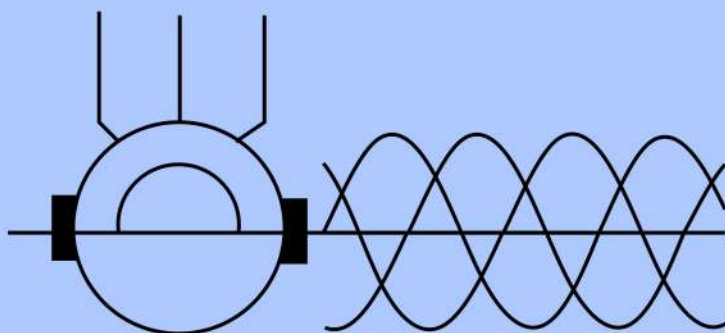
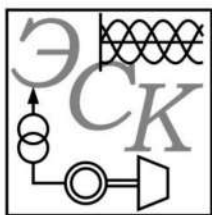


ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№2(47), 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 2(47), ИЮНЬ 2020

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Главный редактор:

В.Р. Храминин – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия;

О.А. Кравченко – доц., д-р техн. наук,
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Б. Агапитов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Н.Ф. Джасаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук,
НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук, ЛГТУ,
г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.Ю. Андришин – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:

О.С. Логанова – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

С.М. Андреев – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук,
Директор R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

А.М. Зюзев – доц., д-р техн. наук,
УрФУ имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук,
Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия;

Е.А. Храминина – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38, ауд. 342а, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

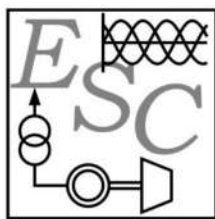
Адрес издателя:

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 26.06.2020. Заказ 145. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(47), JUNE, 2020

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

S.I. Luk'yanov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor in Chief:

V.R. Khrushin – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.E. Kozharuk – Professor, D.Sc. (Engineering),
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia;

O.A. Kravchenko – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), SRSPU (NPI), Novocherkassk,
Russia.

Secton of Power Engineering:

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

E.B. Agapitov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

N.F. Dzharov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NVNA, Varna, Bulgaria.

Secton of Energy- and Resources-Economy:

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Secton of Electric Power Supply:

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.Yu. Andryushin – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Power Electronics, Automation and Control Systems; Technical Systems Dataware and Software:

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
Director of R&D, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Industrial Electro Technology:

A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;

A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;

I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan.

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.A. Khrushina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2020

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:

Nosov Magnitogorsk State Technical University
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
NMSTU publishing center

The editorial office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 26.06.2020. Order 145. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....	4
<i>Авербух М.А., Жилин Е.В., Сизганова Е.Ю., Абдулваххаб М.В.</i> Выбор узлов подключения распределенной генерации в сетях Республики Ирак.....	4
<i>Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Тащилин В.А., Шукало А.</i> Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения.....	11
<i>Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В.</i> Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы.....	19
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	26
<i>Рекутнов О.Г., Юдинцев А.Г.</i> Метод формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электропитания космических аппаратов.....	26
<i>Климаш В.С., Константинов А.М.</i> Стабилизатор трёхфазного напряжения для трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и анализ способов его управления.....	33
<i>Иoffee И.С., Зюев А.М., Костылев А.В., Нестеров К.Е.</i> Математическая модель активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом.....	41
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	47
<i>Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Танич В.О., Петушков М.Ю.</i> Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений.....	47
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	55
<i>Бочкарев И.В., Брякин И.В.</i> Оперативный контроль качества электропроводящих элементов кабеля.....	55
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	64
<i>Ефимов А.Ю., Горькавый М.А., Соловьев В.А.</i> Идентификация нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота в задачах повышения эффективности управления автоматизированным технологическим процессом.....	64
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	72
<i>Копытов С.М., Ульянов А.В., Марущенко Д.С.</i> Моделирование системы светодиодного освещения с передачей команд управления по линии электропитания.....	72
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	80

CONTENT

ELECTRIC POWER SUPPLY.....	4
<i>Averbukh M.A., Zhilin E.V., Sizganova E.Yu., Abdulvakhkhab M.V.</i> Selection of Distributed Generation Nodes in the Networks of Republic of Iraq.....	4
<i>Odinaev I.N., Murzin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A., Sukalo A.</i> Analysis of Mathematical Methods for Decreasing the Saturated Current Transformer Error.....	11
<i>Nigamatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeev A.V.</i> Study of the Influence of Regulating Load Effect on the Voltage of the Supply Substation Taking into Account the Power of the Short-Circuit of the Energy System.....	19
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS.....	26
<i>Rekutov O.G., Yudinsev A.G.</i> Method of Forming a Volt-Amper Characteristic of a Solar Array Simulator for Testing Power Supply Systems of Spacecraft.....	26
<i>Klimash V.S., Konstantinov A.M.</i> Three-Phase Voltage Stabilizer for 10/0.4 kV Transformer Substations and Analysis of its Control Methods.....	33
<i>Ioffe I.S., Ziuzev A.M., Kostylev A.V., Nesterov K.E.</i> Mathematical Model of an Active Front-end voltage rectifier with a Neutral Wire.....	41
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	47
<i>Omelchenko E.Ya., Lyamar A.B., Tanich V.O., Petushkov M.Yu.</i> Reducing of Value of Starting Current and Moment of Asynchronous Motor with Squirrel Cage Rotor Using Phase Voltage Sequence.....	47
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT.....	55
<i>Bochkarev I.V., Bryakin I.V.</i> Operational Quality Control of Electric Conducting Cable Elements.....	55
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE.....	64
<i>Efimov A.Yu., Gorkavyi M.A., Soloviev V.A.</i> Energy-Efficient Algorithms for Controlling the Technological Process of Manufacturing Products Based on an Industrial Robotic System.....	64
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY.....	72
<i>Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Marushchenko D.S.</i> Simulation of Led Lighting System with Transmission of Control Commands Via the Power Supply Line.....	72
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS.....	80

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск³ Университет Диала, республика Ирак

ВЫБОР УЗЛОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СЕТЯХ РЕСПУБЛИКИ ИРАК

В статье показано, что распределительные сети Республики Ирак испытывают ощутимый дефицит мощности в результате частичного разрушения из-за военного конфликта, с одной стороны, и ежегодного роста спроса на электроэнергию, с другой. Перегруженность сетей Республики Ирак вызвала увеличение потерь напряжения и мощности в элементах распределительной сети, что значительно влияет на основные параметры сети и показатели качества электроэнергии. Расчет режима в программном комплексе RasterWin3 подтвердил снижение напряжения в узлах выше допустимых значений и увеличение потерь активной мощности в элементах распределительной сети. Доказана возможность решения этой проблемы с помощью распределенной генерации в виде использования фотодизельных электростанций (ФДЭС), что подкрепляется климатическими особенностями и наличием собственных углеводородов, определяющими возможность использования ФДЭС. С целью выбора узлов подключения ФДЭС в распределительной сети Республики Ирак на шинах 11 кВ подстанции 33/11 кВ решена задача снижения потерь мощности на основании оптимизации выбора мест установки ФДЭС, при этом предложено определенное сочетание между фотоэлектрическими панелями (ФЭП) и дизельэлектростанциями (ДЭС). За критерий оптимальности выбирается минимум потерь активной мощности в сетях напряжением 33 кВ. В результате решения задачи оптимизации предложено установить ФДЭС в трех наиболее характерных узлах (10, 15, 23) суммарной мощностью 2000, 1500 и 1000 кВт. Оценка эффективности распределительных сетей Республики Ирак с учетом использования ФДЭС подтвердила значительное увеличение уровня напряжения в узлах потребления за счет снижения потерь мощности в элементах распределительной сети. Таким образом, научная новизна статьи заключается в разработке методики выбора мощностей и мест установки распределенной генерации в сетях Республики Ирак на основании анализа режимов и минимизации потерь мощности в элементах сети.

Ключевые слова: распределительные сети, распределенная генерация в виде фотодизельных электростанций, потери мощности и напряжения, оптимизация и минимизация потерь.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно спрос электроэнергии в Республике Ирак возрастает и на начало 2020 года составил более 19000 МВт, в то время как энергосистема вырабатывает порядка 16000 МВт. С учетом частичного выбывания сетей из-за военного конфликта и роста потребления распределительные сети Республики Ирак перегружены [1, 2]. Также свыше 70 % установленных генерирующих мощностей введены в эксплуатацию до 2000 года, что указывает на моральный износ и низкую эффективность. Большинство таких систем имеет низкий КПД, не превышающий 40% [3].

В связи с этим возникает необходимость дополнительных источников мощности, в том числе использование распределенной генерации. Учитывая климатические и географические особенности Республики Ирак, в качестве распределенной генерации возможно использование ФЭП. Согласно исследованию [4, 5], интенсивность солнечной радиации в течение года изменяется от 2393 до 6576 Вт·ч/(м²·сут), а количество солнечных дней превышает двести пятьдесят.

Республика Ирак является богатой нефтью и газом страной, где производится добыча и переработка углеводородов. Учитывая, что в среднем сто пятнадцать дней Республика Ирак не охвачена солнечным излучением, то в дополнение к ФЭП возможно использование дизельэлектростанций (ДЭС) [6, 7].

Такие установки могут быть использованы как дополнительные источники энергии, подключенные на шинах 11 кВ подстанций 33/11 кВ, так и как автономные электростанции для удаленных населенных пунктов.

Для повышения энергоэффективности в распределительных сетях Республики Ирака предлагается использовать ФДЭС, которые обладают рядом положительных свойств и обеспечивают [8-11]:

- автоматическое регулирование уровня напряжения в определенных пределах;
- изменение величины и направления потоков мощности;
- снижение потерь мощности;
- повышение уровня напряжения в узлах нагрузки;
- обеспечение автономной работы на длительный срок при авариях.

Учитывая высокую стоимость ФДЭС не целесообразно устанавливать их во всех узлах распределительной сети Республики Ирак, так как они могут не окупиться даже за весь период эксплуатации. Выбор мощности и места установки гибридных ФДЭС произведен на основании минимизации потерь в элементах распределительной сети Республики Ирак [12-14]. Оценка эффективности выбора узлов установки выполняется на примере фрагмента, представленного на рис. 1.

Расчет режима выполнен в программном комплексе RasterWin3 [15]. Последовательность расчета режимов и формирование исходных данных представлены в [16].

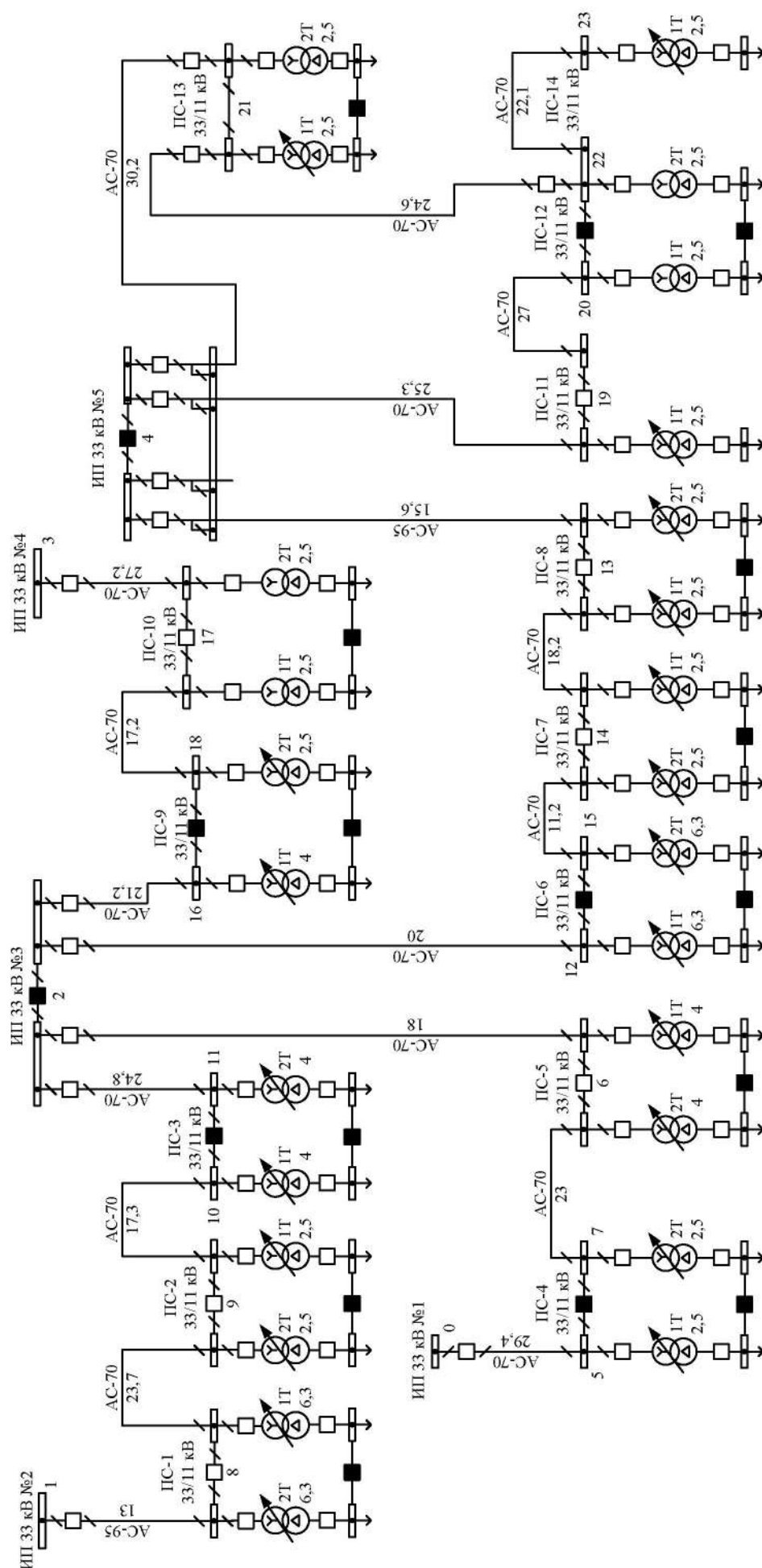


Рис. 1. Фрагмент распределительной сети Республики Ирак

РАСЧЕТ РЕЖИМА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
РЕСПУБЛИКИ ИРАК

Результаты расчета режима в программном комплексе RasterWin3 сведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты расчета режима работы

Узлы				
№ п/п	U, кВ	δU , %	S_p , кВА	
5	31,91	3,3	1727+j1047	
6	30,18	8,56	5554+j2856	
7	29,31	11,19	1648+j946	
8	29,16	11,65	8502+j4691	
9	25,17	23,72	3417+j1932	
10	23,82	27,81	2756+j1587	
11	31,49	4,58	2832+j1670	
12	31,04	5,94	4355+j2775	
13	29,61	10,26	3310+j1951	
14	26,09	20,95	3171+j1821	
15	24,73	25,06	4268+j2683	
16	31,72	3,89	2737+j1763	
17	29,84	9,57	3339+j1871	
18	29,13	11,73	1745+j1090	
19	31,08	5,81	1647+j1032	
20	30,04	8,98	1736+j1010	
21	28,40	13,94	3153+j1745	
22	26,42	19,95	1701+j853	
23	25,49	22,75	1645+j833	
Ветви				
№ п/п	$S_{iнач}$, МВА	I, А	ΔP , кВт	δU , %
0 – 5	1,8+j1,1	37	50	3,30
2 – 6	7,8+j4,4	157	560	8,56
6 – 7	1,7+j	37	41	2,63
1 – 8	17+j11,2	357	1497	11,65
8 – 9	7,1+j4,5	166	827	12,07
9 – 10	2,9+j1,7	77	131	4,09
2 – 11	2,9+j1,8	60	114	4,58
2 – 12	4,6+j3	96	234	5,94
4 – 13	12,2+j8,4	259	946	10,26
13 – 14	8,2+j5,3	190	835	10,69
14 – 15	4,5+j2,9	119	201	4,12
2 – 16	2,8+j1,9	59	94	3,89
3 – 17	5,6+j3,5	115	453	9,57
17 – 18	1,8+j1,1	41	36	2,16
4 – 19	3,6+j2,3	75	178	5,81
19 – 20	1,8+j1,1	39	51	3,18
4 – 21	7,4+j4,4	151	877	13,94
21 – 22	3,5+j1,9	81	205	6,01
22 – 23	1,7+j0,9	42	50	2,81

Примечание. Суммарные потери мощности в элементах сети составили 4468 кВт.

Анализ результатов показывает значительное снижение напряжения в нормальном режиме работы в узлах 5-23, пределы отклонения напряжения от номинального составляют от 10 до 25%. Максимальное значение снижения напряжения наблюдается в узле 10, оно достигает 28%. Потери мощности в ветвях электроэнергетической системы могут достигать 20% от потребляемой мощности. Таким образом, снижение уровня напряжения в узлах подстанции 33/11 кВ превышает допустимые значения. Учитывая значительные длины линий и что по некоторым линиям протекают суммарные токи нескольких потребителей, используемые сечения некоторых линий не проходят по длительно допустимому току, что вызывает значительные перегрузки электроэнергетической системы. Расчеты подтвердили необходимость использования дополнительных технических решений для снижения потерь мощности и напряжения в ветвях распределительных сетей Республики Ирак.

ВЫБОР УЗЛОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ФДЭС

С целью выбора узлов подключения ФДЭС к распределительным сетям Республики Ирак решается задача оптимизации. За критерий оптимальности выбирается минимум потерь активной мощности в распределительных сетях Республики Ирак 33 кВ [17, 18].

Постановка оптимизационной задачи заключается в определении объекта, параметров и критериев оптимизации, а также ограничений для целевой функции.

Для фрагмента распределительной сети Республики Ирак, представленной на рис. 1, сформулирована целевая функция минимума потерь активной мощности. Расчетные потери мощности представляются в виде источников распределенной генерации, представленной ФДЭС:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\Sigma} = & R_1 (P_5 - P_{\text{ФДЭС5}})^2 + \\
 & + R_2 (P_6 + P_7 - P_{\text{ФДЭС6}} - P_{\text{ФДЭС7}})^2 + \\
 & + R_3 (P_7 - P_{\text{ФДЭС7}})^2 + \\
 & + R_4 \left(P_8 + P_9 + P_{10} - \sum_{i=8}^{10} P_{\text{ФДЭС}i} \right)^2 + \\
 & + R_5 \left(P_9 + P_{10} - \sum_{i=9}^{10} P_{\text{ФДЭС}i} \right)^2 + \dots + \\
 & + R_{18} (P_{21} + P_{23} - P_{\text{ФДЭС22}} - P_{\text{ФДЭС23}})^2 + \\
 & + R_{19} (P_{23} - P_{\text{ФДЭС23}})^2 \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $R_i = r_i / U^2$ – отношение активного сопротивления i -го участка сети к квадрату напряжения i -го узла сети; P_i – величина активной мощности i -го участка сети; $P_{\text{ФДЭС}i}$ – генерируемая активная мощность ФДЭС на i -м участке сети.

Условия ограничения для целевой функции принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=5}^{23} P_{\text{ФДЭС}i} - 4468 \approx 0; \\ P_{\text{ФДЭС}i} \geq 0, i = 5, 6, \dots, 23; \\ 0 \leq \delta U \leq 10\%. \end{cases} \quad (2)$$

Одним из общих подходов, в котором реализуется стремление свести задачу условной оптимизации к более простой задаче безусловной оптимизации, является метод неопределенных множителей Лагранжа. Он позволяет находить условный экстремум нелинейной функции [19, 20].

Абсолютный экстремум целевой функции находится методом Лагранжа, в результате которого функция, подлежащая минимизации, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} L = & R_1 (P_5 - P_{\text{ФДЭС}5})^2 + \\ & + R_2 (P_6 + P_7 - P_{\text{ФДЭС}6} - P_{\text{ФДЭС}7})^2 + \\ & + R_3 (P_7 - P_{\text{ФДЭС}7})^2 + \\ & + R_4 \left(P_8 + P_9 + P_{10} - \sum_{i=8}^{10} P_{\text{ФДЭС}i} \right)^2 + \\ & + \dots + R_{18} (P_{21} + P_{23} - P_{\text{ФДЭС}22} - P_{\text{ФДЭС}23})^2 + \\ & + R_{19} (P_{23} - P_{\text{ФДЭС}23})^2 + \\ & + \lambda \left(\sum_{i=5}^{23} P_{\text{ФДЭС}i} - 4468 \right) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в функцию Лагранжа, получаем выражение для формирования частных производных по всем неизвестным переменным:

$$\begin{aligned} L = & 0,0114(1763 - P_{\text{ФДЭС}5})^2 + \\ & + 0,007(7580 - P_{\text{ФДЭС}6} - P_{\text{ФДЭС}7})^2 + \\ & + 0,009(1665 - P_{\text{ФДЭС}7})^2 + \\ & + 0,0036 \left(16305 - \sum_{i=8}^{10} P_{\text{ФДЭС}i} \right)^2 + \\ & + \dots + 0,0095(3465 - P_{\text{ФДЭС}22} - P_{\text{ФДЭС}23})^2 + \\ & + 0,00856(1661 - P_{\text{ФДЭС}23})^2 + \\ & + \lambda \left(\sum_{i=5}^{23} P_{\text{ФДЭС}i} - 4468 \right) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, частные производные по всем переменным имеют вид:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\text{ФДЭС}5}} = -0,01736(1763 - P_{\text{ФДЭС}5}) + \lambda;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_{\text{ФДЭС}6}} &= -0,01086 \left(7580 - \sum_{i=6}^7 P_{\text{ФДЭС}i} \right) + \lambda; \\ \frac{\partial L}{\partial P_{\text{ФДЭС}7}} &= -0,01086 \left(7580 - \sum_{i=6}^7 P_{\text{ФДЭС}i} \right) - \\ &- 0,0093(1665 - P_{\text{ФДЭС}7}) + \lambda; \end{aligned} \quad (5)$$

...

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_{\text{ФДЭС}23}} &= -0,0234 \left(7278 - \sum_{i=21}^{23} P_{\text{ФДЭС}i} \right) - \\ &- 0,0114(3465 - P_{\text{ФДЭС}22} - P_{\text{ФДЭС}23}) - \\ &- 0,0094(1661 - P_{\text{ФДЭС}23}) + \lambda; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \sum_{i=5}^{23} P_{\text{ФДЭС}i} - 4468. \end{aligned}$$

На основании решения полученных уравнений определены рекомендуемые мощности ФДЭС в узлах распределительной сети Республики Ирак, представленные в табл. 2.

Как следует из табл. 2, рациональным местом установки ФДЭС являются узлы 9, 10, 15, 22, 23.

Укрупняя значения активных мощностей в узлах потребления, предлагается установить ФДЭС в узлах 10, 15 23 в следующей комплектации, представленной в табл. 3.

Таблица 2

Рекомендуемая мощность ФДЭС в узлах сети

Узлы					
№ п/п	$P_{\text{ФДЭС}},$ кВт	$\delta U,$ %	№	$P_{\text{ФДЭС}},$ кВт	$\delta U,$ %
5	0	3,3	15	820,4	9,9
6	65,4	8,5	16	0	3,8
7	55,3	9,1	17	94,9	9,5
8	262,6	6,4	18	110,2	9,7
9	701,2	8,1	19	0	55,8
10	1206,7	5,5	20	0	8,9
11	0	4,5	21	333,9	6,9
12	17,5	5,9	22	529,5	7,9
13	205,2	5,2	23	625,3	6,5
14	419,5	9,3			
Ветви					
№ п/п	$\Delta P,$ кВт	$\delta U,$ %	№	$\Delta P,$ кВт	$\delta U,$ %
0 – 5	48,7	3,3	14 – 15	10,1	0,5
2 – 6	541,2	8,5	2 – 16	91,3	3,7
6 – 7	40,8	2,6	3 – 17	423,3	8,5
1 – 8	534,2	6,4	17 – 18	35,2	2,1
8 – 9	51,3	1,7	4 – 19	175,3	4,8
9 – 10	42,2	2,6	19 – 20	50,1	3,1
2 – 11	108,1	4,4	4 – 21	246,6	6,1
2 – 12	231,6	5,9	21 – 22	18,5	0,9
4 – 13	288,9	5,1	22 – 23	12,5	1,35
13 – 14	152,2	4,1			

Таблица 3

Конфигурация ФДЭС			
Номер узла	$P_{\text{ФДЭС}}$, кВт	$P_{\text{ФП}}$, кВт	$P_{\text{ДЭС}}$, кВт
10	2000	500	1500
15	1500	300	1200
23	1000	200	800

Примечание. Мощности ФДЭС 9-го и 10-го узлов объединены в 10-м узле; мощности 22-го и 23-го узлов объединены в 23-м узле.

Расчет режима в сети Республики Ирак напряжением 33 кВ с учетом подключенных ФДЭС в программном комплексе RastrWin3 показал, что снижение уровня напряжения в узлах нагрузки уменьшилось на 20 %, а потери мощности в элементах сети уменьшились на 30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Расчет режима распределительной сети Республики Ирак напряжением 33 кВ показал, что сети перегружены, и потери напряжения и мощности на отдельных участках превышают допустимые значения. И могут достигать соответственно $\delta U=20\%$ и $\Delta P=200$ кВт.

2. Учитывая климатические особенности и доступные нефтегазовые месторождения, становится рациональным и экономически обоснованным использование в качестве распределенной генерации ФДЭС, подключенных к шинам низкого напряжения трансформаторных подстанций 33/11 кВ, как дополнительных источников мощности, так и автономных электростанций для удаленных населенных пунктов.

3. В результате решения задачи оптимизации по выбору узлов подключения ФДЭС к шинам 11 кВ подстанции 33/11 кВ предложено размещение ФДЭС в узлах 10, 15, 23 суммарной мощностью 4500 кВт. Расчет режимов в распределительных сетях Республики Ирак 33 кВ с учетом подключения ФДЭС показал, что уровень напряжения в узлах нагрузки приблизился к номинальным значениям, а потери мощности сократились примерно на 30 %.

Работа выполнена в рамках мероприятия Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохаммед А. З. А., Виноградов А.А. Особенности электрической распределительной сети Ирака // Энергетика и энергоэффективные технологии. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С. 12-16.
2. Седнин А. В., Назар Х., Кадам Н. Состояние и проблемы развития теплоэлектрогенерирующих мощностей энергосистемы Республики Ирак // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. № 6. С. 76-81.
3. Kazem H.A., Chaichan M.T. Status and future prospects of renewable energy in Iraq // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, no. 8, pp. 6007-6012. //doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.058
4. Аль Б. А. Г., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Использование солнечной генерации в системе электроснабжения Ирака // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. №2. С. 69-73.

5. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia / A.H. Mamaghani, S.A. AEscandon, B Najafi, A Shirazi, F Rinaldi // Renewable Energy. 2016, no. 97, pp. 293-305. //doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.086
6. Пашкова Е.В., Хайдер А.Х. Роль нефтяной отрасли в экономическом и политическом развитии Ирака // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. 2014. С. 110-115.
7. Abed F. M., Al-Douri Y., Al-Shahery G. M. Y. Review on the energy and renewable energy status in Iraq: The outlooks // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 39, pp. 816-827. //doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.026
8. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков // Современные проблемы науки и образования. 2014. №3. С. 25-32.
9. Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea / M. R. B. Khan, R. Jidin, J. Pasupuleti, S.A. Shaaya // Energy. 2015. Vol. 82, pp. 80-97. //doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.072
10. Adaramola M. S., Paul S. S., Oyewola O. M. Assessment of decentralized hybrid PV solar-diesel power system for applications in Northern part of Nigeria // Energy for Sustainable Development. 2014. Vol. 19, pp. 72-82. //doi.org/10.1016/j.esd.2013.12.007
11. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Энергоэффективность фотоэлектростанций в автономных системах электроснабжения. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 140 с.
12. Булатов Б. Г., Тарасенко В. В. Алгоритмы интеллектуального управления режимом распределительной сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 37. С. 18-22.
13. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review / A. A. Téllez, G. Lopez, I. Isaac, J.W. Gonzalez // Heliyon. 2018. Vol. 4, no. 8, pp. 1-30. //doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00746
14. Kulaev I., Kubarkov Y. Regulation of Voltage and Optimization of Power Losses in Active-Adaptive Networks // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE. 201, pp. 1-4. //doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728712
15. Мензелеев А. С. Расчет режима электрической сети методом Ньютона с учетом статических характеристик электрических нагрузок // Актуальные проблемы энергетики. Электроэнергетические системы и сети. 2019. С. 180-183.
16. Особенности режимов распределительных электроэнергетических сетей Ирака / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, М.В. Абдуллахбаб // Техника и технология: журнал Сибирского Федерального университета. 2019. Т. 12. №5. С. 607-616.
17. Авербух М. А., Жилин Е. В., Прокопишин Д. И. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Проблемы региональной энергетики. 2018. №2(37). С. 31-37.
18. Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4 (45). С. 21-28.
19. Ефременко В.М., Беляевский Р.В. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. №6(94). С. 138-141.
20. Georgilakis P.S., Hatziaargyriou N.D. Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods and future research // IEEE transactions on power systems. 2013. Vol. 28(3), pp. 3420-3428. //doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2237043

Поступила в редакцию 24 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SELECTION OF DISTRIBUTED GENERATION NODES IN THE NETWORKS OF REPUBLIC OF IRAQ

Mikhail A. Averbukh

D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: avers45@rambler.ru

Evgenij V. Zhilin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: zhilinevg@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2076-6463>

Evgeniya Yu. Sizganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Complexes and Systems, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: seu_eset@mail.ru

Mukhamed V. Abdulvakhhab

Post-graduate student, Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. Assistant, the College of Engineering, University of Diyala, Driyala, Iraq, E-mail: mz_d1984@mail.ru

Partial shutdown of distribution networks of the Republic of Iraq due to the military conflict and annual growth of demand for electric power has caused a noticeable power shortage. Overload in the networks of the Republic of Iraq has caused an increase in voltage and power losses in the elements of distribution network, which significantly affects the main parameters of the network and indicators of power quality. Calculation of the mode in the software package RasterWin2 confirmed the voltage reduction in the nodes above the permissible values and the increase of active power losses in the elements of the distribution network. One of possible variants of the solution of the problem of reduction of voltage and power losses in the distribution network, at necessary quality of electric power, is the use of photo diesel power plants (PDPP). Additional factors determining the possibility of using the distributed generation in the form of PDPP are climatic features and presence of local hydrocarbons. For the purpose of selection of PDPP connection nodes in the distribution network of the Republic of Iraq, the task of optimization of active power losses was solved on 11 kV buses of 33/11 kV substation, and a certain combination between photovoltaic panels (PVP) and diesel power plants (DPP) was proposed. For criterion of optimality the minimum of active power losses in networks with voltage of 33 kV is chosen, which are compensated by installations of PDPP. On the basis of the optimization task solution it is proposed to install PDPP in three most typical units (10, 15, 23) with total capacity of 2000, 1500 and 1000 kW. The evaluation of the efficiency of the distribution networks of the Republic of Iraq, taking into account the use of PDPP, has confirmed the significant increase of the voltage level in the c

Keywords: distribution networks, distributed generation in the form of photo-diesel power plants, power and voltage losses, optimization and loss minimization.

