1$ ,  $W_8^2$ ,  $W_8^3$ , где  $W_N^k = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k\right)$ .

Тестирование проводилось по вышепредставленной схеме, т.е. при разрядности входных данных, соответственно, равных 1, 2 и 3. В этом случае переменным входа достаточно выделить по 5, 8 и 8 бит. Результаты вычислений, как видно на рис. 7–9, равняются 19,679, 20,201 и 20,513 нс.

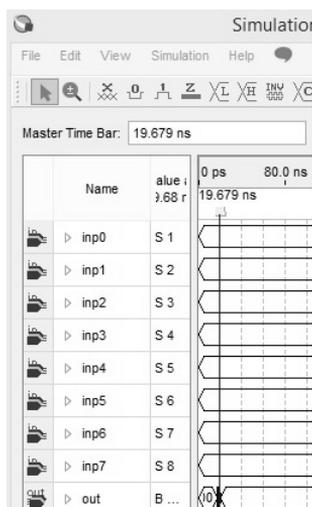


Рис. 7. Результат вычисления БПФ-ПСС для разрядности входных данных 1

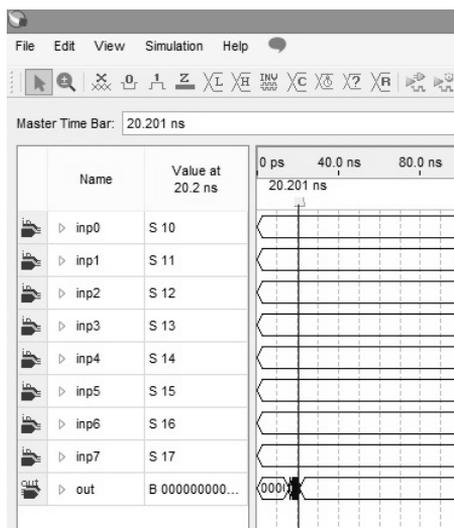


Рис. 8. Результат вычисления БПФ-ПСС для разрядности входных данных 2

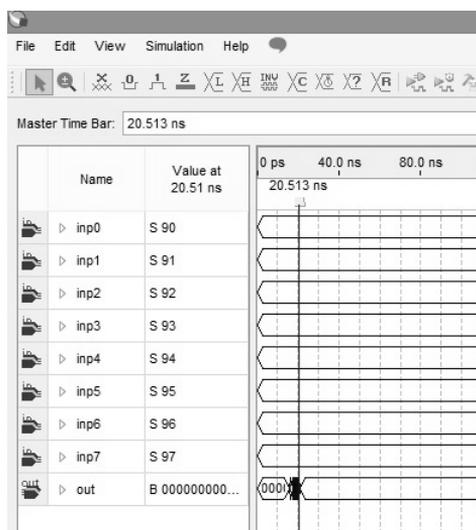


Рис. 9. Результат вычисления БПФ-ПСС для разрядности входных данных 3

**Вычисление БПФ-СОК в Quartus II.** Кодированный остатками СОК входной сигнал поступает на вход спецпроцессора, обеспечивающего высокоскоростную параллельную обработку данных по алгоритму БПФ. Далее результаты непозиционной обработки сигналов, полученные в каналах СОК, поступают на дешифратор, где переводятся в позиционный код в соответствии с КТО.

В рамках проведенного эксперимента время выполнения конфигурационного файла БПФ-СОК составило 14,984, 15,489, 15,724 нс в зависимости от разрядности входных данных (рис. 10–12).

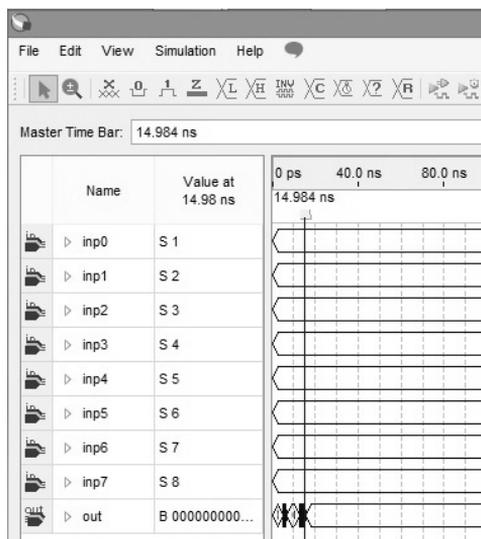


Рис. 10. Результат вычисления БПФ-СОК для разрядности входных данных 1

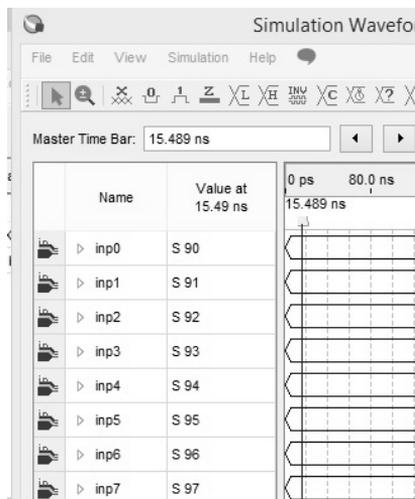


Рис. 11. Результат вычисления БПФ-СОК для разрядности входных данных 2

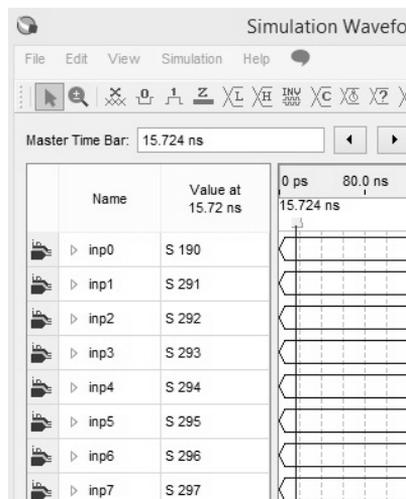


Рис. 12. Результат вычисления БПФ-СОК для разрядности входных данных 3

Полученные практические результаты полностью подтвердили теоретические предположения о возможностях СОК в плане повышения быстродействия обработки сигналов в реальном времени.

График зависимости времени спектральной обработки в ПСС от количества разрядов отсчётов тестового сигнала представлен на рис. 13.

Сравнительный анализ результатов вычисления спектров сигналов в ПСС и СОК представлен на рис. 14.

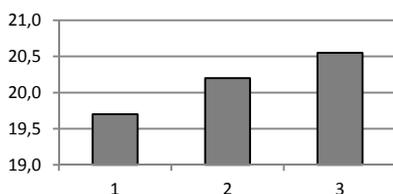


Рис. 13. Зависимость времени спектральной обработки от количества разрядов отсчётов тестового сигнала, нс

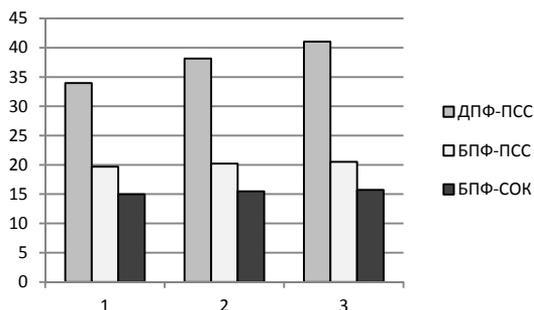


Рис. 14. Результаты сравнительного анализа вычисления спектров сигналов в ПСС и СОК (по оси  $y$  – быстродействие, нс; по оси  $x$  – количество разрядов тестового сигнала)

**Выводы.** В работе были реализованы алгоритмы генерации цифрового сигнала, воздействующего на систему обработки, для трех вариантов вычисления преобразования Фурье на ПЛИС: в позиционной системе счисления (ДПФ и БПФ) и непозиционной системе счисления (БПФ).

В результате анализа результатов тестов, проведённых на симуляторе ПЛИС, можно сделать заключение, что основной проблемой в использовании системы остаточных классов при синтезе цифровых устройств является архитектурная и аппаратная нацеленность последних на использование в своей работе традиционной позиционной двоичной системы счисления. В то же время применение СОК при синтезе алгоритмов ЦОС дает преимущество при умножении обрабатываемых массивов данных, следствием чего является выигрыш в скорости вычислений.

#### Литература

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Сов. радио, 1968. 440 с.
2. Галанина Н.А., Песошин В.А., Иванова Н.Н., Калмыков Б.М., Дмитриев Д.Д. Аппаратурная реализация алгоритма быстрого преобразования Фурье с заданными свойствами в системе счисления в остаточных классах // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 119–126.
3. Галанина Н.А., Иванова Н.Н., Дмитриев Д.Д. Вопросы реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов на программируемой логике с использованием модулярной арифметики // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 135–140.
4. Галанина Н.А., Дмитриев Д.Д. Синтез БПФ на ПЛИС с применением системы остаточных классов // Программные системы и вычислительные методы. 2013. № 1(2). С. 129–133.
5. Галанина Н.А., Дмитриев Д.Д. Разработка устройства на ПЛИС для спектрального анализа цифровых сигналов в системе остаточных классов // Параллельная компьютерная ал-

гебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах: материалы I Междунар. науч. конф. / Северо-Кавказский фед. ун-т; Ин-т математики и естественных наук. Ставрополь, 2014. С. 338–342.

6. Галанина Н.А., Иванова Н.Н. Анализ эффективности синтеза устройств вычислительной техники для непозиционной цифровой обработки сигналов // Кибернетика и программирование. 2015. № 3. С. 1–6.

7. Галанина Н.А., Дмитриев Д.Д. Разработка конфигурационного файла для реализации дискретного преобразования Фурье в системе остаточных классов на ПЛИС // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 119–124.

8. Галанина Н.А. Синтез функциональных модулей БПФ в СОК // Вестник Чувашского университета. 2005. № 2. С. 124–127.

9. Галанина Н.А. Сравнительный анализ энергетических характеристик позиционных и непозиционных фильтров // Вестник Чувашского университета. 2006. № 2. С. 335–340.

10. Cardarilli G.C., Nannarelli A., Re M. Residue Number System for Low-Power DSP Applications. Proc. of 41st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2007. Available at: <http://www.imm.dtu.dk/~alna/pubs/asil07b.pdf>.

11. Chaves R., Sousa L. RDSP: a RISC DSP based on residue number system. Proc. of the Euro-micro Symposium on Digital System Design (DSD'03). Inesc-ID, Lisboa, Lisbon, Portugal, 2003. DOI: 10.1109/DSD.2003.1231911.

**ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА** – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([galaninacheb@mail.ru](mailto:galaninacheb@mail.ru)).

**ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([naadeezdaa@rambler.ru](mailto:naadeezdaa@rambler.ru)).

**ЩИЦОВА АННА ВЛАДИМИРОВНА** – кандидат педагогических наук, доцент, декан факультета информатики и вычислительной техники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

N. GALANINA, N. IVANOVA, A. SHCHIPTSOVA

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF CALCULATION  
OF THE SPECTRA OF THE DIGITAL SIGNALS PROCESSING  
IN THE TRADITIONAL POSITIONAL NUMBER SYSTEM  
AND ITS ENCODING RESIDUES OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM

**Key words:** digital signal processing (DSP), residual classes system (RCS), programmable logic integrated circuits (FPGA), discrete Fourier transform (DFT), fast Fourier transform (FFT).

*Indicated synthesis DSP problem devices in real time. The application of the precoding RCS signal residues, as well as flexible use of FPGA in designing the structure. The written program codes were tested and comparative analysis of options for implementing speed devices. It is shown that the solution of the problem of synthesis spectral analysis algorithms using RCS among Quartus system is relevant and in demand.*

References

1. Akushskii I.Ya., Yuditskii D.I. *Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh* [Machine arithmetic in residual classes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1968, 440 p.

2. Galanina N.A., Pesoshin V.A., Ivanova N.N., Kalmykov B.M., Dmitriev D.D. *Apparaturная realizatsiya algoritma bystrogo preobrazovaniya Fur'e s zadannymi svoistvami v sisteme schisleniya v*

*ostatochnykh klassa* [Hardware implementation of fast fourier transform algorithm with desired properties in residue number system]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no 1, pp. 119–126.

3. Galanina N.A., Ivanova N.N., Dmitriev D.D. *Voprosy realizatsii algoritmov tsifro-voi obrabotki signalov na programmirovemoi logike s ispol'zovaniem modulyarnoi arifmetiki* [To issues of implementing digital signal processing algorithms on programmable logic using modular arithmetic]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 135–140.

4. Galanina N.A., Dmitriev D.D. *Sintez BPF na PLIS s primeneniem sistemy ostatochnykh klassov* [Synthesis of FFT on FPGA using the system of residual classes]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods], 2013, no. 1(2), pp. 129–133.

5. Galanina N.A., Dmitriev D.D. *Razrabotka ustroystva na PLIS dlya spektral'nogo analiza tsifrovyykh signalov v sisteme ostatochnykh klassov* [Development of a device to the FPGA for spectral analysis of digital signals in the system of residual classes]. *Parallelnaya kompyuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh: materialy I Mezhdunar. nauch. konf. / Severo-Kavkazskii fed. un-t; In-t matematiki i estestvennykh nauk* [Proc. of I Int. Sci. Conf. «Parallel computer algebra and its applications in the new information and communication systems»]. Stavropol', 2014, pp. 338–342.

6. Galanina N.A., Ivanova N.N. *Analiz effektivnosti sinteza ustroystv vychislitel'noi tekhniki dlya nepozitsionnoi tsifrovoi obrabotki signalov* [Analysis of the efficiency of synthesis of the devices of computer technology to non-positional digital signal processing]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2015, no. 3, pp. 1–6.

7. Galanina N.A., Dmitriev D.D. *Razrabotka konfiguratsionnogo faila dlya realizatsii diskretnogo preobrazovaniya Fur'e v sisteme ostatochnykh klassov na PLIS* [Development of a configuration file for the implementation discrete fourier transform in residue number system on FPGA]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 119–124.

8. Galanina N.A. *Sintez funktsional'nykh modulei BPF v SOK* [Synthesis of functional modules of the FFT in the system of residual classes]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2005, no. 2, pp. 124–127.

9. Galanina N.A. *Sravnitel'nyi analiz energeticheskikh kharakteristik pozitsionnykh i nepozitsionnykh fil'trov* [Comparative analysis of energy characteristics of positional and non-positional filters]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2006, no. 2, pp. 335–340.

10. Cardarilli G.C., Nannarelli A., Re M. Residue Number System for Low-Power DSP Applications. Proc. of 41st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2007. Available at: <http://www.imm.dtu.dk/~alna/pubs/asil07b.pdf>.

11. Chaves R., Sousa L. RDSP: a RISC DSP based on residue number system. Proc. of the Euro-micro Symposium on Digital System Design (DSD'03). Inesc-ID, Lisboa, Lisbon, Portugal, 2003. DOI: 10.1109/DSD.2003.1231911.

---

**GALANINA NATALIA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**IVANOVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**SHCHIPTSOVA ANNA – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Informatics and Computer Techniques, Chuvash state University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** *Галанина Н.А., Иванова Н.Н., Щипцова А.В.* Сравнительный анализ результатов вычисления спектров цифровых сигналов в традиционной позиционной системе счисления и при их кодировании остатками системы остаточных классов // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 169–179.

УДК 681.3:004.052.2

ББК 3811

Н.А. ГАЛАНИНА, В.А. ПЕСОШИН, Н.Н. ИВАНОВА

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕРЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ, УСТОЙЧИВЫХ К ОДИНОЧНЫМ ОШИБКАМ

**Ключевые слова:** модулярная арифметика, система счисления в остаточных классах, нерекурсивный цифровой фильтр, отказоустойчивость.

Использование модулярной арифметики позволяет синтезировать отказоустойчивые системы. Авторами статьи разработаны схема отказоустойчивого нерекурсивного цифрового фильтра, основанного на модулярной арифметике, а также построена его имитационная модель в среде Simulink/MatLab. С помощью имитационной модели фильтра протестирована его устойчивость к одиночным ошибкам. Результаты тестов показали, что сбой, произошедший в одном из каналов, обнаруживается и исправляется. В итоге с выхода фильтра считываются правильные данные. Разработанную структурную схему фильтра и его имитационную модель можно использовать при схемотехнической реализации аналогичных устройств.

Известно, что при организации вычислений с применением модулярной арифметики любое целое число представляется в виде упорядоченного набора остатков в соответствующем базисе взаимно попарно простых чисел  $N_S$ , называемых модулями, или основаниями, системы:

$$A \leftarrow \{\{N_1, N_2, \dots, N_v\}\} \rightarrow (r_1, r_2, \dots, r_v),$$

где  $r_s = \langle A \rangle_{N_s}$  ( $S = 1, 2, \dots, v$ ),  $\langle \bullet \rangle_{N_s}$  – операция определения вычета числа по модулю  $N_s$  [2].

Для обеспечения совместимости устройств на основе модулярной арифметики с существующими устройствами, основанными на позиционной системе счисления, в состав первых должны быть включены блоки прямого преобразования в модулярное представление данных (шифраторы) [6] и обратный преобразователь в позиционную систему счисления (дешифратор) [5]. На долю этих блоков приходится большая часть аппаратных затрат, необходимых для схемотехнической реализации таких устройств. Однако за счет уменьшения разрядности данных, обрабатываемых в параллельных каналах, общие аппаратные затраты на реализацию всего устройства на основе модулярной арифметики существенно меньше по сравнению с таковыми у их позиционных аналогов [3].

Для разработчиков ЦФ интерес представляет синтез основных функциональных узлов фильтров, обеспечивающих заданные характеристики надежности при минимальных аппаратных затратах [1, 4, 7, 8]. Использование модулярной арифметики при синтезе ЦФ позволяет добиться их устойчивости к одиночным ошибкам за счет незначительного увеличения аппаратных затрат благодаря добавлению дополнительных (контрольных) каналов обработки данных.

На рис. 2 представлена схема отказоустойчивого нерекурсивного ЦФ второго порядка с двумя контрольными каналами. Данное устройство может исправлять однократные ошибки. На рис. 3 и 4 представлены функциональ-

ные схемы блоков это фильтра, которые предназначены для обнаружения отказов (на основе вычисления проекций) и выбора правильных чисел.

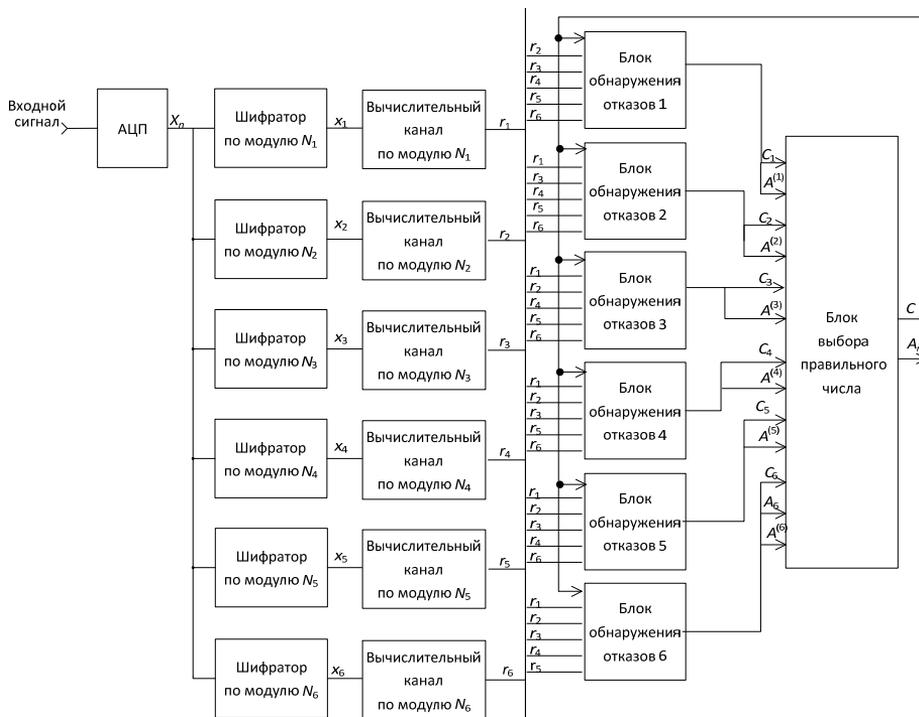


Рис. 1. Структурная схема отказоустойчивого нерекурсивного ЦФ второго порядка на основе модулярной арифметики (4 информационных и 2 контрольных канала)

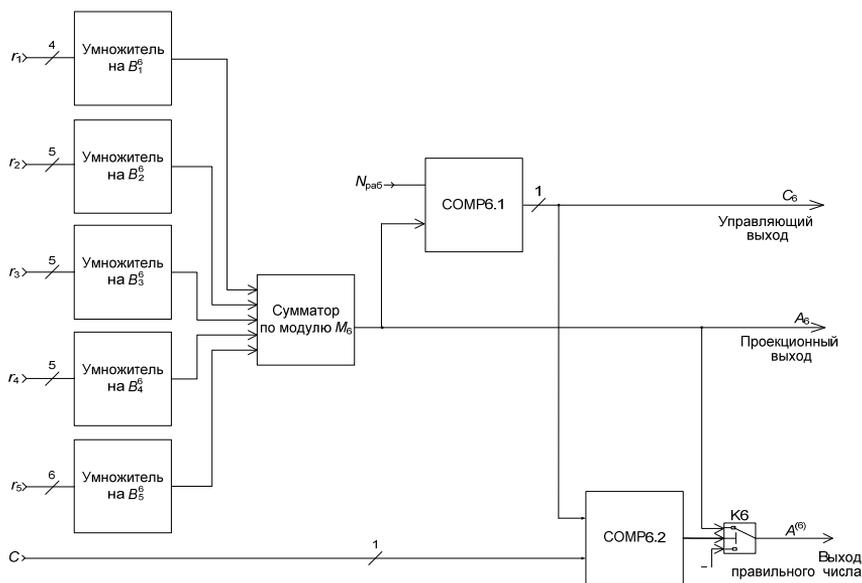


Рис. 2. Функциональная схема «Блока обнаружения отказов 6»

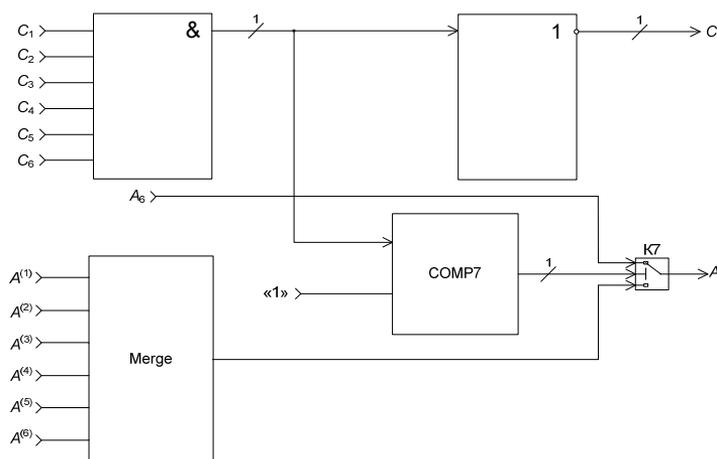


Рис. 3. Блок выбора правильного числа

ЦФ содержит: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блоки определения вычетов входного сигнала (шифраторы по модулям  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ ), вычислительные каналы по модулям  $N_1, N_2, \dots, N_6$  (в нашем случае в этих каналах нерекурсивные фильтры низких частот второго порядка), блоки обнаружения отказов и блок выбора правильного числа.