REFERENCES

1. Mohammed A.Z.A., Vinogradov A.A. Features of the electrical distribution network of Iraq. *V sb.: energetika i energo effektivnye tehnologii. Belgorod: iz-vo BGTU* [In collection of scientific papers: energy and energy-efficient technologies. Belgorod: publ. house BSTU], 2012, pp. 12-16. (In Russian)
2. Sednin A.V., Nazar H., Kadam N. State and problems of the development of thermoelectric generating capacities of the power system of the Republic of Iraq. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij i energeticheskikh obyedinenij SNG* [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2011, no. 6, pp. 76-81. (In Russian)
3. Kazem H. A., Chaichan M. T. Status and future prospects of renewable energy in Iraq // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, no. 8 (16), pp. 6007-6012. //doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.058
4. Al B.A.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Use of solar generation in the power supply system of Iraq. *Energeticheskie ustanovki i tehnologii* [Power plants and technologies], 2019, no. 5 (2), pp. 69-73. (In Russian)
5. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia / A. H. Mamaghani, S A AEscandon, B Najafi, A Shirazi, F Rinaldi // *Renewable Energy*, 2016, 97, pp. 293-305. //doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.086
6. Pashkova E.V., Haider A. Kh. The role of the oil industry in the economic and political development of Iraq. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: International Relations], 2014, pp. 110-115. (In Russian)
7. Abed F. M., Al-Douri Y., Al-Shahery G. M. Y. Review on the energy and renewable energy status in Iraq: The outlooks // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, no. 39, pp. 816-827. //doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.026
8. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Solar-diesel power supply systems of the northern villages. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 3, pp. 25-32. (In Russian)
9. Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea / M. R. B. Khan, R. Jidin, J. Pasupuleti, S.A. Shaaya // *Energy*, 2015, no. 82, pp. 80-97. //doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.072
10. Adaramola M.S., Paul S.S., Oyewola O.M. Assessment of decentralized hybrid PV solar-diesel power system for applications in Northern part of Nigeria // *Energy for Sustainable Development*, 2014, no. 19, pp. 72-82. //doi.org/10.1016/j.esd.2013.12.007
11. Lukutin B.V., Shandarova E.B. *Energoeffektivnost fotojellektrostancij v avtonomnykh sistemah elektrosnabzheniya* [Energy efficiency of photovoltaic power plants in autonomous power supply systems]. Tomsk: TPU Publishing House, 2008, 140 pp. (In Russian)
12. Bulatov B. G., Tarasenko V. V. Algorithms for intelligent control of the distribution network mode. *Vestnik Yuzhno-*

- Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2012, no. 37, pp. 18-22. (In Russian)
13. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review / A. Á. Téllez, G. Lopez, I. Isaac, J.W. Gonzalez // *Heliyon*, 2018, no. 4. № 8, pp. 1-30. //doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00746
 14. Kulaev I., Kubarkov Y. Regulation of Voltage and Optimization of Power Losses in Active-Adaptive Networks // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE. 2018, pp. 1-4. //doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728712
 15. Menzeleev A. S. Calculation of the mode of the electric network by the Newton method taking into account the static characteristics of electric loads. *Aktualnye problem energetiki. Elektroenergeticheskie sistemy i seti* [Actual problems of energy. Electric power systems and networks], 2019, pp. 180-183. (In Russian)
 16. Features of modes of distribution electric power networks of Iraq / M.A. Averbukh, E.V. Zhilin, E.Yu. Sizganova, M.W. Abdulwahhab. *Tehnika i tehnologiya: zhurnal Sibirskogo Federalnogo universiteta* [Technique and Technology: Journal of the Siberian Federal University], 2019, no. 12 № 5, pp. 607-616. (In Russian)
 17. Averbukh M.A., Zhilin E.V., Prokopishin D.I. Minimization of electricity losses in power supply systems of individual housing construction. *Problemy regionalnoy energetiki* [Problems of Regional Energy], 2018, no. 2 (37). pp. 31-37. (In Russian)
 18. Vlackaya L.A., Semenova N.G. The use of genetic algorithms in the problems of optimizing the placement of compensating devices. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no. 4 (45), pp. 21-28. (In Russian)
 19. Efremenko V.M., Belyaevsky R.V. Calculation of the optimal placement of compensating devices using the Lagrange multiplier method. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2012, no. 6 (94), pp. 138-141. (In Russian)
 20. Georgilakis P. S., Hatziaegyriou N. D. Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods, and future research // *IEEE transactions on power systems*, 2013, no. 28 (3), pp. 3420-3428. //doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2237043.

Выбор узлов подключения распределенной генерации в сетях Республики Ирак / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, М.В. Абдулваххаб // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-4-10)

Averbukh M.A., Zhilin E.V., Sizganova E.Yu., Abdulvakhhab M.V. Selection of Distributed Generation Nodes in the Networks of Republic of Iraq. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-4-10)

Одинаев И.Н.¹, Мурзин П.В.¹, Паздерин А.В.¹, Тащилин В.А.¹, Шукало А.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

²АО «Электропренос-Электроприенос БиХ», ад Бая Лука, Босния и Герцеговина

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

В качестве датчиков тока на электроэнергетических объектах в разное время использовались различные устройства, среди которых наиболее широкое распространение получили измерительные электромагнитные трансформаторы тока (ТТ). Применение измерительных ТТ оправдывается их сравнительно низкой стоимостью и достаточным уровнем надежности при условии соблюдения правил эксплуатации. Точность и достоверность измерений, полученных с помощью измерительных ТТ, являются необходимыми факторами для корректной работы систем релейной защиты и автоматики (РЗА), систем сбора данных и передачи информации и автоматизированных систем управления технологическими процессами в электроэнергетических объектах. В настоящей работе выполнена систематизация и произведен сравнительный анализ современных математических методов восстановления измерений ТТ в условиях насыщения на основе численного моделирования. В результате была выявлена устойчивость методов к степени зашумленности сигнала, остаточной намагниченности в сердечнике ТТ и начальной фазы тока КЗ, а также рассчитана точность восстановления тока. Сравнение выполнялось с изменением параметров исходного сигнала и уровня остаточной намагниченности ТТ. Выявлена эффективность работы методов на основе реального тока КЗ. В процессе апробации методов в качестве исходных данных был использован модельный сигнал, содержащий синусоидальную и апериодическую составляющие, а также сигнал, полученный при КЗ на реальном объекте. На основе апробации и сравнительного анализа рассмотренных методов сделаны основные выводы, описывающие достоинства и недостатки методов, а также предложены перспективные направления для дальнейшей работы по восстановлению искаженного вторичного тока ТТ.

Ключевые слова: трансформаторы тока, искаженный вторичный ток, характеристика намагничивания, восстановленный ток, намагничивающий ток, интервал правильной трансформации.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный контроль режимов энергетических объектов, обеспечение надежности работы устройств РЗА, коммерческий и технический учет электроэнергии являются основными задачами, направленными на повышения эффективности электроснабжения. Качественное решение этих задач напрямую зависит от степени достоверности входной информации – тока и напряжения. В качестве датчиков тока используются различные устройства, среди которых наиболее широкое распространение и практическое применение получили ТТ, работающие на электромагнитном принципе [1]. Однако опыт эксплуатации показывает, что в режимах перегрузки и в режимах короткого замыкания (КЗ) сердечники таких ТТ насыщаются, вследствие чего происходит существенное искажение измеряемой информации, что приводит к излишнему срабатыванию или недопустимому замедлению в срабатывании систем РЗА. Как правило, для уменьшения насыщения сердечника в режимах, вызывающих смещение рабочей точки на кривой намагничивания ТТ в зону насыщения, предлагаются различные методы, основанные на конструктивных изменениях ТТ [2] и использовании цифровой обработки сигналов (ЦОС) [3–12]. Данные методы базируются на применении характеристик намагничивания ТТ и методов прогнозирования.

Для исключения ложного срабатывания устройств РЗА при насыщении ТТ в защитах, работающих по дифференциальному принципу, используются тормоз-

ные характеристики [13]. Однако, как показывает опыт эксплуатации, наличие насыщения в ТТ все еще влияет на работу РЗА, в результате чего происходит некорректное срабатывание [14,15]. Например, на воздушной линии 110 кВ «Пыть-Ях» ПП 110 кВ «Угутский» произошло двукратное отключение КЗ. После этого при однофазном КЗ на этой же линии неселективно сработала дифференциальная защита шин (ДЗШ) с командой на отключение 1 и 2 системы шин 110 кВ. Согласно [16] причиной неселективного срабатывания ДЗШ послужила остаточная намагниченность в сердечниках ТТ ВЛ «Пыть-Ях» и ТТ шиносоединительно-го выключателя, появившаяся после КЗ.

Требования к ТТ для трансформации тока в переходном режиме определяются стандартом IEC 60044-6. Согласно этому стандарту, в зависимости от конструкции сердечника различают четыре класса ТТ: TPX, TPY и TPZ. В трансформаторах тока класса TPX воздушный зазор отсутствует, благодаря чему остаточная магнитная индукция в них может достигать своего предельного значения и сохраняться длительное время. Для снижения остаточной магнитной индукции сердечники ТТ класса TPY и TPZ изготавливаются с воздушным зазором. Таким образом, остаточная магнитная индукция в ТТ класса TPY не превышает 10% от своего предельного значения, а в ТТ класса TPZ пренебрежимо мала. Большинство ТТ, установленных в ЕЭС России, можно отнести к классу TPX (класс P согласно стандарту IEC 60044-1), погрешность которого в переходных режимах может достигать недопустимых значений.

Вышеперечисленные факторы свидетельствуют о необходимости снижения погрешности при измерении

искаженного вторичного тока на насыщенных участках или поиска других методов, способных обеспечить корректную работу устройств РЗА при насыщении ТТ.

В настоящей работе выполнен анализ ряда современных методов восстановления искаженного вторичного тока, основанных на применении ЦОС, не рассмотренных ранее в [17]. Выявлена чувствительность этих методов к переходному режиму КЗ на основе реальных данных, а также исследована их устойчивость к различным режимам насыщения.

КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕННОГО ВТОРИЧНОГО ТОКА

По теме компенсации вторичного тока ТТ было выполнено большое количество исследований [3–12]. Для компенсации погрешности ТТ, возникающей как при значительных перегрузках, связанных с подключением потребителей большой мощности или возникновением КЗ, так и в режимах с малыми токами, предлагались различные методы, описание которых приводится ниже. Для наглядности на рис. 1 представлена систематизация этих методов.

Классические методы [2] были разработаны и предложены до появления и активного применения в электроэнергетике микропроцессорных устройств (МПУ). Более подробное описание этих методов рассмотрено в [17].

Современные методы были предложены, в основном, после начала активного использования в электроэнергетике МПУ и основаны на применении ЦОС. К таким методам можно отнести восстановление тока с помощью характеристики намагничивания, путем прогнозирования вторичного тока ТТ, а также комбинированные методы восстановления тока. Анализ достоинств и недостатков методов первой и частично второй группы приведен в [17]. В данной статье более подробно рассмотрены комбинированные методы и некоторые из методов прогнозирования восстановления тока, не вошедшие в [17].

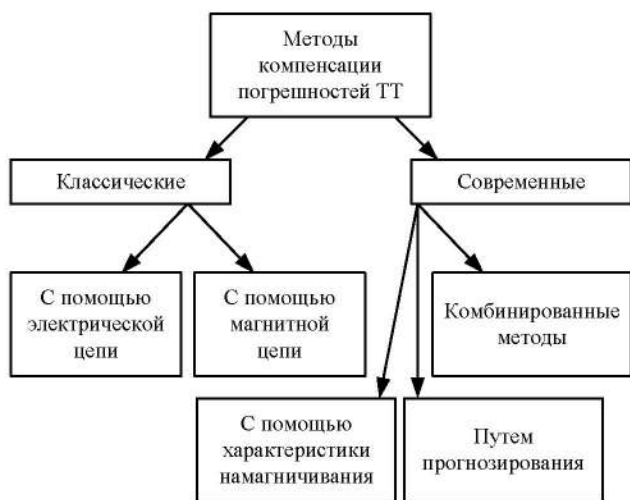


Рис. 1. Систематизация методов компенсации погрешностей ТТ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ

Рассматриваемые в данном разделе способы восстановления тока включают в себя методы прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и комбинированные методы, использующие характеристики намагничивания и алгоритмы прогнозирования.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В работах [3–9] предложены методы восстановления вторичного тока с помощью обучения ИНС. В основу ИНС положена сигмоидальная функция [18], расположенная на скрытом уровне сети (рис. 2, закрашенные нейроны). Входными отсчетами для ИНС являются выборки искаженного тока, выходными – ожидаемый ток в режиме КЗ. Как правило, топология сети выполняется в виде «feed-forward» (прямая связь) или «feedback» (обратная связь).

В выражении (1) приведена зависимость восстановленного тока ТТ i_v от вектора входного искаженного тока i_2 , весовых коэффициентов w_{ij} , функции активации F_k , а также от сумматора S , находящегося на выходном уровне сети.

$$i_v = f(i_2, w_{ij}, F_k, S). \quad (1)$$

Достоинством методов является отсутствие необходимости использования параметров ТТ и их независимость от отсчетов на интервале правильной трансформации (ИПТТ). При различных режимах сети и степени искаженности вторичного тока они способны восстанавливать ток с высокой точностью. Однако из-за динамичности режимов ЭС основной недостаток ИНС заключается в необходимости их обучения и адаптации ко всем режимам, что приводит к существенному увеличению требований к вычислительным ресурсам МПУ. В рамках настоящей статьи произведена апробация ИНС. При восстановлении тока с помощью ИНС были использованы вычислительные средства, встроенные в Matlab. Для восстановления вторичного тока была выбрана топология «feedback» с 10 нейронами на скрытом уровне. Обучение сети выполнялось на основе алгоритма Левенберга-Марквардта [19]. В последнем разделе настоящей статьи представлено сопоставление методов ИНС с комбинированными методами.

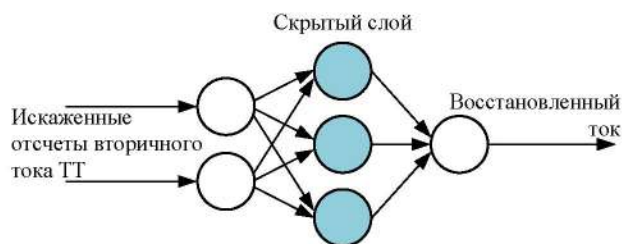


Рис. 2. Топология нейронной сети

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ

В исследованиях [10,11] предложен метод восстановления вторичного тока при наличии насыщения. Далее для удобства этот метод обозначим КМ1. Метод основывается на двух подходах: прогнозирование с помощью аппроксимации вторичного тока в виде синусоиды с наличием аperiodической составляющей и восстановление вторичного тока с использованием кривой намагничивания. В первом подходе для моделирования тока КЗ используется формула

$$i_1(t_i) = A \cdot \sin(\omega t_i + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t_i}{T_1}}. \quad (2)$$

С помощью метода преобразования сумм и разностей углов тригонометрических функций, а также разложения в ряд Тейлора для первого порядка выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$i_1(t_i) = A \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\omega t_i) + A \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega t_i) - \frac{t_i}{T_1} B + B; \quad (3)$$

$$i_1(t_i) = C_1 \cdot \sin(\omega t_i) + C_2 \cdot \cos(\omega t_i) - C_3 \cdot t_i + C_4, \quad (4)$$

где A и B – амплитуда синусоидальной и экспоненциальной составляющих; T_1 – постоянная времени; φ – начальный угол; ω – циклическая частота; $C_1 = A \cdot \cos(\varphi)$; $C_2 = A \cdot \sin(\varphi)$; $C_3 = B/T_1$ и $C_4 = B$.

Для второго подхода намагничивающий ток описывается выражением:

$$i_\mu(t_i) = f(i_2(t_i), C_5) \quad (5)$$

в котором C_5 – неизвестный коэффициент, заменяющий начальный магнитный поток Φ_0 в сердечнике ТТ, i_2 – измеренные значения вторичного тока.

В соответствии с (4) и (5), для восстановления тока, согласно [10,11], составляется векторная функция (6):

$$f(C) = i_2 + f(i_2, C_5) - LC_{1-4}, \quad (6)$$

которая содержит i_2 – вектор измеренных значений вторичного тока, C – вектор неизвестных, включающий коэффициенты C_{1-5} , и L – матрицу, составленную на основе известных слагаемых правой части (4):

$$L = \begin{pmatrix} \sin(\omega t_0) & \cos(\omega t_0) & 1 & t_0 \\ \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) & 1 & t_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_{n-1}) & \cos(\omega t_{n-1}) & 1 & t_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для поиска экстремума функции (6) ее разделяют на две части согласно [10,11]:

$$C_{1-4} = L^+ (i_2 + f[i_2, C_5]) \quad (8)$$

и

$$f(C_5) = (E - LL^+) \cdot (i_2 + f[i_2, C_5]), \quad (9)$$

где E – единичная матрица, L^+ – псевдообратная матрица матрицы L . При нахождении экстремума (9) можно определить C_5 и, используя (8), найти C_{1-4} .

Преимуществом настоящего метода является высокая устойчивость к зашумленности искаженного тока. Главным недостатком является необходимость затрат времени на получение некоторого дополнительного количества отсчетов на интервале насыщения в зависимости от фазы КЗ, а также степени зашумленности и величины аperiodической составляющей исходного сигнала.

В работе [12] предложен еще один метод восстановления искаженного вторичного тока. Далее для удобства метод обозначен КМ2. Восстановление по данному методу выполняется с использованием параметров как магнитной, так и электрической цепи ТТ. В отличие от КМ1 процедура вычисления магнитного потока Φ_0 , соответствующего началу насыщения, выполняется в обратную сторону, то есть искусственно расширяя ИПТ по выражению (10) рассчитывается намагничивающий ток.

$$i_\mu(t_0) = i_{2e}(t_0) - i_2(t_0), \quad (10)$$

где $i_{2e}(t_0)$ – прогнозируемое значение первого искаженного тока.

После этого по характеристике намагничивания $i_\mu = f(\Phi)$ определяется магнитный поток, соответствующий началу насыщения.

Таким образом, зная намагничивающий ток в искусственно расширенной части ИПТ, магнитный поток Φ_0 , активные и реактивные сопротивления на вторичной стороне ТТ, по выражению (11), предложенному в [20], можно определить ток насыщенной части:

$$w_2 \cdot [\Phi(t) - \Phi(t_0)] = R_2 \int_{t_0}^t i_2(\lambda) \cdot d\lambda + L_2 \cdot [i_2(t) - i_2(t_0)]. \quad (11)$$

Преимущество алгоритма заключается в его устойчивости к остаточной намагниченности в сердечнике ТТ. Однако при наличии во входном сигнале аperiodической составляющей со значительным временем затухания и зашумленности сигнала на ИПТ прогнозируемое значение получается с высокой погрешностью, и алгоритм восстановления тока с использованием характеристики намагничивания будет приводить также к большим погрешностям.

АПРОБАЦИЯ

Была проведена апробация методик, предложенных в [3–12]. Для выполнения апробации была выбрана математическая модель ТТ, предложенная в [21]. Моделирование выполнялось аналогично [17] в среде Matlab с частотой дискретизации, равной 2 кГц, которая используется в настоящее время в коммуникационных сетях систем релейной защиты. В модель закладывались параметры ТТ типа ТФНД-

110М [22] с формой кривой намагничивания, близкой к спрямленной характеристике, и параметрами, равными: сопротивление вторичной обмотки $R_2=1,52$ Ом, индуктивность вторичной обмотки $L_2=1,2$ мГн, коэффициент трансформации $k_T=800/5$, поперечное сечение магнитопровода $S=17,5 \cdot 10^{-4}$ м² и длина средней линии $l=0,935$ м. В качестве первичного тока был использован сигнал, форма которого описывается выражением.

$$i_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ A \cdot \sin(\omega t + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Известно, что на момент возникновения насыщения сердечника ТТ влияют различные факторы, а именно: начальный угол, амплитуда периодической составляющей, постоянная времени затухания, кратность тока КЗ и остаточная магнитная индукция в момент возникновения КЗ.

В соответствии с влияющими факторами апробация производилась для следующих моделируемых режимов:

1) КЗ с начальным углом $\varphi = -90^\circ$, с остаточной магнитной индукцией $B_0 = 0,5$ Тл и постоянной времени $T_1 = 0,1$ с;

2) КЗ с начальным углом $\varphi = 0^\circ$, с остаточной магнитной индукцией $B_0 = 1$ Тл и постоянной времени $T_1 = 0,05$ с.

3) КЗ с начальным углом $\varphi = -90^\circ$, с остаточной магнитной индукцией $B_0 = 1$ Тл и постоянной времени $T_1 = 0,05$ с.

4) При наличии зашумлённости исходного сигнала с начальным углом $\varphi = -170^\circ$, с остаточной магнитной индукцией $B_0 = 0$ Тл и постоянной времени $T_1 = 0,025$ с.

Режим 1. На рис. 3 искаженный вторичный ток ТТ при насыщении представлен пунктирной линией, а исходный первичный ток, приведенный ко вторичной цепи (эталонный), сплошной линией. Результаты восстановления тока для этого режима представлены на рис. 4.

На рис. 4, а показан результат работы методов прогнозирования с помощью ИНС [3–9], а на рис 4, б – результат работы метода КМ1. Восстановление тока методом КМ2 представлено на рис. 4, с. Метод КМ2 состоит из алгоритмов прогнозирования и использования характеристики намагничивания ТТ. На этом рисунке сплошные линии соответствуют эталонному току, пунктирные – восстановленному.

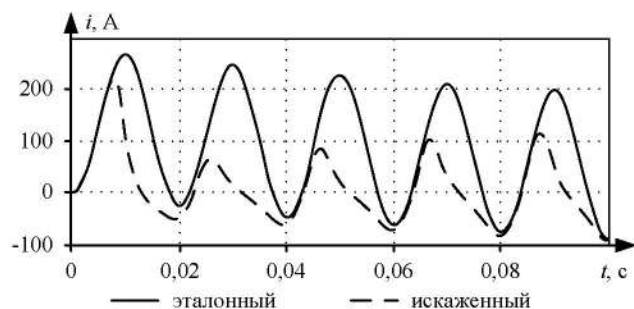


Рис. 3. Эталонный ток (сплошная) и искаженный ток (пунктирная)

В качестве исходного сигнала с содержанием шума (режим 4) взяты данные переходного процесса КЗ, представленные на рис. 5. На этом рисунке ток КЗ (эталонный) представлен сплошной линией, а искаженный вторичный ток – пунктирной линией. Результаты восстановленного тока для этого режима приведены в табл. 1.

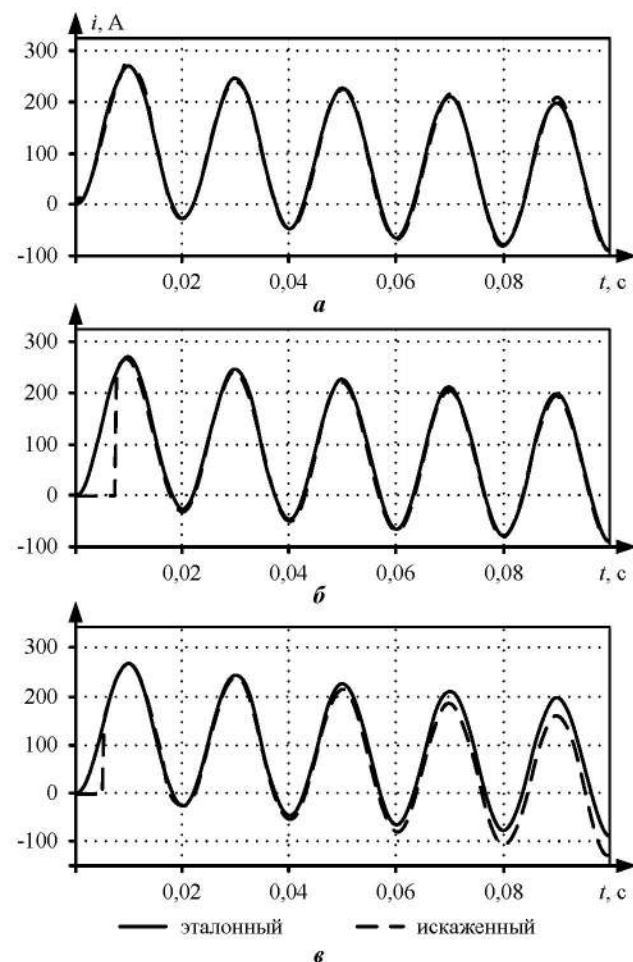


Рис.4. Эталонный и восстановленный ток: а – с помощью ИНС; б – методом КМ1; в – с помощью КМ2

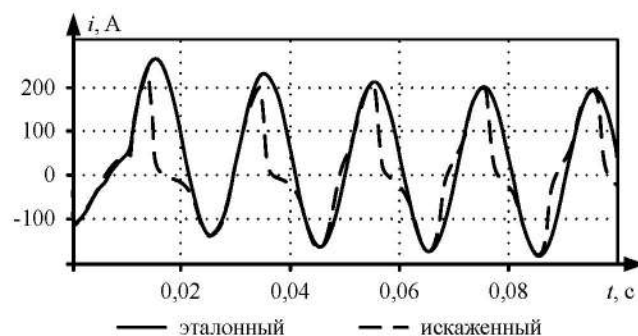


Рис. 5. Эталонный ток (сплошная) и искаженный ток (пунктирная)

Таблица 1
Погрешности методов восстановления вторичного тока ТТ при различных параметрах насыщения

Источник	Метод	Режимы							
		1		2		3		4	
		$f_i^{cp}, \%$	$\varepsilon^{cp}, \%$	$f_i^{cp}, \%$	$\varepsilon^{cp}, \%$	$f_i^{cp}, \%$	$\varepsilon^{cp}, \%$	$f_i^{cp}, \%$	$\varepsilon^{cp}, \%$
[3-9]	ИНС	-0,12	1,85	1,7	7,3	0	3,3	7,5	-0,03
[10,11]	КМ1	4,6	11	0,66	10	1,9	9,44	--	--
[12]	КМ2	2,4	2,7	9,3	12,8	12,7	16,6	-4,32	33

Далее в табличном виде для всех четырех режимов приведен сравнительный анализ рассмотренных методов с различными подходами к восстановлению вторичного тока. Для каждого из них определены усредненные токовая f_i^{cp} и полная ε^{cp} погрешности [1] восстановленного тока на интервале моделирования. Необходимо отметить, что токовая погрешность f_i^{cp} без использования методов компенсации при насыщении сердечника ТТ для модельного сигнала составляет порядка 75–85%, а для реального – 62%.

По выражению (13) определяется выраженная в процентах относительная усредненная погрешность восстановленного тока:

$$f_i = \frac{I_2 - I_1 / \kappa_T}{I_1 / \kappa_T} \cdot 100, \quad (13)$$

где I_1 и I_2 – действующее значение соответственно эталонного и восстановленного токов на периоде.

Вычисление полной погрешности ε было произведено с помощью нижеприведенного выражения и также выражается в процентах.

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{i_{1n}}{\kappa_T} - i_{2n} \right)^2}, \quad (14)$$

где N – количество отсчетов за период.

Следует отметить, что для восстановления реального сигнала с помощью КМ2 [12] при прогнозировании на основе ИПТ без учета апериодической составляющей результат получается более точным относительно результата восстановления тока этим же методом с учетом апериодической составляющей. Также следует отметить, что метод КМ1, предложенный в [10,11], оказался не способным восстановить реальный ток КЗ, форма которого представлена на рис. 5. Это объясняется тем, что в ИПТ этого тока присутствует излом формы сигнала,

связанный с переходом от нормального режима к режиму КЗ. Для устранения этой проблемы предлагается добавить в алгоритм механизм селекции, который позволит ограничить ИПТ участком кривой, относящемуся только к переходному режиму КЗ.

В табл. 2 приведены свойства рассмотренных в данной работе методов. Описаны их достоинства и недостатки, а также используемый подход к восстановлению искаженного вторичного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе выполнен обзор существующих методов восстановления формы искаженного вторичного тока при КЗ с апериодической составляющей. В ходе анализа определены достоинства и недостатки рассмотренных методов. Выявлена точность восстановления тока с помощью комбинированных методов и методов на основе ИНС.

2. Погрешность ТТ в режимах КЗ при насыщении сердечника ТТ выходит за пределы допустимой (5-10%), которая влияет на корректное функционирование устройств РЗА. В связи с этим при разработке алгоритмов для микропроцессорных устройств должна быть предусмотрена коррекция формы искаженного тока. Требование к скорости работы алгоритма компенсации погрешности ТТ является определяющим фактором для релейной защиты.

3. Восстановление искаженного вторичного тока с помощью комбинированных методов оказывается более эффективным относительно применения методов, использующих искусственные нейронные сети, вследствие того, что комбинированные методы обладают более высокой точностью и надежностью. Однако для достижения высокой точности этими методами необходима точная детекция момента насыщения и правильный выбор интервала правильной трансформации ТТ.

Таблица 2

Достоинства и недостатки методов восстановления вторичного тока ТТ

Источник	Подход	Достоинства и недостатки
[3-9]	На основе ИНС	(+) Высокая точность и устойчивость при различной степени зашумленности сигнала, (-) Учет режимов сети и факторов насыщения требует высоких вычислительных ресурсов и большого объема памяти
[10,11]	На основе кривой намагничивания и вторичного тока	(+) Высокая точность, устойчивость в отношении зашумленности сигнала, (-) необходимость наличия искаженных отсчетов, задержка по времени восстановления
[12]		(+) Устойчивость к остаточной магнитной индукции, (-) результат сильно зависит от точности значения прогнозирования, высокая чувствительность к зашумленности сигнала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
2. Трансформаторы тока: учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. РД 153-34.0-35.301.2002. М.: ОРГРЭС, 2003. 152 с.

- СПб.: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
3. Saha M.M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection // *Developments in Power System Protection, Conference Publication. IEE*, 2001, no. 479, pp. 303–306. DOI: 10.1049/cp:20010160.
4. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A., David S. Neural network for current transformer saturation correction // *In Proc. IEEE Transmis. Distrib. Conf. New Orleans, LA, 1999. P. 441–446. DOI: 10.1109/TDC.1999.755390.*
5. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2001. Vol. 16, no. 2, pp. 189–194. DOI: 10.1109/61.915481
6. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006. Vol. 21, no. 1, pp. 73–79. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858799
7. Baoming G., de Almeida A.T., Ferreira Fernando J. T.E. Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network // *Trans. Inst. Meas. Control.* 2006. Vol. 28, no. 1, pp. 81–91. DOI: 10.1191/0142331206tm164oa.
8. Cummins J.C., Yu D.C., Kojovic L.A. Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents // *the Power Eng. Soc. Sum. Meeting, Seattle, WA, USA, 2000, pp. 1373–1378. DOI: 10.1109/PESS.2000.868725.*
9. Erenturk K. ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24, no. 1, pp. 195–201. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.
10. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Jiang L. Fast compensation of current transformer saturation // *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur. 2010, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638931.*
11. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Guo C. X. Current transformer saturation compensation based on a partial nonlinear model // *Electr. Power Syst. Res.* 2013. Vol. 97, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.epr.2012.11.019.
12. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2015. Vol. 30, no. 5, pp. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
13. Ziegler G. Digital Differential Protection. Belo Horizonte, 2005.
14. Протокол совместного заседания <...> по теме «Вопросы координации работы релейной защиты и измерительных ТТ» 2015. Режим доступа: http://www.cigre.ru/research_committees/ik_rus/b5_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90_11.09.2015.pdf.
15. Корчанова А.С., Федосов Д.С. Об изменениях в нормативной документации по трансформаторам тока для релейной защиты // *IV Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы».* 2016. С. 51–55.
16. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кузнецов, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов, А.А. Петров, И.А. Кошельников // *Релейная защита. Научно-практическое издание.* 2019. С. 28–36.
17. Паздерин А.В. Мурзин П.В., Одинаев И.Н., Бобокалон Ф.З. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции // *Электротехнические системы и комплексы.* 2019. Вып. 45. №4. С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11.
18. Bekir K., Vehbi Olgac A. Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks // *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst.* 2011. Vol. 1, no. 4, pp. 111–122.
19. Пархоменко С.С., Леденёва Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Марквардта в условиях большого количества данных // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии.* 2014. Vol. 2, pp. 98–106.
20. Kang Y.C., Lim U.J., Kang S.H., Crossley P.A. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266.
21. Петелин С. Модель однофазного трансформатора тока с насыщением. Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>.
22. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М: Энергия, 1980. 208 с.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF MATHEMATICAL METHODS FOR DECREASING THE SATURATED CURRENT TRANSFORMER ERROR

Ismoil N. Odinaev

Research engineer, Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: ismoil.odinaev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>.

Pavel V. Murzin

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: p.v.murzin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>.

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

Valeriy A. Tashchilin

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.tashchilin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-3705>

Aleksandar Sukalo

Ph.D. (Engineering), Elektroperenos - Elektroprijenos BiH, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. E-mail: a.sukalo@elprenos.com

At different times, different devices were used as current sensors at electric power systems. However, the instrumental electromagnetic current transformers (CTs) proved more suitable and have been the most commonly adopted. The wide application of the CTs can also be justified by their reliability, subject to the operation rules. Accuracy and reliability of measured information sent from instrumental CTs are one of the important components for the correct operation of power system protection, data acquisition and telemetry systems, process control systems at electrical power facilities. There have been developed a lot of numerical methods for compensation of current transformer (CT) saturation. The article provides the comparison of several mathematical methods for secondary current restoration. The accuracy of different methods was analyzed under various conditions, namely, remaining flux, initial phase of short circuit current and noise presence. Linear combination of sine wave and aperiodic function was used as a test primary signal along with real short circuit current scope. Based on the performed analysis some recommendations and further development directions are stressed.

Keywords: current transformers (CTs), distorted secondary current, magnetizing curve, compensated current, magnetizing current, unsaturated section.

REFERENCES

1. *Instruksiya po proverke transformatorov toka, ispolzuemyh v shemah relejnoj zashchity i izmerenija* [Instruction for checking CT]. RD 153-34.0-35.301.2002. Moscow: ORGRJeS, 2003. 152 p. (In Russian)
2. Afanasyev V.V., Adonyev N.M., Kibel, V.M., Sirota I.M., Stognij B.S. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad, Energy, 1989, 416 p. (In Russian)
3. Saha M.M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection // *Developments in Power System Protection*, Conference Publication. IEE, 2001, no. 479, p. 303–306. DOI: 10.1049/cp:20010160.
4. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A., David S. Neural network for current transformer saturation correction // *In Proc. IEEE Transmis. Distrib. Conf. New Orleans, LA, 1999*. P. 441–446. DOI: 10.1109/TDC.1999.755390.
5. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2001. Vol. 16, no. 2, p. 189–194. DOI: 10.1109/61.915481.
6. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006. Vol. 21, no. 1, p. 73–79. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858799.
7. Baoming G., de Almeida A.T., Ferreira Fernando J. T.E. Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network // *Trans. Inst. Meas. Control.* 2006. Vol. 28, no. 1, p. 81–91. DOI: 10.1191/0142331206tm164oa.
8. Cummins J.C., Yu D.C., Kojovic L.A. Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents // *the Power Eng. Soc. Sum. Meeting, Seattle, WA, USA, 2000*. P. 1373–1378. DOI: 10.1109/PESS.2000.868725.
9. Erenturk K. ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24, no. 1, p. 195–201. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.
10. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Jiang L. Fast compensation of current transformer saturation // *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.* 2010. P. 1–7. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638931.
11. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Guo C. X. Current transformer saturation compensation based on a partial nonlinear model // *Electr. Power Syst. Res.* 2013. Vol. 97. P. 34–40. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.11.019.
12. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2015. Vol. 30, no. 5, p. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
13. Ziegler G. *Digital Differential Protection*. Belo Horizonte, 2005.
14. *Protokol sovmestnogo zasedaniya <...> po teme "Voprosy koordinacii raboty relejnoj zashchity i izmeritel'nyh TT"* [Protocol of the joint meeting <...> on the theme of «The issues of coordination for relay system operation and instrumental CTs»] 2015, Available at: http://www.cigre.ru/research_committees/ik_rus/b5_rus/materials/documents/%D0%A2%D0%A2%20%D0%B8%20%D0%A0%D0%97%D0%90_11.09.2015.pdf. (In Russian)
15. Korchanova A.S., Fedosov D.S. About changes in the CTs standards documentation for relay protection. *IV Mezhdunarodnyj molodjozhnyj forum «Intellektualnye Energosistemy»* [IV International Youth Forum "Intelligent Energy Systems"], 2016. Pp. 51–55. (In Russian)
16. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A., Petrov A.A., Koshelnikov I.A. Analysis Of Non-Selective Actions Of Busbar Differential Protection At External Single-Phase Short Circuits With Saturation Of Current Transformer In A Healthy Phase. *Releynaya zashchita. Nauchno-prakticheskoe izdanie* [Relay protection. Scientific and practical publication], 2019. P. 28–36. (In Russian)
17. Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z. Survey of data reliability in digital substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019. Vol. 45, no. 4, p. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11. (In Russian)
18. Bekir K., Vehbi Olgac A. Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks // *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst.* 2011. Vol. 1, no. 4, p. 111–122.
19. Parhomenko S. S., Ledenjova T. M. Neural networks training by Levenberg-Marquardt during data bulk condition. *Vestnik VGU, Seriya: Sistemyj analiz i informatsionnye tehnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: System analyses and Information Technology], 2014, vol. 2, pp. 98–106. (in Russian)
20. Kang Y.C. et al. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19, no. 4, pp. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266.
21. Petelin S. Single phase CT model with saturation. *Tsifrovaya podstantsiya* [Digital substation]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/> (ac-

- cessed 5 November 2019). (In Russian)
22. Korolev E.P., Liberzon Je.M. *Raschet dopustimyh nagruzok v tokovyh tsepyah relenoy zashhity* [Calculation load ability in the current circuits for protection] Moscow: Energy, 1980. 208 p. (In Russian)
-
- Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения / И.Н. Одинаев, П.В. Мурзин, А.В. Паздерин, В.А. Ташчилин, А. Шукало // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 11-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
- Odinaev I.N., Murzin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A., Sukalo A. Analysis of Mathematical Methods for Decreasing the Saturated Current Transformer Error. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 11-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
-

Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ НА УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ С УЧЁТОМ МОЩНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Под регулирующим эффектом нагрузки понимают изменение активной и реактивной мощностей электрической нагрузки вследствие изменения параметров энергосистемы, напряжения и частоты сети, препятствующее данному возмущению. При проведении практических расчетов регулирующим эффектом нагрузки часто пренебрегают. При значительной удаленности нагрузки от энергосистемы и электрически разветвленной сети статические характеристики нагрузки могут оказывать существенное влияние на параметры режима. В данной статье предлагается оценить влияние регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения сети с учётом значения мощности короткого замыкания. При исследовании смоделирована электрическая сеть исследуемого промышленного объекта в специализированном программном комплексе «КАТРАН» и определен регулирующий эффект рассматриваемой нагрузки. Составлен алгоритм определения влияния величины мощности короткого замыкания энергосистемы на напряжение на шинах питающей подстанции. Определены показатели статической устойчивости электроприёмников с учетом регулирующего эффекта нагрузки. В работе показано, что увеличение сопротивления связи с энергосистемой снижает ток мощности короткого замыкания энергосистемы, что приводит к большему влиянию регулирующего эффекта нагрузки на уровень питающего напряжения. В случае электрически удаленных от источников питания разветвленных сетей это приводит к необходимости подробного учета регулирующего эффекта нагрузки. Также увеличение удаленности электрической нагрузки от энергосистемы влияет на показатели устойчивости электрических машин. В работе подсчитан регулирующий эффект в различных узлах нагрузки объекта, исследовано влияние частотного регулирования основных электроприводов насосной станции на регулирующий эффект нагрузки и определено влияние регулирующего эффекта нагрузки на уровень питающего напряжения.

Ключевые слова: регулирующий эффект нагрузки, напряжение, мощность короткого замыкания, ток короткого замыкания, энергосистема, кабель, сопротивление, сеть, нагрузка, статическая устойчивость, электроприёмник.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность настоящей работы связана с повышением требований к качеству электроэнергии. При большой удаленности электрической нагрузки в промышленности от питающей сети регулирующий эффект мощных электроприёмников, таких как синхронные двигатели, может оказывать большое влияние на уровень напряжения сети. Поэтому оценка подобной зависимости является важной задачей в электроэнергетике на данный момент. Использование источников распределенной генерации также не исключает автономной работы нагрузки с энергосистемой. В этом режиме учет регулирующего эффекта нагрузки также становится актуальным.

Влияние потребляемой активной и реактивной мощностей в энергосистеме на уровень напряжения сети выражается регулирующим эффектом нагрузки по напряжению. Под регулирующим эффектом нагрузки подразумевается изменение активной и реактивной мощностей электрической нагрузки вследствие изменения параметров энергосистемы, напряжения и частоты сети, препятствующее данному возмущению. Степень этого влияния может быть разной, в зависимости от величины самой нагрузки и сопротивления электрической связи между нагрузкой и энергосистемой. Регулирующий эффект нагрузки численно выражается коэффициентами, которые представляют собой частные производные первого порядка. Величина, обратно пропорциональная коэффициенту регулирующего эффекта нагрузки, называется коэффициентом статизма нагрузки. На практике коэффициенты регулирующего эффекта нагрузки могут считаться по упрощенной ме-

тодике как отношение разности мощностей на каком-либо промежутке статической характеристики нагрузки к разности напряжения или частоты сети на этом же промежутке.

Вопросы построения статических характеристик нагрузки и расчёт установившегося режима синхронных машин были рассмотрены в статье [1]. То же, но для асинхронных машин, рассмотрено в статье [2]. Разработке математической модели электроприёмников посвящена статья [3]. Статические характеристики нагрузок промышленных потребителей рассмотрены в статьях [4-8]. Регулирующий эффект нагрузки рассмотрен в статьях [7, 8, 10, 11]. К зарубежным работам по этой и смежным темам относятся труды [14-17]. Анализ работ показал, что большая часть трудов посвящена вопросам исследования регулирующего эффекта таких электроприёмников, как синхронные и асинхронные двигатели [18-20]. В меньшей степени охвачены вопросы регулирующего эффекта специфических промышленных потребителей, например, таких как двигатели, получающих питание от частотных преобразователей. Такое исследование является необходимым в силу повсеместного перехода от прямого подключения в сеть приводов переменного тока к питанию через частотные преобразователи, а также пуск от них.

Кроме того, в имеющейся литературе недостаточно проработаны вопросы влияния параметров распределительной сети, таких как трансформаторы, воздушные и кабельные линии, на величину регулирующего эффекта. Особенно это важно при определении регулирующего эффекта комплексной нагрузки, поскольку распределительная сеть оказывает влияние на величину подвального напряжения к каждому из электроприёмников.

То есть напряжение на источнике питания изменяется в заданной пропорции, тогда как напряжение, подводимое при этом к каждому из электроприемников распределенной сети может изменяться отличным образом в соответствии с характеристиками распределительной сети. Если данная сеть очень распределенная (в крупных сетях сети 10 кВ могут достигать десятки километров), то еще наложится регулирующий эффект естественной емкости кабельных линий.

Основной задачей настоящей работы является исследование зависимости напряжения сети от трёх параметров энергосистемы: мощности к.з., регулирующего эффекта нагрузки и величины самой нагрузки.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

В качестве исследуемого промышленного объекта научной работы была выбрана насосная станция цеха водоснабжения, где главными электроприёмниками являются двигатели напряжением по 10 кВ различных типов. Это шесть синхронных двигателей марки СДВ-1600, три синхронных двигателя СДН-1250 и два асинхронных двигателя АОД-630. Потребляемая ими мощность составляет 97% от суммарной расчётной активной мощности нагрузки. Кроме того, имеется низковольтная нагрузка, преимущественно состоящая из асинхронных двигателей с вентиляторным моментом сопротивления на валу. Суммарная установленная мощность объекта составляет 14,6 МВт. Питание станции идёт от трёх секций по 10 кВ, нагрузка по которым распределена примерно поровну.

В специализированном программном комплексе «КАТРАН» [21, 22] электрическая сеть данной станции была смоделирована и был определен её регулирующий эффект на примере 1 секции 10 кВ. В указанном программном комплексе используются метод последовательного эквивалентирования параметров режима для расчета установившихся режимов электрических сетей и метод последовательного утяжеления для определения статической устойчивости генераторов. Метод последовательного утяжеления режима состоит в последовательном изменении параметров исследуемой сети с заданным шагом. На каждом новом шаге считается установившийся режим, пока не будет обеспечена возможность расчёта. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчёт установившихся режимов энергосистем рассмотрены в статье [11].

Согласно расчетам, произведенным в «КАТРАН», суммарная активная расчётная нагрузка станции составляет 10,84 МВт в нормальном режиме работы.

С помощью данного программного комплекса были определены регулирующий коэффициент нагрузки и коэффициент статизма 1 секции 10 кВ с учётом и без учёта питающего кабеля, чтобы оценить влияние последнего на регулирующий эффект нагрузки. Результаты расчетов сведены в табл. 1. Очевидно, что учет протяженного кабеля существенно изменяет регулирующий эффект нагрузки.

Такие же расчеты были проведены для 1 секции 0,4 кВ с учётом и без учёта питающего силового трансформатора. Результаты расчетов сведены в табл. 2. Учет трансформатора оказывает меньшее влияние на параметры режима.

Таблица 1
Коэффициенты 1 секции 10 кВ с учётом и без учёта кабеля

Параметры расчёта	1 секция 10 кВ без кабеля	1 секция 10 кВ с кабелем
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	3
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,25	1
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,01	0
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	10	10
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	0,33
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,8	1
$\Delta U_*/\Delta P_*$	100	∞
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,1	0,1

Таблица 2
Коэффициенты 1 секции 0,4 кВ с учётом и без учёта трансформатора

Параметры расчёта	1 секция 0,4 кВ без трансформатора	1 секция 10 кВ с трансформатором
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	3
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,75	2
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,015	0,015
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	2,5	2
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	0,33
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,57	0,5
$\Delta U_*/\Delta P_*$	66,66	66,66
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,4	0,5

Таким образом, наличие питающего кабеля и силового трансформатора ведёт к изменению коэффициентов регуливающего эффекта нагрузки. Они, в общем случае, снижаются. Поэтому при определении статических характеристик нагрузки необходимо учитывать характер распределительной сети.

Как отмечалось выше, одной из современных тенденций электроэнергетики является переход к использованию частотных преобразователей. С целью влияния этих изменений на регулирующий эффект нагрузки было осуществлено моделирование в программе «КАТРАН» частотного регулирования двигательной нагрузки 1 секции 10 кВ и сравнение коэффициентов регуливающего эффекта нагрузки до и после внедрения частотных преобразователей. Результаты данного вычислительного эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3
Коэффициенты 1 секции 10 кВ до и после внедрения частотных преобразователей

Параметры расчёта	До внедрения	После внедрения
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	0,175
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,125	0,075
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,01	0,01
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	10	0,055
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	5,71
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,88	13,33
$\Delta U_*/\Delta P_*$	100	100
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,1	18,18

Как видно, частотное регулирование электроприводов секции ведёт к снижению их регулирующего эффекта практически до нуля. Это может объясняться тем, что незначительные колебания напряжения или частоты сети практически не влияют на выходные значения частотного преобразователя, от которого могут питаться электродвигатели. Если оценивать данные результаты с точки зрения влияния на параметры режима, то можно однозначно отметить уменьшение положительного регулирующего эффекта нагрузки. В частности, у асинхронных двигателей с коэффициентом загрузки до 0,6 и вентиляторным сопротивлением на валу регулирующий эффект по напряжению положительный. Поэтому при снижении напряжения в точках питания двигателя он естественным путем снижает потребление активной и реактивной мощности и напряжение несколько восстанавливается. Этого не будет при питании двигателей через частотные преобразователи. Кроме того, при раздельной работе регулирующий эффект по частоте также снизится. При высокой нагрузке двигателя по активной мощности его регулирующий эффект реактивной мощности по напряжению может быть отрицательным. Тогда установка преобразователей будет оказывать положительное влияние на уровень напряжения в сети.

Следующим этапом данной работы было исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения сети при раздельной работе с энергосистемой. Данный режим был взят в силу того, что регулирующий эффект при его реализации оказывает максимальное влияние на уровень напряжения на шинах питающего распределительного устройства (в нашем случае это было распределительное устройство 10 кВ). В качестве источника питания был взят синхронный генератор мощностью 25 МВт. Результаты расчета сведены в табл. 4.

Как видим, если не учитывать регулирующий эффект нагрузки, то уровень напряжения сети будет отличаться от номинального значения на большую величину. Это связано с тем, что исследуемый узел оказался избыточным и без учета регулирующего эффекта нагрузки напряжения существенно повышались в силу неизменного характера нагрузки. С учетом регулирующего эффекта при повышении напряжения нагрузка также возрастала и напряжение естественным образом снижалось.

Таблица 4
Напряжения на секциях с учётом и без учёта регулирующего эффекта нагрузки

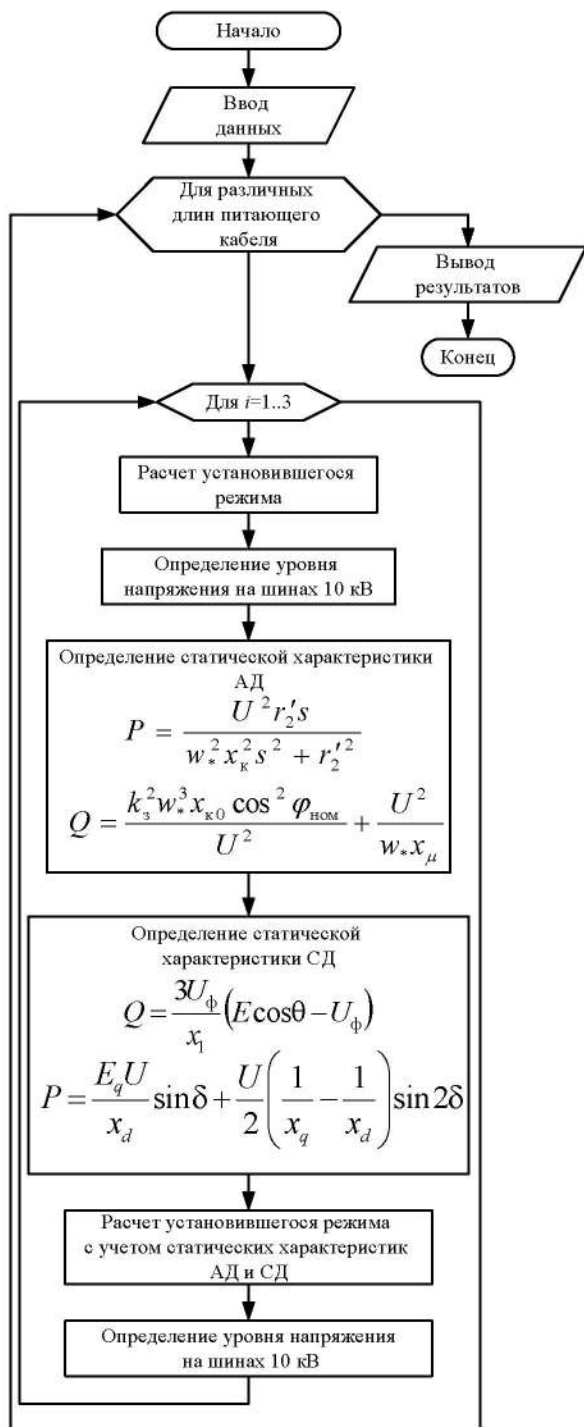
Секция	U , кВ (с учётом РЭН)	U , кВ (без учёта РЭН)
1 секция 10 кВ	11,97	12,23
2 секция 10 кВ	11,97	12,23
3 секция 10 кВ	11,97	12,23
1 секция 0,4 кВ	0,474	0,484
2 секция 0,4 кВ	0,474	0,484

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕНИЕ СЕТИ С УЧЁТОМ МОЩНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПИТАЮЩЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Следующим этапом исследования было исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения на шинах цеховой подстанции с учетом мощности короткого замыкания от энергосистемы. Такая постановка задачи объясняется тем, что с целью упрощения расчетов часто при параллельной работе с энергосистемой учетом регулирующего эффекта пренебрегают или учитывают упрощенно. Интерес представляет определение стапели разветвленности электрической сети с учетом мощности короткого замыкания энергосистемы, когда регулирующим эффектом нагрузки по напряжению пренебрегать не желательно. Алгоритм для решения поставленной задачи приведён на рисунке. Он включает в себя совокупность расчетов установившихся режимов исследуемой сети и определение уровня напряжения на 1 секции 10 кВ насосной станции при различной электрической удаленности нагрузки от энергосистемы с учётом статических характеристик электродвигателей. Расчет каждого установившегося режима ведется в три итерации. Изменение мощности короткого замыкания осуществлялось путем изменения длины питающего кабеля и, как следствие, сопротивления электрической связи с шагом 0,3 км. Составим таблицу изменения напряжения на шинах 10 кВ. Увеличение длины питающего кабеля приводит к увеличению его общего сопротивления, то есть сопротивления электрической связи между энергосистемой и исследуемой нагрузкой, что приводит к уменьшению тока короткого замыкания и, как следствие, мощности КЗ. Уменьшение $S_{кз}$ приводит к большему влиянию регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения на шинах 10 кВ. Результаты расчетов сведены в табл. 5.

Очевидно, что учет регулирующего эффекта нагрузки (РЭН) в этом случае влияния не оказал. Однако при большей электрической удаленности потребителей от источника питания этот эффект будет заметнее. Таким образом, уровень питающего напряжения является функцией от трёх параметров: величины нагрузки, регулирующего эффекта и сопротивления электрической связи с энергосистемой.

Заключительным этапом исследования была оценка показателей статической устойчивости синхронных двигателей при различной мощности короткого замыкания энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки. При этом оценивались коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению k_{3U} и активной мощности k_{3P} . Результаты расчетов с учетом регулирующего эффекта нагрузки сведены в табл. 6, без учета статических характеристик нагрузки - в табл. 7. Как видим, показатели устойчивости во втором случае незначительно выше. Это объясняется тем, что напряжение, а следовательно, и электромагнитная максимальная мощность с учетом регулирующего эффекта нагрузки будут незначительно ниже. В целом учет данного фактора не является существенным.