Блоки обнаружения отказов содержат умножители на ортогональные базисы подсистемы, сумматор по соответствующему модулю  $M_S$ , схемы сравнения (COMP6.1 и COMP6.2) и переключатель (К6). На рис. 2 представлена функциональная схема блока обнаружения отказов, относящегося к 6-му каналу (2-му контрольному). По такому же принципу устроены остальные блоки обнаружения отказов, отличием является только отсутствие в них проекционного выхода.

Блок выбора правильного числа (рис. 3) содержит логические схемы «И» и «ИЛИ», инвертор, схему сравнения с единицей (COMP7), объединитель входных сигналов (Merge) и переключатель К7.

Отказоустойчивый нерекурсивный ЦФ с четырьмя информационными и двумя контрольными каналами работает следующим образом. С выхода АЦП  $R$ -разрядные числа  $X_n$  поступают в 6 шифраторов, где они преобразуются в  $R_S$ -разрядные вычеты  $x_S$  ( $R_S = \log_2 N_S, S = 1, 2, \dots, 6$ ). Эти вычеты поступают в вычислительные каналы, в которых вместо коэффициентов позиционного нерекурсивного фильтра  $b_0, b_1, b_2$  подставляются их масштабированные значения  $B_0, B_1, B_2$ . Они получаются с помощью умножения  $b_0, b_1, b_2$  на коэффициент  $k$  и округления полученных результатов в большую сторону. На выходе блока выбора правильного числа (рис. 3) результат делится на этот коэффициент.

С выходов вычислительных каналов значения  $r_1, r_2, \dots, r_6$  (представляющие собой модули результатов вычислений в каналах по соответствующему основанию  $N_S$ ) подаются на блоки обнаружения отказов. При этом на первый блок не подается  $r_1$ , на второй блок –  $r_2, \dots$ , на шестой –  $r_6$ .

В блоке обнаружения отказов предварительно вычисленные значения ортогональных базисов ( $B_j^S$ , где для  $S = 1: j = 2, \dots, 6$ ; для  $S = 2, 3, \dots, 5: j = 1, 2, \dots, S-1, S+1, \dots, 6$ ; для  $S = 6: j = 1, 2, \dots, 5$ ) подсистем умножаются на соответствующие вычеты и поступают в сумматоры по модулю  $M_S$ , где  $M_S = \frac{N_{\text{полн}}}{N_S}$ :

$$\begin{aligned} A_1 &= \langle r_2 B_2^1 + r_3 B_3^1 + r_4 B_4^1 + r_5 B_5^1 + r_6 B_6^1 \rangle_{M_1}; \\ A_2 &= \langle r_1 B_1^2 + r_3 B_3^2 + r_4 B_4^2 + r_5 B_5^2 + r_6 B_6^2 \rangle_{M_2}; \\ A_3 &= \langle r_1 B_1^3 + r_2 B_2^3 + r_4 B_4^3 + r_5 B_5^3 + r_6 B_6^3 \rangle_{M_3}; \\ A_4 &= \langle r_1 B_1^4 + r_2 B_2^4 + r_3 B_3^4 + r_5 B_5^4 + r_6 B_6^4 \rangle_{M_4}; \\ A_5 &= \langle r_1 B_1^5 + r_2 B_2^5 + r_3 B_3^5 + r_4 B_4^5 + r_6 B_6^5 \rangle_{M_5}; \\ A_6 &= \langle r_1 B_1^6 + r_2 B_2^6 + r_3 B_3^6 + r_4 B_4^6 + r_5 B_5^6 \rangle_{M_6}. \end{aligned}$$

Полученные числа  $A_S$  в схеме сравнения COMP S.1 сравниваются со значением рабочего диапазона  $N_{\text{раб}} = \prod_{S=1}^4 N_S$ . Если  $A_S \leq N_{\text{раб}}$ , то выходной сигнал схемы сравнения  $C_S = 1$ , если же  $A_S > N_{\text{раб}}$ , то  $C_S = 0$ .

С выхода схемы сравнения сигнал  $C_S$  подается на соответствующий вход логической схемы «И» блока выбора правильного числа.

Если  $A$  – правильное число, то все  $C_S = 1$ . В этом случае 1, которая считывается с выхода схемы «И» блока выбора правильного числа, сравнивается с 1, хранящейся в схеме сравнения (COMP7). Переключатель K7 устанавливается в положение 1 и считывается значение шестой проекции  $A_6$ .

Если в каком-то канале произошел сбой, то один из сигналов  $C_S$  равен 0, следовательно, и выходной сигнал схемы «И» блока выбора правильного числа будет равен 0. Тогда переключатель K7 устанавливаем в положение 2 и получаем число со схемы объединения входных сигналов (Merge) (второй управляющий вход), а с управляющего выхода инвертора сигнал  $C = C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_6 = 1$  по цепи обратной связи из блока выбора правильного числа подается на входы схем сравнения (COMP S.2, где  $S = 1, 2, \dots, 6$ ) блоков обнаружения отказов, а значение проекции числа через переключатель KS ( $S = 1, 2, \dots, 6$ ) по второму управляющему входу подается на переключатель K7. Открывается ключ того блока обнаружения отказов, в котором  $A_S < N_{\text{раб}}$  (все остальные  $A_i > N_{\text{раб}}$ ) и  $C_S = 1$ .

В качестве средства для моделирования была выбрана библиотека Simulink среды MatLab, которая успешно используется для проектирования различных систем и проверки их работоспособности до начала тестирования опытных образцов. Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов для построения функциональных блок-схем моделируемых устройств.

Для моделирования данного фильтра в качестве модулей системы примем следующие взаимно простые числа:  $N_1 = 13$ ,  $N_2 = 23$ ,  $N_3 = 29$ ,  $N_4 = 31$ . Тогда диа-

пазон представления данных будет от 0 до  $N_{\text{раб}}$ , где  $N_{\text{раб}} = 2\,708\,687 > 2^{20}$ . Контрольные основания были выбраны таким образом, чтобы система была упорядоченной, а модули оставались взаимно простыми ( $N_5 = 33$ ,  $N_6 = 37$ ). Таким образом  $N_{\text{полн}} = \prod_{S=1}^6 N_S = 3\,307\,306\,827$ .

На основе структурной схемы отказоустойчивого ЦФ в СОК (рис. 1) разработана имитационная модель устройства (коэффициенты нерекурсивного фильтра приняты следующими  $B_0 = 3$ ,  $B_1 = 5$ ,  $B_2 = 3$ ).

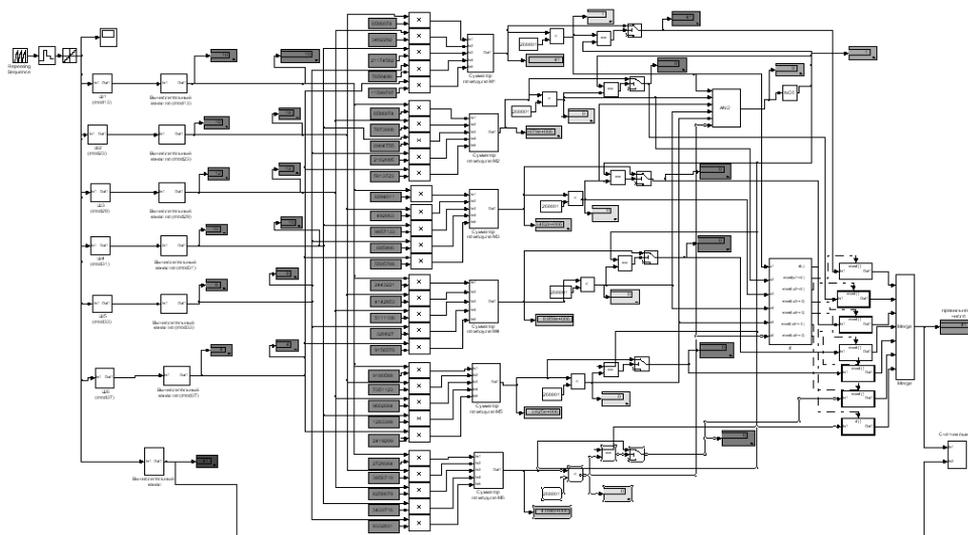


Рис. 4. Имитационная модель отказоустойчивого нерекурсивного цифрового фильтра второго порядка на основе СОК в среде Simulink/MatLab

Для исследования разработанной модели нерекурсивного цифрового фильтра второго порядка на устойчивость к ошибкам в его структуру был добавлен генератор ошибок. При этом счетчик ошибок соединен с вычислительным каналом, в котором не происходят ошибки. Это необходимо для того, чтобы знать, какие числа должны были получиться (в физической модели он не нужен). Эти данные будут выводиться в первом столбце таблицы (Sender), формируемой счетчиком. Счетчик также соединен с выходом фильтра для отображения полученных результатов, которыми будет заполнен второй столбец (Receiver) выходной таблицы.

Генератор ошибок при проведении тестовых вычислений размещался: 1) в одном из каналов после вычислительного блока; 2) в одном из каналов в вычислительном блоке. Также варьировались значения разрядности ошибочного значения и вероятности появления ошибки от 0 (ошибок нет) до 1 (пакет ошибок, т.е. искажены все разряды передаваемой комбинации). При этом в таблице, выдаваемой счетчиком, значения данных в столбцах при всех протестированных вариантах совпадали (рис. 5).

Sender	Receiver
0.3	0.3
0.8	0.8
1.1	1.1
1.4	1.4
1.9	1.9
2.2	2.2
2.5	2.5
3	3
3.3	3.3
3.6	3.6
4.1	4.1
Symbol Transferred	11
Error Number	0
Error Rate	0
Reset error count	Close

Рис. 5. Таблица, выдаваемая счетчиком ошибок

За счет параллельной обработки информации пакет ошибок воздействует лишь на один канал системы, искажается только один вычет числа, который, пройдя через блоки обнаружения отказов и выбора правильного числа, исправляется. Даже если сбой происходит в вычислительном канале, в котором выполняются арифметические операции (сложения и умножения), ошибки обнаруживаются и исправляются, данные принимаются верно.

Таким образом, в системе остаточных классов с двумя контрольными основаниями обнаруживается и устраняется любой отказ, если он произошел в одном из каналов. Нерекursивный ЦФ становится устойчивым к отказам.

#### Литература

1. Абасов Н.Д., Абасова А.М., Финько О.А. Метод преобразования и хранения данных, на основе модулярной арифметики, обеспечивающий целостность информации свойствами самовосстановления и контроля // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2013. № 20. С. 88–92.
2. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Сов. радио, 1968. 440 с.
3. Галанина Н.А. Непозиционные алгоритмы и устройства цифровой фильтрации и спектрального анализа. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. 208 с.
4. Галанина Н.А., Иванова Н.Н. Синтез отказоустойчивых устройств обработки марковских сигналов на основе корректирующего кода системы остаточных классов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. С. 194–195.
5. Галанина Н.А., Иванова Н.Н. Устройства дешифрации результата непозиционной обработки сигналов в позиционный код // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 150–151.
6. Галанина Н.А., Иванова Н.Н., Песошин В.А. Способы реализации устройств кодирования цифровых сигналов вычетами в системе остаточных классов // Кибернетика и программирование. 2013. № 1. С. 21–36.
7. Горденко Д.В. Принципы построения модулярных отказоустойчивых специализированных процессоров для обработки информации // Исследования в области естественных наук. 2013. № 8 (20). С. 1

8. Самойленко Д.В., Финько О.А. Помехоустойчивая криптосистема, основанная на китайской теореме об остатках, для  $N$  каналов с шумом и имитирующим злоумышленником // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 11(112). С. 128–139.

---

**ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА** – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galaninacheb@mail.ru).

**ПЕСОШИН ВАЛЕРИЙ АНДРЕЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (pesoshin-kai@mail.ru).

**ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (naadeezdaa@rambler.ru).

---

**N. GALANINA, V. PESOSHIN, N. IVANOVA**  
**THE USE OF MODULAR ARITHMETIC IN THE SYNTHESIS**  
**OF NON-RECURSIVE DIGITAL FILTERS,**  
**RESISTANT TO SINGLE ERROR**

**Key words:** modular arithmetic, in the numbering system of residual classes, non-recursive digital filter, fault tolerance.

*Using modular arithmetic allows to synthesize fault tolerance system. Authors of this article developed the scheme of non-recursive digital filter based on modular arithmetic and built its simulation model in Simulink / MatLab environment. With the help of simulation model, the filter tested its resistance to a single error. Test results showed that the failure which has occurred in one of the channels is detected and corrected. As a result, from the filter output correct data can be read. The block of the filter circuit and its simulation model can be used for circuitry implementation of similar devices.*

References

1. Abasov N.D., Abasova A.M., Fin'ko O.A. *Metod preobrazovaniya i khraneniya dannykh, na osnove modulyarnoi arifmetiki, obespechivayushchii tselostnost' informatsii svoistvami samovosstanovleniya i kontrolya* [Method for conversion and storage based on the modular arithmetic-tiki, ensures the integrity of the property information self-recovery formation and control]. *Informatsionnoe protivodeistvie ugrozam terrorizma*, 2013, no. 20, pp. 88–92.
2. Akushskii I.Ya., Yuditskii D.I. *Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh* [Machine arithmetic in residual classes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1968, 440 p.
3. Galanina N.A. *Nepozitsionnye algoritmy i ustroystva tsifrovoi fil'tratsii i spektral'nogo analiza* [Non-positional algorithms and devices of digital filtering and spectral analysis]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2009, 208 p.
4. Galanina N.A., Ivanova N.N. *Sintez otkazoustoichivyykh ustroystv obrabotki markovskikh signalov na osnove korrektruyushchego koda sistemy ostatochnykh klassov* [Synthesis of fault-tolerant processing devices Markov signals based on a correcting code system of residual classes]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of IX Rus. Sci. Conf. «Information technologies in electrical engineering and power»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2014, pp. 194–195.
5. Galanina N.A., Ivanova N.N. *Ustroystva deshifratsii rezul'tata nepozitsionnoi obrabotki signalov v pozitsionnyi kod* [The device decoding result of the non-positional signal processing in the position code]. *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XI Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of XI Rus. Sci. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»] Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2015, pp. 150–151.

6. Galanina N.A., Ivanova N.N., Pesoshin V.A. *Sposoby realizatsii ustroystv kodirovaniya tsifrovyykh signalov vychetami v sisteme ostatochnykh klassov* [How to implement device encoding digital signals of residues in the system of residual classes]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2013, no. 1, pp. 21–36.

7. Gordenko D.V. *Printsipy postroeniya modulyarnykh otkazoustoichivyykh spetsializirovannykh protsessorov dlya obrabotki informatsii* [Principles of modular specialized processor fault-tolerant data processing]. *Issledovaniya v oblasti estestvennykh nauk*, 2013, no. 8 (20), p. 1

8. Samoilenko D.V., Fin'ko O.A. *Pomekhoustoichivaya kriptosistema, osnovannaya na kitaiskoi teoreme ob ostatkakh, dlya N kanalov s shumom i imitiruyushchim zloumyshlennikom* [Noise-immunity cryptosystem based on the chinese remainder theorem, for n noise channels and simulates a cracker]. *Izvestiya YuFU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, no. 11(112), pp. 128–139.

---

**GALANINA NATALIA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**PESOSHIN VALERY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Computer Systems Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan.**

**IVANOVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** *Галанина Н.А., Песошин В.А., Иванова Н.Н.* Использование модулярной арифметики при синтезе нерекурсивных цифровых фильтров, устойчивых к одиночным ошибкам // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 180–187.

УДК 62-50

ББК 30в6

В.В. ЗВЕЗДИН, В.А. ПЕСОШИН, Р.Р. САУБАНОВ, Р.Р. РАХИМОВ

## УПРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЗАКАЛКИ ИНСТРУМЕНТА

**Ключевые слова:** лазерная закалка, энергетические потери, показатели качества, зона термического воздействия, точность позиционирования.

*Изложены особенности применения имитационного моделирования процесса формирования закаленного слоя металлов с неизвестной кривизной по известным физическим законам и экспериментальным данным. Показано, что для управления параметрами оптической системы лазерного технологического комплекса необходимо проведение предварительного моделирования поверхности червячной фрезы. Разработанная математическая модель режущих кромок инструмента позволяет оптимизировать условия формообразования его рабочих поверхностей и управлять параметрами лазерного технологического комплекса на разных стадиях технологического процесса.*

Автоматизация процесса лазерной закалки деталей в машиностроении позволяет повысить эффективность технологического процесса (ТП). Наиболее целесообразной является разработка системы автоматического управления (САУ) лазерными технологическими комплексами (ЛТК) со стабилизацией и оптимизацией его энергетических, временных и пространственных характеристик для получения требуемых выходных параметров ТП. Применение моделей позволяет использовать процедуры проектирования, которые основаны на использовании банков адекватных моделей всевозможных технических звеньев комплекса. В информационное обеспечение САУ включаются модели отдельных динамических модулей, а также модели воздействующих на них сигналов и шумов, требующие наличия адекватных математических моделей ТП. Однако из-за сложности физических процессов, протекающих при лазерной обработке материалов, они не дают полной картины происходящих явлений в зоне воздействия лазерного излучения (ЛИ) на металл [2, 3].

**Экспериментальные исследования.** Результаты экспериментальных исследований показали, что глубина зона термического воздействия (ЗТВ) при различных параметрах ЛТК не превышает 0,5 мм. На рис. 1, 2 видны ярко выраженные ЗТВ для различных сталей при определенном диаметре фокусного пятна, что говорит о скачкообразном изменении условий формирования микроструктуры, т.е. по всему объему зон происходят микроструктурные изменения, связанные с переходными процессами.

Экспериментальные исследования подтверждают, что получение зависимостей показателей качества ТП от параметров ЛТК носит трудоемкий и длительный характер. Поэтому имитационное моделирование по известным физическим законам и экспериментальным данным является актуальным.

Для управления параметрами оптической системы ЛТК необходимо моделирование поверхности червячной фрезы [5]. Построение поверхности выступов и впадин инструмента выполняется по схеме, являющейся универсальной для зуборезного инструмента. Применение разработанной математической модели режущих кромок инструмента позволяет оптимизировать ус-

ловия формообразования его рабочих поверхностей и управлять параметрами ЛТК на разных стадиях ТП в инструментальном производстве [1].

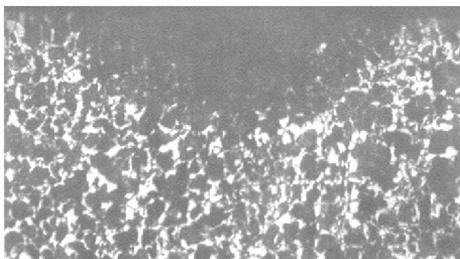


Рис. 1. Фотография микроструктуры легированной стали ШХ 15, обработанной в режиме закалки без оплавления ( $\times 200$ )

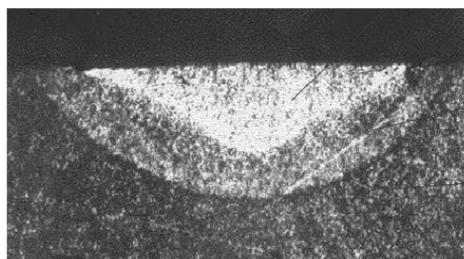


Рис. 2. Фотография микроструктуры стали У8, обработанной в режиме закалки без оплавления ( $\times 200$ ); глубина 0,5 мм

На рис. 3 показан фрагмент зуба червячной фрезы с лазерной закалкой на стали P18K5Ф2, а на рис. 4 представлена ее микроструктура.

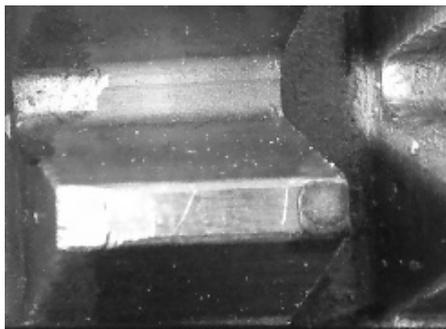


Рис. 3. Фотография зуба фрезы из инструментальной стали P18K5Ф2, обработанного в режиме закалки без оплавления

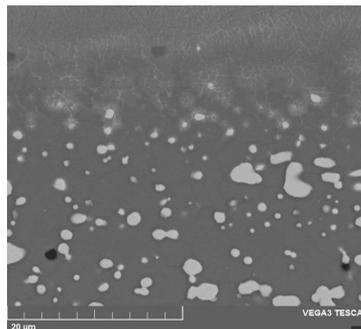


Рис. 4. Фотография микроструктуры зуба фрезы из инструментальной стали P18K5Ф2, обработанного в режиме закалки без оплавления ( $\times 200$ )

На рис. 3 видно равномерное распределение шероховатости в пятне ЗТВ, что определяет ее качество. Микроструктура детали (рис. 4) представляет собой скрытоигольчатый мартенсит и карбиды. Карбидная неоднородность в структуре фрезы соответствует 1А баллу по шкале 1, что удовлетворяет ГОСТ 19265-73.

При микроструктурном исследовании на поверхности рабочей кромки зубьев фрезы выявлено наличие поверхностного упрочнённого слоя с нетравящейся структурой и карбидами. Высокая твердость упрочнённого слоя (до  $HV_{0,1}$  970) оказывает положительное влияние на износостойкость фрезы, которое проявляется при высокой температуре кромки инструмента. Большое влияние на износостойкость инструментальной стали оказывают содержание карбидов, количество остаточного аустенита. При высокой температуре износостойкими являются только стали, устойчивые против отпуска. Уменьшение твердости вследствие распада мартенсита сильно снижает износостойкость [4, 5].

При получении экспериментальных зависимостей используется статистическая обработка данных показателей качества ТП. При измерении микротвердости ( $H_{\mu}$ ) на фиксированной глубине с заданными технологическими параметрами были получены их различные значения. Эти параметры изменяются при повторных экспериментах заранее непредсказуемым образом. Однако можно определить вероятность  $p_m$  попадания измеренного значения микротвердости в заданную область допустимых значений:

$$p_m = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_m}{N}, \quad (1)$$

где  $N_m$  – количество наблюдений случайной величины в заданной области допустимых значений;  $N$  – общее число наблюдений.