Алгоритм анализа влияния регулирующего эффекта нагрузки на параметр режима с учетом мощности КЗ питающей сети

Таблица 5
Напряжение на шинах 10 кВ с учётом и без учёта регулирующего эффекта нагрузки в зависимости от длины кабеля

$S_{кз}$, МВА	U , кВ	U , кВ (без учёта РЭН)
152,4	10	10,02
143,69	9,95	9,97
132,06	9,64	9,68
120,07	9,46	9,64
108,99	9,67	9,69
99	9,72	9,74
90,28	9,77	9,78

Таблица 6
Показатели статической устойчивости СД при учете РЭН

$S_{кз}$, МВА	k_{3U}	k_{3P}
152,4	0,645	0,409
143,69	0,642	0,398
132,06	0,622	0,321
120,07	0,620	0,317
108,99	0,625	0,332
99	0,629	0,347
90,28	0,633	0,362

Таблица 7
Показатели статической устойчивости СД без учёта РЭН

$S_{кз}$, МВА	k_{3U}	k_{3P}
152,4	0,657	0,457
143,69	0,654	0,443
132,06	0,633	0,364
120,07	0,631	0,354
108,99	0,634	0,367
99	0,638	0,381
90,28	0,641	0,394

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы сделаны следующие выводы:

- 1) увеличение удаленности электрической нагрузки в промышленности от питающей сети и, как следствие, снижение мощности короткого замыкания приводит к большему влиянию регулирующего эффекта электроприемников на напряжение ближайшей шины, от которой они питаются;
- 2) при снижении мощности короткого замыкания энергосистемы статическая устойчивость электрических машин снижается;
- 3) наличие разветвленной распределительной сети в виде трансформаторов, преобразователей и кабелей может существенно изменять регулирующий эффект нагрузки;
- 4) частотное регулирование двигательной нагрузки сводит её регулирующий эффект практически к нулю;
- 5) целесообразность учета регулирующего эффекта нагрузки увеличивается по мере снижения мощности короткого замыкания в условиях протяженной распределительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // Журнал Сибирского федерального университета. 2015. С. 795-801.
2. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокопьев, Ю.Н. Дементьев, Ю.В. Крохта, Ари Абдулла Р. Рахим, Л.С. Удут // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №4. С. 109-120.
3. Буланова О.В., Шорохов Д.В., Малафеев А.В. Разработка моделей электрических нагрузок для расчёта установившихся режимов систем электроснабжения (тезисы) // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. агитогорск: МГТУ, 2002. С.8.
4. Анализ факторов, влияющих на статические характери-

- стики по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, И.А. Гусева, Г.Н. Васичкин // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. Вып. №12. С. 138-145.
5. Расчет статических характеристик по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, И.А. Гусева, Г.Н. Васичкин // Материалы 64-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2004-2005 гг.: сб. докл. Т. 2. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 101-103.
 6. Исследование статических характеристик потребителей металлургического производства / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, С.А. Ефимов, Ю.Ю. Зайцева // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 14. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 169-172.
 7. Влияние регулирующего эффекта нагрузки промышленного предприятия на параметры установившегося режима / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, С.А. Ефимов, Ю.Ю. Зайцева // Материалы 65-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2006-2007 гг.: Сб. докл. Т.2. Магнитогорск ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 32-34.
 8. Статические характеристики комплексной нагрузки металлургических предприятий / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, М.Н. Степанова // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 15. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 225-228.
 9. Определение регулирующего эффекта двигателей постоянного тока, питающихся от нерегулируемых выпрямителей, при планировании режимов / О.В. Буланова, В.М. Тарасов, М.А. Извольский, А.В. Малафеев // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб. тр. Всероссийск. конф. с элементами науч. шк. для молодежи. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 107-109.
 10. Определение регулирующего эффекта двигателей переменного тока с автономными инверторами / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов, М.А. Извольский, Ю.В. Ионова // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.2: сб. тр. Десятой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С.154-155.
 11. Готман В. И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчет установившихся режимов энергосистем // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 2011. 311. №4. С. 134-138.
 12. Тарасов В.М., Буланова О.В., Малафеев А.В. Исследование регулирующего эффекта двигателей постоянного тока, питающихся от тиристорных выпрямителей (тезис) // Тинчуринские чтения: материалы докл. 6 Междунар. молодежной науч. конф. Т.1. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. С. 135-136.
 13. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // Изв. вузов Электромеханика. 2011. №4. С. 115-118.
 14. T. Xu H.-Z. Kang Z.-C. Zhang Y.-H. Liu. Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side // Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control. 37(22):9-12+16 · November 2009.
 15. Madis Leinakse Hendrik Kiristaja Jako Kilter. Identification of Intra-Day Variations of Static Load Characteristics Based on Measurements in High-Voltage Transmission Network. // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), At Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712.
 16. Alexander Tavlintsev A.V. Pazderin Anton Suvorov Pavel Chusovit. Experimental Investigation of Static Load Characteristics // Advanced Materials Research(Volumes 960-961). June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III. P. 969-973.
 17. Lidija Korunovic D. P. Stojanovic. The effects of normalization of static load characteristics // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. 28 June-2 July 2009.
 18. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золотов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №1. Энергетика. С. 54-59.
 19. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бадева, В.И. Полищук, А.С. Тавлинцев // Известия Томского политехнического университета. Техника и технология в энергетике. 2014. Т. 325. №4. С. 164-175.
 20. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке / В.З. Ковалёв, А.Г. Щербаков, О.А. Петухова, А.А. Зябкин // Омский научный вестник. 2017. №5. С. 116-125.
 21. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 27-38.
 22. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 40-47.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

STUDY OF THE INFLUENCE OF REGULATING LOAD EFFECT ON THE VOLTAGE OF THE SUPPLY SUBSTATION TAKING INTO ACCOUNT THE POWER OF THE SHORT-CIRCUIT OF THE ENERGY SYSTEM

Ruslan M. Nigamatullin

An undergraduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-9358>

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lo-gan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Under the regulatory effect of the load we understand the change in the active and reactive capacities of the electric load due to changes in the parameters of the power system, voltage and frequency of the network preventing this disturbance. In practical calculations, the regulatory effect of the load is often neglected. With a significant distance of the load from the power system and the electrically branched network, the static characteristics of the load can have a significant impact on the parameters of the mode. This article proposes to evaluate the influence of the regulatory effect of the load on the voltage level of the network taking into account the value of short-circuit power. In the study, the electric network of the industrial object under study was modeled in the specialized KATRAN software complex and the regulatory effect of the load in question was determined. An algorithm for determining the effect of the power short-circuit power of the power system on the voltage on the buses of the power substation has been compiled. The parameters of the static stability of power consumers are determined taking into account the regulatory effect of the load. The work shows that an increase in the resistance of communication with the power system reduces the current power of the short circuit of the power system, which leads to a greater influence of the regulatory effect of the load on the level of the supply voltage. In the case of branched networks electrically remote from power supplies, this leads to the need for a detailed consideration of the regulatory effect of the load. Also, increasing the distance of the electrical load from the power system affects the stability indicators of electrical machines. In the work, the regulatory effect in various load nodes of the object was calculated, the influence of the frequency regulation of the main electric drives of the pumping station on the regulatory effect of the load was studied and the influence of the regulatory effect of the load on the level of the supply voltage was determined.

Keywords: load regulating effect, voltage, short circuit power, short-circuit current, power system, cable, resistance, network, load, static stability, power receiver.

REFERENCES

1. Filatov A. N., Syzganova E. Yu., Panteleev V. I., Petuhov R. A., Pilyugin, G. A. Static characteristics and methods of calculation steady-state modes of synchronous motors. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University]. 2015, pp. 795-801. (In Russian)
2. Odnokopylov Ivan G., Dementiev Yuri, Krochta Yuri, Ari, Abdullah R. RA-chem, Udu Leonid Stepanovich. Static limiting characteristics of the asynchronous electric drive with frequency vector control // *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Herald of SUSU. "Energy" Series]. 2018. Vol. 18, no. 4, pp. 109-120. (In Russian)
3. Bulanova O.V., Shorokhov, D. V., Malafeev A.V. Modelling of electric loads for calculation of the established modes of power supply systems (abstract). *Energetiki i metallurgii nastoyashchemu i budushchemu Rossii: Tez.dokl. 3-y Vseros. nauch.-tekhn. Konf.* [Energy and metallurgy present and future of Russia: abstracts of reports of 3rd all-Russian scientific.-tech. Conf.]. Magnitogorsk: MGTU, 2002. P. 8. (In Russian)
4. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. Analysis of factors affecting static conductive characteristics of frequency-voltage consumers of metallurgical production (article) / *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhhvuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electrical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk, GOU VPO "MGTU", 2006. Vol. No. 12. P. 138-145. (In Russian)
5. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. Calculation of static characteristics of frequency-voltage consumers of metallurgical production (article) *Materialy 64-y nauch.-tekhn. Konf. Po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2004-2005 gg.: Sb. Dokl. T.2* [Materials of the 64th scientific.-tech. Conf. according to the results of scientific research in 2004-2005: Collection of scientific reports. Vol. 2]. Magnitogorsk: GOU VPO "MGTU", 2006. P. 101-103. (In Russian)
6. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Efimov S.A., Zaytseva Y.Y. Study of the static characteristics of consumers of metallurgical production (article), *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhhvuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electro-technical systems and complexes: Interuniversity collection. SB. nauch. Tr.] Vol. 14. Magnitogorsk: GOU VPO "MGTU", 2007. P. 169-172. (In Russian)
7. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Efimov S.A., Zaytseva Y.Y. the Influence of the regulating effect of loading industrial enterprises on the parameters of the installation stopped still mode (article). *Materialy 64-y nauch.-tekhn. Konf. Po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2006-2007 gg.: Sb. Dokl. T.2*. [Proceedings of the 65th scientific.-tech. Conf. according to the results of scientific research for 2006-2007. Vol. 2]. Magnitogorsk GOU VPO "MGTU", 2007. P. 32-34. (In Russian)
8. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Stepanova M.N. Static characteristics the comprehensive load of metallurgical enterprises (article) *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhhvuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electrical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Vol. 15. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU, 2008. P. 225-228. (In Russian)
9. Bulanova O.V., Tarasov V. M., Izvolsky M. A., Malafeev A.V. Determination of the regulatory effect of DC motors supplied from uncontrolled rectifiers in planned regimes (article). *Nauchno-issledovatel'skie problemy v oblasti energetiki i energosberezheniya: Sb. Tr. Vserossiysk. Konf. s elementami nauch. Shk. Dlya molodezhi* [Research issues in the field of energy and energy conservation: collection of scientific papers of the All-Russian conference with workshops for the youth]. Ufa: UGATU, 2010. P. 107-109. (In Russian)
10. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu. N., Tarasov V.M., Izvolsky M.A., Ionova Y.V. Determination of the regulatory effect of AC motors with auxiliary inverters (article). *Vysokie tekhnologii, fundamentalnye i prikladnye issledovaniya, obrazovanie. T. 2. Sb. Tr. Desyatoy Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. «Issledovanie, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologiy v promyshlennosti»* [High technologies, fundamental and applied researches, education. Vol. 2: collection of scientific papers of the tenth Intern. scientific.-pract. Conf. "Research, development and application of high technologies in industry"]. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnical Institute. University press, 2010. P. 154-155. (In Russian)

11. Gotman V. I. Common algorithm of static stability estimation and calculation of the established modes of energy systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University]. 2007. Vol. 2011. 311. No. 4. P. 134-138. (In Russian)
12. Tarasov V.M., Bulanov O.V., Malafeyev A.V. Study of govern-present the effect of DC motors fed from thyristor rectifiers (thesis). *Tinchurinskie chteniya: Materialy dokl. 6 Mezhdunar. Molodezhnoi nauch. Konf. T.1 - Kazan* [Tinchurin readings: Materials of reports of 6 Intern. youth scientific. Conf. Vol. 1. Kazan: Kazan. State Power University, 2011. P. 135-136. (In Russian)
13. Nikolaev N.A., Malafeyev A.V., Bulanov O.V., Kondrashov Yu.N., Tarasov V.M. Regulatory effect rectifier load to determine the parameters of the established modes of power supply systems of industrial enterprises (article). *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011. No. 4. P. 115-118. (In Russian)
14. T. Xu, H.-Z. Kang Z.-C. Zhang Y.-H. Liu. Influence of voltage regulating and control mode for power type of load on voltage stability of load side. // *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*. 37(22):9-12+16 • November 2009.
15. Madis Leinakse Hendrik Kiristaja Jako Kilter. Identification of Intra-Day Variations of Static Load Characteristics Based on Measurements in High-Voltage Transmission Network // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), At Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712.
16. Alexander Tavlintsev A. V. Pazderin Anton Suvorov Pavel Chusovitin. Experimental Investigation of Static Load Characteristics. // *Advanced Materials Research*(Volumes 960-961). June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III. P. 969-973.
17. Lidija Korunovic, D. P. Stojanovic. The effects of normalization of static load characteristics // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. 28 June-2 July 2009.
18. Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zolov B.P. Determination of the static characteristics of the power loads of network nodes on the basis of active experiment. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. [Proceedings of Universities. The North Caucasus region. Technical Sciences]. 2015. No. 1. Energy. P. 54-59. (In Russian)
19. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tulentsev A.S. Method of identifying load static characteristics according to the results of the experiment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologiya v energetike* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering and technology in the energy sector]. 2014. V. 325. No. 4. P. 164-175. (In Russian)
20. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Petukhova O.A., Zyabkin A.A. The effect of deviation of the parameters of an asynchronous machine on its static characteristics under fan load. *Omskiy nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2017. No. 5. pp. 116-125. (In Russian)
21. Gazizova O.V., Kondrashova YU.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. (In Russian)
22. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeyev A.V. The question context of saturation in the mathematical model industrial generator for calculation of transition mode in the power complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40-47. (In Russian)

Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 19-25. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)

Nigamatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. Study of the Influence of Regulating Load Effect on the Voltage of the Supply Substation Taking into Account the Power of the Short-Circuit of the Energy System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 19-25. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(47)-19-25)

Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (НИИ АЭМ ТУСУР)

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМИТАТОРА БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Одной из особенностей имитаторов батареи солнечной, используемых в космической индустрии, являются их более высокие динамические характеристики в сравнении с имитаторами батарей солнечных, используемых в промышленности. В связи с этим несколько отличаются и подходы к проектированию как силовой части, так и системы управления. Представлен способ формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной, применяемого для испытания систем электропитания космических аппаратов. Суть предложенного способа заключается в представлении имитатора батареи солнечной как безынерционного источника тока благодаря подходу к построению силовой части с использованием обводного канала тока и системы управления, позволяющей синхронизировать его работу в зависимости от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике имитатора батареи солнечной. В статье описана структура силовой части и алгоритм работы системы управления, реализованные в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной.

Ключевые слова: имитатор батареи солнечной, вольт-амперная характеристика, силовой модуль, топология, регулятор, стабилизация тока, ШИМ.

ВВЕДЕНИЕ

Перед отправкой космического аппарата (КА) в космос он должен пройти ряд испытаний, одним из которых является проверка системы электропитания (СЭП). Контрольно-испытательная аппаратура (КИП), осуществляющая проверку СЭП, состоит из ряда электротехнических комплексов: имитатора аккумуляторной батареи, имитатора батареи солнечной (ИБС), блока имитации нагрузки. Данные комплексы позволяют в полной мере осуществить наземную проверку СЭП КА. Задачей ИБС является имитация первичного источника тока – солнечной батареи (СБ) [1, 2].

К ИБС для СЭП КА предъявляются высокие требования к динамическим характеристикам, а именно возможности адекватно и с наименьшим временем запаздывания изменять значение тока и напряжения выхода соответственно изменению нагрузки. В связи с этим в качестве топологии силовой части, как правило, берется линейная топология [3, 4] построения силовых модулей или комбинированная [5, 6]. В системах управления данных ИБС в качестве способа формирования ВАХ принят так называемый метод справочных таблиц, подробным образом описанный в литературе [7]. Недостаток такого подхода к построению ИБС заключается в низком КПД линейной топологии и относительно малой мощности ИБС. Значение мощности ограничивается конечным значением количества работающих параллельно линейных каналов тока. Увеличение данного количества каналов выше некоторого значения приводит к несогласованности между ними и, следовательно, потере устойчивости системы.

В качестве альтернативы описанному выше подходу существует подход к построению ИБС с использованием силовых модулей с импульсным принципом работы [8] и его дальнейшее развитие с использованием обводного канала тока в структуре ИБС.

МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

При воспроизведении характеристик СБ непосредственной задачей ИБС является формирование вольт-амперной характеристики (ВАХ) множества солнечных элементов (СЭ), составляющих СБ. На рис. 1 изображена типичная ВАХ СБ, которую должен формировать ИБС, а также нагрузочные характеристики. Условно ВАХ делится на три участка: участок тока, нелинейный участок и участок напряжения. Положение рабочей точки (А/В/С) ВАХ ИБС определяется нагрузкой ($R_1/R_2/R_3$).

В основе построения ИБС лежат аналитические модели солнечного элемента (СЭ). Эквивалентная схема СЭ одной из таких моделей, показанная на рис. 2, описывается уравнением (1).

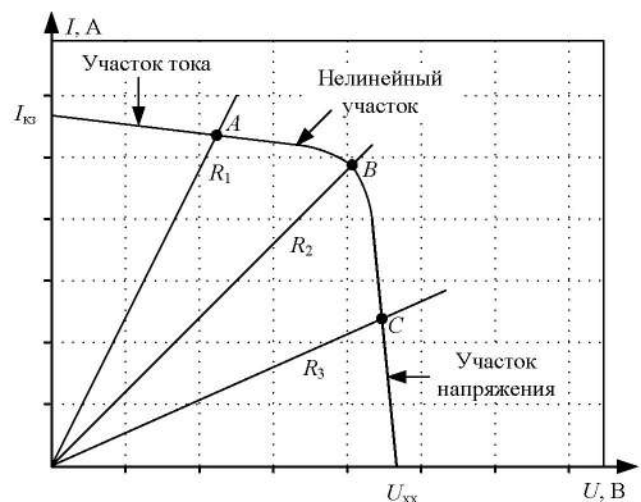


Рис. 1. ВАХ ИБС и нагрузочные характеристики

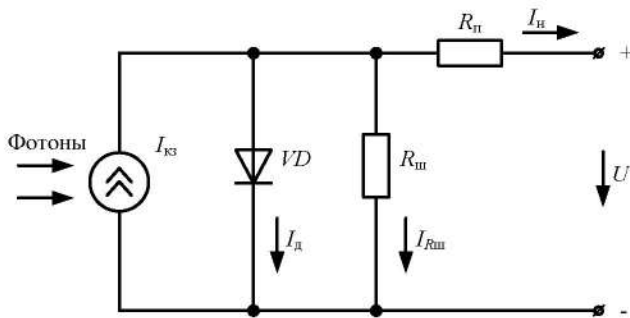


Рис. 2. Эквивалентная схема солнечного элемента

$$I_n = I_{kz} - I_s \left(e^{\frac{e(U + I_n R_n)}{A k T}} - 1 \right) - \frac{U + I_n R_n}{R_{sh}}, \quad (1)$$

где I_n – ток нагрузки солнечного элемента; I_{kz} – фототок или ток короткого замыкания солнечного элемента; I_s – обратный ток насыщения диода; e – заряд электрона равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; U – напряжение на нагрузке солнечного элемента; k – постоянная Больцмана равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – рабочая температура в градусах Кельвина; R_n – последовательное сопротивление солнечного элемента; R_{sh} – шунтирующее сопротивление; A – коэффициент (эмпирический параметр ВАХ), полученный при сравнении теоретических и экспериментальных кривых вольт-амперной характеристики.

Параметрами, определяющими форму ВАХ ИБС, являются: ток короткого замыкания (КЗ) I_{kz} ; напряжение холостого хода (ХХ) U_{xx} ; сопротивления R_{sh} и R_n , которые определяют наклоны ВАХ соответственно на участках тока и напряжения.

Данная модель, взятая за основу, позволяет получить достаточно точные характеристики СЭ при относительно простоте реализации [9, 10].

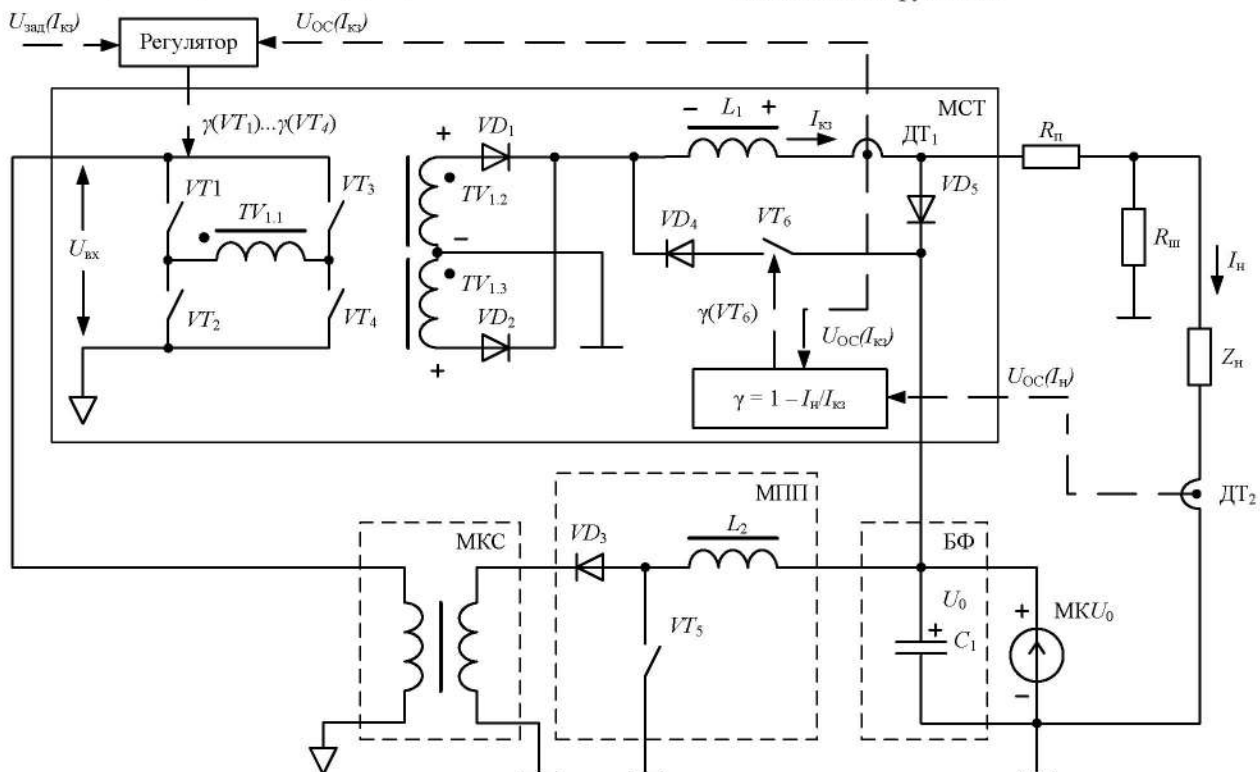


Рис. 3. Структурная схема ИБС № 1

Согласно эквивалентной схеме СЭ ниже будут представлены несколько способов формирования ВАХ СБ и соответствующие им варианты построения ИБС, которые представляют собой безынерционные источники тока, благодаря тому, что ток короткого замыкания (I_{kz}) в дросселе выходного фильтра поддерживается постоянно независимо от положения рабочей точки на ВАХ. Для достижения этого условия используются обводные контуры, которые вступают в работу в соответствии с определенными алгоритмами. Для упрощения анализа приведенные схемы ИБС не предполагают воспроизведение нелинейного участка.

На рис. 3 изображена структурная схема ИБС №1, состоящая из следующих частей:

- модуля стабилизатора тока (МСТ), выполненного по топологии мостового инвертора с понижающим трансформатором, двухполупериодным выпрямителем со средней точкой и обводным каналом;
- источника напряжения – MKU_0 , исполненного по аналогичной топологии МСТ, за исключением обводного канала;
- блока фильтров (БФ), состоящего из нескольких электролитических конденсаторов;
- модуля повышающего преобразователя (МПП), выполненного по топологии повышающего преобразователя;
- модуля конвертора сброса (МКС), выполненного по топологии мостового инвертора с повышающим трансформатором и двухполупериодным выпрямителем со средней точкой;
- резисторов R_n и R_{sh} предназначенных для имитации соответствующих сопротивлений СБ. Величины сопротивлений резисторов R_n и R_{sh} влияют на наклоны ВАХ соответственно на участках напряжения и тока;
- импеданса нагрузки Z_n .

МСТ с помощью ШИМ-преобразования осуществляет стабилизацию тока $I_{кз}$ дросселя L_1 независимо от тока I_n нагрузки. Выход МСТ через отсекающий диод нагружен на конденсаторы БФ с напряжением U_0 , определяющим напряжение ХХ ИБС, а также подключен к нагрузке канала ИБС. При уменьшении сопротивления нагрузки от ХХ до КЗ напряжение на нагрузке будет определяться суммой напряжения U_0 и падением напряжения на отсекающем диоде VD_5 . С дальнейшим уменьшением сопротивления отсекающий диод запирается и ток нагрузки I_n определяется током $I_{кз}$. Стабилизацию напряжения U_0 осуществляют преобразователи MKU_0 и МПП, реализуя заряд и разряд конденсаторов фильтра U_0 и тем самым симметричный отклик системы при сбросе-набросе нагрузки. Выходное напряжение МПП еще раз повышается блоком МКС до уровня $U_{вх}$ и рекуперирован на вход ИБС.

Обводной канал МСТ, состоящий из последовательно включенных транзистора VT_6 и диода VD_4 , позволяет снизить установочную мощность MKU_0 , МПП и МКС. Это достигается за счет своевременного отпирания транзистора VT_6 на интервале паузы управления мостового инвертора МСТ, при этом относительная длительность отпирания регулируется по закону

$$\gamma(VT_6) = 1 - \frac{I_n}{I_{кз}}, \quad (2)$$

где $\gamma(VT_6)$ – коэффициент заполнения ШИМ ключа VT_6 обводного канала; I_n – ток нагрузки, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.

В момент открытого состояния VT_6 ток $I_{кз}$ замыкается по «нулевому» контуру: $L_1(+)$ – ДТ₁ – VD_5 – VT_6 – VD_4 – $L_1(-)$, что препятствует избыточному сбросу энергии, накопленной в дросселе L_1 , в фильтр U_0 .

При положении рабочей точки на участке тока ВАХ, когда стабилизируемый ток $I_{кз}$ полностью потребляется нагрузкой, путь прохождения тока определяется контуром:

$$TV_{1.2} / TV_{1.3} (+) - L_1 - ДТ_1 - R_n - Z_n - U_0 - TV_{1.2} / TV_{1.3} (-).$$

Для стабилизации тока МСТ используется стандартный ПИД-регулятор.

Структурная схема управления работой ключа VT_6 обводного канала МСТ изображена на рис. 4.

На выходе аналогового сумматора $DA1$ формируется напряжение U_1 , описываемое уравнением (3).

$$U_1 = U_{OC}(I_{кз}) - U_{OC}(I_n), \quad (3)$$

где $U_{OC}(I_{кз})$ – сигнал ОС тока КЗ; $U_{OC}(I_n)$ – сигнал ОС тока нагрузки.

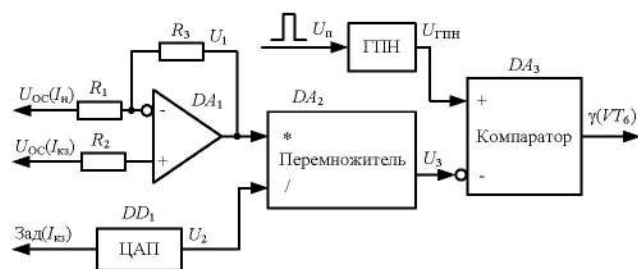


Рис. 4. Структурная схема управления работой ключа обводного канала МСТ

Цифроаналоговый преобразователь ЦАП преобразует цифровой сигнал задания тока КЗ в напряжение U_2 , описываемое уравнением (4).

$$U_2 = U_{зad}(I_{кз}), \quad (4)$$

где $U_{зad}(I_{кз})$ – сигнал задания тока КЗ.

На выходе перемножителя $DA2$ формируется напряжение U_3 , описываемое уравнением (5).

$$U_3 = \frac{U_{OC}(I_{кз}) - U_{OC}(I_n)}{U_{зad}(I_{кз})}, \quad (5)$$

Блок генератора пилообразного напряжения (ГПН) образует напряжение $U_{ГПН}$ пилообразной формы, синхронизированное с временем начала паузы работы ключей $VT_1...VT_4$ мостового инвертора МСТ.

Компаратор $DA3$ в результате сравнения напряжений $U_{ГПН}$ и U_3 формирует коэффициент заполнения $\gamma(VT_6)$ ключа обводного канала VT_6 МСТ, пропорциональный величине $(1 - I_{кз})/I_n$ на интервале паузы ключей $VT_1...VT_4$ мостового инвертора.

Недостатком данного способа является относительная сложность схемы управления работой обводного ключа, что выражается в трудоемком процессе настройки данного узла.

На рис. 5 изображена структурная схема ИБС №2, с упрощенной топологией построения в сравнении с ИБС №1 за счет устранения разрядных (МПП, МКС) и зарядного (MKU_0) блоков с сохранением высокого КПД. Составными частями ИБС №2 являются:

- источники напряжений U_0 и $U_{доб}$, выполненные по топологии мостового инвертора с понижающим трансформатором и двухполупериодным выпрямителем со средней точкой;
- МСТ, выполненного по топологии понижающего преобразователя;
- резисторы R_n и $R_{ш}$ аналогичные по предназначению для схемы ИБС №1;
- отсекающий диод VD_3 вместе с R_n , VT_2 и VD_1 , образующего обводной канал;
- импеданса нагрузки Z_n .

Источники напряжений U_0 и $U_{доб}$ служат для формирования напряжения $U_{хх}$. Модуль стабилизации тока (МСТ), выполненный по топологии понижающего преобразователя, стабилизирует ток $I_{кз}$.

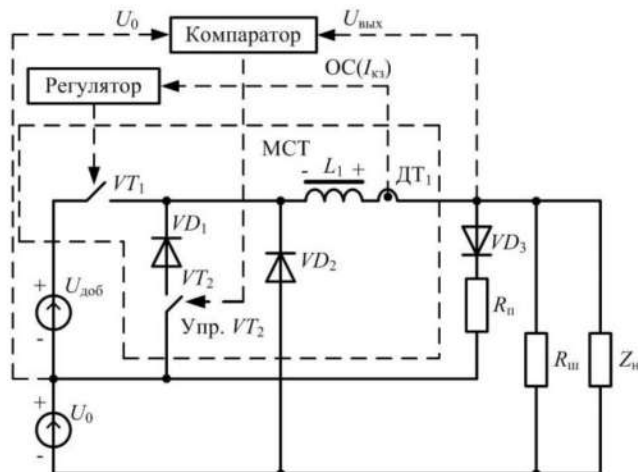


Рис. 5. Структурная схема ИБС №2

Аналогично ИБС № 1 способ формирования ВАХ ИБС № 2 основан на использовании обводных каналов, которые образуются при открытии ключа VT_2 во время работы ИБС на участке напряжения. Управление ключом VT_2 осуществляется компаратором из условия сравнения двух сигналов напряжений $U_{\text{вых}}$ и U_0 . Когда $U_{\text{вых}} > U_0$ (режим работы на участке напряжения), ключ обводного канала открыт, в противном случае – закрыт.

При работе на участке напряжения ток $I_{\text{кз}}$ в ИБС разветвляется по следующим контурам с учетом состояния ключа VT_1 :

ключ VT_1 открыт: $U_{\text{доб}}(+)$ – VT_1 – L_1 – ДТ₁ – $Z_{\text{н}}$ – U_0 – $U_{\text{доб}}(-)$;

$U_{\text{доб}}(+)$ – VT_1 – L_1 – ДТ₁ – VD_4 – VD_3 – $U_{\text{доб}}(-)$.

При закрытом ключе VT_1 ток течет в «нулевом» контуре:

$L_1(+)$ – ДТ₁ – VD_4 – VD_3 – VT_2 – VD_1 – $L_1(-)$;

и через нагрузку: $L_1(+)$ – ДТ₁ – $Z_{\text{н}}$ – VD_2 – $L_1(-)$.

Использование «нулевого» контура позволяет добиться минимального спада тока (энергия рассеивается только на активном сопротивлении элементов контура) в индуктивности L_1 , когда не происходит сброса энергии на источник напряжения U_0 .

При работе на участке тока ВАХ путь прохождения тока будет определяться следующими контурами:

ключ VT_1 открыт: $U_{\text{доб}}(+)$ – VT_1 – L_1 – ДТ₁ – $Z_{\text{н}}$ – U_0 – $U_{\text{доб}}(-)$;

ключ VT_1 закрыт: $L_1(+)$ – ДТ₁ – $Z_{\text{н}}$ – VD_2 – $L_1(-)$.

Использование обводного канала необходимо для предотвращения недопустимого повышения напряжения на модуле стабилизации напряжения U_0 выше номинального в режиме работы ИБС на участке напряжения.

Недостаток данного способа заключается в присутствии ошибок, связанных с нечетким критерием перехода с участка тока на участок напряжения, когда разница уровней напряжений $U_{\text{вых}}$ и U_0 не превышает уровень гистерезиса компаратора, отвечающего за открытое состояние ключа VT_2 . В результате чего энергия индуктивности L_1 приводит к увеличению

уровня напряжения U_0 выше заданного и, как следствие, неадекватному увеличению уровня выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ИБС [11].

В описанных выше способах построения ВАХ используются дополнительные схемы управления работой обводного канала, из-за чего достаточно сложно обеспечить монотонность ВАХ. На рис. 6 представлена модель ИБС № 3 в среде Matlab/Simulink со способом формирования ВАХ, используя только регулятор.

МСТ (выполненный по топологии понижающего преобразователя) работает в двух диапазонах входного напряжения, образуемых соответственно уровнями U_0 и $(U_0 + U_{\text{доб}})$ при переходе рабочей точки с участка тока на участок напряжения ВАХ. Переход на разные уровни входного напряжения осуществляется благодаря использованию двух транзисторных ключей VT_1 и VT_2 , работающих под управлением регулятора МСТ, модель которого изображена на рис. 7.

Переключение диапазонов осуществляется в зависимости от величины коэффициентов заполнения ключей VT_1 и VT_2 МСТ согласно алгоритму, представленному на диаграммах (рис. 8). Для этого в структуре регулятора реализованы два пилообразных сигнала (П1 и П2), сдвинутые по фазе на 180 эл. градусов, представляющие собой опорные сигналы для входов 1 компараторов 1 и 2. На входы сравнения 2 данных компараторов заведен сигнал ошибки блока ПИД-регулятора, полученного путем сравнения заданного тока и тока короткого замыкания. В результате сравнения данных сигналов компараторами формируются соответственно сигналы K_1 и K_2 .

Время открытого состояния транзисторного ключа VT_2 определяется по логике ИЛИ при сравнении сигналов K_1 и K_2 и пропорционально их сумме. Время открытого состояния транзисторного ключа VT_1 определяется по логике и при сравнении сигналов K_1 и K_2 и формируется при их совпадении. В результате, когда ИБС работает на участке тока ВАХ, ключ VT_1 закрыт и ко входу МСТ приложено напряжение U_0 через диод VD_1 .

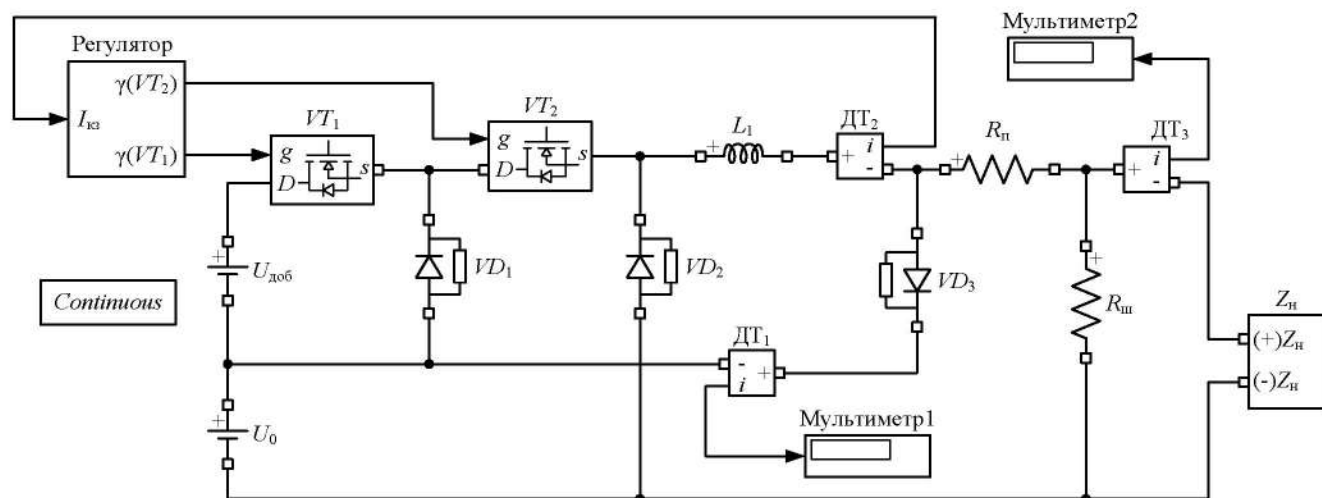


Рис. 6. Модель ИБС № 3

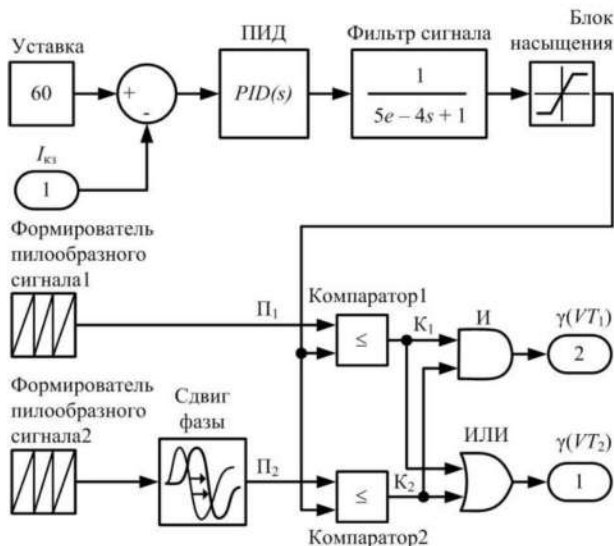


Рис. 7. Модель регулятора МСТ

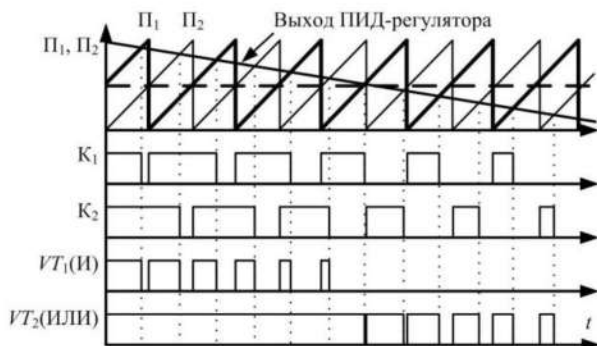


Рис. 8. Диаграммы формирования коэффициентов заполнения ключей VT1 и VT2 МСТ

Формирование ВАХ происходит при работе ключа VT_2 . Когда ошибка регулирования достигает значения, при котором коэффициент заполнения ключа VT_2 становится равным 1, начинает открываться ключ VT_1 и в работу вступает источник напряжения $U_{доб}$, повышая уровень входного напряжения МСТ до значения $(U_0 + U_{доб})$ для компенсации потери напряжения на активном сопротивлении элементов ИБС. С этого момента ИБС переходит на участок напряжения, ключ VT_2 открыт постоянно, формирование ВАХ происходит при работе ключа VT_1 . В момент времени, когда ключ VT_1 закрыт, для тока образуется контур обводного канала: $L_1(+)$ – ДТ2 – VD_3 – ДТ1 – VD_1 – VT_2 – $L_1(-)$. Это приводит к уменьшению скорости спада тока в индуктивности L_1 , при этом вся избыточная энергия индуктивности (не идущая в нагрузку) вращается в этом контуре.

На рис. 9 изображен блок нагрузки (БН) Z_n с функцией потенциометра, благодаря чему можно менять положение рабочей точки ИБС и наблюдать с помощью мультиметров 1 и 2, как токи разветвляются по контурам в зависимости от положения рабочей точки на различных участках ВАХ.

Измерительная часть БН позволяет построить ВАХ ИБС (рис. 10). Для ее отображения необходимо ввести в командной строке среды Matlab команду: `plot(v, i)`. Полученная монотонная ВАХ ИБС говорит об эффективности работы схемы регулятора.

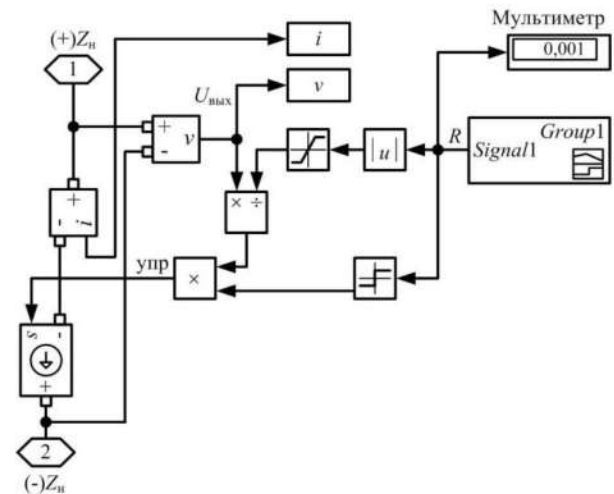


Рис. 9. Блок нагрузки Zn

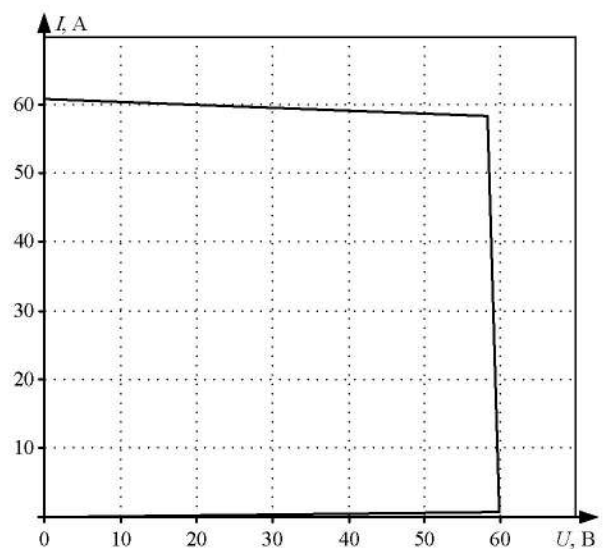


Рис. 10. ВАХ ИБС № 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Топология построения силовой части описанных ИБС с использованием обводного контура позволяет представлять их как безынерционные источники тока, благодаря чему значительно улучшаются динамические характеристики имитаторов.

Предложенный способ формирования ВАХ ИБС №3 дает возможность добиваться более качественной имитации СБ при значительно меньших затратах в процессе настройки. Использование ПЛИС в качестве аппаратного решения для реализации логики регулятора требует лишь настройкой коэффициентов блока ПИД-регулятора и не требует настройки схемы, обеспечивающей работу обводного контура.

Рассатриваемый подход по формированию ВАХ ИБС может применяться для имитации СБ во всем диапазоне существующих мощностей в ближайшей перспективе до 30 кВт.

Статья написана в рамках выполнения работы FEWM-2020-0043 «Изучение фундаментальных проблем создания и теоретические исследования систем ресурсосберегающей интеллектуальной силовой электроники с использованием технологий интернет-вещей и радиофотоники на основе компонентной базы собственной разработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гушин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учебное издание. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Keysight Technologies. Решение проблем имитации солнечных батарей. Помощь в выборе оптимального источника питания для наземных испытаний спутников. URL: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problemimitatsii-solnechnyh-batarey.html> (дата обращения: 23.02.2020).
3. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs // *IEEE Trans.* 2018. Vol. MTT-65, no. 6, pp. 4691–4701.
4. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. High dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage // *IEEE Trans.* 2018. Vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.
5. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach // *IEEE Trans.* 2018. Vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102–4114.
6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator // *IEEE Trans.* 2018. Vol. MTT-33, no. 8, pp. 7178–7192.
7. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator // *IEEE Trans.* – 2009. –2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 24.12.2019).
8. Кремзуков Ю.А. Исследование динамических характеристик имитатора солнечной батареи ИБС-300/25 // *Известия Томского политехнического университета*. 2008. №4. С. 131–135.
9. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов: монография / Ю.А. Кремзуков, В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин. Томск: Томский университет, 2014. С. 86.
10. Кремзуков Ю.А. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на основе импульсных преобразователей: дис... канд. техн. наук. 05.09.12 / Кремзуков Юрий Александрович. Томск, 2011.
11. Пат. 144248 Российская Федерация, МПК H 01 L 31/00. Электрический имитатор солнечной батареи / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Бубнов О.В., Кремзуков Ю.А.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2014117895/28; заявл. 30.04.2014; опубл. 20.08.14.

Поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF FORMING A VOLT-AMPER CHARACTERISTIC OF A SOLAR ARRAY SIMULATOR FOR TESTING POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACECRAFT

Oleg G. Rekutov

Researcher, Direct Current Conversion Department, Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR), Tomsk, Russia. E-mail: rekutov@nii.aem.tomsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7464-5707>

Anton G. Yuditsev

Ph.D. (Engineering), Director, the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR), Tomsk, Russia. E-mail: yag@nii.aem.tomsk.ru.

One of the features of solar array simulators used in the space industry is their higher dynamic characteristics compared to solar battery simulators used in the industry. In this regard, approaches to the design of both the power unit and the control system are somewhat different. A method for forming the volt-ampere characteristics of a solar array simulator used for testing power systems of spacecraft is presented. The essence of the proposed method is to present the solar array simulator as an inertialess current source, due to the approach of constructing the power part using the bypass current channel and a control system that allows you to synchronize its operation depending on the position of the operating point on the current-voltage characteristic of the solar array simulator. The article describes the structure of the power unit and the algorithm of the control system implemented in the Matlab / Simulink environment. The obtained simulation results confirm the effectiveness of the proposed method for the formation of the current-voltage characteristics of a solar array simulator.

Keywords: solar array simulator, current-voltage characteristic, power module, topology, regulator, current stabilization, PWM.

REFERENCES

1. Gushchin V.N. *Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov: uchebnoye izdanie* [Basics of the device of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 2003, 272 p. (In Russian)
2. Keysight Technologies. Reshenie problem imitatsii solnechnykh batarei. Pomoshch v vybere optimalnogo istochnika pitaniya dlya nazemnykh ispytaniy sputnikov [Keysight Technologies. Solving the challenges of solar array simulation. Helping you select the optimal power solution for satellite ground testing]. Available at: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problemimitatsii-solnechnyh-batarey.html> (accessed 23 February 2020). (In Russian)
3. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-65, no. 6, pp. 4691–4701.
4. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. High Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.
5. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng

- Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave track-ing output voltage approach, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102-4114.
6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 8, pp. 7178-7192.
 7. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator, *IEEE Trans.* – 2009, 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
 8. Kremzukov Yu.A. The study of the dynamic characteristics of a solar array simulator SAS-300/25. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2008, no. 4, pp. 131–135. (in Russian)
 9. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchelnikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskii V.M., Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A. *Proektirovanie modulnykh imitatorov solnechnykh batarei avtomatizirovannoi kontrolno-ispytatelnoi apparatury sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of modular solar array simulators of the automated control test apparatus of electric power supply systems of automatic spacecrafts]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2014, 86 p. (in Russian)
 10. Kremzukov Yu.A. *Imitator batarei solnechnoy dlya nazemnoy otrabotki i ispytaniy sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove impulsnykh preobrazovateley*. Kand. Diss. [Solar array simulator for ground testing of spacecraft power systems based on pulse converters. Ph.D. Diss.]. Tomsk, 2011.
 11. Mishin V.N., Pchelnikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A. *Elektricheskiy imitator solnechnoy batarei* [Electric solar array simulator]. Patent RF, no. 2014117895/28, 2014.

Рекутов О.Г., Юдинцев А.Г. Метод формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электропитания космических аппаратов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 26-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32)

Rekutov O.G., Yudintsev A.G. Method of Forming a Volt-Amper Characteristic of a Solar Array Simulator for Testing Power Supply Systems of Spacecraft. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32)

Климаш В.С.¹, Константинов А.М.²¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

СТАБИЛИЗАТОР ТРЕХФАЗНОГО НАПЯЖЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 10/0,4 кВ И АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена проблема нестабильного напряжения у трёхфазных потребителей электроэнергии при их питании от трансформаторных подстанций, включая комплектные трансформаторные подстанции напряжением 10/0,4 кВ. Выполнен сравнительный анализ существующих устройств регулирования и стабилизации трёхфазного напряжения. Выявлены их основные недостатки. Предложен вариант силовой схемы трёхфазного стабилизатора напряжения без входного преобразовательного трансформатора и его подключение в рассечку вторичной обмотки главного трансформатора подстанции, что позволяет минимизировать его массогабаритные параметры. Стабилизатор представляет собой маломощный блочно-модульный тиристорно-транзисторный канал, содержащий звено повышенной частоты, обеспечивающий формирование и регулирование напряжения вольтодобавки для нагрузки совместно с напряжением главного трансформатора подстанции. В качестве звена повышенной частоты применён понижающий трансформатор, работающий на частоте 450 Гц. В работе представлено краткое описание схемы и принципа действия предлагаемого стабилизатора трёхфазного напряжения, а также способов его управления. Выполнено построение регулировочных характеристик и проведен гармонический анализ напряжения на нагрузке при этих способах управления. Получены аналитические соотношения для действующего напряжения на нагрузке в процессе стабилизации, его первой гармоники и среднего значения, соответственно при амплитудном регулировании реверсивным выпрямителем и широтно-импульсным регулированием инвертором напряжения. Выполнено имитационное моделирование работы устройства в различных режимах работы, а именно при пониженном напряжении в сети и на нагрузке и при повышенном напряжении в сети и на нагрузке. Представлены некоторые результаты имитационного моделирования в программной среде Matlab/Simulink. Сделаны выводы по работе.

Ключевые слова: стабилизатор, звено повышенной частоты, комплектная трансформаторная подстанция, реверсивный выпрямитель, инвертор напряжения, непосредственный преобразователь частоты, главный трансформатор подстанции, амплитудный способ управления, широтно-импульсный способ управления, качество напряжения, потребители электроэнергии, имитационное моделирование, MATLAB/Simulink.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует ряд потребителей, требовательных к стабильному напряжению. Особо остро проблема нестабильного напряжения возникает, когда отсутствуют какие-либо устройства для регулирования и стабилизации напряжения. К таким потребителям относятся различные цеховые трансформаторные подстанции, системы собственных нужд тяговых подстанций переменного тока, питающих потребителей автоблокировки через трансформаторы с системой ПВВ [1], когда в условиях интенсивного тяжеловесного движения возникают частые отклонения напряжения и его несимметрия по фазам. Для обеспечения стабильного напряжения у потребителей разрабатываются и применяются стабилизаторы напряжения. При их разработке актуальными становятся вопросы не только высоких энергетических показателей и быстродействия, но и снижения их собственных массогабаритных показателей, а также расширения функциональных возможностей в одном устройстве, что согласуется с современной тенденцией по компактизации и минимизации основного электрооборудования трансформаторных подстанций [2].

В настоящее время среди устройств для стабилизации и регулирования напряжения нашли применение в первичных (10 кВ) или во вторичных цепях (0,4 кВ) главного трансформатора подстанции:

1. Электромеханические устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) – на первичной

(высокой) стороне главного трансформатора подстанции [3, 4].

2. Управляемые шунтирующие реакторы (УШР) – на первичной (высокой) стороне главного трансформатора подстанции [5-7].

3. Стабилизаторы типа СТС – во вторичных цепях главного трансформатора подстанции [8-10].

4. Стабилизаторы типа Odissey – во вторичных цепях главного трансформатора подстанции [11].

В табл. 1 представлены основные параметры стабилизаторов: удельная мощность $P_{уд}$, время срабатывания (быстродействие) $t_{ср}$ и диапазон регулирования D_p выходного напряжения.

Проведенный анализ показал, что среди недостатков устройств регулирования и стабилизации следует отметить следующие: низкое быстродействие (см. табл. 1 от 3,8 до 0,04 с), завышенные массогабаритные показатели (от 4 до 6,1 кВА/кг для стабилизаторов во вторичных цепях главного трансформатора подстанции) и невысокая энергоэффективность.

Таблица 1
Сравнительная оценка параметров устройств регулирования и стабилизации напряжения

Тип	$P_{уд}$, кВА/кг	$t_{ср}$, с	D_p , %
РПН	5-7	1,5-3,8	±10 до ±16
УШР	0,5-3	1-4	±16 до ±20
СТС	6,1	0,2-0,45	±15 до ±20
Odissey	4-5	≈ 0,04	±15 (-20 / +10)

В соответствии с чем была определена цель исследования – разработка компактного и быстродействующего стабилизатора трёхфазного напряжения с улучшенными энергетическими показателями.

Задачами исследования являлись:

1. Разработка схемных решений, обеспечивающих снижение массы и габаритов предлагаемого стабилизатора трёхфазного напряжения.
2. Проверка функционирования стабилизатора по предложенной схеме.
3. Разработка быстродействующих алгоритмов управления стабилизатором.
4. Получение аналитических выражений для разработанных алгоритмов стабилизации напряжения на нагрузке.
5. Анализ регулировочных характеристик, а также характеристик гармонического влияния в процессе стабилизации напряжения.
6. Исследование пусковых, переходных и установившихся процессов на имитационной модели стабилизатора напряжения в программе MATLAB.

МЕТОДЫ

В соответствии с целью исследования был предложен стабилизатор трёхфазного напряжения нагрузки, однолинейная схема которого представлена на рис. 1 [12].

На рис. 1 обозначены: С – энергосистема; ГТ – главный трансформатор подстанции; Н – нагрузка; РВ – реверсивный трёхфазный мостовой выпрямитель; ИН – трёхфазный мостовой инвертор напряжения; ЗПЧ – звено повышенной частоты (представляющее собой трёхфазно-шестифазный высокочастотный трансформатор); НПЧ – непосредственный преобразователь частоты; Д1 – датчик отклонения напряжения сети; Д2 – датчик отклонения напряжения нагрузки.

Подключение РВ (рис. 1) осуществляется параллельно нагрузке подстанции, а НПЧ, который выполнен шестифазно-трёхфазным, в рассечку вторичных обмоток ГТ подстанции. Реверс напряжения на выходе РВ необходим для перевода стабилизатора из режима вольтосложения (при пониженном напряжении на нагрузке) в режим вольтовывчитания (при повышенном напряжении на нагрузке). Каждый из мостов РВ выполнен на базе однооперационных тиристоров (SCR).

Стабилизатор (рис. 1) производит формирование добавочного напряжения вольтодобавки U_d для ГТ подстанции и продольное регулирование этого напряжения амплитудным способом – РВ по отклонению напряжения в сети или широтно-импульсным способом с помощью ИН по отклонению напряжения в нагрузке.

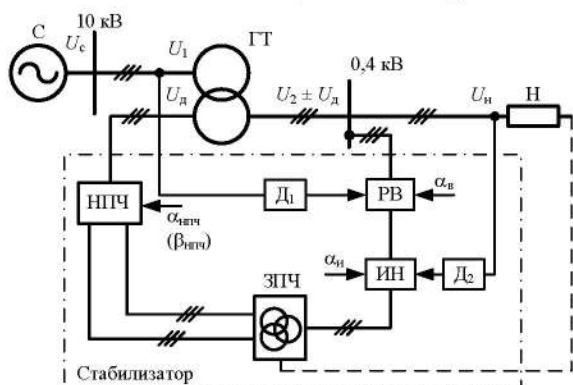


Рис. 1. Схема подключения стабилизатора напряжения на трансформаторной подстанции

Принцип действия трёхфазного стабилизатора заключается в следующем: переменное напряжение на нагрузку подается на вход РВ, где происходит его преобразование в выпрямленное постоянное напряжение U_d . Среднее значение этого выпрямленного напряжения определяется по известной формуле:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_2 \cos \alpha_v, \quad (1)$$

где U_2 – действующее значение напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора; α_v – угол регулирования трёхфазного реверсивного выпрямителя.

Далее выпрямленное напряжение поступает на промежуточный LC-фильтр (не показан на схеме рис. 1). После сглаживания напряжение подается на вход трёхфазного ИН, который выполнен по мостовой схеме на базе IGBT-транзисторов. В этом случае при интервале проводимости транзисторов, равном 180 эл. град., фазное напряжение на его выходе будет двухступенчатым с высотами ступеней $2U_d/3$ и $U_d/3$. Действующее значение линейного напряжения $U_{ил}$ на выходе ИН определяется в соответствии с выражением для двух случаев:

1) амплитудного регулирования РВ ($\alpha_n = \alpha_{u.min} = \text{const}$):

$$U_{ил} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot U_d; \quad (2)$$

2) широтно-импульсного регулирования ИН внутри периода коммутации (при этом действующее значение линейного напряжения зависит от угла управления инвертором $\alpha_n = \text{var}$):

$$U_{ил} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{\sqrt{U_d^2 (\pi - 3\alpha_n N)}}{\sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

где N – число импульсов напряжения внутри периода коммутации транзисторов инвертора напряжения.

Преобразованное постоянное напряжение ИН в переменное подается на первичную обмотку трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора, вторичные обмотки которого выполняются на номинальное значение тока в цепи вторичных обмоток ГТ.

В ЗПЧ напряжение понижается до уровня добавочного напряжения U_d .

Первичные обмотки трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора могут быть соединены как в звезду, так и в треугольник, а вторичные обмотки могут быть соединены в шестифазную звезду, причем при наличии нулевого провода суммирование добавочного напряжения U_d и напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора U_2 происходит в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} U_{на} = U_{2a} + U_{да}; \\ U_{наb} = U_{2b} + U_{даb}; \\ U_{наc} = U_{2c} + U_{даc}, \end{cases} \quad (4)$$

где $U_{на}$, $U_{наb}$, $U_{наc}$ – фазные значения напряжения на нагрузке; U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} – фазные значения напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора подстанции; $U_{да}$, $U_{даb}$, $U_{даc}$ – фазные значения добавочного напряжения стабилизатора (на выходе НПЧ).

Преобразованное в ЗПЧ пониженное напряжение подаётся в НПЧ с естественной коммутацией тиристоров, выполненный на базе SCR-тиристорov и представляющий собой шестифазно-трёхфазный преобразователь со средней точкой (может выполняться и на базе мостовых схем). НПЧ производит преобразование высокой частоты 450 Гц до частоты сети, равной 50 Гц.

Управление тиристорами НПЧ осуществляется с фиксированным углом управления $\alpha_{\text{нпч}} = \text{const}$ – в выпрямительном режиме и управления $\beta_{\text{нпч}} = \pi - \alpha_{\text{нпч}} = \text{const}$ – в инверторном режиме.

НПЧ выполнен с возможностью пофазного изменения углов управления тиристорами $\alpha_{\text{нпч}}$ и $\beta_{\text{нпч}}$, тем самым обеспечивая симметрирование напряжения на нагрузке в определенном диапазоне, в случае возникновения несимметрии напряжения по фазам.

Стабилизатор трёхфазного напряжения выполнен с улучшенными выходными характеристиками по отношению к стабилизатору с однофазным звеном повышенной частоты, при этом частота промежуточного преобразования в ЗПЧ принимается кратной частоте сети и числу фаз, поэтому работа НПЧ обеспечивает преобразование с частоты с числом пульсаций 12 за полупериод выходного напряжения 50 Гц, вместо 9 пульсаций с однофазным ЗПЧ [13].

Сочетание искусственной коммутации на IGBT-транзисторах в ИН и естественной коммутации в НПЧ на SCR-тиристорах повышает быстродействие стабилизатора и улучшает качество напряжения на нагрузке. К положительным свойствам стабилизатора по предлагаемой силовой схеме следует отнести встречно-параллельное включение SCR-тиристорov в каждой фазе вторичных шестифазных обмоток ЗПЧ, что приводит к снижению класса этих тиристорov по току.

Векторные диаграммы при стабилизации напряжения на нагрузке для фазы a при трёхфазной системе напряжений показаны на рис. 2.

Как видно из векторных диаграмм (рис. 2), регулирование напряжения производится без сдвига основной гармоники напряжения на нагрузке (продольное регулирование напряжения). Вектор добавочного несинусоидального напряжения U_d с требуемой амплитудой и фазой и частотой 50 Гц по его первой гармонике, полученный на выходе стабилизатора в случае повышенного напряжения в сети направлен в сторону, противоположную вектору напряжения на нагрузке, тем самым снижая до нуля возникшую $+\Delta U$. Аналогичным образом, но в противоположную сторону, происходит регулирование U_d для стабилизации напряжения на нагрузке до уровня номинального при возникновении $-\Delta U$.

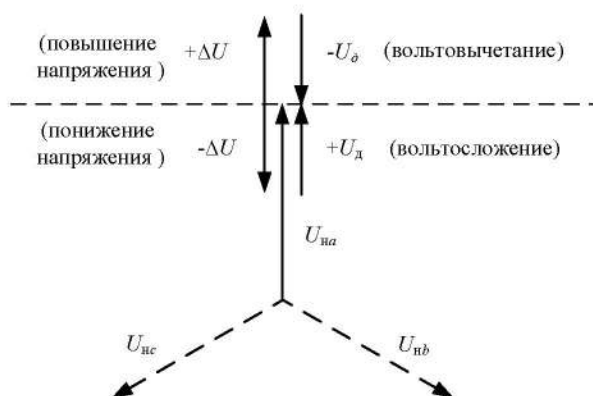


Рис. 2. Векторная диаграмма при стабилизации напряжения на нагрузке

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ регулировочных характеристик и гармонического влияния стабилизатора указанными способами производился на основании полученных аналитических выражений.

На рис. 3 приведены поясняющие диаграммы для вывода аналитических выражений при амплитудном регулировании напряжения РВ.