Предполагаем, что закон распределения исследуемой совокупности данных является нормальным. Отсюда определяем среднее значение микротвердости и среднеквадратичное отклонение на каждой глубине. После воздействия лазерным излучением (ЛИ) на металл инструмента во всех случаях повышается твердость обработанной зоны (см. рис 3): от 900 HV<sub>0,1</sub> при твердости матрицы 805 HV<sub>0,1</sub> (образец сталь P18K5Ф2 при энергии импульса ЛИ  $W = 15$  Дж, длительность импульса 10 мс).

Вследствие нестабильности параметров ЛИ и оптико-физических свойств поверхности снижаются показатели качества закалки, которые зависят от стабильности и оптимальных значений параметров ЛТК. Для их стабилизации разработана САУ ЛТК с отрицательной обратной связью по параметрам процесса закалки, измеряемым в реальном времени. В качестве сигналов обратной связи закалки металлов выступают плотность энергии ЛИ, температура и точность позиционирования фокуса относительно поверхности детали. Структура САУ ЛТК представляет собой систему, которая характеризуется большим числом обратных связей и является нелинейной (рис. 5) [1].

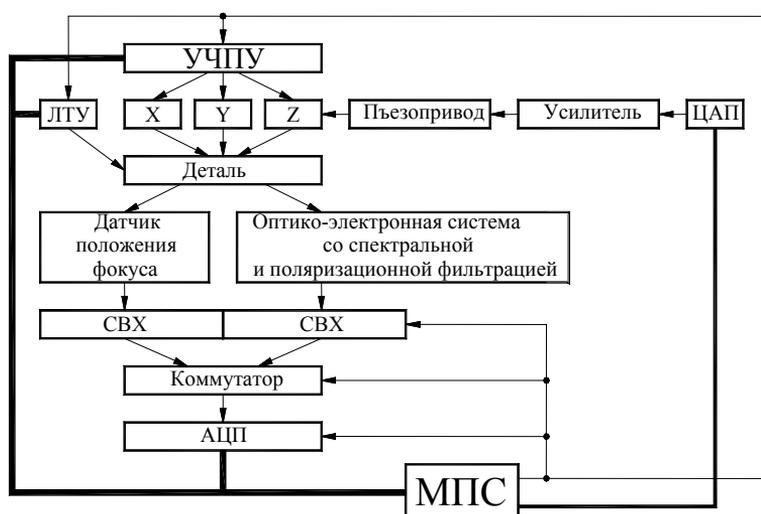


Рис. 5. Блок-схема САУ ЛТК

При обосновании выбора математической модели звеньев были приняты определенные допущения, позволяющие линеаризовать их передаточные функции. Расчеты и исследования свойств САУ производились для линеаризованной системы.

В соответствии с принятыми допущениями определены передаточные функции подсистем. Динамические процессы в элементах, входящих в нее, описываются дифференциальными уравнениями, на основании которых рассчитаны передаточные функции и с помощью пакета прикладных программ получены переходные и частотные характеристики, определяющие качество САУ ЛТК.

Анализ исследований в области разработки САУ показывает эффективность многоконтурных релейных систем с обратными связями по информативным параметрам, измеряемым в реальном времени для управления ЛТК.

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$Wr = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2T_2 \zeta p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

где  $K = \prod K_i = 0,0005$ .

Соответствующие логарифмические амплитудная (ЛАЧХ) и фазовая частотные (ЛФЧХ) характеристики приведены на рис. 6.

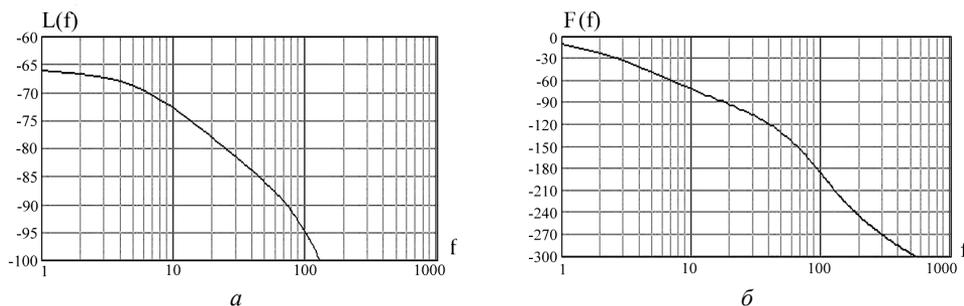


Рис. 6. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б)

Из графиков видно, что замкнутая система также будет устойчива, запас устойчивости по амплитуде составляет  $\sim 80$  дБ. Анализ остальных контуров показывает, что все контуры САУ являются минимально-фазовыми, устойчивыми, обладают большим запасом устойчивости по амплитуде (не менее 20 дБ).

**Выводы.** Экспериментальные исследования по воздействию ЛИ на металлы показывают возможность оптимизации энергетических параметров ЛТК для закалки с получением требуемых показателей качества, что приводит к снижению энергозатрат. Разработанная САУ ЛТК удовлетворяет предъявляемым требованиям и обеспечивает стабильные показатели качества закалки. В процессе нагрева материала постоянным во времени потоком ЛИ, превышающим некоторое критическое значение, температура поверхности колеблется. Соответствующим подбором параметров временной структуры

можно добиться практически полного устранения влияния плазменного факела на снижение проплавливающей способности ЛИ. Локальность закалки обеспечивает рациональное проектирование закаленных деталей и минимальные остаточные деформации.

#### Литература

1. Звездин В.В., Григорьянц А.Г., Исрафилов И.Х. Метод управления лазерным технологическим комплексом сварки металлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 6(6). С. 190–196.
2. Звездин В.В., Хамадеев А.В., Фардиев Р.К., Исрафилов Д.И., Баймаков Д.А. Влияние модового состава лазерного излучения на зону термического воздействия в металлах // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2007. № 2. С. 84–85.
3. Портнов С.М., Саубанов Р.Р., Кисаев Р.А., Кузнецов И.Н., Исрафилов И.Х., Звездин В.В., Нугманова А.И. Система управления процессом термообработки концентрированными потоками энергии поверхности деталей // Глобальный научный потенциал. 2011. № 8. С. 95–100.
4. Юнусов Ф.С., Хисамутдинов Р.М. Повышение точности производящих поверхностей формообразующих инструментов. Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2008. 212 с.
5. Юнусов Ф.С., Хисамутдинов Р.М., Ягафаров М.М. Расчет аппроксимирующих параметров образующей профиля режущего зуба фрезы // Вестник машиностроения. 2004. № 8. С. 44–48.

---

**ЗВЕЗДИН ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, Набережные Челны (irmaris@yandex.ru).

**ПЕСОШИН ВАЛЕРИЙ АНДРЕЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (pesoshin-kai@mail.ru).

**САУБАНОВ РУЗИЛЬ РАШИТОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, Набережные Челны (saubanov@mail.ru).

**РАХИМОВ РАДИК РАФИСОВИЧ** – старший преподаватель, аспирант кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, Набережные Челны (saubanov@mail.ru).

---

#### V. ZVEZDIN, V. PESOSHIN, R. SAUBANOV, R. RAKHIMOV CONTROL OF LASER TECHNOLOGICAL COMPLEX OF INSTRUMENT HARDENING

**Key words:** laser annealing, the energy losses, quality indicators, zone of thermal influence, positioning accuracy.

*The application features of imitating modeling of the process of the metals annealed layer forming with unknown curvature under the known physical laws and experimental data are stated. It is shown that the optical system for the control parameters of the laser technological complex simulation of the surface is necessary hob. The developed mathematical model of the cutting edges of the tool allows you to optimize the conditions of its working surfaces formation and to control the parameters of the laser technological complex at various stages of the technological process.*

## References

1. Zvezdin V.V., Grigor'yants A.G., Israfilov I.Kh. *Metod upravleniya lazernym tekhnologicheskim kompleksom svarki metallov* [Method of control of a laser technological complex of dissimilar metal welding]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering], 2012, № 6(6), pp. 190–196.
2. Zvezdin V.V., Khamadeev A.V., Fardiev R.K., Israfilov D.I., Bashmakov D.A. *Vliyanie modovogo sostava lazernogo izlucheniya na zonu termicheskogo vozdeystviya v metallakh* [On influence of laser radiation mode structure upon the zone of thermal action in metals]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2007, no. 2, pp. 84–85.
3. Portnov S.M., Saubanov R.R., Kisaev R.A., Kuznetsov I.N., Israfilov I.Kh., Zvezdin V.V., Nugumanova A.I. *Sistema upravlenie protsessom termoobrabotki kontsentrirovannymi potokami energii poverkhnosti detalei* [Process Control System for Heat Treatment of Concentrated Energy Flows of Surface Parts]. *Global'nyi nauchnyi potentsial* [The global scientific potential], 2011, no. 8, pp. 95–100.
4. Yunusov F.S., Khisamutdinov R.M. *Povyshenie tochnosti proizvodnyashchikh poverkhnostei formoobrazuyushchikh instrumentov* [Improving the accuracy of producing surfaces of forming tools]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2008, 212 p.
5. Yunusov F.S., Khisamutdinov R.M., Yagafarov M.M. *Raschet approksimiruyushchikh parametrov obrazuyushchei profilya rezhushchego zuba frezy* [Approximating the calculation of the parameters forming the profile of the cutting tooth cutter]. *Vestnik mashinostroeniya* [Journal of mechanical engineering], 2004, no. 8, pp. 44–48.

---

**ZVEZDIN VALERY – Doctor of Technical Sciences, Professor of High-Energy Processes and Units Department, Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University, Russia, Naberezhnye Chelny.**

**PESOSHIN VALERY – Doctor of Technical Sciences, Professor of Computer Systems Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan.**

**SAUBANOV RUZIL – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of High-Energy Processes and Units Department, Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University, Russia, Naberezhnye Chelny.**

**RAKHIMOV RADIK – Senior Teacher, Post-Graduate Student of High-Energy Processes and Units Department, Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of the Kazan (Volga) Federal University, Russia, Naberezhnye Chelny.**

---

**Ссылка на статью:** Звездин В.В., Песошин В.А., Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р. Управление лазерным технологическим комплексом закалки инструмента // Вестник Чувашиского университета. – 2016. – № 3. – С. 188–193.

УДК 004.414.23:004.056

ББК 3972.53в631.0

С.О. ИВАНОВ, Д.В. ИЛЬИН, Л.А. ИЛЬИНА, О.В. НАЗАРОВА

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ОБЩИМ КРИТЕРИЯМ МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА ISO/IEC 15408

*Ключевые слова:* информационная безопасность, общие критерии международного стандарта ISO/IEC 15408, имитационное моделирование, средства защиты информации.

*Рассматриваются особенности оценки средств защиты информации с использованием международного стандарта ISO/IEC 15408 Common Criteria for Information Technology Security Evaluation (Общие критерии). Предлагается способ преодоления недостатков общих критериев международного стандарта с помощью имитационного моделирования. На основании общих принципов защиты информации строится базовая конфигурация модели. Среди функциональных требований «общих критериев» отобраны требования, напрямую влияющие на эффективность защиты информации. Представлена процедура оценки средств защиты информации.*

С выходом Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 г. № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных»<sup>1</sup> оценка средств защиты информации (СЗИ) сводится к их сертификации на соответствие определенным стандартам и требованиям [1, 6].

В настоящее время среди множества регламентов и стандартов по информационной безопасности центральное место занимает ISO/IEC 15408 Common Criteria for Information Technology Security Evaluation, известный как «Общие критерии» (ОК)<sup>2</sup>. Этот международный стандарт разработан во второй половине 1990-х гг. правительственными организациями США, Канады, Великобритании, Франции, Германии и Нидерландов и дает критерии для оценки и сравнения средств защиты информации. Благодаря своей общности и гибкости ОК является ведущим стандартом по информационной безопасности [7].

Однако ему присущи недостатки, затрудняющие непосредственное использование [13]:

- общие критерии не содержат определенных требований к конкретным системам защиты информации, а представляют собой набор определений и правил, в рамках которых можно описывать различные системы защиты [7];
- несмотря на большой объем ОК, интерпретация его требований определяется другими стандартами и руководствами, а пояснения публикуются отдельно в ряде специализированных журналов [7, 9];

<sup>1</sup> Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: постановление Правительства РФ от 01.11.2012 г. № 1119 [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информ.-прав. сист. URL: <http://base.garant.ru/70252506>.

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2:2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 1. Функциональные компоненты безопасности. М.: Стандартинформ, 2014.

– вместо конкретных методов оценка критериев перекладывается на мнение аудиторов;

– требования доверия безопасности, по сравнению с функциональными, представляются более проработанными, поскольку для них определены удобные на практике оценочные уровни доверия [8].

В самих ОК описываются направления устранения их недостатков: «повышение доверия к оценке может быть достигнуто: строгостью, т.е. применением более структурированного и формального подхода». Согласно [2] для реализации системного подхода к решению проблемы обеспечения информационной безопасности необходимо комплексное использование методов моделирования систем и процессов защиты информации. Среди возможных методов – имитационное моделирование является наиболее подходящим, так как позволяет учесть множество факторов, правил, рекомендаций, требований [5].

В данной статье предлагается имитационная модель СЗИ, соответствующая ОК, которая позволит оценить, насколько сочетание различных функциональных требований ОК повышает уровень защищенности. Эта модель отличается от известных тем, что она может применяться не только для сетей, менее требовательна к используемым ресурсам и соответствует методологии ОК.

**Применение имитационного моделирования в информационной безопасности.** О преимуществах применения имитационного моделирования в информационной безопасности говорится практически в каждой работе, ему посвященной. Дж. Саундерс отмечает, что в будущем имитационное моделирование может быть эффективно использовано в сфере информационной безопасности: для исследования и разработки новых мер противодействия, испытания способов нападений и защиты, оценки эффективности развернутых средств защиты, анализа вторжений и атак, обучения и тренировки [15].

К перечисленному выше другие авторы добавляют, что имитационное моделирование может помочь в анализе рисков инвестиций информационной безопасности, предсказании будущих уязвимостей, симуляции процесса распространения вредоносного кода, оценке конфигураций защиты компьютерных систем [12].

Отдельно стоит отметить возможность использования имитационных моделей в обучении, так как их применение является выгодным в качестве механизма активного обучения по сравнению с использованием лаборатории по безопасности [10].

Имитационные модели в информационной безопасности также могут использоваться для [2, 5, 11]:

- оценки уровня безопасности;
- оценки мер безопасности (и средств);
- предупреждения риска уязвимостей нулевого дня;
- обучения пенттестингу;
- исследования возможных атак на систему;

- изучения методов планирования информационной безопасности;
- генерирования данных для обучения поведенческому анализу.

Представление методологии ОК в виде наглядных формализованных моделей актуально для эффективного применения стандарта [9]. Так, в работе [14] предлагается анализ угроз, совместимый с ОК для сертификации моделей безопасности.

Имитационные модели часто используются при исследовании систем защиты. Во многих работах [7–9] для упорядочивания и сравнения используется классификация Дж. Саундерса [5]:

1. Packet wars – проведение атак в лабораторной сети (например, IWAR, MAADNET, DETERlab, RINSE, RCEL, Tele-Lab IT Security, S-vLab, AWARE, RADICL).

Основным недостатком этого класса моделей является высокая стоимость, выражающаяся в большой потребности в ресурсах, поэтому они могут использоваться только для исследования сетевой безопасности.

2. Sniffers+Network Design Tools – анализ и визуализация процессов распространения угроз в виртуальной сети (например, OPNET, NeSSi2).

Существенный недостаток этого класса – идеализация, не отражающая реально существующих процессов.

3. Canned Attack/Defend Scenarios – игровые сценарии с обратной связью (например, CyberProtect, CyberOps: NetWarrior).

Этот класс моделей органичен заданным набором сценариев.

4. Management Flight Simulators – событийно-управляемые имитационные модели потоков данных (например, EASEL, CyberCIEGE).

Эти модели сочетают недостатки второго и третьего классов.

5. Role-Playing – разыгрывание (симулирование) ролевых сценариев.

Эта модель не предусматривает использования формальных методов.

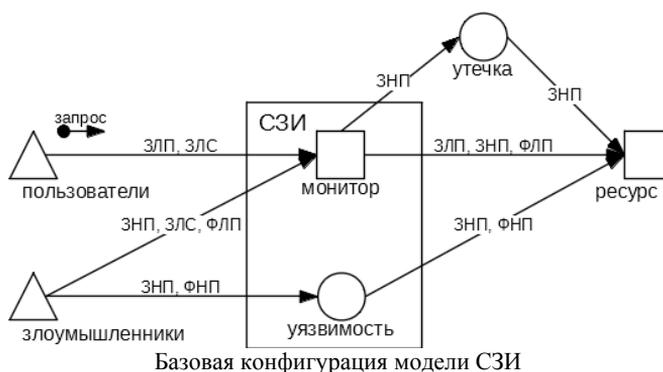
При этом не учитываются недостатки, ограничения, уязвимости самих средств защиты информации [3]. К тому же используемые модели часто отражают отдельные аспекты защиты [4], что верно в теории, но на практике реальные СЗИ осуществляют защиту не по отдельным критериям, а по проверенным направлениям, что видно из групп функциональных требований ОК.

**Базовая конфигурация модели СЗИ.** Для соответствия множеству различных сочетаний функциональных требований ОК конфигурация модели СЗИ должна быть гибкой и настраиваемой.

Смоделируем процесс доступа к ресурсу через СЗИ. Выделим базовую конфигурацию модели (рисунок), отражающую основные положения, лежащие в основе защиты информации (конфиденциальность, целостность, доступность, монитор безопасности, скрытые каналы), а также основные способы атак (утечки, уязвимости, отказы, повторное использование).

С точки зрения модели CIA (конфиденциальность, целостность, доступность) взаимодействие с ресурсом может проходить нормально или с угрозами по отдельным критериям информационной безопасности ресурса. Так, по критерию конфиденциальности запрос может быть легальным или нелегальным, по критерию целостности: обычным или фальсификацией, по критерию

доступности: простым или сложным. По сочетанию характеристик существует девять видов запросов к ресурсу. С точки зрения поведения обычного пользователя и злоумышленника не все виды запросов имеют смысл и могут использоваться. Выделим основные виды запросов к ресурсу для обычного пользователя и злоумышленника. Пользователь может сформировать запрос легальный простой (ЗЛП), запрос легальный сложный (ЗЛС); злоумышленник – запрос легальный сложный (ЗЛС), запрос нелегальный простой (ЗНП), фальсификацию легальную простую (ФЛП), фальсификацию нелегальную простую (ФНП). Подписи к связям на рисунке указывают, какие виды запросов по ним распространяются.



Основные параметры модели:

- максимальная загруженность – это пороговое значение, при превышении которого СЗИ перестает обрабатывать запросы;
- вероятность эксплуатации уязвимости определяется как частота использования;
- вероятность утечки информации определяется экспертом.

**Функциональные компоненты ОК.** Базовая конфигурация модели в зависимости от целей, предположений и политики безопасности, дополняется компонентами, описанными в ОК.

Всего существует 11 функциональных классов, 66 семейств, 135 компонентов, из них используются только те семейства компонентов ОК, которые оказывают влияние на конфигурацию базовой модели (таблица).

Для оценки эффективности защиты СЗИ с помощью модели используется следующая процедура:

- 1) конфигурирование модели на основании профиля (задания) безопасности СЗИ;
- 2) выбор тестового набора событий;
- 3) прогон модели на тестовом наборе;
- 4) подсчет количества несанкционированных запросов, фальсификации, пропущенных запросов;
- 5) вычисление оценки в абсолютной (суммарное количество инцидентов) или относительной (относительно общего количества запросов) форме.

## Влияние функциональных компонентов ОК на конфигурацию

Семейство компонентов ОК	Изменения
<i>Защита конфиденциальности</i>	
FIA_UAU Аутентификация пользователей	проверка легальный-нелегальный
FIA_UID Идентификация пользователей	разрешение легальных обращений
FIA_AFL Отказы аутентификации	блокирование нелегальных обращений
<i>Защита доступности</i>	
FRU_PRS Приоритет обслуживания	приоритеты
FRU_RSA Распределение ресурсов	квоты, резервы
<i>Защита целостности</i>	
FDP_DAU Аутентификация данных	проверка целостности ресурса
FDP_ROLL Откат	восстановление целостности
FDP_SDI Целостность хранимых данных	автоматическое восстановление
<i>Защита от атак</i>	
FAU Аудит безопасности (требования к сервису, протоколирование и аудит)	реакции на события
FDP_ACC Политика управления доступом	ограничение входящих потоков
FDP_ACF Функции управления доступом	
FDP_IFC Политика управления информационными потоками	ограничение исходящих потоков(связей)
FDP_IFF Функции управления информационными потоками	
FDP_RIP Защита остаточной информации	уменьшение утечек
FPT_RPL Обнаружение повторного использования	уменьшение фальсификации

**Выводы.** Построенная модель предназначена для изучения эффективности защиты информации от угроз, поэтому требования, связанные со структурой, администрированием, реализацией и условиями эксплуатации, не отражаются в ее конфигурации. Кроме требований, определяющих конфигурацию модели в профиле безопасности, необходимо соблюдение и других требований. С учетом выделенных в таблице функциональных требований может быть получено  $2^{13} = 8192$  конфигураций модели.

Модель может быть использована как для построения СЗИ с заданными характеристиками, так и для анализа существующего СЗИ благодаря гибкости ОК.

## Литература

1. Волков А. Оценка соответствия и актуальные угрозы [Электронные ресурсы] // Безопасность для понимающих и не очень: сайт. URL: [http://anvolkov.blogspot.ru/2013/03/blog-post\\_17.html](http://anvolkov.blogspot.ru/2013/03/blog-post_17.html).
2. Григорьев В.А. Имитационная модель системы защиты информации [Электронные ресурсы] // Программные продукты и системы. 2005. № 2. URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=530>.
3. Иванов С.О. Модель средства защиты информации // Современное состояние естественных и технических наук: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. (19 июня 2015 г.). М.: Спутник+, 2015. С. 96–100.
4. Иванов С.О. Оценка защищенности информации моделированием // Математические модели и их приложения: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. Вып. 17. С. 64–68.
5. Калинина Н.А. Моделирование атакующих воздействий и средств защиты корпоративной сети с помощью сетей Петри // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 2.
6. Почему оценка соответствия средств защиты информации и есть сертификация [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/201124>.
7. Просяников Р.Е., Савельев М.С. Станут ли общими «Общие критерии» [Электронный ресурс] // BYTEmag.ru. 2004. № 8(72). URL: <http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=9049>.