По диаграмме определяются пределы интегрирования и выражения при амплитудном регулировании РВ стабилизатора напряжения.

Аналитические выражения действующего значения напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании РВ ($\alpha_n = \text{var}$, $\alpha_n = \text{const}$, $\alpha_{\text{нпч}} = \alpha_{\text{нпч. min}}$ ($\beta_{\text{нпч}} = \beta_{\text{нпч. min}}$), $N = 36$), полученные для схемы с нулевым проводом, представленные для процесса вольтосложения (вольтовычитания). Действующее значение фазного напряжения нагрузки U_n в общем случае определяется как среднеквадратичное по формуле:

$$U_n = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3} \left(\frac{12 \cdot U_d U_{2m}}{\sin \beta} \left(\left(\sin \frac{2}{3} \beta (\cos \beta + 1) - 2 \sin \frac{1}{3} \beta \right) + \left(2 + \cos \frac{1}{3} \beta - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right) + 2\pi \cdot \left(\frac{9}{2} U_{2m}^2 + 2 U_d^2 \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где U_d – величина добавочного напряжения; U_{2m} – амплитудное значение напряжения во вторичной обмотке ГТ; $\beta = \pi/N$ – число интервалов в течение полупериода напряжения в сети.

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании РВ:

$$U_{n(1)} = \frac{\sqrt{2}}{6\pi \sin \beta} \left[2U_d \left(\sin \beta \left(\left(2 + \cos \frac{1}{3} \beta - \cos \frac{2}{3} \beta \right) + \left(\cos \frac{2}{3} \beta - \cos \frac{1}{3} \beta \right) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times (\cos \beta + 1) \right) \right) + 3\pi U_{2m} \sin \beta \right], \quad (7)$$

Действующее значение фазного напряжения высших гармоник на нагрузке определяется по формуле

$$U_{n\Sigma} = \sqrt{U_n^2 - U_{n(1)}^2}, \quad (8)$$

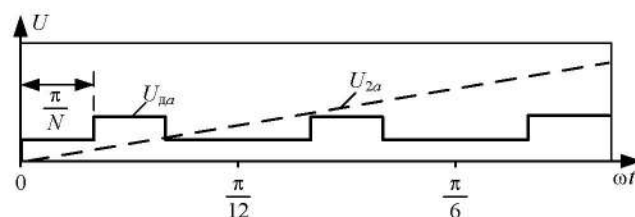


Рис. 3. Поясняющая диаграмма при амплитудном регулировании РВ

Среднее значение фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании РВ:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{9} \left(\frac{9}{\pi} U_{2m} + 2U_d \right). \quad (9)$$

В формулах (6), (7) и (9) величина добавочного напряжения U_d зависит от угла регулирования реверсивного выпрямителя α_n и записывается в виде:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}/\pi}{k_T} U_{2\phi} \cos \alpha_n, \quad (10)$$

где $U_{2\phi}$ – величина фазного действующего напряжения во вторичной обмотке ГТ; k_T – коэффициент трансформации в ЗПЧ; α_n – угол регулирования реверсивного выпрямителя.

Поясняющие диаграммы для определения пределов интегрирования и вывода аналитических выражений при широтно-импульсном регулировании напряжения на нагрузке ИН показаны на рис. 4.

Определение пределов интегрирования (рис. 4) выполняется аналогично, как и для амплитудного регулирования (рис. 3), но только при числе импульсов $N = 72$ в течение периода добавочного напряжения U_d и при учёте угла регулирования инвертора напряжения α_n .

Действующее значение фазного напряжения на нагрузке U_n для стабилизатора напряжения при ШИР ($\alpha_n = \text{const}$, $\alpha_n = \text{var}$, $\alpha_{\text{нпч}} = \alpha_{\text{нпч.min}}$ ($\beta_{\text{нпч}} = \beta_{\text{нпч.min}}$)) ИН запишется в виде

$$\begin{aligned} U_n = & \left[\frac{1}{36\pi \sin \beta} \left(\sin \beta \left(8U_d^2 \left(\pi - 12\alpha_n \frac{\pi}{\beta} \right) + \right. \right. \right. \\ & + 18\pi U_{2m}^2 \left. \right) - 24U_d U_{2m} \cdot (\sin \alpha_n \times \\ & \times \left(2 \left(1 + \sin \beta \left(\sin \frac{5}{6}\beta + \sin \frac{1}{6}\beta + \right. \right. \right. \\ & + 2\sin \frac{1}{2}\beta \left. \right) + \left(\cos \frac{1}{6}\beta + \cos \beta \right) \left. \right) + \cos \beta \times \\ & \times \left(\cos \frac{5}{6}\beta - 2\cos \frac{1}{2}\beta \right) + \cos \frac{5}{6}\beta + \\ & + 2\cos \frac{1}{2}\beta \left. \right) \left. \right) - \cos \alpha_n \left(\sin \beta \left(\cos \frac{2}{3}\beta - \right. \right. \\ & - \cos \frac{1}{3}\beta - 2 \left. \right) + \sin \frac{1}{3}\beta - \sin \frac{2}{3}\beta - \\ & \left. \left. \left. - \cos \beta \left(\sin \frac{2}{3}\beta + \sin \frac{1}{3}\beta \right) \right) \right) \right] \frac{1}{2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где α_n – угол регулирования инвертора напряжения.

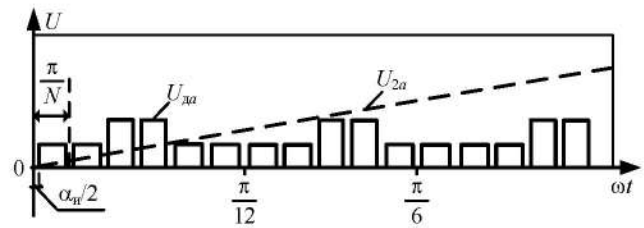


Рис. 4. Поясняющая диаграмма при широтно-импульсном регулировании ИН

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на нагрузке $U_{n(1)}$ для стабилизатора напряжения при ШИР ($\alpha_n = \text{const}$, $\alpha_n = \text{var}$, $\alpha_{\text{нпч}} = \alpha_{\text{нпч.min}}$ ($\beta_{\text{нпч}} = \beta_{\text{нпч.min}}$)) ИН запишется в виде:

$$\begin{aligned} U_{n(1)} = & \frac{1}{6} \left[\frac{\sqrt{2}}{\pi(\cos \beta - 1)} \left(4U_d \sin \alpha_n \cdot (\sin \beta \times \right. \right. \\ & \times \left(1 + \cos \frac{5}{6}\beta + \cos \frac{1}{6}\beta + 2\cos \frac{1}{2}\beta + \right. \\ & + \frac{3}{2} \left(\cos \frac{2}{3}\beta + \cos \frac{1}{3}\beta \right) - \cos \beta \times \\ & \times \left(\sin \frac{5}{6}\beta - \frac{3}{2} \left(\sin \frac{2}{3}\beta + \sin \frac{1}{3}\beta \right) - \right. \\ & - \sin \frac{1}{6}\beta - 2\sin \frac{1}{2}\beta \left. \right) + 2\sin \frac{1}{2}\beta + \\ & + \sin \frac{5}{6}\beta + \frac{3}{2} \left(\sin \frac{1}{3}\beta + \sin \frac{2}{3}\beta \right) + \\ & + \sin \frac{1}{6}\beta \left. \right) + 4U_d \cos \alpha_n \left(\frac{1}{2} \sin \beta \times \right. \\ & \times \left(\sin \frac{1}{3}\beta - \sin \frac{2}{3}\beta \right) + \cos \frac{1}{2}\beta \times \\ & \times \left(2 + \cos \frac{1}{3}\beta + \cos \frac{2}{3}\beta \right) - \frac{1}{2} \left(\cos \frac{1}{3}\beta + \right. \\ & + \cos \frac{2}{3}\beta \left. \right) - 1 \left. \right) + 3\pi \cdot U_{2m} (\cos \beta - 1) \left. \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Действующее значение фазного напряжения высших гармоник на нагрузке при ШИР-регулировании определяется по формуле (8).

Среднее значение фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при ШИР-регулировании ИН:

$$U_{\text{ср}} = \frac{-48U_d (\alpha_n N + 2\pi) + 9U_{2m}}{9\pi}. \quad (13)$$

Оценка регулировочных свойств стабилизатора производится через степень регулирования фазного напряжения на нагрузке ϵ_n , выраженную в относи-

тельных единицах, которая представляется в следующем виде [14]:

$$\varepsilon_n = \frac{U_n}{U_c}, \quad (14)$$

где U_c – номинальное напряжение во вторичной обмотке ГТ.

Тогда с учётом полученных аналитических выражений (6), (7), (8) и (10) выполнялось построение регулировочных характеристик при амплитудном регулировании РВ при различных коэффициентах трансформации трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора $k_T = 8, 10, 12, 14$, а по формулам (10), (11) и (12) – построение регулировочных характеристик при широтно-импульсном регулировании ИН при тех же коэффициентах трансформации k_T , что и для амплитудного способа регулирования. При этом регулировочные характеристики при амплитудном способе показаны при относительной степени регулирования $\varepsilon_n = f(\alpha_n)$ на рис. 5, а для ШИР способа $\varepsilon_n = f(\alpha_n)$ на рис. 6.

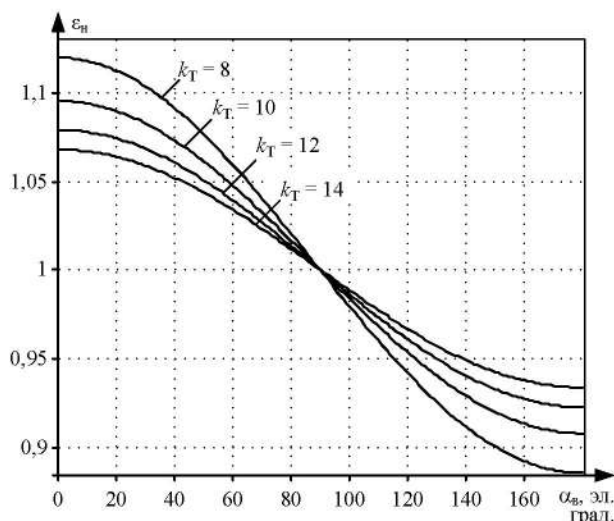


Рис. 5. Регулировочные характеристики стабилизатора при амплитудном регулировании РВ

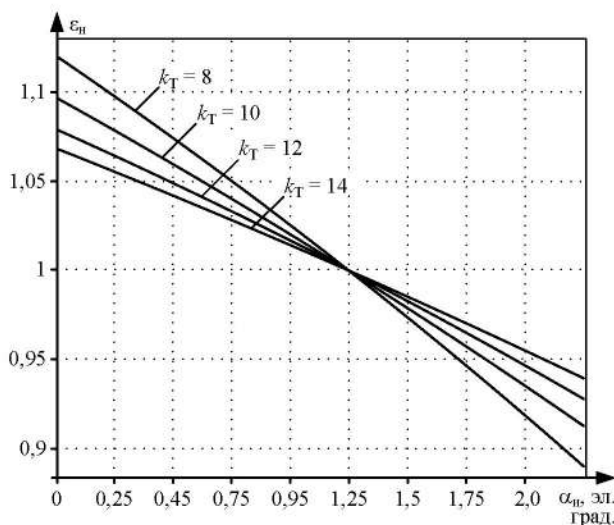


Рис. 6. Регулировочные характеристики стабилизатора при широтно-импульсном регулировании ИН

Регулировочные характеристики получены для режима вольтосложения в процессе стабилизации напряжения на нагрузке при изменении угла регулирования α_n от 0 до 90 эл. град, а также для режима вольтовывчитания при изменении угла регулирования α_n от 90 до 180 эл. град.

Идентично, как и для рис. 5, изменение угла регулирования α_n (рис. 6) на интервале от 0 эл. град. до 1,25 эл. град. приводило к изменению величины степени регулирования в режиме вольтосложения, а изменение угла α_n от 1,25 до 2,25 эл. град – к изменению степени регулирования для режима вольтовывчитания.

Как видно из полученных регулировочных характеристик (рис. 5, 6) широтно-импульсное регулирование по характеру изменения стабилизируемого напряжения на нагрузке обладает большей линейностью, что имеет значение в случае стабилизации напряжения при резкопеременной нагрузке для наиболее быстрого устранения отклонения напряжения. В то же время регулировочные характеристики при амплитудном регулировании обладают некоторой нелинейностью, что может быть скомпенсировано в условиях при относительно невысокой скорости изменения напряжения в сети.

Анализ гармонического влияния в процессе стабилизации напряжения производился в соответствии с коэффициентом несинусоидальности напряжения на нагрузке:

$$K_U = \frac{U_{n\Sigma}}{U_{n1}}. \quad (15)$$

Полученные характеристики по формуле (15) при амплитудном регулировании РВ представлены на рис. 7 и при широтно-импульсном регулировании ИН на рис. 8.

Как видно из полученных характеристик (рис. 7, 8), коэффициент несинусоидальности напряжения на нагрузке K_U для случая амплитудного и широтно-импульсного регулирования не превысил 8% при коэффициенте трансформации трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора $k_T = 8$, что не превышает значений для уровня напряжения 0,4 кВ, установленных в действующем ГОСТ 32144-2013 [15].

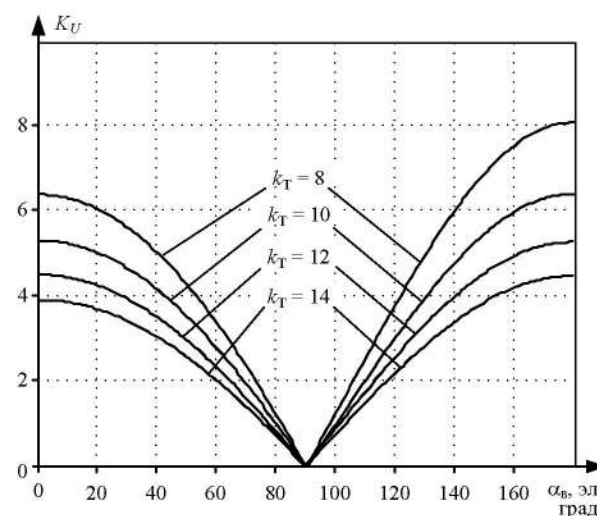


Рис. 7. Зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения на нагрузке при амплитудном регулировании РВ

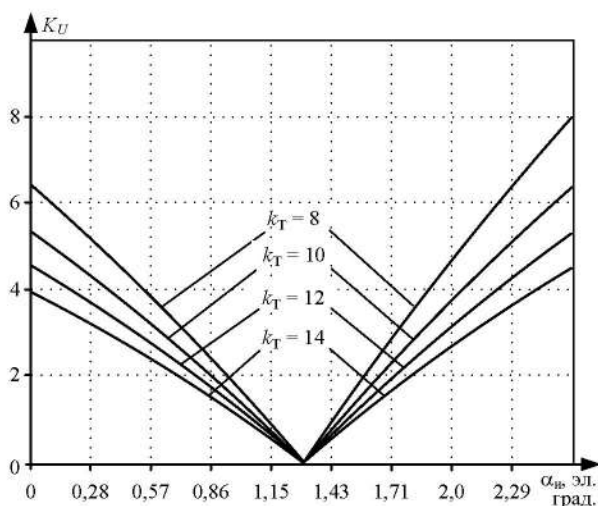


Рис. 8. Зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения на нагрузке при широтно-импульсном регулировании ИН

Проверка предложенных схемных решений и способов автоматического управления стабилизатора напряжения производилась в программной среде компьютерного моделирования MATLAB (R2018b) в подпрограмме Simulink, где была разработана имитационная модель трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ мощностью 1000 кВА. Модель включала ряд силовых и измерительных элементов из библиотеки SimPowerSystems.

В ходе моделирования производилась проверка предложенных принципов функционирования стабилизатора при его подключении в рассечку вторичных обмоток ГТ подстанции с анализом пусковых и переходных процессов. На модели также исследовались и установившиеся режимы работы подстанции со стабилизатором в условиях изменения напряжения (появлении отклонений от номинального уровня в положительную и отрицательную сторону) в сети и на нагрузке, при которых стабилизатор в имитационной модели функционировал в режимах вольтосложения или переводился в режим работы с вольтовычитанием.

Временные диаграммы в процессе стабилизации при регулировании методом ШИР при пониженном напряжении $-\Delta U = 10\%$, $\varphi_n = 30$ эл. град, $\alpha_n = 30$ эл. град, $\alpha_n = 0,45$ эл. град ($N = 72$), $k_T = 10$, $\alpha_{нпч} = 7$ эл. град ($\beta_{нпч} = 173$ эл. град.) приведены на рис. 9.

В ходе моделирования контролировались параметры действующих значений (RMS) сигналов и осциллограммы мгновенных значений сигналов токов и напряжений с помощью виртуального осциллографа (Scope) (рис. 9): напряжения на нагрузке u_n , в первичной обмотке u_1 и во вторичной обмотке u_2 ГТ, токов в первичной обмотке (сети) i_1 и во вторичной обмотке i_2 ГТ, напряжение u_n и ток i_n в нагрузке, напряжение $u_{в1}$ и ток $i_{в1}$ на входе РВ, напряжение u_d и ток i_d на выходе РВ, напряжение $u_{н1}$ и ток $i_{н1}$ на входе ИН, напряжение $u_{н2}$ и ток $i_{н2}$ на выходе ИН, напряжение $u_{нпч1}$ и ток $i_{нпч1}$ на входе НПЧ, напряжение $u_{нпч2}$ (дополнительное напряжение u_d) и ток $i_{нпч2}$ на выходе НПЧ, токи намагничивания $i_{огт}$ главного и высокочастотного $i_{овт}$ трансформаторов. Из временных диаграмм на рис. 9 видно, что напряжение на нагрузке u_n стабилизируется до уровня номинального напряжения во вторичной обмотке ГТ подстанции.

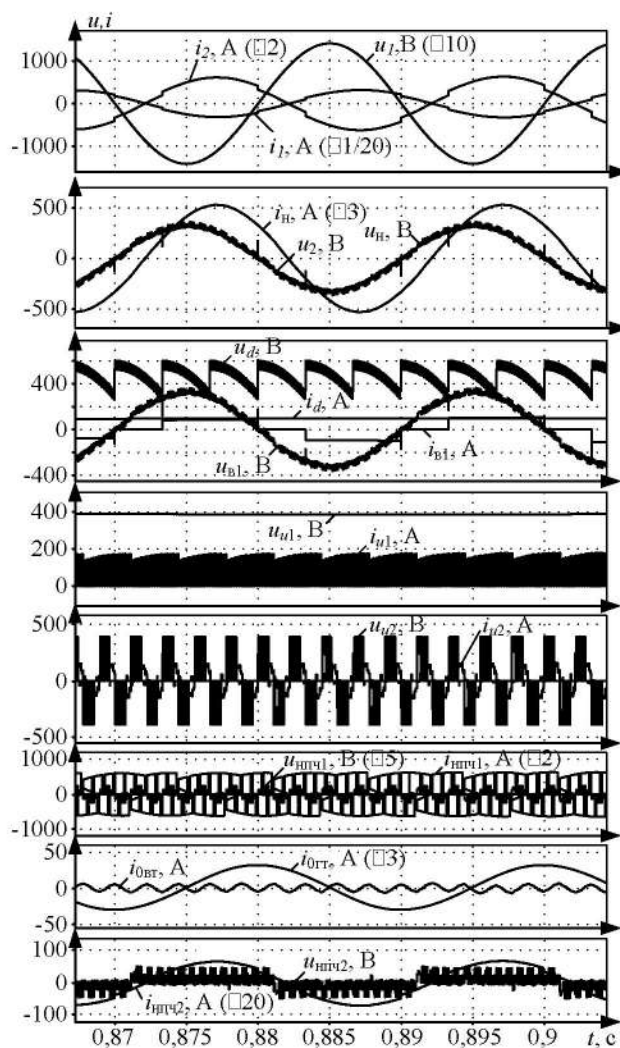


Рис. 9. Временные диаграммы процесса стабилизации напряжения нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Имитационно-математическое моделирование показало правильность принципов функционирования предложенного стабилизатора напряжения.

2) Преимуществом данного стабилизатора является отсутствие преобразовательного трансформатора (выполненного для рабочей частоты 50 Гц) на входе реверсивного выпрямителя, а также применение высокой частоты промежуточного преобразования (450 Гц) и схемы подключения стабилизатора главному трансформатору подстанции, что способствует снижению массы и габаритов электромагнитных частей и всего стабилизатора.

3) Расчеты показали, что мощность стабилизатора составляет около 25 % (около 250 кВА) от мощности подстанции 1000 кВА то есть удельная мощность Руд предложенного стабилизатора напряжения составит не более 3-3,5 кВА/кг.

4) Исследования на имитационно-математической модели показали, что быстродействие стабилизатора составило при амплитудном регулировании не более 0,019 с, а при регулировании методом ШИР – не более 0,012 с.

5) Коэффициент несинусоидальности напряжения на нагрузке при регулировании, как при амплитудном, так и при методе ШИР, не более 8%.

6) Стабилизатор повышает КПД нагрузки в условиях как симметричного отклонения напряжения по фазам, так и несимметричного отклонения при пусках, в переходных и установившихся режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 58408-2019. Сети электрические собственных нужд и оперативного тока железнодорожных тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения. Технические требования, правила проектирования, методы электрических расчетов. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 мая 2019 г. №194-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 64 с.
- СТО 70238424.29.240.10.009-2011. Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования. Утвержден и введен в действие приказом НП «ИНВЭЛ» от 02.06.2011 № 54. М.: Некоммерческое Партнерство «Инновации в электроэнергетике», 2011. 23 с.
- СТО 34.01-3.2-010-2017. Устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН). Общие требования. Утвержден и введен в действие распоряжением ПАО «Россети» от 28.02.2017. М.: ПАО «Россети», 2017. 22 с.
- Haibin Zhou¹, Xiaojiang Yan, and Guanwei Liu. A review on voltage control using on-load voltage transformer for the power grid. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Sci. 252 032144, pp. 1-10 (doi:10.1088/1755-1315/252/3/032144).
- СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2007. 131 с.
- Controlling power system parameters through reactive power (Var) compensation. [Electronic resource]. Access mode: <https://electrical-engineering-portal.com/reactive-power-var-compensation>, free. – (date of request: 24.03.2020).
- Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2005. 199 с.
- Стабилизаторы напряжения. Руководство по эксплуатации СТС-5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://td-elmash.ru/produkcija/stabilizatoryi-napryazheniya>, свободный (дата обращения: 24.03.2020).
- Зинин Ю., Смирнов Ю., Яковлев В. Разработка программируемого блока управления мощными трёхфазными стабилизаторами напряжения типа СТС // Силовая электроника. 2013. №1. С. 78-83.
- Киреева Э.А. Новая серия промышленных трехфазных стабилизаторов напряжения СТС-5 // Промышленная энергетика. 2009. №12. С. 51-52.
- Digital voltage stabilisers (DVS) Ortea (Odyssey). [Electronic resource]. Access mode: https://www.ortea.it/en/categorie_prodotti/digital-voltage-stabilisers/, free. (date of request: 24.03.2020).
- Пат. 2071633 Российская Федерация, МПК МПК Н 02 М 5/45, G 05 F 1/30. Стабилизатор напряжения трансформаторной подстанции со звеном повышенной частоты / Климаш В.С., Андриенко П.Д.; заявитель «Комсомольский-на-Амуре политехнический институт». № 93 93039673; заявл. 02.08.93; опубл. 10.01.97.
- Климаш В.С., Константинов А.М. Математическое моделирование трёхфазного компенсатора отклонений напряжения и реактивной мощности с однофазным звеном повышенной частоты // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2008. №1. С. 20-23.
- Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием: монография. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 58-59.
- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: принят Межгосударственным советом по стандартизации, методологии и сертификации (протоколом №55-П от 25 марта 2013 г.). М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

Поступила в редакцию 31 марта 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THREE-PHASE VOLTAGE STABILIZER FOR 10/0.4 kV TRANSFORMER SUBSTATIONS AND ANALYSIS OF ITS CONTROL METHODS

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8150-5013>

Andrey M. Konstantinov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: kamfes@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2342-1142>

The problem of improving the quality of voltage for three-phase electricity consumers when they are powered from transformer substations, including complete transformer substations, with a voltage of 10/0.4 kV is considered and a comparative analysis of existing three-phase voltage stabilization devices is performed. Their main disadvantages are revealed. A variant of the power circuit without an input converter transformer and the connection of a three-phase voltage stabilizer to the secondary winding of the main transformer of the substation is proposed, which allows minimizing its mass-dimensional parameters. The stabilizer is a low-power block-modular thyristor-transistor channel containing a high-frequency

link that provides the formation and regulation of the voltage of the voltage booster for the load together with the voltage of the main transformer of the substation. A step-down transformer operating at a frequency of 450 Hz is used as a link of increased frequency. The paper provides a brief description of the scheme and principle of operation of the proposed three-phase voltage stabilizer as well as ways to control it. The construction of the adjustment characteristics and the harmonic analysis of the load voltage for these control methods are performed. Analytical relations are obtained for the current voltage on the load during stabilization, its first harmonic and average value, respectively, when the amplitude is regulated by a reverse rectifier and pulse-

width regulation by a voltage inverter. Simulation of the device operation in various operating modes, namely, at low voltage in the network and at load, and at high voltage in the network and at load, was performed. Some results of simulation modeling in the Matlab/Simulink software environment are presented. Conclusions on the work are made.

Keywords: stabilizer, high frequency link, complete transformer substation, reverse rectifier, voltage inverter, direct frequency converter, main transformer substation, amplitude control method, pulse width control method, voltage quality, electricity consumers, simulation, MATLAB/Simulink.

REFERENCES

1. GOST R 58408-2019. Auxiliary electric networks for railway traction substations, transformer substations and power supply linear devices. Technical requirements, design rules, electric calculation methods. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 64 p. (In Russian)
2. STO 70238424.29.240.10.009-2011. The electrical distribution system. Substations 6-20/0,4 kV. The conditions of the building. Norms and requirements. Moscow, Non-profit Partnership - Innovations in electric power engineering Publ., 2011. 23 p. (In Russian)
3. STO 34.01-3.2-010-2017. Devices On-load tap-changer (OLTC). General requirements. Moscow, Rosseti Publ., 2017. 22 p. (In Russian)
4. Haibin Zhou, Xiaojiang Yan, and Guanwei Liu. A review on voltage control using on-load voltage transformer for the power grid. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Sci. 252 032144, pp. 1-10 (doi:10.1088/1755-1315/252/3/032144).
5. STO 56947007-29.240.30.010-2008. Schematic diagrams of electrical switchgears of 35-750 kV substations. Typical solutions. Moscow, ENAS Publ., 2007. 131 p. (In Russian).
6. Controlling power system parameters through reactive power (VAR) compensation. [Electronic resource]. – Access mode: <https://electrical-engineering-portal.com/reactive-power-var-compensation>, free. – (accessed 24 March 2020).
7. Aleksandrov G.N., Lunin V.P. *Upravlyaemye reaktory* [Controlled reactor]. St. Petersburg, Energy training center Publ., 2005. 199 p. (In Russian)
8. Voltage stabilisers. User manual STS-5. [Electronic resource]. Access mode: <http://td-elmarsh.ru/produkciya/stabilizatoryi-napryazheniya>, free (accessed 24 March 2020). (In Russian)
9. Zinin Yu., Smirnov Yu., Yakovlev V. Development of programmable control unit of powerful three-phase voltage stabilizers of STS type. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2013, no. 1, pp. 78-83. (In Russian)
10. Kireeva E.A. New series of industrial three-phase voltage stabilizers STS-5. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power], 2009, no. 12, pp. 51-52. (In Russian)
11. Digital voltage stabilisers (DVS) Ortea (Odyssey). [Electronic resource]. Access mode: https://www.ortea.it/en/categorie_prodotti/digital-voltage-stabilisers/, free (accessed 24 March 2020).
12. Klimash V.S., Andrienko P.D. *Stabilizator napryazheniya transformatornoy podstantsii so zvenom povyshennoy chastoty* [Voltage stabilizer of a transformer substation with a link of the raised part]. Patent RF, no. 2071633, 1997.
13. Klimash V.S., Konstantinov A.M. Mathematical simulation of three-phase compensator of voltage and reactive power deviations with single-phase link of increased frequency. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, electric power engineering, electrical engineering industry], 2008, no. 1, pp. 20-23. (In Russian)
14. Klimash V.S. *Voltodobavochnye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impulsnym i fazovym regulirovaniem* [Voltage Booster Aimed at Compensation of Voltage Fluctuations and Reactive Energy Fluctuations with Amplitude, Pulse and Phase Control]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002, pp. 58-59. (In Russian)
15. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

Климаш В.С., Константинов А.М. Стабилизатор трёхфазного напряжения для трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и анализ способов его управления // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 33-40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-33-40)

Klimash V.S., Konstantinov A.M. Three-Phase Voltage Stabilizer for 10/0.4 kV Transformer Substations and Analysis of its Control Methods. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 33-40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-33-40)

Иоффе И.С., Зюзев А.М., Костылев А.В., Нестеров К.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ

Активный выпрямитель напряжения зачастую применяют в системах энергоснабжения, таких как регулируемый электропривод, электрогенераторы различного типа, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, применяемые для питания собственных нужд или в качестве систем поддержания электрической сети при параллельной работе. В таких системах нейтральный провод при необходимости можно подключить к средней точке конденсаторов на стороне постоянного тока преобразователя или создать дополнительный канал для протекания токов нулевой последовательности через дополнительную стойку транзисторов. Отметим, что схема подключения нейтрального провода к средней точке конденсаторов имеет ряд недостатков, таких как дисбаланс напряжений между конденсаторами в звене постоянного тока, а также протекание через конденсаторы токов высших гармоник и токов нулевой последовательности при их компенсации. Устранение указанных проблем представляется возможным при использовании схемы с дополнительной стойкой. Данная компоновка электрического полупроводникового преобразователя даёт возможность использования полного напряжения в звене постоянного тока и управления токами нулевой последовательности. В статье обсуждается построение математической модели активного выпрямителя с четырьмя транзисторными стоками как объекта управления на основе анализа комбинаций состояний ключей при работе на нагрузку. Приводится математическое описание активного выпрямителя с дополнительной стойкой в матричной форме. Предлагаемая математическая модель может быть использована для синтеза регуляторов системы автоматического управления преобразователем и выделения токов нулевой последовательности с целью их компенсации, что является значимым фактором для будущих исследований всей системы активного выпрямителя с дополнительной стойкой.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, полупроводниковый преобразователь, математическая модель, нейтральный провод, дополнительная стойка, энергоэффективность, нестационарные режимы, нулевая последовательность, обратная последовательность, несимметричные режимы.