8. Профили защиты на основе «Общих критериев»: аналитический обзор / В.Б. Бетелин, В.А. Галащенко, М.Т. Кобзарь и др. URL: <http://citforum.ru/security/criteria>.
9. Суханов А.В. Суханов В.А. Оценка защищенности информационных систем по методологии общих критериев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. URL: <http://jurnal.org/articles/2008/inf32.html>.
10. Beckers K., Hatebur D., Heisel M. A Problem-based Threat Analysis in compliance with Common Criteria. Proc. of 2013 Eighth Int. Conf. on Availability, Reliability and Security (ARES), 2013. Available at: <https://www.uni-due.de/imperia/md/content/swe/papers/2013ares.pdf>.
11. Futoransky A., Miranda F., Orlicki J., Sarraute C. Simulating Cyber-Attacks for Fun and Profit. Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Simulation Tools and Techniques. SIMUTools 2009. Available at: <https://www.coresecurity.com/corelabs-research/publications/simulating-cyber-attacks-fun-and-profit>.
12. Husain R., Suleiman B. Modeling and Simulation of Worm Propagation and Attacks against Campus Network. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 2015, vol. 2, iss. 8. Available at: [https://www.ijeas.org/download\\_data/IJEAS0208017.pdf](https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0208017.pdf).
13. Jackson W. Under attack. GCN, 2007, Aug 10. Available at: <http://gcn.com/articles/2007/08/10/under-attack.aspx>.
14. Pastor V., Diaz G., Castro M. State-of-the-art simulation systems for information security education, training and awareness. Proc. of IEEE EDUCON 2010 Conf. Madrid, 2010, pp. 1907–1916. doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492435.
15. Saunders J.H. Simulation Approaches in Information Security Education. Proc. of 6<sup>th</sup> National Colloquium for Information System Security Education, Redmond, WA. 2002. URL: <http://cisse.info/CISSE%20J/2002/saun.pdf>.

---

**ИВАНОВ СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ** – старший преподаватель кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([v101-11@mail.ru](mailto:v101-11@mail.ru)).

**ИЛЬИН ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([destr@mail.ru](mailto:destr@mail.ru)).

**ИЛЬИНА ЛАРИСА АЛЕКСЕЕВНА** – доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([larisai2009@gmail.com](mailto:larisai2009@gmail.com)).

**НАЗАРОВА ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА** – старший преподаватель кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([nazarovaolga.v@mail.ru](mailto:nazarovaolga.v@mail.ru)).

---

S. IVANOV, D. ILIN, L. ILINA, O. NAZAROVA

**SIMULATION OF DATA PROTECTION TOOLS CORRESPONDING TO COMMON CRITERIA OF INTERNATIONAL STANDARD ISO / IEC 15408**

**Key words:** *information security, common criteria of international standard ISO / IEC 15408, simulation, data protection tools.*

*The article considers the features of evaluation of data protection tool according to the international standard ISO / IEC 15408 Common Criteria for Information Technology Security Evaluation (Common Criteria). The method of eliminating the disadvantages of common criteria through simulation is proposed. Based on the principles of information security the basic configuration of the model is built. Among the functional requirements of common criteria the requirements that directly affect the efficiency of information security are selected. The procedure of data protection evaluation is given.*

References

2. Volkov A. *Otsenka sootvetstviya i aktual'nye ugrozy* [Estimation of conformity and actual threat]. Available at: [http://anvolkov.blogspot.ru/2013/03/blog-post\\_17.html](http://anvolkov.blogspot.ru/2013/03/blog-post_17.html).
3. Grigor'ev V.A. *Imitatsionnaya model' sistemy zashchity informatsii* [Simulation Model of information security systems]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software and Systems]. 2005, no. 2. Available at: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=530>.

4. Ivanov S.O. *Model' sredstva zashchity informatsii* [Model of data protection tool]. *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (19 iyunya 2015 g.)* [Proc. of XIX Int. Sci. Conf. «The current state of the natural sciences and engineering»]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2015, pp. 96–100.

5. Ivanov S.O. *Otsenka zashchishchennosti informatsii modelirovaniem* [Assessment of information security by modeling]. *Matematicheskie modeli i ikh prilozheniya: sb. nauch. tr.* [Mathematical models and their applications: collection of scientific papers]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2015, iss. 17, pp. 64–68.

6. Kalinina N.A. *Modelirovanie atakuyushchikh vozdeystvii i sredstv zashchity korporativnoi seti s pomoshch'yu setei Petri* [Modeling attacking impacts and means of protection of corporate network using Petri nets]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician Reshetnev], 2009, no. 2.

7. *Pochemu otsenka sootvetstviya sredstv zashchity informatsii i est' sertifikatsiya* [Why conformity assessment of information protection means is the certification]. Available at: <http://habrahabr.ru/post/201124>.

8. Prosyankov R.E., Savel'ev M.S. *Stanut li obshchimi «Obshchie kriterii»?* [Will the common «Common Criteria»?]. *BYTEMag.ru*, 2004, no. 8(72). Available at: <http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=9049>.

9. Betelin V.B., Galatenko V.A., Kobzar' M.T. et al. *Profili zashchity na osnove «Obshchikh kriteriev»* [Profiles of protection based on the «Common Criteria»]. Available at: <http://citforum.ru/security/criteria>.

10. Sukhanov A.V. Sukhanov V.A. *Otsenka zashchishchennosti informatsionnykh sistem po metodologii obshchikh kriteriev* [Assessment of information systems security according to common criteria methodology]. *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov* [Scientific publications Journal of post-graduate and doctoral students], 2008. Available at: <http://jurnal.org/articles/2008/inf32.html>.

11. Beckers K., Hatebur D., Heisel M. A Problem-based Threat Analysis in compliance with Common Criteria. Proc. of 2013 Eighth Int. Conf. on Availability, Reliability and Security (ARES), 2013. Available at: <https://www.uni-due.de/imperia/md/content/swe/papers/2013ares.pdf>.

12. Futoransky A., Miranda F., Orlicki J., Sarraute C. Simulating Cyber-Attacks for Fun and Profit. Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Simulation Tools and Techniques. SIMUTools 2009. Available at: <https://www.coresecurity.com/corelabs-research/publications/simulating-cyber-attacks-fun-and-profit>.

13. Husain R., Suleiman B. Modeling and Simulation of Worm Propagation and Attacks against Campus Network. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 2015, vol. 2, iss. 8. Available at: [https://www.ijeas.org/download\\_data/IJEAS0208017.pdf](https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0208017.pdf).

14. Jackson W. Under attack. GCN, 2007, Aug 10. Available at: <http://gcn.com/articles/2007/08/10/under-attack.aspx>.

15. Pastor V., Diaz G., Castro M. State-of-the-art simulation systems for information security education, training and awareness. Proc. of IEEE EDUCON 2010 Conf. Madrid, 2010, pp. 1907–1916. doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492435.

16. Saunders J.H. Simulation Approaches in Information Security Education. Proc. of 6<sup>th</sup> National Colloquium for Information System Security Education, Redmond, WA. 2002. URL: <http://cisse.info/CISSE%20J/2002/saun.pdf>.

---

**IVANOV SERGEY – Senior Teacher of Math and Hardware Information Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**ILYIN DMITRY – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Math and Hardware Information Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**ILINA LARISA – Associate Professor of Math and Hardware Information Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

**NAZAROVA OLGA – Senior Teacher of Math and Hardware Information Systems Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.**

---

**Ссылка на статью:** Иванов С.О., Ильин Д.В., Ильина Л.А., Назарова О.В. Имитационное моделирование средств защиты информации, соответствующих общим критериям Международного стандарта ISO/IEC 15408 // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 194–200.

УДК 004.932

ББК 32.81

А.В. ОБУХОВ, С.А. ЛЯШЕВА, М.П. ШЛЕЙМОВИЧ

## МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НОМЕРОВ

**Ключевые слова:** автоматическое распознавание автомобильных номеров, локализация, нормализация, сегментация, распознавание символов, синтаксический анализ.

*Представлены результаты исследования методов автоматического распознавания автомобильных номеров. Описаны процедуры локализации области автомобильного номера на изображении, нормализации изображения номера, сегментации изображения номера, распознавания символов номера и синтаксического анализа элементов номера. Показано, что эффективный подход может быть основан на применении методов Виолы – Джонса, Хафа, анализа гистограмм яркостей и машины опорных векторов. Описанный подход позволяет получить достаточно высокую точность распознавания при различных поворотах автомобильного номера относительно камеры.*

В настоящее время системы автоматического распознавания автомобильных номеров востребованы в самых различных областях. Например, они применяются в работе автотранспортных предприятий, станций техобслуживания, автомобильных парковок и др. Подобные системы позволяют контролировать наличие автомобилей в зоне обслуживания, определять время обслуживания автомобилей клиентов, количество свободных мест на парковке, фиксировать время пребывания автомобиля в конкретной зоне, организовывать автоматический въезд и выезд автомобилей и т.д. Кроме того, возможность автоматического распознавания номера автомобиля является важным аспектом контроля и обеспечения безопасности дорожного движения ввиду постоянно увеличивающегося на дорогах количества транспортных средств.

Под системами автоматического распознавания автомобильных номеров подразумеваются программный или аппаратно-программный комплекс, который реализует алгоритмы автоматического распознавания номерных знаков для регистрации событий, связанных с перемещением автомобилей, т.е. для автоматизации ввода данных и их последующей обработки [5].

В основе автоматического распознавания автомобильных номеров лежат следующие процедуры [7]:

- 1) локализация;
- 2) нормализация;
- 3) сегментация;
- 4) распознавание;
- 5) синтаксический анализ.

Первая процедура предназначена для обнаружения и локализации на изображении области с регистрационным номером автомобиля. Далее найденная область вырезается из исходного изображения и рассматривается отдельно. Нормализация заключается в приведении размеров и ориентации полученного на предыдущем шаге изображения с номером к требуемому виду. Здесь выполняются геометрические преобразования, шумоподавление, изменение яркости и

контраста. Процедура сегментации обеспечивает разделение изображения на знакоместа, т.е. выделение областей отдельных символов. Процедура распознавания предназначена для формирования строки символов автомобильного номера. Последняя процедура (процедура синтаксического анализа) выполняется для определения элементов строки, содержащей символы номера. Данные элементы могут различаться согласно стандартам стран регистрации автотранспортных средств. Например, в Российской Федерации используется стандарт, определяемый ГОСТ Р 50577-93 (с изменениями, внесенными приказами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии)<sup>1</sup>.

Для локализации области номера на изображении применяются различные алгоритмы. В большинстве своем они базируются на бинаризации, выделении контуров, морфологической обработке изображений. При этом предполагается, что исходное цветное изображение преобразуется в полутоновую форму. Бинаризация изображений заключается в разделении всех пикселей полутонового изображения по яркости на два класса – объект и фон. В системах автоматического распознавания номеров могут применяться как методы глобальной, так и локальной бинаризации изображений. Однако адаптивные подходы являются более предпочтительными ввиду возможности компенсировать влияние помех на различные участки изображения, например, распределение теней из-за неоднородности освещения. Вместе с бинаризацией может также применяться выделение контуров [1]. Для устранения мелких деталей и разрывов часто применяются морфологические методы обработки изображений. В результате указанных процедур формируются связанные последовательности точек бинарного изображения – контуры. На заключительном этапе процедуры локализации определяется, какой из полученных контуров является границей области автомобильного номера.

Таким образом, можно предложить следующий алгоритм локализации области автомобильного номера на изображении:

- 1) преобразовать исходное цветное изображение, содержащее автомобильный номер, в полутоновый вид;
- 2) выполнить обработку изображения градиентными операторами, например, Собела или Превитт, результатом которой является изображение, значение каждого пикселя которого равно модулю градиента в соответствующей точке исходного изображения;
- 3) выполнить адаптивную бинаризацию изображения, полученного на предыдущем шаге;
- 4) выполнить операцию морфологического закрытия с прямоугольником в качестве структурирующего элемента;
- 5) определить контуры на изображении;
- 6) определить области, ограниченные контурами;
- 7) выбрать область, параметры которой соответствуют автомобильному номеру.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50577-93. Знаки государственные регистрационные транспортных средств. Типы и основные размеры. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2002.

Альтернативный подход для локализации области автомобильного номера на изображении базируется на методе Виолы – Джонса, разработанном и представленном в 2001 г. П. Виолой и М. Джонсом [8]. Метод Виолы – Джонса является одним из самых известных методов поиска объектов на изображении в реальном времени. Данный подход позволяет находить область номера в сложных и нетипичных условиях. Метод Виолы – Джонса основан на применении набора признаков Хаара. Признак Хаара состоит из смежных прямоугольных областей, которые позиционируются на изображении, далее происходит суммирование интенсивности пикселей в областях, затем между суммами вычисляется разность. На этапе обнаружения заданной области в методе Виолы – Джонса используется окно определенного размера, которое перемещается по изображению. Признак Хаара рассчитывается для каждой области изображения, над которой проходит окно. Наличие или отсутствие предмета в окне определяется разницей между значением признака и обучаемым порогом. Высокую точность обнаружения заданных объектов на изображении обеспечивает каскадный классификатор.

Подходы, основанные на анализе контуров, позволяют находить номер различного размера и под различным наклоном. Однако у них есть несколько недостатков:

1) на изображении автомобиля может быть много прямоугольных объектов, похожих своими очертаниями на автомобильный номер;

2) относительно высокая трудоемкость вычислений – даже на изображении небольшого размера время обнаружения может достигать нескольких секунд;

3) они основаны на анализе границ номера, что не всегда возможно в реальных условиях. Например, на изображениях запыленных автомобилей могут отсутствовать четко выраженные границы.

Более эффективным для локализации номера представляется подход на основе метода Виолы – Джонса. Соответствующая процедура фактически анализирует искомую область на предмет наличия в ней характерных для номера отношений, точек или градиентов, выявленных на этапе обучения по положительным и отрицательным примерам. При этом, используя некоторые известные соотношения, можно еще больше повысить эффективность поиска. Например, начальное значение сканирующего окна можно задать исходя из размеров автомобильного номера 520×115 мм согласно ГОСТ Р 50577-93. Недостатком данного подхода является относительно невысокая степень инвариантности к аффинным и проекционным искажениям объектов на изображениях.

После локализации области изображения с автомобильным номером необходимо сформировать изображение, содержащее только номер, и выполнить его нормализацию. В простейшем случае нормализация заключается в повороте соответствующей прямоугольной области таким образом, чтобы его ориентация совпала с ориентацией осей системы координат изображения. Но, как правило, часто приходится выполнять обрезание рамки номера по горизонтали и по вертикали. Кроме того, можно выполнить фильтрацию с целью шумоподавления или повышения контраста.

Как правило, выделенная область с номером имеет сравнительно небольшой размер, содержит границы номера, горизонтальные полосы очертания бампера и радиаторной решетки. Поэтому для определения угла поворота рамки номера можно применить алгоритм на основе преобразования Хафа для линий [2]. Алгоритм заключается в следующем:

- 1) определяются линии, длина которых больше половины ширины области номера;
- 2) формируется прямая из средних значений всех точек полученных линий;
- 3) вычисляется угол между полученной прямой и линией горизонта.

Следующий этап нормализации заключается в поиске границ рамки номерной платы автомобильного номера. Для этого используются гистограммы интенсивности по горизонтали и вертикали соответственно. Для построения гистограмм необходимо просуммировать значения всех пикселей бинарного изображения по строкам или столбцам, затем выделить максимум и отсеять все значения меньше 20% от максимума.

Следующая процедура, как было сказано выше, состоит в выделении знаков на изображении (сегментация). Самым простым подходом для сегментации символов является использование заранее заданного шаблона [4]. Шаблон можно представить в виде изображения темных прямоугольников, соответствующих символам, на светлом фоне, как показано на рис. 1. Основным требованием для эффективной сегментации здесь является правильное определение рамки номера на этапе нормализации, а любое отклонение от реальных габаритов будет способствовать ухудшению сегментации символов номера.

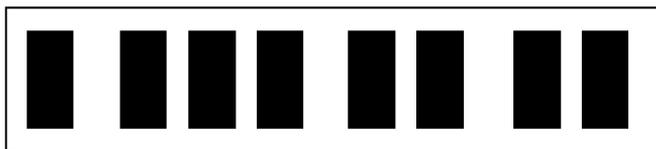


Рис. 1. Шаблон расположения символов на номерной плате автомобиля

Следующий подход основан на построении горизонтальной проекции средней интенсивности [2]. Суть этого подхода сводится к тому, что вычисляется средняя интенсивность в каждом столбце изображения номера и определяются столбцы, в которых средняя интенсивность значительно отличается от порогового значения (рис. 2).



Рис. 2. Гистограмма распределения яркости пикселей номерной пластины

Еще один способ базируется на проведении контурного анализа [6]. После получения контуров, которые представляют собой связанные последова-

тельности точек бинарного изображения, определяются те из них, которые являются границами областей символов номера автомобиля. Это достигается путем фильтрации контуров, удовлетворяющих определенным требованиям к соотношению геометрических характеристик [2]. Пример работы соответствующего алгоритма показан на рис. 3.



Рис. 3. Результат сегментации символов автомобильного номера

Метод, основанный на использовании шаблонов, очень прост в реализации и не требует сложных операций, связанных с анализом изображения для поиска символов, но для его работы необходимо точное выделение границ рамки номера, что в реальных условиях не всегда выполнимо. Гистограммный анализ изображения имеет высокую чувствительность к шумам и дефектам на изображении, особенно в промежутках между символами. В результате этого гистограммы могут не дать выявить ярко выраженные максимумы в промежутках между символами. В данном методе могут возникнуть также затруднения при выделении символов региона, так как под ними находится символы принадлежности к стране. Сегментация на основе контурного анализа является менее требовательной к условиям реализации, поскольку здесь используются обобщенные геометрические признаки.

Для распознавания символов необходимо привести каждый из них к заранее определенному стандартному виду. Как правило, это сводится к масштабированию и проведению бинаризации символов для достижения наилучшего контрастирования символов и фона. После предварительной обработки к соответствующим выделенным знакам можно применить различные методы распознавания. Часто применяются методы сопоставления с шаблонами, методы на основе анализа моментов, машины опорных векторов [1, 3].

Преимущества шаблонных методов заключаются в простоте реализации и устойчивости к дефектам изображения символов. Основной недостаток шаблонных методов заключается в невозможности распознавания символов, которые подвержены аффинным и проекционным искажениям и отличаются от заложенных в системе шаблонов.

Достоинство использования моментов изображения для выделения признаков символов заключается в высокой устойчивости к изменению масштаба изображения и другим геометрическим преобразованиям. Недостаток их использования заключается в высокой чувствительности к шумам и дефектам на изображении, в результате чего символы могут неправильно классифицироваться.

Достоинство метода SVM заключается в том, что для построения классификатора для распознавания символов достаточно обучающей выборки сравни-

тельно небольшого размера. Кроме того, он имеет низкую вероятность ошибки. Недостаток данного метода заключается в том, что в процессе классификации учитывается не все множество данных, а только ближайшая к разделяющей классы границе часть. Метод опорных векторов представляется наиболее эффективным для распознавания символов автомобильного номера.

Сформулированные выводы по эффективности реализации каждой из процедур были подтверждены в результате проведения экспериментов с разработанным программным обеспечением. Эксперименты проводились на базе двухъядерного персонального компьютера с процессорами Intel Core 5i, тактовой частотой 1,6 ГГц, оперативной памятью 4 Гб, под управлением операционной системы Windows. Программное обеспечение разработано на языке C# с применением библиотеки компьютерного зрения Emgu. Результаты экспериментов приведены в табл. 1–4. В табл. 2–3 приведены результаты анализа изображений автомобильных номеров, полученных при повороте плоскости изображения относительно камеры (рис. 4).

Таблица 1

**Время распознавания в зависимости от расстояния до объекта**

Расстояние до объекта, м	Время локализации, с	Время распознавания, с	Общее время обработки, с
1	0,67	0,26	0,93
2	0,69	0,28	0,97
3	0,84	0,29	1,13
4	0,94	0,29	1,23
5	0,81	0,32	1,13
6	0,89	0,31	1,20
7	0,85	0,29	1,14
8	0,91	0,29	1,20
9	0,79	0,31	1,10
10	0,85	0,31	1,16

Таблица 2

**Распознавание номера при повороте в плоскости**

Угол поворота	-25	-20	-15	-10	0	10	15	20	25
Процент правильного распознавания	50	82	95	100	100	98	96	79	37

Таблица 3

**Распознавание номера при повороте в пространстве по вертикали**

Угол поворота	-70	-60	-40	-20	0	20	40	60	70
Процент правильного распознавания	53	87	98	98	100	97	98	90	52

Таблица 4

**Распознавание номера при повороте в пространстве по горизонтали**

Угол поворота	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
Процент правильного распознавания	63	95	98	100	100	100	99	92	57

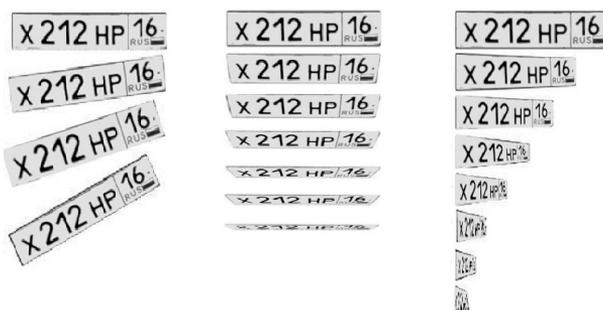


Рис. 4. Повороты плоскости изображения на плоскости (слева), в пространстве по вертикали (по центру), в пространстве по горизонтали (справа)

Таким образом, эффективная система автоматического распознавания автомобильных номеров может быть построена на основе метода Виолы – Джонса для локализации области номера на изображении, методов Хафа и анализа гистограмм яркостей пикселей для нормализации, контурного анализа для сегментации и метода SVM для распознавания символов.

Разработанные алгоритмы позволили обеспечить распознавание автомобильных номерных знаков, соответствующих ГОСТ Р 50577-93 (группа 1, тип 1), с точностью не менее 85% при различных углах поворота.

#### Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Елизаров А.И., Афонасенко А.В. Методика построения систем распознавания автомобильного номера // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8. С. 118–122.
3. Киртичников А.П., Ляшева С.А., Обухов А.В., Шлеймович М.П. Автоматическое распознавание автомобильных номеров // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 4. С. 218–222.
4. Мурыгин К.В. Нормализация изображения автомобильного номера и сегментация символов для последующего распознавания // Искусственный интеллект. 2010. № 3. С. 364–369.
5. Свириг И., Ханин А. Некоторые аспекты автоматического распознавания автомобильных номеров // Алгоритмы безопасности. 2010. № 3. С. 26–29.
6. Фурман Я.А., Юрьев А.Н., Янишин В.В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. 248 с.
7. Shin Shi. Emgu CV Essentials. Packt Publishing, 2013, 105 p.
8. Viola P., Jones M.J. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001, vol. 1, p. 511–518.

**ОБУХОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** – магистр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Россия, Казань (anvob@mail.ru).

**ЛЯШЕВА СТЕЛЛА АЛЬБЕРТОВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Россия, Казань (stellyash@mail.ru).

**ШЛЕЙМОВИЧ МИХАИЛ ПЕТРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Россия, Казань (shlch@mail.ru).

A. OBUKHOV, S. LYASHEVA, M. SHLEYMOVICH

THE METHODS OF AUTOMATIC LICENSE PLATE RECOGNITION

**Key words:** automatic license plate recognition, localization, normalization, segmentation, character recognition, syntactic analysis.

The results of the methods research of automatic license plate recognition are presented. The procedures of the localization region license plates in the image picture, normalizing the license plate image, license plate image segmentation, character of license plate recognition and syntactic analysis of the elements of the license plate. It is shown that an effective approach can be based on the applying methods of the Viola-Jones, Hough, the analysis of histograms of brightness and support vector machine. The described approach allows to obtain high recognition accuracy in different corners of the license plate relative to the camera.

References

1. Gonzalez R., Woods R. Digital Image processing. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey, Prentice Hall, 2008 (Russ. ed.: Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii. 3-e izd., ispr. i dop. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012, 1104 p.).
2. Elizarov A.I., Apanasenko A.V. Metodika postroeniya sistem raspoznavaniya avtomobil'nogo nomera [Method of construction of systems of recognition of license plate]. Metodika postroeniya sistem raspoznavaniya avtomobil'nogo nomera [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2006, vol. 309, no. 8, pp. 118–122.
3. Kirpichnikov A.P., Lyasheva S.A., Obukhov A.V., Shleymovich M.P. Avtomaticheskoe raspoznavanie avtomobil'nykh numerov [Automatic license plate recognition]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Herald of Kazan Technological University], 2015, vol. 18, no. 4, pp. 218–222.
4. Murygin K.V. Normalizatsiya izobrazheniya avtomobil'nogo nomera i segmentatsiya simvolov dlya posleduyushchego raspoznavaniya [Normalization of the Image of a Car Plate and Segmentation of Symbols for the Subsequent Recognition]. Iskusstvennyi intellekt [Artificial intelligence], 2010, no. 3, pp. 364–369.
5. Svirin I., Hanin A. Nekotorye aspekty avtomaticheskogo raspoznavaniya avtomobil'nykh numerov [Some aspects of automatic recognition of license plates]. Algoritmy bezopasnosti [Security algorithms], 2010, no. 3, pp. 26–29.
6. Fuhrman J.A., Yur'ev A.N., Yanshin V. Tsifrovye metody obrabotki i raspoznavaniya binarnykh izobrazhenii [Digital methods of processing and recognition of binary images]. Krasnoyarsk University Publ., 1992, 248 p.
7. Shin Shi. Emgu CV Essentials. Packt Publishing, 2013, 105 p.
8. Viola P., Jones M.J. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001, vol. 1, p. 511–518.

---

**OBUKHOV ANDREY** – Master, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI, Russia, Kazan.

**LYASHEVA STELLA** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Applied Mathematics & Informatics, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI, Russia, Kazan.

**SHLEYMOVICH MIKHAIL** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Automated Information Processing Systems & Control, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI, Russia, Kazan.

---

**Ссылка на статью:** Обухов А.В., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Методы автоматического распознавания автомобильных номеров // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 201–208.

УДК 519.7

ББК 74

А.Е. ПОРЯДИН, И.Г. СИДОРКИНА, В.В. РОЖЕНЦОВ

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТРЕНИРОВКИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ В СПОРТИВНЫХ ИГРАХ**

**Ключевые слова:** спорт, спортивные игры, спортивная техника, техника движений, технические приемы, техническая подготовленность, обучение, тренировка, методика тренировки, информационные технологии.

Современные условия профессиональной деятельности и спортивной подготовки выдвигают определенные требования к функциональным возможностям человека. Такие условия расширяют понятие профессионального здоровья, которое включает в себя не только отсутствие болезней, но и соответствие критериям качества жизни человека. Особое внимание уделяется тем видам деятельности, которые связаны с экстремальными физическими или интеллектуальными нагрузками, а также в которых чрезвычайно важна надежность деятельности. Например, в космонавтике, авиации, флоте, и, в частности, в спорте.

Предметом исследования статьи является обучение основным способам выполнения технических приемов в играх со спортивным снарядом. Проблемой роста технического мастерства является укоренившаяся система обучения элементам техники, при которой для создания представления о технике спортивных упражнений в основном используются такие методы, как рассказ, объяснение, показ упражнения. По мере роста технической подготовленности возможности избирательного воздействия на отдельные стороны двигательной функции увеличиваются и для обеспечения разносторонней подготовки требуется применение всё большего числа различных тренирующих средств. С этой целью необходим поиск инновационных, более эффективных средств формирования техники движений, преимущественно с использованием возможностей информационных технологий.

Предложенная компьютерная технология позволяет быстрее овладеть рациональной игровой техникой, раскрыть индивидуальные технические особенности игрока и совершенствовать их на любом этапе профессиональной карьеры. Технология позволяет определить количественные показатели подготовленности спортсмена в большом диапазоне когнитивно-моторных тестов, что будет являться основой при анализе потенциала игрока и корректировки его тренировочных заданий. Она может использоваться при технической подготовке спортсменов разной квалификации, специализирующихся в футболе, хоккее, ручном мяче, баскетболе и в других видах спорта, где необходима работа со спортивным снарядом.

Под спортивной техникой понимается совокупность приемов и действий, обеспечивающих наиболее эффективное решение двигательных задач, обусловленных спецификой конкретного вида спорта [7]. Уже на этапе базовой подготовки (первый год обучения) одной из основных задач в спортивных играх является обучение основным способам выполнения технических приемов спортивных игр на уровне двигательного умения [17].

Традиционным методикам технической подготовки более 40 лет, поэтому проблемой роста технического мастерства является укоренившаяся система обучения элементам техники, при которой для создания представления о технике спортивных упражнений в основном используются такие методы, как рассказ, объяснение, показ упражнения.

В настоящее время, по мнению М.А. Вершинина и соавт. [3], необходим системный подход к разработке и совершенствованию методики тренировки технических приемов в спортивных играх, что предполагает поиск и разработку новых технологий. По мере роста технической подготовленности возможности избирательного воздействия на отдельные стороны двигательной функции увеличиваются и для обеспечения разносторонней подготовки требуется применение всё большего числа различных тренирующих средств [1]. С этой целью необходим поиск инновационных, более эффективных средств формирования техники движений, преимущественно с использованием возможностей информационных технологий. Это позволит [5, 10, 13]:

- быстрее овладеть рациональной и эффективной техникой и уметь пользоваться ею;
- найти индивидуальный стиль техники;
- совершенствовать техническую подготовку на любом этапе – от новичка до заслуженного мастера спорта;
- вывести качество подготовки спортсменов в игровых видах спорта на более высокий уровень;
- значительно облегчить труд тренера по достижению лучших результатов в спорте.

Вопросы использования компьютерных информационных технологий в технико-тактической подготовке в игровых видах спорта рассмотрены авторами ранее, предложена методика обучения техническим [2, 18], тактическим действиям путем моделирования игровых ситуаций в виртуальной реальности [15] и технико-тактической подготовки в игровых видах спорта [16].

**Цель работы** – разработка технологии тренировки технических приемов в спортивных играх с использованием информационных технологий.

**Технология тренировки технических приемов в спортивных играх.** Для контроля двигательной активности и психофизиологического состояния человека разработаны специальные методики и инструментальные средства, которые позволяют выявлять психические и психофизиологические противопоказания при отработке технических приемов тренировки. Многолетний опыт использования подобных методик и систем в промышленности и спорте доказал важность и эффективность подобного подхода. Обзор наиболее известных на сегодняшний день решений, используемых для оценки состояния человека, позволяет выявить недостатки известных в мировой практике решений.

Новизна предлагаемой технологии состоит в возможности количественной оценки точности восприятия разнонаправленного движения объектов в двумерном пространстве с возможностью программного моделирования процессов тестирования личности.

Тренировка технических приемов осуществляется на игровом поле, на котором световыми излучателями, управляемыми компьютером, формируются разрешенные и запрещенные светодинамические зоны. Каждый спортсмен должен находиться в одной из разрешенных зон, выполнять заданные технические приемы со спортивным снаряжением, ориентируясь грудью на световую метку, создаваемую вне разрешенной зоны, не выходить из разрешенной зо-

ны и удерживать в ней спортивный снаряд. В процессе тренировки непредсказуемо для спортсмена меняют положение, форму и площадь разрешенных и запрещенных зон.

В зависимости от подготовленности спортсмена задается скоростной уровень трансформации и перемещений зон на игровом поле. Для начинающих спортсменов устанавливается минимальная скорость, более подготовленным спортсменам предъявляют сложные задания, имитирующие игру с опытным соперником. Ошибкой считается попадание спортсмена в запрещенную зону или выполнение технических приемов в положении, не ориентированном на метку.

При отсутствии ошибок площадь разрешенной зоны уменьшают, а интенсивность тренировки увеличивают до тех пор, пока спортсмен не сможет безошибочно выполнять данное упражнение. По минимальному размеру разрешенной зоны, максимальной скорости ее перемещения, при которой спортсмен, выполняя данное упражнение, не допускает ошибок, судят о технической подготовленности спортсмена [12].

В рамках технологии разработаны и исследованы тесты, регистрирующие точность остановки пользователем (спортсменом) движущегося объекта на определенной метке, при объективной оценке скорости реакции пользователя для выявления индивидуальных особенностей, таких как функциональная асимметрия. Созданы тесты, основанные на применении различных вариаций направления движения объекта и метки. Разработан алгоритм, позволяющий проанализировать скоростные показатели человека: двигательные реакции, способность к максимально быстрому началу движения, способность выполнять движения с максимальной частотой. Исследованы характеристики внимания. Для определения распределения и переключения внимания человека использовался набор из 8 тестов, представляющих собой поочередное нахождение пользователем цифр из разных категорий в возрастающем или убывающем порядке. Проведено исследование и сделан анализ характеристик внимания пользователя при выполнении профессиональных действий. Приложение разработано в виде базы знаний, представленной в виде иерархии хранения директорий и файлов на жестком диске. Эта база знаний предназначена для хранения долгосрочных фактов, описывающих проблемную область, правила, регламентирующие отношения между этими фактами, а также другие типы декларативных знаний о проблемной области. Кроме правил и фактов, образующих декларативную часть базы знаний, в нее входит процедурная часть. Это – множество функций и процедур, представляющие собой эвристические, расчетные и другие алгоритмы, реализующие психофизиологические тесты или их элементы.

**Обсуждение.** Исследователями, изучающими проблему двигательной активности детей, как отмечают В.И. Прокопенко и В.П. Метёлкин [14], было доказано, что дети в возрасте 5-7 лет способны к освоению движений спортивного характера, представляющих собой сложные виды двигательных навыков. Поэтому в отечественной и зарубежной спортивной науке и практике

пристальное внимание уделяется научным исследованиям, связанным с приобщением детей к занятиям отдельными видами спорта, и научно обоснованной методике их обучения. В этом аспекте особое место в тренировочном процессе в игровых видах спорта должно отводиться, по их мнению, освоению технических элементов (технике) вида спорта как одному из ведущих факторов стабильности и продуктивности выступления будущего спортсмена в соревнованиях.

Начальная стадия обучения юных спортсменов в игровых видах спорта характеризуется применением большого количества одноцелевых упражнений, которые выполняются в простых условиях, на месте или на малой скорости, без дефицита времени и т.д. [9]. Затем технические приемы выполняются в усложнённых условиях и, наконец, – в сложных условиях, приближённых к игровым [4].

В то же время одним из факторов, лимитирующих уровень подготовленности юных спортсменов в игровых видах спорта, является, как отмечает А.В. Дулибский [4], техническая оснащённость игроков. При этом отставание в технике игры намечается уже на начальных этапах подготовки. Приемы, которые выполняются с высоким процентом брака в детском возрасте, продолжают оставаться камнем преткновения и в пору спортивной зрелости [9].

Не менее важно в подготовке юных спортсменов повышение эффективности работы над овладением техники игры и совершенствованием навыков выполнения технических приемов в вариативных условиях, близких к игровым. Процесс обучения юных спортсменов должен строиться так, чтобы технические приемы разучивались и совершенствовались не изолировано друг от друга, а в определенных сочетаниях друг с другом, которые наиболее часто встречаются в игровых ситуациях [9].

Для повышения уровня технической подготовленности необходимо совершенствование структуры двигательных действий, их динамики, кинематики и ритма. С этой целью нужно увеличивать «набор» движений в ситуациях, приближенных к условиям соревнований. Важная роль в решении этих вопросов отводится различным тренажерным устройствам, позволяющим оценивать и развивать как физическую, так и техническую подготовленность [6]. Однако и за рубежом, и в России они в основном узкоспециализированы, имеют малые функциональные возможности. Так, для контроля и анализа движений спортсмена выполняют съемку видеокамерой изучаемых движений, передают в компьютер полученные видеофрагменты, задают контрольные точки на теле спортсмена или снаряде на первом кадре, отслеживают их положения на всех последующих кадрах, вычисляют траектории движения контрольных точек и выполняют их анализ. Этот комплекс позволяет изучить движения спортсмена, выполняемых в ограниченном пространстве, но не позволяет оценить скорость и интенсивность двигательных действий и качество технических действий в игровых видах спорта непосредственно на игровом поле [11].

Таким образом, результаты исследования показали, что наиболее распространенные модели, методики и инструментальные средства, их реализующие из разработанных на данный момент решений, обладают рядом ограничений.

Например, не обеспечивают оперативную поддержку принятия решений. Это объясняется недостаточно исследованной теоретической и фундаментальной составляющей предметной области. В основу известных методик заложены «бумажные» тесты, не используется, за редким исключением, дополнительное (встраиваемое) оборудование. Разработку методов и методик в настоящее время поддерживают ведущие мировые производители программного обеспечения. Для проведения психофизиологических исследований в мировой практике используется специально разработанное программное обеспечение.

Применение современных технических средств и информационных технологий во время тренировочных занятий, как отмечает Д.А. Лелеко [8], дает возможность эффективнее развивать двигательные способности, совершенствовать техническое мастерство, получать срочную и достоверную информацию о количественных и качественных характеристиках движений, уровне технической подготовленности спортсмена, обеспечивать ускоренное совершенствование двигательного навыка. Это позволяет разнообразить учебно-тренировочный процесс, повысить эмоциональность спортсменов.

**Выводы.** Предложенная компьютерная технология позволяет быстрее овладеть рациональной игровой техникой, раскрыть индивидуальные технические особенности игрока и совершенствовать их на любом этапе профессиональной карьеры. Технология позволяет также определить количественные показатели подготовленности спортсмена в большом диапазоне когнитивно-моторных тестов, что будет являться основой при анализе потенциала игрока и корректировки его тренировочных заданий.

Кроме того, при компьютерной реализации методики закладываются основные принципы построения профессиональной интеллектуальной системы.

Технология может использоваться при технической подготовке спортсменов разной квалификации, специализирующихся в футболе, хоккее, ручном мяче, баскетболе и в других видах спорта, где необходима работа со спортивным снарядом. Предполагаемый подход к реализации приемов тренировки основан на обобщении и развитии опыта, полученного в ходе теоретического анализа оценки психофизиологических характеристик человека.

#### Литература

1. *Абрамов А.А.* Структура показателей подготовки юных хоккеистов к спортивной деятельности на начальном этапе учебно-тренировочного процесса // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2012. № 133. С. 263–267.
2. *Афоншин В.Е., Полевщиков М.М., Роженцов В.В.* Технология тренировки передач в спортивных играх // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2014. № 1. С. 10–13. DOI: 10.5930/issn.1994-4683.2014.01.107.p10-13.
3. *Вершинин М.А., Корзун Д.Л., Москвичёв Ю.Н.* Сравнительный анализ технико-тактических действий юных футболистов // Фундаментальные исследования. 2013. № 6-4. С. 976–981.
4. *Дулибский А.В.* Повышение эффективности спортивного отбора в футболе // Педагогика, психология и медико-биологические проблемы физического воспитания и спорта. 2010. № 8. С. 29–33.
5. *Ермаков С.С.* Обоснование педагогических задач обучения ударным движениям в спортивных играх // Физическое воспитание студентов творческих специальностей. 2001. № 3. С. 24–29.
6. *Ермаков С.С.* Педагогические подходы в обучении сложным техническим приемам юных волейболистов (анализ педагогической литературы) // Физическое воспитание студентов творческих специальностей. 2001. № 2. С. 32–42.

7. Кривощёков К.Г. Технология образного обучения техническим приемам в подготовке юных борцов-дзюдоистов // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2007. № 5(68). С. 16–21.

8. Лелеко Д.А. Анализ влияния технического оснащения в теннисе на физическую и техническую подготовку спортсменов // Физическое воспитание студентов. 2011. № 1. С. 85–89.

9. Лобачев В.В., Корнева Ю.И., Хайдар М.А. Методика технической подготовки конкурентоспособных игроков в футболе на начальных этапах подготовки юных спортсменов // Культура физическая и здоровье. 2011. № 2. С. 54–56.

10. Лукьянов Б.Г., Шейко Б.И., Фетисов В.С., Дудов О.А. Программно-аппаратный комплекс для видеоанализа движений спортсменов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9, № 5. С. 64–71.

11. Пат. 2233685 РФ, МПК А63В 71/00. Способ контроля и анализа биомеханических параметров спортсменов / Зайцев В.К., Шахматов М.В., Тихонов И.Д., Кузьмин А.В. № 2003121353/12; заявл. 15.07.2003; опубл. 10.08.2004, Бюл. № 22.

12. Пат. 2557503 РФ, МПК А63В 71/00. Способ тренировки двигательных действий и технических приемов / Афоньшин В.Е. № 2014141224/12; заявл. 13.10.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

13. Петушинский Б.Б. Индивидуализация процесса технико-тактической подготовки квалифицированных баскетболистов // Физическое воспитание студентов творческих специальностей. 2006. № 6. С. 64–71.

14. Прокопенко В.И., Метёлкин В.П. Техническая подготовка детей 6-7 лет занимающихся мини-футболом // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2011. № 12. С. 137–140.

15. Роженцов В.В., Афоньшин В.Е. Тактическая подготовка в игровых видах спорта с использованием виртуальной реальности // Программные системы и вычислительные методы. 2013. № 3(4). С. 272–276. DOI: 10.7256/2305-6061.2013.3.8904.

16. Роженцов В.В., Афоньшин В.Е. Технология технико-тактической подготовки в игровых видах спорта // Кибернетика и программирование. 2014. № 3. С. 103–109. DOI: 10.7256/2306-4196.2014.3.12048.

17. Софронов И.Л., Драндров Г.Л., Бурцев В.А. Формирование спортивной культуры студентов на основе спортивных игр // Вестник МГГУ им. М.А. Шолохова. Сер. Педагогика и психология. 2012. № 1. С. 79–87.

18. Polevshchikov M.M., Afonshin V.E., Rozhentsov V.V. A Technology for Technical Preparation of Young Athletes in Team Sports. *European Journal of Physical Education and Sport*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 54–58.

**ПОРЯДИН АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ** – аспирант кафедры информационной безопасности, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола (lazu.ant10@gmail.com).

**СИДОРКИНА ИРИНА ГЕННАДЬЕВНА** – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола (igs592000@mail.ru).

**РОЖЕНЦОВ ВАЛЕРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола (vrozhentsov@mail.ru).

**A. PORYADIN, I. SIDORKINA, V. ROZHENTSOV**  
**COMPUTER TECHNOLOGY TRAINING TECHNIQUES IN SPORTS**

**Key words:** sport, training techniques, technical readiness, training, training methods, information technologies.

*The modern conditions of professional activity and sport under-cooking put forward specific requirements to the functionality of a human. Such conditions expand the concept of occupational health, which includes not only the absence of diseases, but also the criteria of life quali-*

ty. The particular attention is given to those activities that are associated with extreme physical or intellectual loads, where reliability is extremely important. For example, in the aerospace, aviation, forces, and, in particular, in sports.

The subject of the article is to teach basic methods of technical receptions implementation in games with a sports shell. The problem of the technical skill growth is an entrenched system of teaching technique elements, in which such methods as narration, explanation and exercises demonstration are mostly used for understanding the creation technique of sports exercises.

With the growth of technical training the opportunities of selective effects on certain aspects of the motor function increase and for the insurance of more comprehensive training the use of an increasing number of different training tools is required. For this purpose some new innovative, more effective means of development of the movement technique, mainly using the possibilities of information technology is necessary. The proposed computer technology makes it easier to master the rational gaming equipment, to disclose the individual technical features of the player and improve them at any stage of a professional career. The technology allows you to determine the quantitative indicators of the athlete preparedness of in a wide range of cognitive-motor tests, what will be the basis for the analysis of the player potential and adjust his/her training tasks. It can be used with the technical preparation of sportsmen of different qualifications, specializing in football, hockey, hand ball, basketball and other sports where it is necessary to work with a sports shell.

#### References

1. Abramov A.A. *Struktura pokazatelei podgotovki yunykh khokkeistov k sportivnoi deyatelnosti na nachal'nom etape uchebno-trenirovochnogo protsesssa* [Structure of Parameters of Training Young Hockey Players to Sports Activities at the Initial Stage of Training Process]. *Izvestiya Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena* [Herzen University Journal of Humanities and Sciences], 2012, no. 133, pp. 263–267.
2. Afonshin V.E., Polevshchikov M.M., Rozhentsov V.V. *Tekhnologiya trenirovki peredach v sportivnykh igrakh* [Training Technology for handoffs in sports games]. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*, 2014, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.5930/issn.1994-4683.2014.01.107.p10-13.
3. Vershinin M.A., Korzun D.L., Moskvichev Yu.N. *Sravnitel'nyi analiz tekhniko-takticheskikh deistvii yunykh futbolistov* [The comparative analysis of technical and tactical actions of young football]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Modern high technologies], 2013, no. 6-4, pp. 976–981.
4. Dulibskii A.V. *Povyshenie effektivnosti sportivnogo otbora v futbole* [Improving efficacy of sport selection in football]. *Pedagogika, psikhologiya i mediko-biologicheskie problemy fizicheskogo vospitaniya i sporta* [Pedagogics, Psychology, Medical-Biological Problems of Physical Training and Sports], 2010, no. 8, pp. 29–33.
5. Ermakov S.S. *Obosnovanie pedagogicheskikh zadach obucheniya udarnym dvizheniyam v sportivnykh igrakh* [A substantiation of pedagogical problems of learning to stroke locomotions in sports games]. *Fizicheskoe vospitanie studentov tvorcheskikh spetsial'nostei*, 2001, no. 3, pp. 24–29.
6. Ermakov S.S. *Pedagogicheskie podkhody v obuchenii slozhnym tekhnicheskim priemam yunykh voleibolistov (analiz pedagogicheskoi literatury)* [The pedagogical approaches in learning multiple techniques of the juvenile players of volleyball (analysis of the pedagogical literature)]. *Fizicheskoe vospitanie studentov tvorcheskikh spetsial'nostei*, 2001, no. 2, pp. 32–42.
7. Krivoshechekov K.G. *Tekhnologiya obraznogo obucheniya tekhnicheskimi priemami v podgotovke yunykh bortsov-dzyudoistov* [The Technology of Image Teaching of Young Judoists]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Tomsk State Pedagogical University Bulletin], 2007, no. 5(68), pp. 16–21.
8. Leleko D.A. *Analiz vliyaniya tekhnicheskogo osnashcheniya v tennise na fizicheskuyu i tekhnicheskuyu podgotovku sportsmenov* [Analysis of influence of technical equipment in tennis on physical and technical preparation of sportsmen]. *Fizicheskoe vospitanie studentov* [Physical Education of Students of Creative Specialties], 2011, no. 1, pp. 85–89.
9. Lobachev V.V., Korneva Yu.I., Haidar M.A. *Metodika tekhnicheskoi podgotovki konkurentosposobnykh igrokov v futbole na nachal'nykh etapakh podgotovki yunykh sportsmenov* [Methodology of technical preparation of competitive players in football on the initial stages of preparation of young sportsmen]. *Kul'tura fizicheskaya i zdorov'e* [Physical culture and health], 2011, no. 2, pp. 54–56.