ВВЕДЕНИЕ

Активные выпрямители напряжения (АВН) в настоящее время являются важными элементами энергетических систем [1-5]. Данные полупроводниковые устройства определяют эффективность функционирования электротехнического комплекса, состоящего из электроприводных или генераторных установок. Силовые схемы активных выпрямителей в ряде применений должны иметь нейтральный провод. Преобразователь в таком случае формирует в несимметричных режимах работы токи нулевой и обратной последовательности [1], которые необходимо учитывать и компенсировать за счёт действия системы автоматического регулирования [2, 6]. Для применений АВН как элемента сети электроснабжения необходимо исследовать распределение электрических переменных в данной системе. Так как решение данной проблемы не нашло должного отражения в имеющихся публикациях, актуальной является задача разработки математической модели активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом при учете несимметрии в его каналах. Другой важной задачей является полное использование напряжения в звене постоянного тока при работе системы с нейтральным проводом. При появлении ещё одной ветви (нейтральной) создаётся дополнительный путь для протекания тока в цепи и нулевой потенциал. Для расширения диапазона регулирования выходного напряжения применяется алгоритм ШИМ с предмодуляцией по третьей гармонике [3]. Однако третья

гармоника при схеме с нейтральным проводом оказывает влияние на работу схемы, так как потенциал в четвёртой стойке изменяется с её учётом, поэтому необходимо компенсировать данное влияние. Исходя из вышесказанного, в работе были выдвинуты следующие задачи:

- формирование комбинаций состояний ключей при работе АВН на нагрузку;
- применение алгоритма ШИМ с предмодуляцией по третьей гармонике;
- представление математической модели АВН в матричной форме записи.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАГРУЗКИ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Для понимания принципа работы активного выпрямителя напряжения с дополнительной стойкой обратимся к упрощенной схеме замещения электрического преобразователя, изображенного на **рис. 1**.

АВН в своём составе имеет восемь ключей $1A, 1B, 1C, 1N, 2A, 2B, 2C, 2N$, обеспечивающих разные режимы работы нагрузки Z_a, Z_b, Z_c . Средней точкой преобразователя является точка потенциала ϕ_s , которая делит пополам напряжение u_d в звене постоянного тока. Данный преобразователь имеет два ключа в стойке, что, в свою очередь, определяет количество комбинаций состояний ключей, которое равно $2^4=16$.

Все состояния АВН с дополнительной стойкой отображает **таблице**, в которой приводятся векторные диаграммы в фазных координатах $nabc$ и матрицы напряжения питания нагрузки.

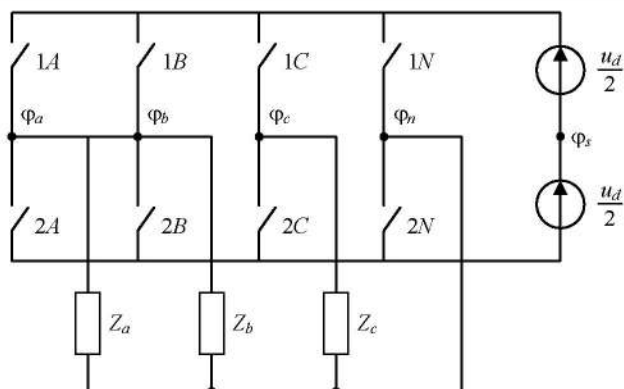


Рис. 1. Упрощенная схема АВН с дополнительной стойкой

Состояний АВН с дополнительной стойкой

№	Комбинация	Схема питания нагрузки	Диаграмма состояний	Вектора
1	1A; 2B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
2	1A; 1B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
3	2A; 1B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
4	2A; 1B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
5	2A; 2B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
6	1A; 2B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
7	1A; 1B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
8	2A; 2B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
9	2A; 1B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

10	2A; 2B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
11	1A; 2B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
12	1A; 2B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$
13	1A; 1B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
14	2A; 1B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
15	2A; 2B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$
16	1A; 1B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Как видим, получается шестнадцать диаграмм состояний, восемь из которых являются прямыми и восемь инверсными. В конечном итоге годограф вектора напряжения при разных комбинациях состояния ключей образует два одинаковых шестиугольника в проекциях $0a\beta$, что следует из диаграммы состояний.

АЛГОРИТМ ШИРотно-ИМпульсной МОДУЛЯЦИИ для АВН с ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Базовые алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) не позволяют раскрыть всех возможностей схем инвертора. В связи с этим применяются модифицированные (специальные) алгоритмы ШИМ с использованием предварительной модуляции сигнала. На рис. 2 показана данная реализация ШИМ, содержащая в своём составе генератор сигнала предмодуляции (ГСПР) по третьей гармонике и генератор опорного пилообразного сигнала (ГОС).

Задающими воздействиями в данной схеме являются синусоидальные сигналы $u_{a,m}^*(t), u_{b,m}^*(t), u_{c,m}^*(t)$ с амплитудой задающего напряжения U_0 . Введение предмодуляции по третьей гармонике позволяет уменьшить амплитуду результирующих задающих воздействий u_a^*, u_b^*, u_c^* на входах ШИМ в $\sqrt{3}/2$ раз. В связи с этим новое предельно-допустимое пороговое значение будет равно [4]:

$$U_m = \frac{2}{\sqrt{3}} U_0 \approx 1,155 U_0. \quad (1)$$

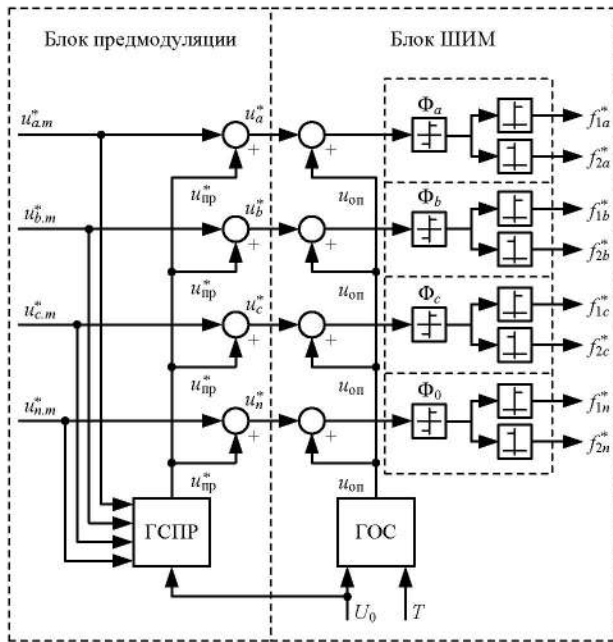


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ШИМ АВН с дополнительной стойкой

Важно заметить, что задающим сигналом ШИМ для дополнительной стойки (нейтральной стойки) будет нулевой сигнал, что обеспечит скважность импульсов $\tau = 0.5$. Однако при введении сигнала предмодуляции из задающего нулевого сигнала необходимо вычесть сигнал третьей гармоники для компенсации его влияния. Этот вывод следует из условия баланса фазных напряжений, а именно разности нулевых и фазных потенциалов.

Рассмотрим задающие воздействия блока ШИМ, представленного на рис. 2.

Вектор фазных и нулевых задающих воздействий:

$$U_f^* = \begin{bmatrix} u_a^* \\ u_b^* \\ u_c^* \end{bmatrix}, \quad U_n^* = \begin{bmatrix} u_n^* \\ u_n^* \\ u_n^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где задающие фазные и нулевые воздействия определяются следующими уравнениями

$$\begin{aligned} u_a^* &= U_m \cos(\theta_u^*) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \\ u_b^* &= U_m \cos\left(\theta_u^* - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \\ u_c^* &= U_m \cos\left(\theta_u^* - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \end{aligned} \quad (3)$$

$$u_n^* = -\frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \quad (4)$$

в которых U_m – модуль амплитуды задающего вектора напряжения; θ_u^* – угол поворота задающего вектора напряжения; $-1/6 \cdot U_m \cos(3\theta_u^*)$ – сигнал предмодуляции по третьей гармонике.

Вектор напряжения опорного сигнала

$$U_{оп} = \begin{bmatrix} u_{оп} \\ u_{оп} \\ u_{оп} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коммутационные векторы-функций для фазных и нулевых воздействий соответственно:

$$F_f^* = \begin{bmatrix} f_a^* \\ f_b^* \\ f_c^* \end{bmatrix}, \quad F_n^* = \begin{bmatrix} f_n^* \\ f_n^* \\ f_n^* \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$F_f^* = sg(U_f^* + U_{оп}), \quad F_n^* = sg(U_n^* + U_{оп}); \quad (7)$$

$$sg(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > 0; \\ 0, & \text{при } x \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Потенциалы выходных шин АВН с дополнительной стойкой:

$$\Phi_f = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = u_d F_f^*; \quad \Phi_n = \begin{bmatrix} \Phi_n \\ \Phi_n \\ \Phi_n \end{bmatrix} = u_d F_n^*, \quad (9)$$

где u_d – напряжение в звене постоянного тока.

Вектор фазных напряжений является разностью векторов фазного и нулевого потенциала:

$$U = \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \Phi_f - \Phi_n. \quad (10)$$

Исходя из приведённых уравнений, можно заметить, что введение сигнала предмодуляции по третьей гармонике необходимо учитывать в нейтральном (нулевом) канале задания ШИМ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

При разработке математической модели АВН с дополнительной стойкой были определены следующие допущения:

- отсутствие потерь при переключении ключей;
- ключи рассматриваются как полностью управляемые с двухсторонней проводимостью;
- переключение ключей происходит мгновенно, в связи с чем можно принять время переключения ключей равным нулю;
- пассивные элементы буферного реактора являются идеализированными, что обеспечивает постоянство параметров активно-индуктивных цепей.

Описание математической модели целесообразно проводить в фазных координатах abc , что в будущем позволит упростить синтез регуляторов системы автоматического регулирования при работе в несимметричных режимах, за счёт управления каждой фазой активного выпрямителя напряжения (пофазного регу-

лирования). С учётом вышеизложенного введем алгебраические векторы-столбцы для относительных значений фазных токов:

$$I_f = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

пассивных элементов, а именно активного сопротивления и индуктивности буферного реактора (с учётом нагрузки):

$$R = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} l_a & 0 & 0 \\ 0 & l_b & 0 \\ 0 & 0 & l_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Математическое описание объекта управления определяется следующими уравнениями:

$$0 = U + RI_f + L \frac{dI_f}{dt}; \quad (13)$$

$$\Phi_f = u_d F_f^*; \quad (14)$$

$$\Phi_n = u_d F_n^*; \quad (15)$$

$$U = \Phi_f - \Phi_n; \quad (16)$$

$$F_f = \frac{1}{2} sg(U_f^* + U_{on}); \quad (17)$$

$$F_n = \frac{1}{2} sg(U_n^* + U_{on}); \quad (18)$$

$$i_n = i_a + i_b + i_c; \quad (19)$$

$$i_d = F_f I; \quad (20)$$

$$i_d = F_f i_n; \quad (21)$$

$$i_d - i_n = C \frac{du_d}{d\tau}, \quad i_d - i_n = C \frac{du_d}{d\tau}, \quad (22)$$

где i_d – ток в звене постоянного тока; i_n – ток возмущения; C – ёмкость конденсатора в звене постоянного тока.

На рис. 3 представлена структурная схема, описанная уравнениями (13)–(22). Предлагаемая модель раскрывает структуру АВН как объекта управления, что создаёт предпосылки для синтеза регуляторов тока и напряжения для каждой фазы (пофазного управления).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВН С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Моделирование работы АВН на основе приведённой системы уравнений проведено в абсолютных единицах в среде Matlab Simulink (рис. 4). Корректность работы модели подтверждается сопоставлением с результатами моделирования, полученными в библиотеке SimPowerSystems. Вследствие данного утверждения предлагаемую модель можно считать адекватной.

Результаты моделирования АВН в режиме генератора при симметричном режиме работы нагрузки приведены на рис. 5–8.

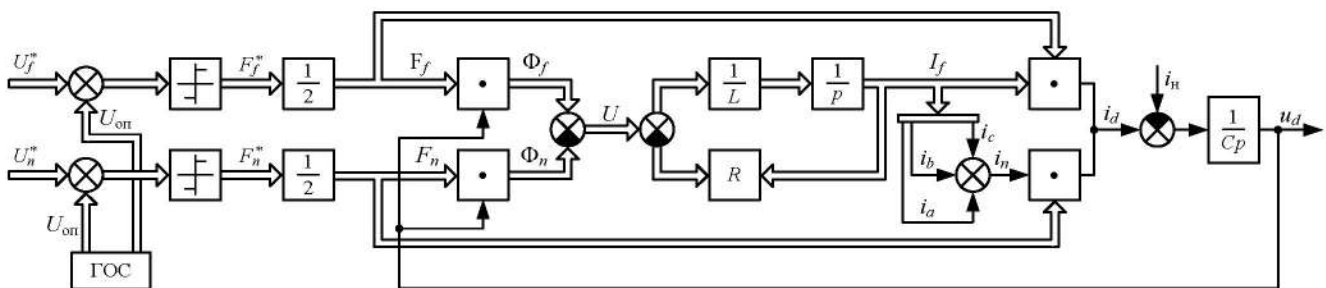


Рис. 3. Математическая модель АВН с дополнительной стойкой

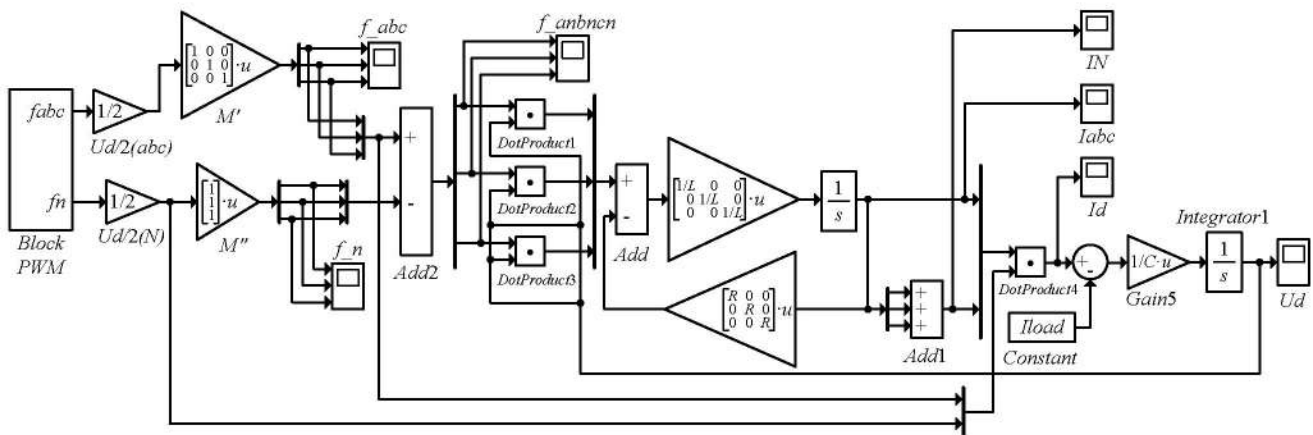


Рис. 4. Математическая модель АВН с дополнительной стойкой в пакете Matlab Simulink

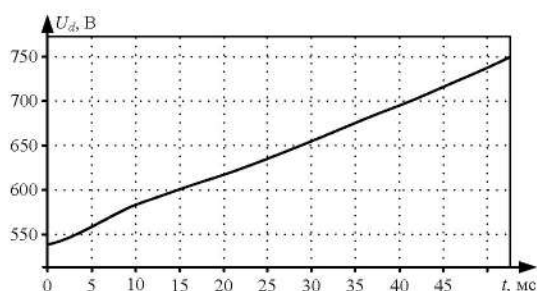


Рис. 5. График напряжения в звене постоянного тока

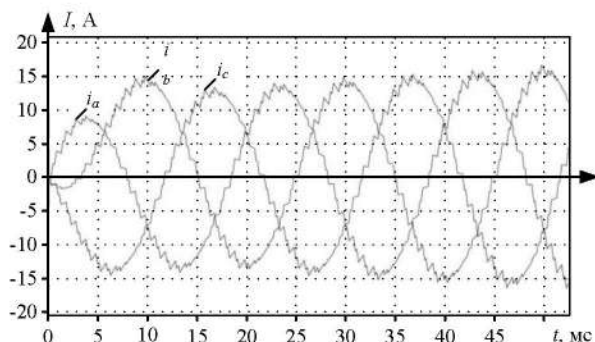
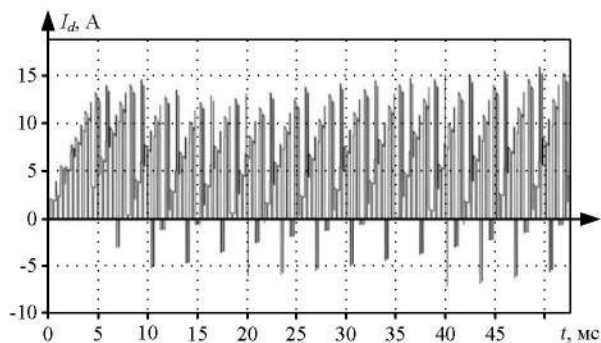
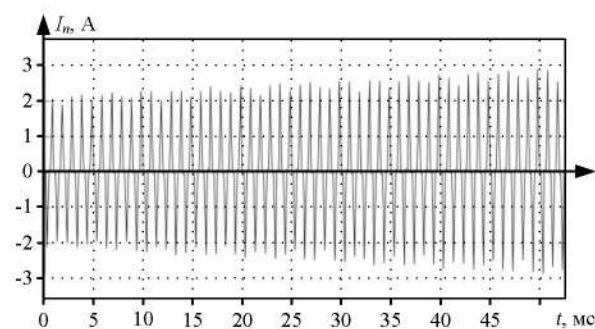


Рис. 6. Графики фазных токов АВН

Рис. 7. Графики тока i_d звена постоянного токаРис. 8. Графики тока i_n в нейтральном проводе

Параметры объекта взяты из расчёта мощности генерирующего устройства равного 10 кВт:

$U_d = 540$ В – начальное напряжение в звене постоянного тока;

$R = 10$ Ом – активное сопротивление буферного реактора;

$L = 0,00551$ Гн – индуктивность буферного реактора;

$C = 0,0012$ Ф – ёмкость конденсатора в звене постоянного тока.

Модель конденсатора в данном случае представляет собой интегрирующее звено с начальными условиями, равными напряжению 540 В. Из графиков видно увеличение напряжения U_d , обусловленное зарядкой конденсатора. В связи с увеличением напряжения происходит рост фазных токов, что отражает график на рис. 6. Надо отметить, что представленная математическая модель является симметричной, что соответствует нулевому среднему значению фазного тока на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлено математическое описание АВН как объекта управления. Рассматриваемый преобразователь является нелинейным, многомерным и многосвязным объектом с внутренними перекрёстными обратными связями. Этот факт необходимо будет учитывать при разработке системы управления и синтезе регуляторов АВН. Отметим, что для режима несимметричной нагрузки структура модели объекта не изменяется, причём предлагаемая структура позволяет выделить токи нулевой и обратной последовательности [1] для их компенсации при пофазном способе регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.
2. Киселёв М.Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трёхфазных системах электропитания на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности: дис... канд. техн. наук. 05.09.01 / Киселёв Михаил Геннадьевич. Москва, 2017.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во Новоуральского государственного технологического университета, 2001. 250 с.
4. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
5. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
6. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И. Электропривод переменного тока с двухсекционным инвертором напряжения // Всероссийская конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. ИЭГУ. 2012. С. 345-350.

Поступила в редакцию 12 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF AN ACTIVE FRONT-END VOLTAGE RECTIFIER WITH A NEUTRAL WIRE

Igor S. Ioffe

Engineer, a Post-graduate student, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: effect66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6595-206X>.

Anatolii M. Ziuzev

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>.

Aleksey V. Kostylev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-9819>.

Konstantin E. Nesterov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: k.e.nesterov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-8556>.

Active front-end is often used in power supply systems, such as regulated electric drive, electric generators of various types, including those based on renewable energy sources, used to power their own needs or as systems for maintaining the electrical network in parallel operation. In such systems, if necessary, the neutral wire can be connected to the midpoint of the capacitors on the DC side of the Converter or create an additional channel for the flow of zero-sequence currents through an additional branch of transistors. It should be noted that the scheme for connecting the neutral wire to the midpoint of the capacitors has a number of disadvantages, such as the voltage imbalance between the capacitors in the DC link, as well as the flow of currents of higher harmonics and zero-sequence currents through the capacitors when they are compensated. These problems can be resolved by using a scheme with an additional branch. This arrangement of an electric semiconductor Converter makes it possible to use the full voltage in the DC link and control the zero-sequence currents. The article discusses the construction of a mathematical model of an active front-end with four transistor branches as a control object based on the analysis of key state combinations when working on a load. A mathematical description of an active front-end with an additional branch in matrix form is given. The proposed mathematical model can be used for the synthesis of regulators of the automatic control system of the Converter and the allocation of zero-sequence currents in order to compensate for them, which is a significant factor for future research of the entire system of an active front-end with an additional branch.

Keywords: active front-end (AFE), semiconductor converter, mathematical model, neutral wire, additional brunch, energy efficiency, non-stationary modes, zero sequence, reverse sequence, asymmetric modes.

REFERENCES

1. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of chain theory]. Moscow: Energy, 1975. 752 p. (In Russian)
2. Kiselev M. G. *Issledovanie i razrabotka metodov simmetrirovaniya tokov v tryohfaznykh sistemakh elektro-snabzheniya na osnove silovykh elektronnykh ustroystv kompensatsii neaktivnoy moshchnosti. Kand. Diss.* [Research and development of methods for simulating currents in three-phase power supply systems based on power electronic devices for compensation of inactive power Ph.D. Diss.] Kiselev, Mikhail Gennadevich. Moscow, 2017.
3. Efimov A. A., Schreiner R. T. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [Active converters in regulated AC drives]. Novouralsk: Publishing house of the Novouralsk state technological University, 2001. 250 p. (In Russian)
4. Schreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg: URO RAS, 2000. 654 p. (In Russian)
5. Pronin M. V. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet)* [Power fully controlled semi-conductor converters (modeling and calculation)]. St. Petersburg: Electrosila, 2003, 172 p. (In Russian)
6. Schreiner R. T., Kostylev A.V., Shilin S. I. Alternating current electric drive with the two-section voltage source inverter. *Vserossiyskaya konferentsiya po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2012* [All-Russian conference on automated electric drive AEP-2012]. Pp. 345-350. (In Russian)

Математическая модель активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом / И.С. Иоффе, А.М. Зюзов, А.В. Костылев, К.Е. Нестеров // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-41-46)

Ioffe I.S., Ziuzev A.M., Kostylev A.V., Nesterov K.E. Mathematical Model of an Active Front-end voltage rectifier with a Neutral Wire. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 41-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-41-46)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.333:622

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)

Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Танич В.О., Петушков М.Ю.

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова

СНИЖЕНИЕ ПУСКОВЫХ ТОКОВ И МОМЕНТОВ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Прямой пуск от сети асинхронных короткозамкнутых двигателей характеризуется возникновением пиковых бросков пусковых токов и слабозатухающих колебательных составляющих электромагнитного момента, что в комплексе приводит к посадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток асинхронных двигателей, ударам, резонансным колебаниям и деформации в механическом оборудовании. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок в механическом оборудовании металлургической и горной промышленности за счет разработки рациональных схемных решений при прямом пуске асинхронного двигателя является актуальной научно-технической задачей. Целью статьи является оценка возможностей ограничения пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности подачи на его статорные обмотки фазного напряжения. Для ее оценки разработана динамическая компьютерная модель трехфазного асинхронного двигателя с учетом особенностей подключения статорной обмотки к питающей сети при прямом пуске, проведены необходимые исследования и определены требования к рациональным схемным решениям для асинхронных электроприводов, приводящих к снижению электрических и механических нагрузок. Теоретические исследования выполнены с привлечением методов теоретических основ электротехники, теории электрических машин, теории автоматического управления и автоматизированного электропривода. При расчете переходных процессов использовался программный пакет Matlab Simulink. Разработаны достоверные математическая и компьютерная модели трехфазных асинхронных двигателей мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт, позволяющие исследовать в динамике варианты прямого пуска с учетом потерь в стали статора, вытеснения тока ротора, кривой намагничивания главного потока, механической нагрузки и инерционности ротора. Задержки подачи напряжения на фазы В и С позволяет снизить максимум момента по отношению к моменту номинальному с 8,22 до 3,16 и время колебаний с 0,29 с до 0,035 с. Получены зависимости максимумов модуля тока статора и электромагнитного момента в зависимости от угла сдвига трех фаз питающего напряжения по отношению к нулевым начальным условиям асинхронного двигателя. Сформулированы выводы и требования к схемным решениям для рационального прямого пуска, позволяющие регулировать максимальные нагрузки и колебательность в начале прямого пуска.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель, компьютерная модель, прямой пуск, свободные колебания момента, начальные значения напряжения, схемные решения.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы механического оборудования определяется надежностью работы их электроприводов. Асинхронный электропривод конвейеров, дробилок, грохотов, проходческих комбайнов, водоотливных установок и др. является нерегулируемым и характеризуется прямым пуском от сети асинхронных короткозамкнутых двигателей (АД) [1-4] при существенной механической нагрузке и инерционности [5]. Дополнительно возникают пиковые броски пусковых токов и слабозатухающие колебательные составляющие электромагнитного момента, что в комплексе приводит к посадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток АД, ударам, резонансным колебаниям и деформации в механическом оборудовании [6]. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок в механическом оборудовании металлургической и горной промышленности за счет разработки рациональных схемных решений при прямом пуске АД является актуальной научно-технической задачей.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПО ПРЯМОМУ ПУСКУ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В монографии [1] приведена теория электромагнитных переходных процессов АД, проведены экспериментальные исследования прямого пуска трехфазного асинхронного двигателя, разработана математическая модель

эквивалентного двухфазного двигателя, на аналоговой вычислительной машине (АВМ) рассчитаны переходные процессы угловой скорости и электромагнитного момента при разных моментах сопротивления и инерционности. В работе [2] на основе математической модели эквивалентного двухфазного двигателя с использованием АВМ проведены расчеты переходных процессов при ограничении скорости нарастания питающего напряжения, при ограничении питающего напряжения, пуски при ненулевых начальных условиях и применении устройств плавного пуска (УПП). В статье [3] представлена динамическая двухфазная компьютерная модель двигателя АД 4А250S4Y3 с учетом потерь в стали, вытеснения тока ротора и насыщения магнитной системы основным потоком [7], с помощью которой с высокой достоверностью рассчитаны переходные процессы скорости и электромагнитного момента. В статье [5] приведены переходные процессы скорости, ускорения и момента АД мощностью 250 кВт, рассчитанные на компьютерной модели при прямом пуске, при пофазной подаче напряжения и при квазиоптимальном пуске.

В перечисленных работах проведены исследования различных способов прямого пуска на двухфазных динамических моделях, разработанных на основе обобщенной электрической машины. При этом не учтены особенности трехфазного АД [1-3, 5, 8-11]. Поэтому целью статьи является разработка динамической компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя с учетом особенностей подключения статорной обмотки к питающей сети при прямом пуске, проведе-

ние необходимых исследований и разработка требований к рациональным схемным решениям для асинхронных электроприводов, приводящих к снижению электрических и механических нагрузок.

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

На основании концепции работы асинхронного двигателя [8, 12] при разработке математической модели сформулированы исходные допущения:

1. Обмотки статора и ротора распределены по пазам идеально, состоят из нескольких катушечных групп и создают синусоидальные пространственные намагничивающие силы. Сумма токов обмоток равна нулю. Фазные активные и индуктивные сопротивления обмоток статора равны между собой, считаются постоянными и не зависящими от насыщения основной магнитной цепи. Фазные сопротивления обмоток ротора равны между собой, но с учетом процесса вытеснения тока роторной обмотки при большом скольжении изменяются (коэффициенты вытеснения тока ротора по активному сопротивлению K_r и реактивному сопротивлению K_x) [13].

2. Не учитываются зубцовые пульсации потока при вращении ротора. Считается, что эта проблема решена конструктивно за счет скоса пазов на одно зубцовое деление и подбора числа пазов статора и ротора.

3. Учет насыщения магнитной системы проводится по цепи «магнитопровод статора - зазор - магнитопровод ротора - зазор» [7].

4. Контуры вихревых токов представлены фазными сопротивлениями потерь в стали. За основу взята Т-образная схема замещения АДК с параллельным подключением сопротивления потерь в стали [3].

Дополнительные условия реализации модели:

1. Расчет основных переменных ведется в абсолютных величинах.