10. Lukyanov B.G., Sheiko B.I., Fetisov V.S., Dudov O.A. *Programmno-apparatnyi kompleks dlya videoanaliza dvizhenii sportsmenov* [Soft hardware for tracing and analysis of sportsmen's movements]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 9, no. 5, pp. 64–71.
11. Zaitsev V.K., Shakhmatov M.V., Tikhonov I.D., Kuz'min A.V. *Sposob kontrolya i analiza biomekhanicheskikh parametrov sportsmenov* [Method of monitoring and analysis of biomechanical parameters of sportsmen]. Patent RF, no. 2233685, 2004.
12. Afon'shin V.E. *Sposob trenirovki dvigatel'nykh deistvii i tekhnicheskikh priemov* [Method movement training actions and technical methods]. Patent RF, no. 2557503, 2015.
13. Petushinskii B.B. *Individualizatsiya protsessa tekhniko-takticheskoi podgotovki kvalifitsirovannykh basketbolistov* [Individualization of process of technical-tactical opening-up qualified of basketball players]. *Fizicheskoe vospitanie studentov tvorcheskikh spetsial'nostei*, 2006, no. 6, pp. 64–71.
14. Prokopenko V.I., Metelkin V.P. *Tekhnicheskaya podgotovka detei 6-7 let zanimayushchikhsya mini-futbolom* [Technical training of children aged 6-7 years engaged in futsal]. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*, 2011, np. 12, pp. 137–140.
15. Rozhentsov V.V., Afon'shin V.E. *Takticheskaya podgotovka v igrovyykh vidakh sporta s ispol'zovaniem virtual'noi real'nosti* [Tactical training in team sports using virtual reality]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods], 2013, no. 3(4), pp. 272–276. DOI: 10.7256/2305-6061.2013.3.8904.
17. Rozhentsov V.V., Afon'shin V.E. *Tekhnologiya tekhniko-takticheskoi podgotovki v igrovyykh vidakh sporta* [Methods, languages and forms of human-computer interaction]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2014, no. 3, pp. 103–109. DOI: 10.7256/2306-4196.2014.3.12048.
18. Sofronov I.L., Drandrov G.L., Burtsev V.A. *Formirovaniye sportivnoi kul'tury studentov na osnove sportivnykh igr* [The formation of sports culture of students on the basis of sports games]. *Vestnik MGGU im. M.A. Sholokhova. Ser. Pedagogika i psikhologiya* [Vestnik of Sholokhov Moscow State University for the Humanities: «Pedagogy and Psychology» Series], 2012, no. 1, pp. 79–87.
19. Polevshchikov M.M., Afonshin V.E., Rozhentsov V.V. *A Technology for Technical Preparation of Young Athletes in Team Sports*. *European Journal of Physical Education and Sport*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 54–58.

---

**PORYADIN ANTON** – Post-Graduate Student of Information Security Department, Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola.

**SIDORKINA IRINA** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Information Security Department, Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola.

**ROZHENTCOV VALERY** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Design and Production of Electronic Calculating Facilities, Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola.

---

**Ссылка на статью:** *Порядин А.Е., Сидоркина И.Г., Роженцов В.В.* Компьютерная технология тренировки технических приемов в спортивных играх // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 209–216.

УДК 004.931  
ББК 32.813

С.И. РОДЗИН, С.А. ЭЛЬ-ХАТИБ

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА\*

*Ключевые слова:* алгоритм роя частиц, кластер, оптимизация, расстояние, сегментация изображений.

*Приведена постановка задачи сегментации медицинских магнитно-резонансных изображений. Предлагается гибридный роевой алгоритм ее решения, который позволяет повысить качество и скорость обработки снимков. При решении задачи используются методология роевого интеллекта, кластерный анализ, теория эволюционных вычислений, математическая статистика, компьютерное моделирование и программирование. Приводятся результаты экспериментов, полученные на основе данных из библиотеки медицинских МРТ-снимков. Установлены оптимальные значения параметров, определяющих поведение и эффективность алгоритма, что позволяет уменьшить количество итераций алгоритма. Результаты демонстрируют перспективность использования алгоритма в системах цифровой обработки медицинских снимков.*

Объектом исследования являются методы разделения цифрового изображения на сегменты с целью упрощения анализа и обработки медицинских магнитно-резонансных изображений, полученных при проведении МРТ исследований пациентов, а также тестовых МРТ-изображений из международных наборов (*benchmarks*). Целью является применение методов и алгоритмов роевого интеллекта для решения задачи сегментации изображений.

Сегментацией называется процесс разбиения изображения на непересекающиеся части, соответствующие объектам изображения либо их частям. Данная процедура необходима для качественного решения задач обработки медицинских снимков с целью распознавания патологий. Изображения медицинских снимков являются сложными и вариабельными. Автоматизация детектирования объектов на снимках позволяет ускорить диагностику заболевания, уточнить лечение и оперативно управлять процессами реабилитации. Сложность и размерность медицинских снимков являются ключевыми факторами, ограничивающими применение известных методик для сегментации изображений.

Задача сегментации является слабо формализованной, если она определяется не как результат, а как процесс разбиения пикселей изображения на множества по некоторому алгоритму. Все последующие этапы обработки, такие как классификация, извлечение образов и идентификация, зависят от результатов сегментации. К настоящему времени разработано большое количество различных алгоритмов сегментации [8–10, 13, 15].

Главная сложность в процессе сегментации заключается в наличии дополнительных факторов, присущих изображениям: вариабельность фона, наличие шума на снимках, разница между частями изображения. Подходы к

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00336) в Южном федеральном университете.

сегментации можно разделить на два класса: автоматические, не требующие взаимодействия с пользователем, и интерактивные, использующие пользовательский ввод непосредственно в процессе работы.

В последнее время сегментация изображений становится одним из актуальных направлений развития компьютерных технологий в медицине для улучшения качества изображения, восстановления поврежденных изображений, распознавания отдельных элементов патологического процесса. Современная медицинская диагностика невозможна без цифровой обработки медицинских снимков. Вместе с тем задача автоматизированной диагностики патологических процессов по данным медицинских изображений далека от своего разрешения: универсального алгоритма не существует, актуальной проблемой остается определение оптимальных параметров описания объектов интереса, что оказывает непосредственное влияние на качество их классификации [1].

Объекты интереса исследователя на медицинских изображениях, используемых в ранней диагностике, обычно бывают небольшими и мало контрастными по сравнению с окружающим фоном, а сами снимки являются сложными и переменными. Системы для анализа и обработки медицинских изображений обладают рядом недостатков: исследователю доступен широкий набор алгоритмов сегментации, но неясно, какой именно алгоритм должен быть применен; невозможно гарантированно осуществить оптимальный выбор параметров алгоритма; нереален перебор всех алгоритмов для достижения наилучшего результата. Поэтому для улучшения систем анализа и обработки медицинских изображений необходим подход, обеспечивающий оптимизацию параметров алгоритмов сегментации изображений. Целью статьи является аналитическое и экспериментальное обоснование оптимальных параметров биоинспирированного роевого алгоритма сегментации медицинских изображений.

**Постановка задачи и подход к ее решению.** Под сегментом подразумевается некоторая изолированная область, состоящая из отдельных элементов (пикселей), такая, что расстояние между ее элементами минимально, а расстояние между двумя соседними областями – максимально. Требуется разбить множество элементов, на сегменты так, чтобы расстояние между элементами внутри группы было минимальным, а расстояние между группами – максимальным.

Результат разбиения зависит от особенностей входных данных, что приводит к разделению изображений на ряд предметных областей (аэрокосмических, медицинских, телевизионных и др.), для которых разрабатываются конкретные алгоритмы сегментации, а достоверность сегментации оценивается эмпирически по адекватности зрительному восприятию или результатам автоматического обнаружения заранее заданных объектов.

Не существует четкой и однозначной общей постановки задачи сегментации [6]. Необходимо выделить на изображениях области с определенными свойствами. Такие области обычно соответствуют объектам или их частям, которые определяют исследователи. Результатом сегментации является бинарное или иерархическое изображение, в котором каждый уровень изображения соответствует конкретному классу выделенных объектов. Сегментация являет-

ся сложным моментом в обработке и анализе медицинских изображений биологической ткани, так как необходимо выделять области, соответствующие различным объектам или структурам на гистологических препаратах: клеткам, органоидам, артефактам и т.д. Это связано с вариабельностью их характеристик, слабой контрастностью обрабатываемых изображений и сложной геометрической организацией объектов. Между тем точность результатов сегментации медицинских изображений должна быть на самом высоком уровне [4, 5].

Для получения более эффективного результата предлагается использовать комбинирование нескольких эвристик, управляемых общей схемой, с помощью которой усиливаются их достоинства и компенсируются слабости. Результаты сегментации изображений могут быть улучшены при использовании гиперэвристики *PSO-k-means*, которая представляет собой композицию алгоритмов роя частиц и *k*-средних.

Алгоритм роя частиц (*Particle Swarm Optimization, PSO*) [11, 12] является метафорой, имитирующей социальное поведение роя (птиц в стае, рыб в косяке и др.). Известно, что всякого рода роевые объединения играют важную роль в повышении эффективности поиска ими пищи, защиты от хищников, а также в уменьшении энергетических затрат. Обнаружены базовые принципы синхронного поведения роя, меняющего как по команде направление своего движения и перемещающегося как единое целое.

Алгоритм *PSO* показал свою конкурентоспособность при решении многих *NP*-полных трансвычислительных задач [2, 14]. Идея алгоритма состоит в поиске наилучшего положения частиц, перемещаемых в пространстве согласно простой формуле. При определении следующего положения частицы учитывается информация о наилучшей частице из числа ее соседей, а также информация о данной частице на той итерации алгоритма, на которой этой частице соответствовало наилучшее значение целевой функции. Каждая частица роя подчиняется правилам поведения, которые учитывают ее локальный успех и глобальный оптимум всех частиц роя.

Пусть  $n$  – количество параметров, подлежащих оптимизации,  $x^1, x^2, \dots, x^n$  – параметры оптимизации;  $f(x): R^n \rightarrow R$  – целевая функция в  $n$ -мерном пространстве, которую требуется минимизировать

$$\min_{x \in R^n} f(x) = f(x^*). \quad (1)$$

При реализации *PSO*-алгоритма  $n$ -мерное пространство поиска населяется роем из  $m$  частиц в рое (размер популяции элементарных решений). Координата  $i$ -й частицы ( $i \in [1 : m]$ ) задается вектором  $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ , который определяет некоторый набор параметров оптимизации. В процессе инициализации роя частицы случайным образом располагаются по всей области поиска. При этом каждая  $i$ -я частица имеет свой собственный вектор скорости  $v_i \in R^n$ , которая в каждый конкретный момент времени, соответствующий некоторой итерации *PSO*-алгоритма, определенным образом влияет на значения координат позиции  $i$ -й частицы. Координаты позиции  $i$ -й частицы в  $n$ -мерном пространстве поиска однозначно определяют значение целевой функции  $f(x_i) = f(x^1, x^2, \dots, x^n)$ .

Для каждой позиции  $n$ -мерного пространства поиска, в котором побывала частица, вычисляется значение целевой функции  $f(x_i)$ . При этом каждая частица запоминает свое лучшее значение целевой функции, а также координаты позиции в  $n$ -мерном пространстве, соответствующие этому значению целевой функции. Кроме того, частица «знает», где расположена позиция, являющаяся лучшей (в смысле формулы (1)) среди всех позиций, в которых уже побывали остальные частицы. Благодаря этому обеспечивается мгновенный обмен информацией между всеми частицами.

На каждой итерации  $PSO$ -алгоритма частицы корректируют свою скорость. Это, с одной стороны, позволяет быть поближе к лучшей позиции, которую частица нашла сама, и, с другой стороны, приблизиться к позиции, которая в данный момент является глобально лучшей. Через некоторое количество итераций частицы должны собраться вблизи наиболее хорошей позиции (глобально лучшей по результатам всех итераций). Однако, возможно, что часть частиц останется где-то в относительно неплохом локальном оптимуме.

Сходимость  $PSO$ -алгоритма зависит от того, каким образом выполняется коррекция вектора скорости частиц. Известны различные подходы к выполнению коррекции вектора скорости.

В классической версии  $PSO$ -алгоритма коррекция каждой  $j$ -й координаты вектора скорости ( $j \in [1 : n]$ )  $i$ -й частицы выполняется в соответствии с формулой [11]:

$$v_i^j = v_i^j + c_p r_p (y_i^j - x_i^j) + c_g r_g (y^{*j} - x_i^j), \quad (2)$$

где  $v_i^j$  –  $j$ -я координата вектора скорости  $i$ -й частицы;  $x_i^j$  –  $j$ -я координата вектора  $x_i$ , задающего позицию  $i$ -й частицы;  $y_i^j$  –  $j$ -я координата вектора лучшей позиции, найденного  $i$ -й частицей за время ее существования;  $y^{*j}$  –  $j$ -я координата глобально лучшей позиции всего роя частиц, в которой целевая функция имеет оптимальное значение;  $r_p$  и  $r_g$  – случайные числа на интервале  $(0, 1)$ ;  $c_p$  и  $c_g$  – личный и глобальный коэффициенты ускорения частиц, являющиеся константами и определяющие поведение и эффективность  $PSO$ -алгоритма в целом. С помощью коэффициентов ускорения  $c_p$  и  $c_g$  масштабируются случайные числа  $r_p$  и  $r_g$ . При этом глобальный коэффициент ускорения  $c_g$  управляет воздействием глобальной лучшей позиции на скорости всех частиц, а личный коэффициент ускорения  $c_p$  – воздействием личной лучшей позиции на скорость некоторой частицы.

Модификация  $PSO$ -алгоритма состоит в том, что при выполнении коррекции вектора скорости  $v_i$  вместо формулы (2) используется следующая формула:

$$v_i^j = \omega v_i^j + c_p r_p (y_i^j - x_i^j) + c_g r_g (y^{*j} - x_i^j), \quad (3)$$

в которой перед  $j$ -й координатой вектора скорости  $i$ -й частицы добавлен множитель  $\omega$  – весовой коэффициент инерции, благодаря чему скорость изменяется более плавно.

Далее для каждой частицы рассчитывается новое значение целевой функции  $f(x_i)$  и выполняется проверка: не стала ли новая позиция с вектором

координат  $x_i$  лучшей среди всех позиций, в которых  $i$ -я частица ранее побывала. Если новая позиция  $i$ -й частицы признается лучшей на текущий момент времени, то информация о ней сохраняется в векторе  $y_i$  с «запоминанием» значения целевой функции  $f(x_i)$  в этой позиции. Затем среди всех новых позиций частиц роя осуществляется проверка на наличие глобально лучшей позиции. Если некоторая новая позиция признается глобально лучшей на текущий момент времени, то информация о ней сохраняется в векторе  $y^{*j}$  с «запоминанием» значения целевой функции в этой позиции.

При реализации предлагаемого комбинированного алгоритма наряду с модифицированным *PSO*-алгоритмом используется известный алгоритм *k-means*. Это один из наиболее популярных алгоритмов кластеризации без учителя, целевой функцией которого является минимизация суммарного квадратичного отклонения точек кластеров от центров этих кластеров:

$$\Delta = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in Cl_k} (x_i - h_k)^2, \quad (4)$$

где  $K$  – количество кластеров;  $Cl_k$  – полученные кластеры,  $k \in [1 : K]$ ;  $h_k$  – центры масс векторов  $x_i \in Cl_k$ . Основная идея алгоритма *k-means* заключается в том, что на каждой итерации перевычисляются центры каждого кластера, затем векторы вновь разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Первоначально выбираются  $K$  случайных центров кластеров. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения центра кластеров. Это происходит за конечное число итераций, так как количество возможных разбиений конечного множества конечно, а на каждом шаге суммарное квадратичное отклонение  $D$  не увеличивается, поэтому заикливание невозможно. Временная сложность алгоритма *k-means* невысокая –  $O(m)$ , что делает его пригодным для задач большой размерности. Однако при этом не гарантируется достижение минимума суммарного квадратичного отклонения  $\Delta$ , а результат зависит от выбора исходных центров кластеров, число которых надо знать заранее.

**Алгоритм *PSO-k-means*.** Алгоритм *PSO-k-means* использует композицию из модифицированного *PSO*-алгоритма и алгоритма *k-means*: вначале для сегментации применяется модификация *PSO*-алгоритма, которая позволяет приблизиться к оптимальному решению, но показывает медленную сходимость вблизи оптимума. Затем полученное решение используется в качестве исходного для алгоритма *k-means*.

Отличие предлагаемого алгоритма от аналогов состоит в следующем. В алгоритме *PSO-k-means* каждая частица  $x_i$  является центром  $h_{ik}$  кластера  $Cl_k$ :  $x_i = (h_{i1}, \dots, h_{ik}, \dots, h_{iK})$ . Поэтому рой из  $m$  частиц представляет собой множество кандидатов на роль центров  $K$  кластеров. Целевая функция является многокритериальной, ее значение для частицы определяется следующим образом:

$$f(x_i, Q_i) = w_1 d_{\max}(Q_i, x_i) + w_2 (q_{\max} - d_{\min}(x_i)), \quad (5)$$

где  $q_{\max}$  – максимальное значение в наборе данных цифрового  $s$ -битового изображения ( $q_{\max} = 2^s - 1$ );  $Q$  – матрица, отображающая связь между пикселем и центром кластера для частицы  $i$ . Каждый булевский элемент этой матрицы

указывает на принадлежность пикселя  $q_p$  кластеру  $Cl_k$  для частицы  $i$ ; константы  $w_1$  и  $w_2$  – весовые значения каждого критерия, которые определяются пользователем;  $d_{max}$  – максимальное среднее евклидово расстояние от частиц до связанных с ними кластеров, которое вычисляется согласно выражению:

$$d_{max}(Q_i, x_i) = \max_{k=1, \dots, K} \left( \sum_{\forall q_p \in Cl_{i,k}} \frac{d(q_p, h_{i,k})}{n_{i,k}} \right), \quad (6)$$

где  $n_{i,k}$  – число пикселей частицы  $i$ , принадлежащих к кластеру  $Cl_k$ ;  $d_{min}(x_i)$  – минимальное евклидово расстояние между любой парой кластерных центров, которое вычисляется согласно выражению:

$$d_{min}(x_i) = \min_{\forall k, kk, k \neq kk} \{d(h_{i,k}, h_{i,kk})\}. \quad (7)$$

Целевая функция (5) одновременно минимизирует внутрикластерные расстояния между пикселями и их кластерными центрами и максимизирует расстояния между любой парой кластеров. Для получения оптимального решения используется аддитивная скаляризация с весовыми значениями  $w_1$  и  $w_2$  для каждого из критериев, задаваемых пользователем.

Ниже приводится описание предлагаемого алгоритма *PSO-k-means*.

1. Выбор количества частиц в рое  $m$ , личного и глобального коэффициентов ускорения  $c_p$  и  $c_g$ , максимального количества итераций  $N_{max}$ , определение границ для параметров поиска оптимума, параметров функции  $f$  согласно (5).

2. For  $i = 1, \dots, m$  (цикл по количеству частиц в рое).

2.1. Инициализировать начальное положение частицы случайным вектором  $x_i$ , имеющим равномерное распределение.

2.2. Начальное положение частицы принять за ее лучшее известное положение  $y_i = x_i$ .

2.3. Если  $f(y_i) < f(y^*)$ , то обновить наилучшее известное состояние роа, заменив  $y^*$  на  $y_i$ .

2.4. Случайная инициализация скоростей частиц  $v_i$ .

3. Текущее количество итераций  $N = 1$ .

4. For  $i = 1, \dots, m$  (цикл по количеству частиц в рое).

5. For  $j = 1, \dots, n$  (цикл по количеству параметров целевой функции).

5.1. Сгенерировать случайные числа  $r_p$  и  $r_g$ , принадлежащие интервалу  $(0, 1)$ .

5.2. Обновить скорость частицы  $v_i^j$ .

5.3.  $x_i^j = x_i^j + v_i^j$ .

6. Если  $f(x_i) < f(y_i)$ , то обновить лучшее известное положение частицы  $y_i = x_i$ , иначе перейти к п. 4.

7. Если  $f(x_i) < f(y^*)$ , то обновить лучшее состояние роа  $y^* = x_i$ , иначе перейти к п. 4.

8. Текущее количество итераций  $N = N + 1$ .

9. Если текущее количество итераций  $N \geq N_{max}$ , то  $y^*$  содержит лучшее из найденных решений, иначе перейти к п. 4.

10. В соответствии с найденным решением инициализировать число кластеров  $K$  и их центры.

11. Определить принадлежность пикселя изображения кластеру, ближе к центру которого он находится, вычислив расстояние до его центра.

12. Рассчитать новые центры кластеров согласно (5). Если они не совпадают с предыдущими, то перейти к п. 11.
13. Сохранить лучшее решение для каждой частицы.
14. Сохранить лучшее решение среди всех  $m$  частиц.
15. Обновить кластерные центры согласно полученным решениям.
16. Если произошли изменения в кластерах, то перейти к п. 12.
17. Конец.

Алгоритм *PSO-k-means* может быть улучшен. Выше отмечалось, что множитель  $\omega$  в формуле (3) влияет на баланс между размерами поискового пространства и вниманием к найденным субоптимальным решениям. Если этот множитель больше 1, то скорости частиц увеличиваются, они разлетаются в стороны и исследуют пространство поиска оптимума более тщательно. Иначе скорости частиц со временем уменьшаются, и скорость сходимости зависит от выбора значений коэффициентов ускорения частиц  $c_p$  и  $c_g$ . Таким образом, большие значения коэффициента инерции способствуют исследованию пространства поиска, а малые – локализации решения. В [7] предлагалось линейно изменять множитель  $\omega$  от некоторого максимального значения  $\omega_{\max}$  до некоторого минимального значения  $\omega_{\min}$ :

$$\omega = (\omega - \omega_{\min}) \left( \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}} \right) + \omega_{\min}, \quad (8)$$

где  $n_{\max}$  – максимальное число итераций;  $n$  – номер текущей итерации. Рекомендуемые значения  $\omega_{\max} = 0,9$ ;  $\omega_{\min} = 0,4$ ; снижение значения  $\omega$  до  $\omega_{\min}$  производится за 1500 итераций.

Однако результат работы алгоритма *PSO-k-means* можно улучшить, если изменять весовой коэффициент инерции  $\omega$  экспоненциально:

$$\omega = (\omega - \omega_{\min}) e^{\left( \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}} \right) - 1} + \omega_{\min}, \quad (9)$$

Обозначим эту модификацию алгоритма через *EPSO*.

**Результаты экспериментов.** Проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма *PSO-k-means* и его модификации *EPSO*. Целью экспериментов являлся оптимальный выбор таких параметров гиперэвристики *PSO-k-means* и *EPSO*, как число частиц  $m$ , а также  $c_p$  и  $c_g$  – личного и глобального коэффициентов ускорения частиц, соответственно.

Для экспериментального тестирования использовался набор медицинских МРТ-изображений [3]. Все медицинские снимки были поделены на шесть групп: головной мозг; сердце; легкие; печень; костные структуры; другие.

Исследованием предусматривалось моделирование поведения *PSO-k-means* и *EPSO* с различными параметрами с целью определения влияния начальных параметров на сходимость алгоритмов, число итераций, степень идентичности результата обработки эталонному изображению. Для удобства проведения исследований были разработаны вспомогательные программные средства. Для выявления оптимального значения количества частиц  $m$  снимки исследовались при различных условиях (зашумленность, контрастность, размытость). Исследования проводились как в автоматическом, так и в интерактивном режиме.

В автоматическом режиме от пользователя требуется указать только количество частиц, максимальное число итераций и количество кластеров для сегментации. Проведенные эксперименты показали, что при размере изображения до  $50 \times 50$  пикселей рационально использовать не более 10 частиц для алгоритма *PSO-k-means* и не более 8 – для алгоритма *EPSO*. При больших значениях размера снимков (до  $800 \times 800$  пикселей) уместно брать не более 70 и 62 частиц, соответственно. Данные значения установлены экспериментальным путем и являются средними величинами, полученными при различных вариантах комбинаций начальных расстановок частиц.

Для выявления оптимальных значений коэффициентов  $c_p$  и  $c_g$ , снимки исследовались при различных начальных параметрах алгоритма, различных начальных размерах и условиях зашумленности, контрастности и размытости. В частности, при различных значениях  $m$  выполнялось разное число итераций и производился отбор лучшего решения. Для выяснения влияния параметров *PSO-k-means* и *EPSO* на общее число итераций были проведены сотни пусков алгоритмов с различным начальным количеством частиц. Выборка лучших решений производилась на основе формулы (5) и наименьшего числа итераций. Вывод: коррекция параметров алгоритма приводит к уменьшению количества его итераций и времени работы.

Для определения оптимальных значений коэффициентов  $c_p$  и  $c_g$  все шесть групп медицинских изображений были классифицированы в зависимости от качества снимков на следующие подтипы: зашумленность; контрастность, размытость; хорошее качество.

План экспериментов включал в себя выполнение для каждого изображения в группе до 100 запусков алгоритмов *PSO-k-means* и *EPSO*. Все результаты исследований сохранялись в базе данных. После получения необходимого объема экспериментальных данных, делался запрос к СУБД и производилось вычисление среднего арифметического коэффициентов для лучших решений для снимков одного подтипа. Статистика собиралась для всех групп изображений. Установлено, что оптимальные значения коэффициентов, определяющих поведение и эффективность алгоритмов *PSO-k-means* и *EPSO*, уменьшают количество итераций этих алгоритмов на 8,1% и 9,3%, соответственно.

**Выводы.** Аналитически обоснован подход к сегментации медицинских изображений посредством комбинированного алгоритма *PSO-k-means* и его модификации *EPSO*, позволяющих повысить качество и скорость обработки изображений по сравнению с известными алгоритмами. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными на основе бенчмарков МРТ-снимков. Установлено, что первичные центры кластеров не оказывают влияния на конечное решение для алгоритмов *PSO-k-means* и *EPSO*, а оптимальные значения коэффициентов, определяющих поведение и эффективность алгоритмов *PSO-k-means* и *EPSO*, уменьшают количество итераций этих алгоритмов на 8,1% и 9,3%, соответственно.

Результаты демонстрируют преимущество и подтверждают перспективность использования разработанных алгоритмов в системах цифровой обработки медицинских снимков для решения задачи сегментации изображений.

## Литература

1. Доронищева А.В., Савин С.З. Методы распознавания медицинских изображений для задач компьютерной автоматизированной диагностики // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14414> (Дата обращения: 27.02.2016).
2. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. М.: Физматлит, 2012. 260 с.
3. Медицинская система OsiriX [Электронный ресурс]. URL: <http://www.osirix-viewer.com> (Дата обращения: 04.04.2016).
4. Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А. Компьютерная система сегментации медицинских изображений методом роя частиц // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Информатика и моделирование. 2015. № 36. С. 147–154.
5. Эль-Хатиб С.А., Скобцов Ю.А. Система сегментации медицинских снимков методом муравьиных колоний // Научно-технические ведомости СПбПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2(217). С. 9–19.
6. Burke E.K., Kendall G. Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques. N.Y., Springer Science, 2014, part 20, pp. 611–623.
7. El-Desouky N., Ghali N., Zaki M. A new Approach to Weight Variation in Swarm Optimization. Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Conf. Al-azhar engineering, 2007. pp. 240–244.
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. Prentice-Hall, 2008, 954 p.
9. Guojun Gan, Chaogun Ma, Jianhong Wu. Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications. SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, 2007, 466 p.
10. Ilango M., Mohan V. A Survey of Grid Based Clustering Algorithms. *Int. Jour. of Eng. Science and Technology*, 2010, vol. 2(8), pp. 3441–3446.
11. Kennedy J., Eberhart R.C., Yuhui Shi. Swarm Intelligence. San Francisco, Morgan Kaufmann Publ., 2010, 512 p.
12. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimization. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, vol. 2008, pp. 1–10.
13. Pratt W.K. Introduction to Digital Image Processing. CRC Press, 2013, 756 p.
14. Rodzin S. Smart Dispatching and Metaheuristic Swarm Flow Algorithm. *Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 109–115.
15. Rui Xu, Wunsch D. Clustering. N.Y., John Wiley & Sons, 2009, 358 p.

---

**РОДЗИН СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ** – кандидат технических наук, профессор кафедры математического обеспечения применения ЭВМ, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, Россия, Таганрог ([srodzin@sfedu.ru](mailto:srodzin@sfedu.ru)).

**ЭЛЬ-ХАТИБ САМЕР АДНАН** – соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры математического обеспечения применения ЭВМ, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, Россия, Таганрог ([samer\\_elkhatib@mail.ru](mailto:samer_elkhatib@mail.ru)).

---

**S. RODZIN, S. EL-KHATIB**

**IMPROVING SEGMENTATION ALGORITHM  
MAGNETIC RESONANCE IMAGES BASED ON SWARM INTELLIGENCE**

*Key words:* particle swarm algorithm, cluster, optimization, distance, image segmentation.

*The formulation of the segmentation problem of medical magnetic resonance imaging is given. A hybrid swarm algorithm for its solution is proposed, which allows you to improve the quality and speed of the image processing. In solving the problem, we use the swarm intelligence method, cluster analysis, the theory of evolutionary computation, mathematical statistics, computer modeling and programming. The experimental results obtained on the data basis from the library of medical MRI images. The optimal values of*

*the parameters showing the behavior and the effectiveness of the algorithm are determined which allows to reduce the number of the algorithm iterations. The results demonstrate the promising use of the algorithm in digital medical imaging systems.*

#### References

1. Doronicheva A.V., Savin S.Z. *Metody raspoznavaniya meditsinskih izobrazheniy dlya zadach kompyuternoy avtomatizirovannoy diagnostiki* [Methods of Recognition of Medical Images for Computer Aided Diagnosis of Problems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14414>.
2. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. *Teoriya evolyutsionnykh vyichisleniy* [Theory of Evolutionary Computation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012, 260 p.
3. *Meditsinskaya sistema OsiriX* [Medical system OsiriX]. Available at: <http://www.osirix-viewer.com>.
4. Skobtsov Yu.A., El-Hatib S.A. *Kompyuternaya sistema segmentatsii meditsinskih izobrazheniy metodom roya chastiits* [Computer system of medical image segmentation method of particle swarm]. *Vestnik NTU "HPI". Seriya: Informatika i modelirovanie* [Vestnik NTU «KPI». Series: Computing and Modeling], 2015, no. 36, pp. 147–154.
5. El-Hatib S.A., Skobtsov Yu.A. *Sistema segmentatsii meditsinskih snimkov metodom muravinykh koloniy* [Segmentation System of Medical Images by Ant Colonies]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical statements STU. Informatics. Telecommunications. Control], 2015, no. 2(217), pp. 9–19.
6. *Burke E.K., Kendall G. Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. N.Y., Springer Science, 2014, part 20, pp. 611–623.
7. *El-Desouky N., Ghali N., Zaki M. A new Approach to Weight Variation in Swarm Optimization*. Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Conf. Al-azhar engineering, 2007, pp. 240–244.
8. *Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing*. Prentice-Hall, 2008, 954 p.
9. *Guojun Gan, Chaoqun Ma, Jianhong Wu. Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*. SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, 2007, 466 p.
10. *Ilango M., Mohan V. A Survey of Grid Based Clustering Algorithms*. *Int. Jour. of Eng. Science and Technology*, 2010, vol. 2(8), pp. 3441–3446.
11. *Kennedy J., Eberhart R.C., Yuhui Shi. Swarm Intelligence*. San Francisco, Morgan Kaufmann Publ., 2010, 512 p.
12. *Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimization*. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, vol. 2008, pp. 1–10.
13. *Pratt W.K. Introduction to Digital Image Processing*. CRC Press, 2013, 756 p.
14. *Rodzin S. Smart Dispatching and Metaheuristic Swarm Flow Algorithm*. *Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 109–115.
15. *Rui Xu, Wunsch D. Clustering*. N.Y., John Wiley & Sons, 2009, 358 p.

---

**RODZIN SERGEY – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Mathematical Support of Computer Applications, Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University, Russia, Taganrog (srodzin@sfnu.ru).**

**EL-KHATIB SAMER ADNAN – Aspirant Candidate of Technical Sciences, Department of Mathematical Support of Computer Applications, Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University, Russia, Taganrog (samer\_elkhatib@mail.ru).**

---

**Ссылка на статью:** *Родзин С.И., Эль-Хатиб С.А. Совершенствование алгоритмов сегментации магнитно-резонансных изображений на основе роевого интеллекта // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 217–226.*

УДК 519.7

ББК 74

Р.Р. ФАТХУЛЛИН, И.Г. СИДОРКИНА

## АЛГОРИТМ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

**Ключевые слова:** оценка качества образования, информационная энтропия, свертка критериев, алгоритм оценки качества деятельности образовательных организаций, математическая модель оценки качества, образовательная квалиметрия.

Одной из ведущих тенденций развития образования в мире в настоящее время является создание системы комплексной оценки качества образования. Сегодня активно разрабатываются подходы к определению качества образования, исследуются различные его аспекты, индикаторы и показатели. Комплексная оценка качества деятельности образовательных организаций – это многоэтапная задача, для решения которой необходимо установить алгоритм и процедуру их оценки. В данной статье предложены алгоритм и математическая модель (квалиметрическая) комплексной оценки качества деятельности образовательных организаций региональной системы образования. Математическая модель основана на информационной энтропии и предусматривает использование свертки показателей качества в интегрированную комплексную оценку. При реализации данной математической модели могут вырасти такие важные качественные показатели комплексной оценки качества деятельности образовательных организаций, как объективность оценки, масштабируемость, простота и удобство использования. Полученные результаты могут широко использоваться при комплексной оценке качества деятельности образовательных организаций на различных уровнях и типах образования.

В субъектах Российской Федерации (РФ) в течение нескольких последних лет в рамках реализации целевых программ развития системы образования происходит активный процесс формирования региональной системы оценки качества образования (РСОКО), которая рассматривается как составная часть общероссийской системы оценки качества образования. РСОКО формируется как сбалансированная система оценочных технологий и процедур оценки качества образования, осуществляемых на различных уровнях и с участием различных субъектов РФ.

Под качеством образования следует понимать интегральную характеристику системы образования, отражающую степень соответствия реальных достигаемых образовательных результатов и условий обеспечения образовательного процесса личностным ожиданиям субъектов образования, социальным запросам и государственно-нормативным требованиям. Оценка качества образования подразумевает оценку качества деятельности образовательных организаций (ОО), муниципальных образовательных систем, образовательных программ, индивидуальных образовательных достижений и деятельности педагогических работников с учетом таких аспектов, как условия, процессы и результаты.

Таким образом, актуальной становится задача построения математической модели оценки качества деятельности системы региональных ОО, которая на более объективной основе предоставляла бы возможность управления

ОО субъекта РФ. Математическая модель – это «эквивалент объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д.» [4]. Обычно существует в триадах «модель-алгоритм-программа» [3].

Алгоритм математической модели оценки качества деятельности системы ОО с позиции оценки показателей качества состоит из следующих этапов (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм комплексной оценки качества ОО

**1. Определение цели оценки.** Оценка качества деятельности ОО может проводиться в разных целях. В зависимости от цели оценки меняются подходы к выбору показателей качества ОО. Так, например, при оценке качества образовательной деятельности на данном этапе возможно решение следующих задач: принятие обоснованных управленческих решений, выявление факторов, влияющих на повышение качества образования обучаемых, определение рейтинга ОО и стимулирующих выплат педагогическим работникам по результатам оценки и т.д. При этом важная задача мониторинговых исследований – собрать необходимую достоверную информацию для достижения данных целей.

**2. Кластеризация ОО.** При оценке качества деятельности ОО следует учитывать степень взаимосвязи (корреляции) объектов образовательной системы. Качество различных ОО, разделенных между собой по типу, территориально, количеству обучающихся и т.п., не рекомендуется сравнивать, так как в данном случае оценка будет необъективной. Поэтому необходимо вы-

явить ОО с высокой степенью взаимосвязи и объединить их в образовательные кластеры. Образовательный кластер представляет собой совокупность ОО, имеющих наиболее близкую степень взаимосвязи. Степень взаимосвязи характеризуется коэффициентом  $w$ .

Пусть задано конечное множество  $O$  элементарных объектов региональной образовательной системы. Под элементарными объектами  $o$  рассмотрим ОО, входящие в совокупность региональной системы образования. Объекты являются однородными и образуют множество:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}, \quad (1)$$

где  $o$  – ОО;  $n$  – количество ОО исследуемой образовательной системы.

При оценке качества образования важным аспектом является однородность ОО по отношению друг к другу, т.е. они характеризуются определенной системой однотипных индикаторов и показателей. Исходную информацию о системе однородных ОО в образовательном кластере можно представить в виде следующей матрицы  $C$ :

$$C = \{o_{ij}(c_i); i = \overline{1, M}; j = \overline{1, d^C}\}, \quad (2)$$

где  $c_i$  – образовательный кластер;  $d^C$  – максимальное количество ОО, входящих в один образовательный кластер;  $o_{ij}(c_i)$  –  $i$ -й объект  $j$ -го образовательного кластера;  $M$  – количество кластеров.

Для расчета степени взаимосвязи ОО предлагается использовать коэффициент множественной качественной конкордации [5]:

$$W(O) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^m |x'_{ih} - x'_{jh}|}{nm(m-1)}, \quad (3)$$

где  $x'$  – значение нормированного показателя качества;  $n$  – количество ОО;  $m$  – количество показателей.

Расчет данного коэффициента позволяет сгруппировать ОО по кластерам в соответствии с выбранным пороговым значением коэффициента конкордации. Условие отбора однородных ОО по кластерам:

$$w(o_i) \geq \lambda, \quad (4)$$

где  $w(o_i)$  – коэффициент взаимосвязи;  $\lambda$  – пороговое значение (коэффициент конкордации).

$$C = \left( \begin{array}{c|cccc} c_1 & o_{11} & o_{12} & \dots & o_{1N} \\ c_2 & o_{21} & o_{22} & \dots & o_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_M & o_{M1} & o_{M2} & \dots & o_{MN} \end{array} \right), \quad (5)$$

где  $c_M$  – образовательный кластер;  $M$  – количество кластеров;  $N$  – количество ОО в кластере;  $o_{MN}$  – ОО  $M$ -го кластера.

Если для  $j$ -го ОО количество смежных с ним объектов меньше  $d^C$ , то оставшиеся элементы  $j$ -й строки матрицы  $C$  заменяются нулями.

**3. Определение номенклатуры показателей качества.** Все ОО характеризуются системой показателей (количественные характеристики)  $x$ , характеризующих их свойства и степень взаимосвязи с другими ОО образовательной системы. Введем в рассмотрение вектор показателей  $X$  деятельности ОО, отражающий наиболее важные характеристики рассматриваемого объекта:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, \quad (6)$$

где  $x$  – значение показателя качества;  $m$  – число показателей качества системы.

Матрица количественных характеристик:

$$X = \{x_{ij}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, d^X}\}, \quad (7)$$

где  $x_{ij}$  – значение  $j$ -й количественной характеристики  $i$ -го ОО;  $d^X$  – число характеристик;  $m$  – число показателей качества системы.

Исходную информацию о системе однородных ОО можно представить в виде следующей матрицы:

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $X \in R^m$ ;  $t \in R^1$ ;  $R^m$  –  $m$ -мерное евклидово пространство;  $n$  – количество ОО;  $m$  – количество показателей качества ОО;  $x_{ij}$  – значение  $j$ -го показателя для  $i$ -го ОО;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $t$  – момент времени, на который строится срез данных.

**4. Определение значений базовых и единичных показателей качества.** На данном этапе определяются значения базовых  $x_i^*$  и единичных показателей  $x_i$  для каждого  $i$ -го показателя качества. Обычно значения базовых показателей подбираются на основе выбора базового образца ОО. В случае если базовый образец по данному показателю определить сложно, необходимо назначить интервалы  $x^{\min}$  и  $x^{\max}$  допустимого изменения значений абсолютных показателей отдельных характеристик объекта оценки.

**5. Нормирование показателей качества.** Оперировать с величинами (вычислять суммы, сравнивать друг с другом) можно только тогда, когда они соизмеримы, т.е. сведены к единой мере (в некоторых случаях нужно оценивать одновременно компьютеры и преподавателей, в других – квадратные метры школьных классов и часы, отведенные на практические занятия). Предлагается использовать подход на основе статистики качества [6]. Чтобы избежать данных несоответствий, оценки по показателям делают безразмерными, чтобы они принимали значения от 0 до 1, т.е. значение показателя разбивается на одно и то же число интервалов, и номер интервала, в который попадает значение показателя, определяет значение меры качества данного показателя. Один из способов нормирования по эталону, который имеет вид:

$$x'_i = \frac{x_i}{x_i^*}, \quad (9)$$

где  $x'_i$  – нормированное значение  $i$ -го показателя;  $x_i^*$  – эталонное значения  $i$ -го показателя;  $x_i$  – значения  $i$ -го показателя;  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Часть показателей имеет негативное влияние. Следовательно, показатель требуется не максимизировать, а минимизировать. Например, показатель «численность выпускников 11 класса, получивших результаты ниже установленного минимального количества баллов»<sup>1</sup>. Тогда необходимо взять обратную величину, т.е. отношение эталонного значения к измеренному:

$$x'_i = \frac{x_i^*}{x_i}. \quad (10)$$

В случае если базовый показатель определить сложно, необходимо назначить интервалы  $x^{\min}$  и  $x^{\max}$  допустимого изменения значений абсолютных показателей отдельных характеристик объекта оценки:

$$x'_i = \frac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}; \quad (11)$$

$$x'_i = \frac{x_i - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, \quad (12)$$

где  $x_i$  – значения  $i$ -го показателя;  $x_i^{\min}$ ,  $x_i^{\max}$  – минимально и максимально возможные значения  $i$ -го показателя качества, соответственно.

Получаем матрицу нормированных значений показателей качества:

$$X'(t) = \begin{pmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \dots & x'_{1m} \\ x'_{21} & x'_{22} & \dots & x'_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \dots & x'_{nm} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $n$  – количество ОО;  $m$  – количество показателей качества;  $x'_{ij}$  – значение нормированного аналога качества  $i$ -го показателя для  $j$ -й ОО;  $t$  – момент времени, на который строится срез данных.

**6. Определение значимости показателей качества.** На данном этапе в зависимости от выбора метода свертки показателей качества, выбирается способ определения значимости показателей качества.

**6.1. Выбор метода нахождения коэффициентов весомости показателей качества.** В данном случае используется метод определения значимости показателей качества через информационную энтропию. В других случаях способ определения значимости показателей качества зависит от выбора метода свертки показателей в комплексную оценку.

**6.2. Расчет значимости показателей качества.** Оценка качества ОО с помощью энтропии, т.е. с помощью оценки его неопределенности (неупорядоченности) имеет ценность в том, что чем больше «определенность» исследуемого образовательного объекта, тем больше известен объем информации об объекте образования. Следовательно, чем больше осуществляется взаимодействие с ним, тем качество данного образовательного объекта выше. Оценим качество ОО в единицах измерения количества информации (величины энтропии) [2].

<sup>1</sup> Об утверждении показателей деятельности образовательной организации, подлежащей самообследованию: приказ Министерства образования и науки РФ от 28.01.2014 г. № 1324 // Рос. газета. Фед. выпуск. 2014. № 6310, 19 фев.

Для определения значимости показателей качества используем функцию информационной энтропии [7], зависящую от частоты появления события (собственная информация случайной величины). Энтропия – это количество информации, приходящейся на одно элементарное сообщение источника, вырабатывающего статистически независимые сообщения [7]. Собственная информация – статистическая функция дискретной случайной величины. Собственная информация является случайной величиной, которую следует отличать от ее среднего значения – информационной энтропии. Определим энтропию случайной величины, введя предварительно понятия распределения случайной величины  $X$ , имеющей конечное число значений (индикаторов или показателей) [1]:

$$P_X(x_i) = p_i = \frac{k_i}{K}, \quad p_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1, \quad (15)$$

где  $P_X$  – распределение случайной величины  $X$ ;  $k_i$  – относительная частота (вероятность) наступления события  $X$ ;  $p_i$  – количество благоприятного наступления события  $X$ ;  $K$  – общее количество событий, и собственной информации:

$$I(X) = -\log P_X(X). \quad (16)$$

По К. Шеннону, информационная энтропия  $H$  для независимых случайных событий  $x$  с  $m$  возможными состояниями (от 1 до  $m$ , где  $p$  – функция вероятности) рассчитывается по формуле [7]:

$$H(X) = E(I(X)) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i, \quad (17)$$

или, что тождественно:

$$H(X) = \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p \left( \frac{1}{p_i} \right). \quad (18)$$

Энтропия является количеством, определенным в контексте вероятностной модели для источника данных. Заметим, что для источника информации, который генерирует данные, состоящие только из одинаковых показателей, энтропия равна нулю:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m \log_2 1 = 0. \quad (19)$$

Смысл и результативность данной формулы не изменятся, если заменить логарифм по основанию два натуральным логарифмом, тогда информационная энтропия равна:

$$H_j(X) = \sum_{i=1}^m p_i \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right) = c \sum_{i=1}^m p_i \ln \left( \frac{1}{p_i} \right), \quad (20)$$

где  $p_i$  – вероятность наступления события;  $H(X)$  – количество информации о событии (информационная энтропия, значимость)  $j$ -го показателя качества;  $j$  – порядковый номер показателя для  $i$ -го образовательного объекта.

Величина  $H(X)$  дает количество информации о событии, вероятность наступления которого равна  $p_i$ . Таким образом, количество информации о событии определяется как величина, обратно пропорциональная вероятности наступления события. Итак, информация и энтропия – понятия, которые, с одной стороны, представляют объективные характеристики процессов и явлений образовательных объектов, с другой – отражают потребности человека и, следовательно, могут быть использованы для характеристики качества ОО.

**7. Расчет комплексной оценки уровня качества ОО.** ОО как система характеризуется интегральным показателем качества, который нельзя непосредственно вывести из отдельных показателей деятельности, образующих ее, и не является просто суммой данных компонентов. В данном методе интегральное качество ОО на данном этапе его функционирования находится не как простая сумма качеств ее элементов, а ранжируется как интегральная сумма вида:

$$q_i = \sum_{j=1}^m x'_{ij} H_j, \quad (21)$$

где  $q_i$  – интегральная оценка  $i$ -й ОО;  $x'_{ij}$  – значение нормированного показателя качества (нормированная оценка)  $i$ -го объекта по  $j$ -му показателю;  $H_j$  – некоторый коэффициент, который зависит от степени влияния каждого образовательного фактора и который является тем самым не субъективным (назначенным экспертом), а объективным, полученным из статистических зависимостей коэффициентом значимости каждой характеристики на данном этапе функционирования образовательной системы;  $m$  – количество показателей оценки образовательного объекта.

Матрицу оценок однородных объектов образовательной системы можно представить в следующем виде:

$$Q = \{q_{ij}; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, d^O}\}, \quad (22)$$

где  $q_{ij}$  – интегральная оценка  $j$ -й ОО  $i$ -го образовательного кластера;  $d^O$  – количество ОО в  $i$ -м образовательном кластере;  $M$  – число образовательных кластеров.

На основании выражений (1)–(22) получаем математическую модель оценки показателей качества деятельности системы однородных ОО:

$$Q(x') = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \frac{k_j}{K} \ln \left( \frac{K}{k_j} \right) \right) x'_{ij}, \quad (23)$$

где  $K$  – общее число событий ( $K = m$ );  $k_j$  – число благоприятного наступления события  $X$ ;  $x'_{ij}$  – значение нормированного показателя качества;  $n$  – количество ОО;  $m$  – количество показателей качества.

### **8. Анализ полученной оценки качества ОО и принятие решения.**

**Выводы.** В работе предложен алгоритм комплексной оценки качества деятельности ОО, включающий в себя следующие этапы: определение цели оценки качества образования, кластеризацию ОО, выбор номенклатуры пока-

зателей качества, определение значений и нормирование показателей качества, определение значимости показателей качества, расчет комплексной оценки для каждой ОО, а также анализ полученной информации. На основе предложенного алгоритма оценки разработана универсальная математическая (квалиметрическая) модель оценки качества деятельности ОО, основанная на информационной энтропии, позволяющая представить в комплексном виде всю региональную систему образования в различных сферах образовательной деятельности, как в целом по субъекту РФ, так и муниципальному образованию и отдельным ОО региона.

#### Литература

1. Габидулин Э.М., Пиличук Н.И. Лекции по теории информации. М.: МФТИ, 2007. 214 с.
2. Денисова А.Л., Зайцев Е.В., Молоткова Н.В. Информационная основа потребительской оценки товаров и услуг: современные методы и подходы [Электронный ресурс]. URL: [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/019/38019/15817?p\\_page=2](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/019/38019/15817?p_page=2) (Дата обращения: 20.06.2016).
3. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
4. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
5. Фатхуллин Р.Р. Топометрика сходства образовательных объектов // Электронное обучение в непрерывном образовании 2015: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Ульяновск, 16–18 марта 2015 г): в 2 т. / Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2015. Т. 2. С. 170–174.
6. Фатхуллин Р.Р. Обоснование инвариантности решений, основанных на образовательной квалиметрии и теории нейронных сетей при оценке качества деятельности образовательных организаций // ВВ: Кибернетика и программирование. 2014. № 6. С. 33–73. DOI: 10.7256/2306-4196.2014.6.13477. URL: [http://e-notabene.ru/kp/article\\_13477.html](http://e-notabene.ru/kp/article_13477.html).
7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 2002.

---

**ФАТХУЛЛИН РОБЕРТ РИФОВИЧ** – аспирант кафедры прикладной математики и информатики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола ([fatkhullin.robert@gmail.ru](mailto:fatkhullin.robert@gmail.ru)).

**СИДОРКИНА ИРИНА ГЕННАДЬЕВНА** – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола ([igs592000@mail.ru](mailto:igs592000@mail.ru)).

---

#### R. FATKHULLIN, I. SIDORKINA ALGORITHM AND MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX QUALITY ASSESSMENT OF EDUCATIONAL ORGANIZATIONS

**Key words:** *quality assessment of education, informational entropy, criteria convolution, quality assessment algorithm of educational organizations, mathematical model of quality assessment, educational qualimetry.*

*One of the major trends in the development of education in the world at the moment is to create a comprehensive system of quality assessment of education. Today approaches to determining the quality of education are actively developed, its various aspects, indicators and indices are investigated. The integrated assessment of the effectiveness of educational institutions is a multi criteria problem for which solution it is necessary to establish criteria and procedures for its evaluation. In this article, the algorithm and mathematical model (qualimetric) the comprehensive quality assessment of educational organi-*

zations of the regional education system are proposed. The mathematical model is based on the information entropy, and involves the use of convolution quality indicators into the integrated comprehensive assessment. During the realization of this mathematical model such important quality indicators of complex assessment of the activity quality of educational organizations as objectivity of assessment, scalability, simplicity and usability can grow. The obtained results can be widely used in the integrated quality assessment of educational organizations at the various levels of education.

#### References

1. Gabidulin E.M., Pilipchuk N.I. *Leksii po teorii informatsii* [Lectures on the theory of information]. Moscow, MFTI Publ., 2007, 214 p.
2. Denisova A.L., Zaitsev E.V., Molotkova N.V. *Informatsionnaya osnova potrebitel'skoi otsenki tovarov i uslug: sovremennye metody i podkhody* [Information-based consumer evaluations of products and services: modern methods and approaches]. Available at: [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/019/38019/15817?p\\_page=2](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/019/38019/15817?p_page=2) (Accessed 20 June 2011).
3. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery. 2-e izd., ispr.* [Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples. 2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 320 p.
4. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie sistem. 3-e izd., pererab. i dop.* [Modeling of systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p.
5. Fatkhullin R.R. *Topometrika skhodstva obrazovatel'nykh ob"ektov* [Topometric similarities of educational facilities]. *Elektronnoe obuchenie v nepreryvnom obrazovanii 2015: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Rossiya, Ul'yanovsk, 16–18 marta 2015 g): v 2 t.* [Proc. of Int. Proc. «E-learning in continuing education 2015»]. Ul'yanovsk, 2015, vol. 2, pp. 170–174.
6. Fatkhullin R.R. *Obosnovanie invariantnosti reshenii osnovannykh na obrazovatel'noi kvalimetrii i teorii neironnykh setei pri otsenke kachestva deyatel'nosti obrazovatel'nykh organizatsii* [Justification invariance solutions based on educational qualimetry and neural net theory in quality assessment of activities educational organizations]. *NB: Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2014, no. 6, pp. 33–73. DOI: 10.7256/2306-4196.2014.6.13477. Available at: [http://e-notabene.ru/kp/article\\_13477.html](http://e-notabene.ru/kp/article_13477.html).
7. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Work on the theory of information and Cybernetics]. Moscow, 2002.

---

**FATKHULLIN ROBERT – Post-Graduate Student of Applied Mathematics and Informatics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola.**

**SIDORKINA IRINA – Doctor of Technical Sciences, Professor of Information Security Department, Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola.**

---

**Ссылка на статью:** *Фатхуллин Р.Р., Сидоркина И.Г.* Алгоритм и математическая модель комплексной оценки качества деятельности образовательных организаций // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 227–235.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Чувашского университета» просит авторов руководствоваться нижеприведенными правилами.

**1.** Авторские оригиналы представляются на бумажном и электронном носителе. Авторский текстовый оригинал должен быть пронумерован и подписан авторами на титульном листе с указанием даты.

**2.** К статьям, направляемым в редакцию, прилагаются:

- 1) *заявление автора на имя главного редактора;*
- 2) *анкета авторов;*
- 3) *две внешние рецензии;*
- 4) *ходатайство научного руководителя;*
- 5) *экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.*

**3.** Авторы должны указать рубрику, в которой следует поместить статью.

### **4. Оформление статьи:**

- 1) *классификационные индексы Универсальной десятичной классификации (УДК), Библиотечно-библиографического классификатора (ББК);*
- 2) *инициалы и фамилия авторов;*
- 3) *название статьи;*
- 4) *ключевые слова;*
- 5) *аннотация статьи;*
- 6) *название статьи, инициалы и фамилия автора на английском языке;*
- 7) *ключевые слова на английском языке;*
- 8) *аннотация на английском языке;*
- 9) *текст статьи;*
- 10) *пристатейный библиографический список;*
- 11) *транслитерированный библиографический список References;*
- 11) *сведения об авторе.*

Авторские оригиналы подготавливаются с помощью компьютера в среде Microsoft Word (файлы типа doc). Формат бумаги А4, поля: справа и слева 4 см, сверху 4,5 см, снизу 5,7 см, от края до верхнего колонтитула 3 см, красная строка 0,75 см. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размера 11 пт через 1 интервал.

Текст статьи представляется в двух экземплярах с приложением файла в электронном виде.

**5. Рисунки.** Количество рисунков не более 4. На рисунки должны быть ссылки. Рисунки должны быть внедрены в режиме Вставка Объект Рисунок Microsoft Word. Подрисуночные подписи выполняются шрифтом размера 9 пт.

**6. Формулы и буквенные обозначения по тексту.** Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Шрифт для греческих букв – Symbol, для всех остальных – Times New Roman, основной размер 11 пт, крупный индекс 7 пт, мелкий 5 пт.

Латинские буквы набираются курсивом, буквы греческого алфавита и кириллицы – прямым шрифтом, обозначения матриц, векторов, операторов – прямым полужирным шрифтом.

Формулы располагаются по центру страницы. Номер формулы ставится у правого края. Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

При выборе единиц физических величин рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

**7. Таблицы.** Текст в таблицах набирается шрифтом размером 9 пт, заголовки выделяются полужирным шрифтом. На таблицы должны быть ссылки.

**8. Список литературы.** Список строится по алфавиту, записи рекомендуется располагать сначала на языке издания, в которое включен список, затем на других языках. Источники набираются шрифтом Times New Roman размера 9 пт. При оформлении списка литературы необходимо руководствоваться ГОСТом Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления».

Ссылки на источники в тексте даются в квадратных скобках, например [1], [1. С. 5].

**9. Список References.** Транслитерацию русского текста в латиницу следует производить в соответствии со стандартом BSI.

**10. Сведения об авторах** набираются полужирным шрифтом размера 10 пт *на русском и английском языках в именительном падеже* по следующей форме: *Фамилия, имя, отчество – ученая степень, должность, место работы, страна, город. Контактная информация (e-mail).*

**11.** Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, возвращаются без рассмотрения. Возвращение рукописи автору на доработку не означает, что статья принята к печати. После получения доработанного текста рукопись вновь рассматривается редколлегией. Доработанный текст автор должен вернуть вместе с первоначальным экземпляром статьи, а также ответами на все замечания. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

**12.** Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**13.** В одном номере журнала может быть опубликовано, как правило, не более двух статей одного автора, в том числе в соавторстве.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

<b>Афанасьев А.А., Нгуен Конг Там</b> Беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с комбинированным проводом .....	5
<b>Ашмарин В.В., Никитина О.А., Руссова Н.В., Свинцов Г.П.</b> Расчет размеров форсированного броневоего электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором, минимизирующих массу его активных материалов .....	13
<b>Аюурзана Э., Мамбетжанов А.Д., Такырбашев Б.К., Джамагидзе Д., Петров М.И., Кузьмин А.А.</b> Оценка составляющих тока однофазного замыкания на землю при проведении натуральных экспериментов в сетях среднего класса напряжения различного назначения .....	21
<b>Гуцин И.А.</b> Аналитическая модель растекания тока молнии по проводящему композиционному материалу .....	30
<b>Ильгачёв А.Н.</b> Аналитико-численный метод расчета характеристик электрического поля ванны многоэлектродных печей .....	36
<b>Ильгачёв А.Н.</b> Частичные проводимости схем замещения ванны прямоугольных руднотермических печей и их связь с входными сопротивлениями ванны .....	50
<b>Канюгин О.И., Макарова Н.Л.</b> Стратегия обслуживания силовых трансформаторов в сельских электрических сетях 10 кВ по результатам диагностирования .....	58
<b>Кипервассер М.В., Гуламов Ш.Р.</b> Разработка системы защиты гидроагрегатов, работающих на автономную нагрузку, от механических поломок .....	68
<b>Малинин Г.В., Серебрянников А.В.</b> Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи .....	76
<b>Никитина О.А.</b> Синтез минимизированного по высоте форсированного броневоего электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме управления с балластным резистором .....	94
<b>Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А.</b> Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети .....	100
<b>Петров М.В., Аврелькин В.А.</b> Магнитно-импульсная обработка заготовок типа оболочки вращения .....	109

<b>Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., Калинин А.Г.</b> Адаптивное управление режимом теплоснабжения здания с помощью автоматизированного теплового пункта .....	117
<b>Тарасов В.А., Калинин А.Г., Тарасова В.В., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г.</b> Динамические тепловые характеристики ограждающих конструкций.....	124
<b>Щедрин В.А., Воронов П.Л.</b> Представление параметров режима электротехнических комплексов и сетей в пространственно-временной системе физических величин .....	132
<b>Ядарова О.Н., Федоров Е.О., Гильденберг Б.М., Сучков В.О., Славутский Л.А.</b> Комплексный контроль параметров регулирования системы вентиляции с заслонками.	149

---

### **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<b>Абруков В.С., Кочергин А.В., Ануфриева Д.А.</b> Искусственные нейронные сети как средство обобщения экспериментальных данных.....	155
<b>Бобин Д.В.</b> Разработка математической базы информационно-аналитической системы оценки энергоэффективности региона.....	163
<b>Галанина Н.А., Иванова Н.Н., Щипцова А.В.</b> Сравнительный анализ результатов вычисления спектров цифровых сигналов в традиционной позиционной системе счисления и при их кодировании остатками системы остаточных классов.....	169
<b>Галанина Н.А., Песошин В.А., Иванова Н.Н.</b> Использование модулярной арифметики при синтезе нерекурсивных цифровых фильтров, устойчивых к одиночным ошибкам .....	180
<b>Звездин В.В., Песошин В.А., Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р.</b> Управление лазерным технологическим комплексом закалки инструмента.....	188
<b>Иванов С.О., Ильин Д.В., Ильина Л.А., Назарова О.В.</b> Имитационное моделирование средств защиты информации, соответствующих общим критериям Международного стандарта ISO/IEC 15408.....	194
<b>Обухов А.В., Ляшева С.А., Шлеймович М.П.</b> Методы автоматического распознавания автомобильных номеров.....	201
<b>Порядин А.Е., Сидоркина И.Г., Роженцов В.В.</b> Компьютерная технология тренировки технических приемов в спортивных играх .....	209
<b>Родзин С.И., Эль-Хатиб С.А.</b> Совершенствование алгоритмов сегментации магнитно-резонансных изображений на основе речевого интеллекта .....	217
<b>Фатхуллин Р.Р., Сидоркина И.Г.</b> Алгоритм и математическая модель комплексной оценки качества деятельности образовательных организаций.....	227
<b>ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ.....</b>	236

CONTENTS

---

*ELECTRICAL TECHNOLOGY AND POWER ENGINEERING*

---

*Afanasyev A., Nguyen Cong Tam*  
SLOTLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH COMBINED WIRE ..... 5

*Ashmarin V., Nikitina O., Russova N., Svintsov G.*  
CALCULATING DIMENSIONS OF FORCED ARMORED DC ELECTROMAGNET  
WITH PLUNGING ARMATURE IN SCHEME WITH BALLAST RESISTOR,  
MINIMIZING WEIGHT OF ITS ACTIVE MATERIALS ..... 13

*Ayurzana E., Mambetzhano A., Takyrbashev B., Dzhamagidze J., Petrov M., Kuzmin A.*  
ASSESSMENT OF CURRENT COMPONENTS OF SINGLE-PHASE EARTHINGS  
DURING FIELD EXPERIMENTS IN MEDIUM-VOLTAGE FOR VARIOUS PURPOSES ..... 21

*Gushchin I.*  
ANALYTICAL MODEL OF SPREADING OF LIGHTNING CURRENT VIA CONDUCTING  
COMPOSITE MATERIAL ..... 30

*Ilgachev A.*  
ANALYTICAL NUMERICAL METHOD TO CALCULATE MULTIELECTRODE FURNACES  
BATH OF ELECTRIC FIELD CHARACTERISTICS ..... 36

*Ilgachev A.*  
DIRECT ADMITTANCES OF RECTANGULAR ORE-THERMAL FURNACES BATH  
EQUIVALENT CIRCUITS AND THEIR CONNECTION WITH BATH INPUT RESISTANCES ..... 50

*Kanyugin O., Makarova N.*  
MAINTENANCE STRATEGY OF POWER TRANSFORMERS  
IN RURAL ELECTRIC NETWORKS OF 10 kV ACCORDING TO RESULTS OF DIAGNOSTICS ... 58

*Kipervasser M., Gulamov Sh.*  
DEVELOPING OF HYDRAULIC UNIT PROTECTION SYSTEM WORKING  
ON AN AUTONOMOUS LOAD TO AVOID MECHANICAL FAILURES ..... 68

*Malinin G., Serebryannikov A.*  
MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PV ARRAY ..... 76

*Nikitina O.*  
SYNTHESIS OF FORCED ARMORED ELECTROMAGNET OF DC VOLTAGE MINIMIZED  
ON HEIGHT IMPLEMENTING WITH TAKING ROOT ANCHOR  
IN SCHEME WITH BALLAST RESISTOR ..... 94

*Orlov A., Volkov S., Savelyev A.*  
ANALYSIS OF INFLUENCE OF LOAD BALANCING UNIT ON INDICATORS  
OF POWER SUPPLY UNBALANCE ..... 100

*Petrov M., Avrelkin V.*  
MAGNETIC PULSE MACHINING OF SHELL ROTATION TYPE ..... 109

*Tarasova V., Afanasyev V., Kovalev V., Tarasov V., Kalinin A.*  
EXPERIMENTAL STUDIES IN AUTOMATED THERMAL POINTS OF HEATING MODE ..... 117

*Tarasov V., Kalinin A., Tarasova V., Afanasyev V., Kovalev V.*  
DYNAMIC THERMAL PERFORMANCE OF FENCING STRUCTURES ..... 124

<b>Shchedrin V., Voronov P.</b> PRESENTATION MODE PARAMETERS ELECTRO-TECHNICAL COMPLEXES AND NETWORKS IN SPACE-TIME SYSTEM OF PHYSICAL QUANTITIES.....	132
<b>Yadarova O., Fedorov E., Gildenberg B., Suchkov V., Slavutskii L.</b> COMPLEX PARAMETERS CONTROL TO REGULATE FAN SYSTEM WITH SHUTTERS .....	149

---

**INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL**

<b>Abrukov V., Kochergin A., Anufrieva D.</b> ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AS A MEANS OF GENERALIZATION OF EXPERIMENTAL DATA .....	155
<b>Bobin D.</b> DEVELOP A MATHEMATICAL BASE OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR RATING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE REGION .....	163
<b>Galanina N., Ivanova N., Shchiptsova A.</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF CALCULATION OF THE SPECTRA OF THE DIGITAL SIGNALS PROCESSING IN THE TRADITIONAL POSITIONAL NUMBER SYSTEM AND ITS ENCODING RESIDUES OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM .....	169
<b>Galanina N., Pesoshin V., Ivanova N.</b> THE USE OF MODULAR ARITHMETIC IN THE SYNTHESIS OF NON-RECURSIVE DIGITAL FILTERS, RESISTANT TO SINGLE ERROR.....	180
<b>Zvezdin V., Pesoshin V., Saubanov R., Rakhimov R.</b> CONTROL OF LASER TECHNOLOGICAL COMPLEX OF INSTRUMENT HARDENING .....	188
<b>Ivanov S., Ilin D., Ilina L., Nazarova O.</b> SIMULATION OF DATA PROTECTION TOOLS CORRESPONDING TO COMMON CRITERIA OF INTERNATIONAL STANDARD ISO / IEC 15408 .....	194
<b>Obukhov A., Lyasheva S., Shleymovich M.</b> THE METHODS OF AUTOMATIC LICENSE PLATE RECOGNITION .....	201
<b>Poryadin A., Sidorkina I., Rozhentcov V.</b> COMPUTER TECHNOLOGY TRAINING TECHNIQUES IN SPORTS .....	209
<b>Rodzin S., El-Khatib S.</b> IMPROVING SEGMENTATION ALGORITHM MAGNETIC RESONANCE IMAGES BASED ON SWARM INTELLIGENCE .....	217
<b>Fatkhullin R., Sidorkina I.</b> ALGORITHM AND MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX QUALITY ASSESSMENT OF EDUCATIONAL ORGANIZATIONS.....	227
<b>RULES FOR THE AUTHORS</b> .....	236

## **ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Технические науки**  
**№ 3 2016**

Редактор *Н.И. Завгородняя*  
Технический редактор *Н.Н. Иванова*

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзоре)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-66541 от 21.07.2016 г.

Сдано в набор 02.08.16. Подписано в печать 19.06.16. Выход в свет 26.09.16.  
Формат 70×100/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 19,1.

Тираж 200 экз. Заказ № 1053. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя  
428015, Чебоксары, Московский просп., 15

Типография Чувашского университета  
428015, Чебоксары, Московский просп., 15