2. В качестве входных воздействий, приложенных к трем фазам статора, могут использоваться напряжения любой амплитуды, формы, частоты, фазы.

3. Выходные переменные для контроля: трехфазные токи статора и ротора (I_s , I_r); электромагнитный момент ротора (M_R); угловая скорость вращения и угол поворота ротора (ω , Θ_m), коэффициент мощности $\cos\varphi$, КПД двигателя η и скольжение s .

4. Возмущающее воздействие – реактивный момент сопротивления (M_C).

Структурная схема математической модели АД [14] приведена на рис. 1. Жирными линиями в структурной схеме выделены трехмерные или двухмерные векторы переменных. В блоке (1) выполняется расчет трехмерного тока статора при постоянных значениях активного сопротивления и индуктивности потока рассеивания [15] и с учетом потерь в стали статора. В блоке (2) рассчитывается трехмерный ток ротора при изменяющихся в функции скольжения активном сопротивлении и индуктивности потока рассеивания [16, 17]. В блоке (3) последовательно выполняется пересчет токов статора и ротора из трехфазной неподвижной системы координат ABC в двухфазную неподвижную систему координат $\alpha\beta$ и далее в двухфазную вращающуюся систему координат xy . Далее для расчета вектора тока намагничивания из вектора тока статора вычитается вектор тока ротора. С учетом кривой намагничивания рассчитываются проекции потоков намагничивания на оси xy . В блоке (4) выполняет-

ся обратный пересчет двухмерного вектора главного потока в трехмерные векторы потоков статора и ротора в осях ABC и abc . Блоки (5) и (6) необходимы для расчета трехмерных векторов ЭДС статорной E_s и роторной E_r обмоток. С помощью блока (7) на основе тока ротора и ортогональных потокоцеплений рассчитывается электромагнитный момент, развиваемый ротором АД [7]. Используя момент двигателя, момент сопротивления механизма и суммарный момент инерции (блок (8)) рассчитывается угловая скорость ротора АД.

В соответствии со структурной схемой математической модели в среде программирования Matlab Simulink разработана компьютерная модель асинхронного электропривода по системе ПЧ-АД со скалярным регулированием *adkn3cp.mdl* [15]. Основные параметры модели (табл. 1) для асинхронного двигателя 4A250S4Y3 (75 кВт, 1500 об/мин) [18] сведены в файл базы данных *adk250S4cp.mat*.

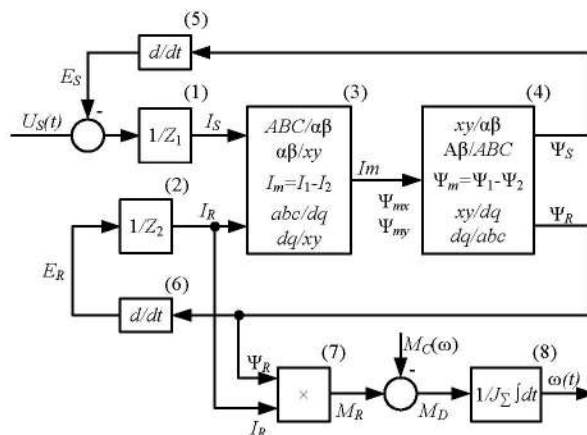


Рис. 1. Структурная схема математической модели трехфазного АД

Таблица 1
Основные параметры модели асинхронного двигателя 4A250S4Y3

Параметр	Значение
Номинальный ток статора $I_{n\sigma}$, А	135,77
Коэффициент мощности номинальный $\cos\varphi_n$	0,9
КПД номинальный η_n , %	93
Скольжение номинальное S_n , %	1,2
Момент критический $M_{k\sigma}$ о.е.	2,3
Момент номинальный M_n , Н·м	483
Коэффициент вытеснения тока ротора по активному сопротивлению k_r	2
Коэффициент вытеснения тока ротора по реактивному сопротивлению k_x	0,83
Активное сопротивление статорной обмотки, приведенное к роторной обмотке R_1 , Ом	0,0397
Индуктивность потока рассеивания роторной обмотки, приведенная к роторной обмотке L_1 , мГн	0,45
Активное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной обмотке R_2 , Ом	0,0218
Индуктивность потока рассеивания роторной обмотки, приведенная к статорной обмотке L_2 , мГн	0,23
Индуктивность главного потока L_m , мГн	9,2
Электромагнитная постоянная времени статорной обмотки t_1 , мс	11,34
Ток пусковой $i_{n\sigma}$ о.е.	10,55

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 2 приведены рассчитанные с помощью компьютерной модели переходные процессы прямого пуска АД при номинальной реактивной нагрузке при подаче трехфазного линейного напряжения 380 В частотой 50 Гц. Кривые модуля тока статора I_1 , электромагнитного момента M , момента сопротивления M_c и угловой скорости вращения ω (на рис. 2 график скорости приведен в масштабе 2:1) представлены в относительных единицах. Инерционная постоянная времени [6] двигателя 4A250S4Y3 равна 0,31 с. Основные характеристики переходных процессов приведены в табл. 2. Задержанные пуски отличаются друг от друга разным углом сдвига $\Delta\phi$.

Время прямого пуска под номинальной нагрузкой не превышает 0,684 с при суммарном моменте инерции, в 2 раза большем момента инерции двигателя. На интервале времени от 0 до 0,29 с в кривых тока и момента явно выражены существенные, слабо затухающие колебания частотой до 50 Гц. Максимумы тока и момента в начале пуска равны 9,58 и 8,22 о.е. соответственно.

Эти колебательные процессы объясняются тем, что электрические и магнитные переходные процессы в АД имеют гармонический характер с различными постоянными времени [12] и разной степенью затухания [19], а электромагнитный момент равен произведению электрического тока на ортогональное потокоцепление [7], что приводит в начале пуска к существенному колебанию момента и модуля тока. Подобные переходные процессы получены многими исследователями на своих моделях и экспериментальных установках [1-5, 8-10, 20, 21].

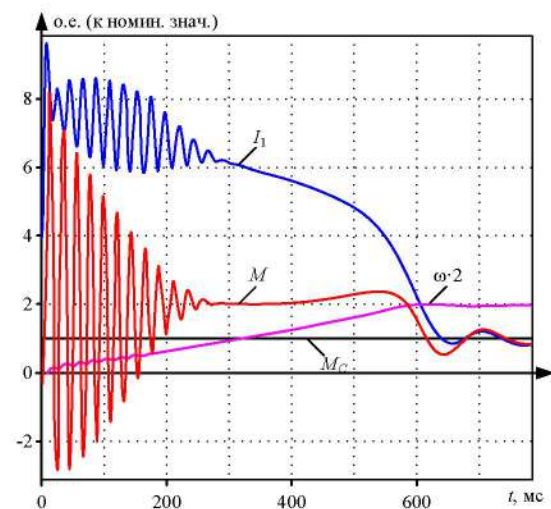


Рис. 2. Переходные процессы прямого пуска АД при одновременной подаче фазных напряжений

Таблица 2

Характеристики переходных процессов

Наименование	Прямой пуск	Зад. пуск 1	Зад. пуск 2
Максимум I_1 , о.е.	9,58	8,31	11,19
Максимум M , о.е.	8,22	3,16	4,27
Минимум M , о.е.	2,03	2,01	2,02
Момент критический M_{k2} , о.е.	2,38	2,38	2,39
Время пуска, с	0,683	0,64	0,635
Время колебания тока I_1 , с	0,29	0,035	0,033
Время колебания момента M , с	0,284	0,035	0,04
Угол сдвига, град.	-	0	-90

Достоверность компьютерной модели оценивалась по точности расчета основных переменных в номинальном режиме. В установившемся режиме задавались номинальные напряжение, частота и момент. По окончании пуска замерялись скольжение, ток статора, коэффициент мощности, КПД, ток пусковой и момент критический. Величина среднеквадратичной ошибки по 6 переменным составила 5,73 %, что говорит о высокой достоверности компьютерной модели.

На рис. 3 представлены осциллограммы трехфазного статорного напряжения, модуля напряжения, трехфазного тока статора и его модуля, а также тока намагничивания и его проекций по осям x и y . Время затухания переходных процессов тока статора не превышает 35 мс, а время затухания свободной составляющей тока намагничивания доходит до 290 мс и определяет время затухания электромагнитного момента АД.

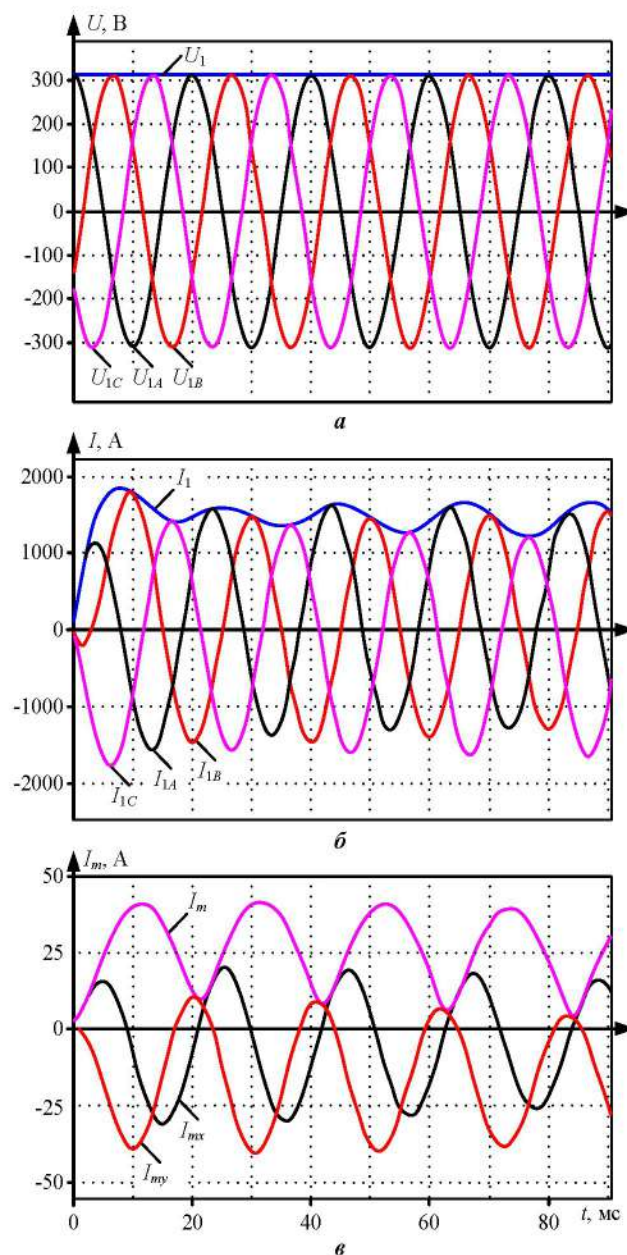


Рис. 3. Переходные процессы напряжения, тока статора, тока намагничивания при одновременной подаче фазного напряжения

Наличие слабозатухающих свободных составляющих в кривых тока намагничивания и потокосцепления связано с различными начальными значениями фазных напряжений [19], одновременно подаваемых на статорную обмотку при прямом пуске.

$$\begin{cases} U_{1a}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi); \\ U_{1b}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi - 2\pi/3); \\ U_{1c}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi + 2\pi/3). \end{cases} \quad (1)$$

Угол сдвига $\Delta\varphi$ является общим начальным углом для трех фаз питающего напряжения (1) по отношению к нулевым начальным условиям АД. При исследовании угол задавался в диапазоне от -90 до $+90$ град. Установлено на модели, что переходный процесс пуска (см. рис. 2) при одновременной подаче трехфазного напряжения не зависит от угла сдвига $\Delta\varphi$.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ СТАТЬИ

Для исключения слабозатухающих свободных составляющих в потокосцеплении при прямом пуске фазные напряжения на статорные обмотки В и С необходимо подавать с задержкой на 120 и 240 эл. град соответственно.

На рис. 4 в абсолютных величинах представлены осциллограммы трехфазного статорного напряжения, трехфазного тока статора, тока намагничивания и его проекций по осям x и y , рассчитанные с помощью компьютерной модели переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$. Задержки подачи напряжения на фазы В и С при частоте питающего напряжения 50 Гц составили 6,66 и 13,32 мс, соответственно. Время затухания переходных процессов тока статора и тока намагничивания при этом не превысили 35 мс.

На рис. 5, в продолжение осциллограмм рис. 4, приведены кривые модуля тока статора I_1 , электромагнитного момента M , момента сопротивления M_C и угловой скорости вращения ω в относительных единицах. Основные характеристики переходных процессов приведены в табл. 2. Время переходного процесса сократилось до 0,64 с, максимумы тока и момента уменьшились до 8,31 и 3,16 о.е. соответственно. Минимальный момент и момент критический остались прежними (см. рис. 2). Время затухания колебаний электромагнитного момента уменьшилось с 290 до 35 мс, а качество переходного процесса изменилось с существенно колебательного до монотонного.

Исследования влияния угла сдвига при задержанной подаче фазных напряжений на качество переходных процессов при пуске показали, что при $\Delta\varphi \neq 0$ максимумы тока и момента увеличиваются, но качество переходного процесса сохраняется. На рис. 6 приведены переходные процессы пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi = -90$ град, по которым видно, что время переходного процесса пуска уменьшилось до 0,635 с, максимумы тока и момента увеличились до 11,19 и 4,27 о.е. соответственно при времени затухания колебаний электромагнитного момента 40 мс.

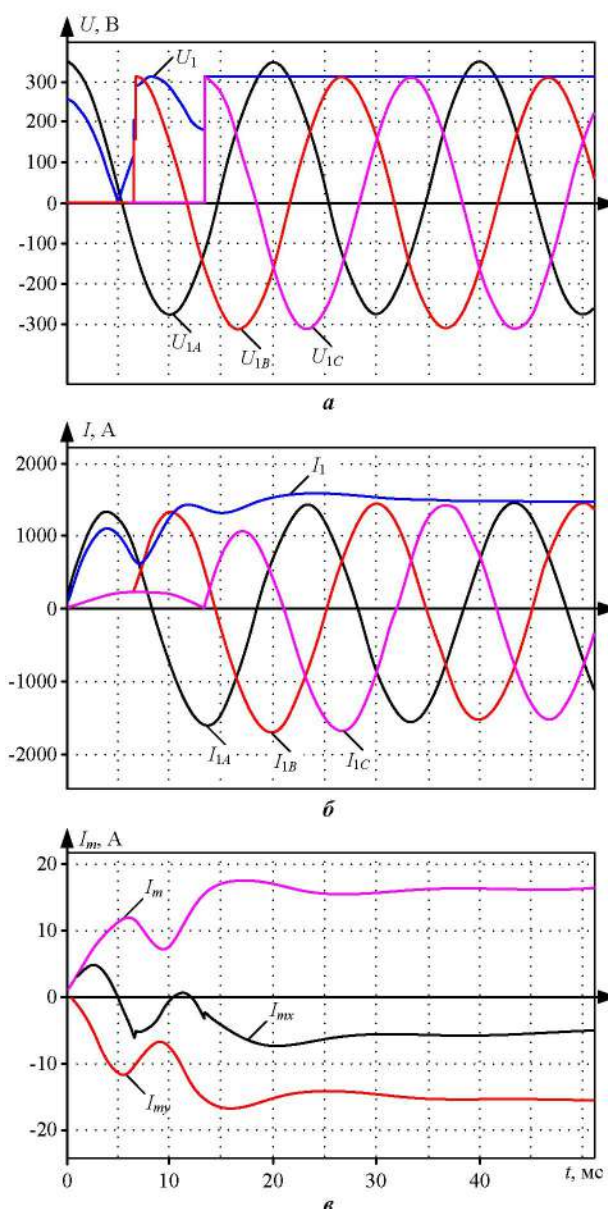


Рис. 4. Переходные процессы напряжения, тока статора, тока намагничивания при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$

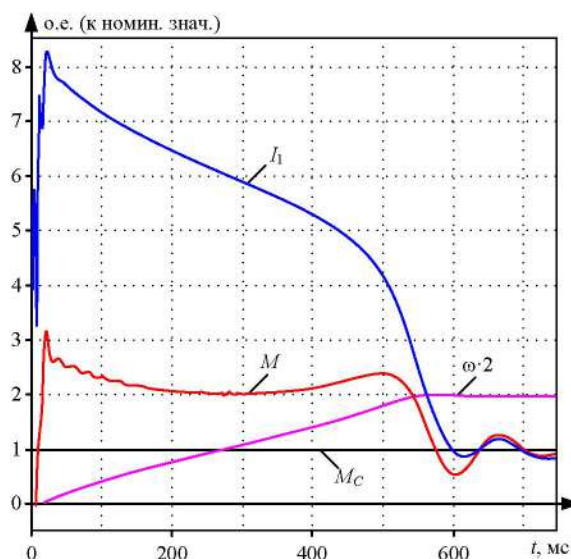


Рис. 5. Переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$

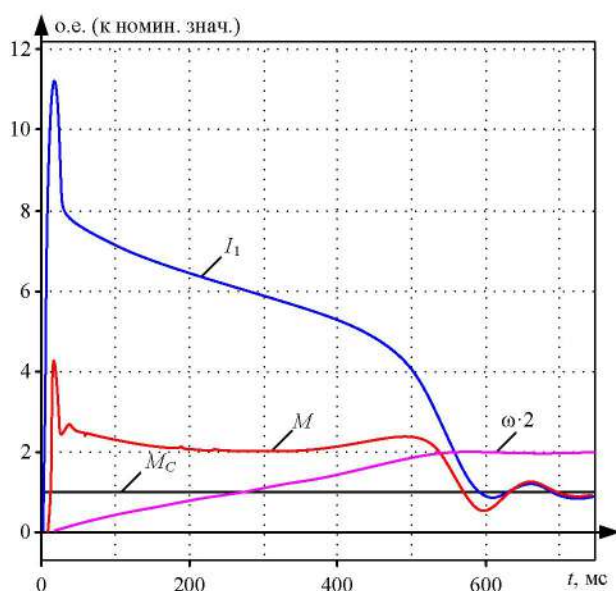


Рис. 6. Переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=-90$

Для более полного доказательства полученных результатов проведены исследования влияния угла сдвига на максимумы токов и моментов в начале пуска на аналогичных компьютерных моделях асинхронных двигателей 4А315М4УЗ, 4А355М4УЗ и ДТА350М мощностью 200, 315 и 350 кВт при синхронных скоростях 1500, 1500 и 842 об/мин соответственно. Для этого по базам данных [14] и [18] сформированы файлы *adk315M4cp.mat*, *adk355M4cp.mat* и *adk350tancp.mat*. Совместно с файлом *adkn3cp.mdl* выполнены тестовые расчеты, доказаны достоверности моделей и далее выполнены исследования по влиянию угла сдвига на максимумы токов и моментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 7 и 8 представлены зависимости максимумов моментов и токов в начале пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений в зависимости от угла сдвига питающего напряжения для АД мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт.

Приведенные зависимости имеют явно выраженные минимумы в районе $\Delta\varphi = \pm 20$ град и находятся в пределах $2,5 \pm 0,5$ и $7,5 \pm 1$ о.е. для моментов и токов соответственно. Максимальные значения моментов и токов проявляются при $\Delta\varphi = -90$ и не превышают 4 ± 1 и $12 \pm 1,5$ о.е. соответственно. Полученные зависимости показывают, что угол сдвига $\Delta\varphi$ существенно влияет на максимумы токов и моментов в начале прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений. Продолжительность этих всплесков не превышает 40 мс. Таким образом, при прямом пуске трехфазного АД с задержанной подачей фазных напряжений, задавая углом сдвига $\Delta\varphi$ от -90 град (по уравнению (1) напряжение фазы А – синусоида) до $\Delta\varphi = \pm 20$, можно регулировать максимумы тока статора и электромагнитного момента от наибольшего значения до наименьшего.

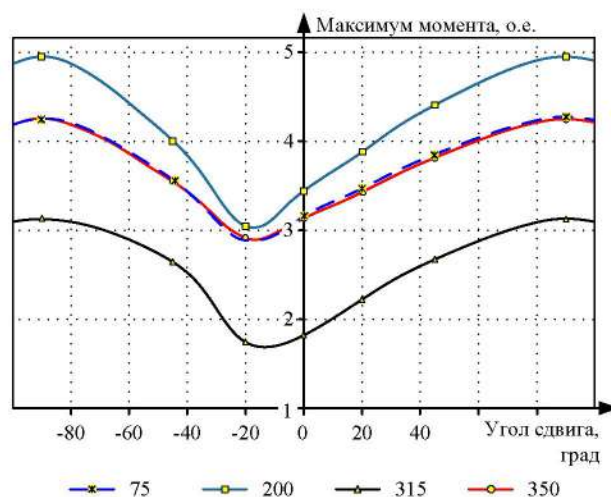


Рис. 7. Зависимости максимумов моментов от угла сдвига

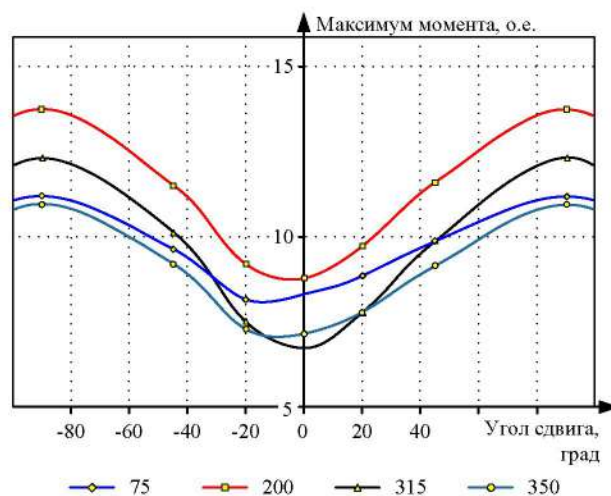


Рис. 8. Зависимости максимумов тока от угла сдвига

ВЫВОДЫ

1. В начале прямого пуска при одновременной подаче трехфазного напряжения в кривых тока статора и электромагнитного момента АД явно выражены существенные, слабозатухающие колебания частотой до 50 Гц. Наличие этих колебаний приводят к дополнительным нагрузкам в электрическом и механическом оборудовании.

2. Возникновение этих колебаний связано с разными начальными условиями фазных напряжений, подаваемых на статорную обмотку. Это приводит к возникновению разных свободных составляющих в кривых потокосцепления и дополнительным колебаниям электромагнитного момента. При одновременной подаче трехфазного напряжения начальный угол сдвига фазного напряжения статора не влияет на форму переходных процессов модуля тока статора и электромагнитного момента.

3. Задержка подачи напряжений фаз В и С в начале пуска на 120 и 240 электрических градусов приводит к исчезновению свободных составляющих в кривых потокосцепления и исчезновению высокочастотной колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента. При этом в начале пуска возникают дополнительные максимумы в кривых модуля тока статора и электромагнитного момента, затухающие за 35-40 мс.

4. При задержке подачи напряжений фаз B и C начальный угол сдвига фазного напряжения статора существенно влияет на максимумы модуля тока статора и электромагнитного момента. Полученные выводы сделаны на основании исследований на 4 достоверных компьютерных моделях АД мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт. Задавая угол сдвига $\Delta\varphi$ от -90 град до $\Delta\varphi = \pm 20$, можно регулировать максимумы модуля тока статора и электромагнитного момента от наибольшего значения до наименьшего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выводов сформулированы требования к рациональным системам прямого пуска:

1. Подключать к сети АД со схемой соединения статорной обмотки «звезда» необходимо по 5-проводной схеме: 3 линейных провода U , V и W (A , B и C), нейтральный провод N и заземляющий провод PE .

2. Для направления «Вперед» фазы U , V и W подключать к зажимам статорной обмотки $C1$, $C2$ и $C3$ соответственно с задержками 0, 6,66 и 13,32 мс (см. рис. 4). Зажимы $C4$, $C5$ и $C6$ подсоединить к нейтральному проводу N .

3. Для направления «Назад» фазы U , V и W (A , C и B) подключать к зажимам статорной обмотки $C1$, $C3$ и $C2$ соответственно с задержками 0; 6,66; 13,32 мс.

4. При реализации схемы на тиристорах для минимизации всплесков модуля тока статора и электромагнитного момента подключать фазу A к зажиму $C1$ следует при максимуме напряжения ($\Delta\varphi = \pm 20$) (см. рис. 5). Если подключение будет выполнено при прохождении напряжения через ноль, всплески тока и момента в начале пуска будут максимальными ($\Delta\varphi = -90$) (см. рис. 6).

5. При реализации схемы на однополюсных контакторах со стабилным временем срабатывания достаточно выполнение требований 2 и 3 без привязки подключения фазы A по величине фазного напряжения. При этом величина всплесков тока и момента будет носить случайный характер, но электрическая схема будет самая дешевая.

6. При реализации схемы реверсивного магнитного пускателя необходимо предусмотреть полную остановку двигателя через кнопку «Стоп» с последующим пуском в направлении «Назад».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров Л.Б., Масандилов, В.А. Ладензон. М.: Энергия, 1967. 200 с.
2. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 84 с.
3. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. № 5. С. 57–61.
4. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макарьева, А.В. Макаров // VIII Международная (XIX всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводе (АЭП). Саранск, 2014. С. 197–202.
5. Каширских В.Г., Переверзев С.С. Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов

- горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) ГИАБ, 2005 / Семинар № 17. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
7. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
8. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. US. 2006. 333 p. DOI 10.1002/9781119156079.
9. Cadirci I., Ermis M., Nalcacl E., Ertan B., Rahman M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 14, Iss. 3, 1999. P. 402–412. DOI 10.1109/60.790889.
10. Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017, DOI 10.1109/SIELMEN.2017.8123313.
11. Güdelhöfer J., Gottkehasch R., Möckelю A. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018. DOI 10.1109/ICELMACH.2018.8507162.
12. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008. 350 с.
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
14. Omelchenko E., Khramshin T., Tanich, V. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / Proceedings – 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019. DOI 10.1109/PEAMI.2019.8915408.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С. // ОБПБТ. 2014. №8.
16. Омельченко Е.Я. Математическая модель трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2011. №15. С. 49–53.
17. Омельченко Е.Я., Моисеев В.О., Тележкин О.А. Математическая модель системы «Преобразователь частоты-асинхронный двигатель» с улучшенным пусковым моментом // АЭП 2012: труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе. Иваново, 2012. С. 169–172.
18. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
19. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В 3-х т. Т. 1. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. 463 с.
20. Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. 2010. Pp. 3423–3427.
21. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей / Е.Я. Омельченко, А.В. Белый, С.С. Енин, Н.В. Фомин // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3(40). С. 12–19. DOI 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REDUCING OF VALUE OF STARTING CURRENT AND MOMENT OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH SQUIRREL CAGE ROTOR USING PHASE VOLTAGE SEQUENCE

Evgenii Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Aleksei B. Lymar

Post-graduate student, Senior Lecturer, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lyamar.alexei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

Vasily O. Tanich

Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shift-91@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0098-6431

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electronic and Microelectronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.petushkov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Relevance of this article is that direct-on-line start of asynchronous squirrel-cage motors is characterized by the appearance of peaks of inrush currents and weakly damped components of the electromagnetic moment, which in total leads to the voltage drop, accelerated wear of the insulation of the windings of asynchronous motors, impacts, resonant vibrations and deformation in the mechanical equipment. Therefore, the reduction of electrical and mechanical loads in the mechanical equipment of the metallurgical and mining industries due to the development of rational circuit solutions for direct-on-line of an asynchronous motor is an actual scientific and technical task. The aim of the article is to estimate the possibilities of limiting starting current and moments of an asynchronous squirrel-cage motor due to the sequence of supplying phase voltage to its stator windings. For this aim a dynamic computer model of a three-phase asynchronous motor was developed taking into account the peculiarities of connecting the stator winding to the mains during direct start-up, the necessary researches were carried out and the requirements for rational circuit solutions for asynchronous electric drives, leading to a reduction in electrical and mechanical loads, were determined.

Methods used in this article: theoretical researches were used with the methods of the theoretical foundations of electrical engineering, the theory of electrical machines, the theory of automatization and automated electric drive. The software package Matlab Simulink was used to calculate the computer model. Novelty: Reliable mathematical and computer models of three-phase asynchronous motors with power of 75, 200, 315 and 350 kW have been developed, which made it possible to research the dynamics of direct-on-line start options taking into account losses in stator steel, displacement of the rotor current, magnetization curve of the main stream, mechanical load and inertia rotor. Result: Delays in the supply of voltage to phases B and C can reduce the maximum torque to rated moment from 8.22 to 3.16 and the oscillation time from 0.29 s to 0.035 s. The dependences of the maxima of the stator current modulus and the electromagnetic moment are obtained depending on the angle of shift of the three phases of the supply voltage with respect to the zero initial conditions of the asynchronous motor. Practical relevance: The conclusions and requirements for circuit solutions for rational direct start are formulated, allowing us to control the maximum loads and oscillation at the beginning of a direct start.

Keywords: three-phase asynchronous squirrel-cage motor, computer model, direct-on-line start, oscillations of the moment, initial voltage values, schematic solutions.

REFERENCES

1. Sokolov M.M. Petrov L.P., Masandilov L.B., Ladenzon V.A. *Elektromagnitnyye perehodnyye protsessy v asinhronnom elektropivode* [Electromagnetic transients of asynchronous electric drives]. Moscow: Energiya, 1967. 200 p. (In Russian)
2. Petrov L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinhronnykh dvigateley*. [Control of starting and stopping of asynchronous motors]. Moscow: Energoizdat, 1981. 84 p. (In Russian)
3. Vinogradov A.B. Taking into account losses in steel, saturation, and surface effect when modeling dynamic processes in a frequency-controlled asynchronous electric drive. *Elektrotehnika*. [Electrotechnic] 2005. No. 5. P. 57–61. (In Russian)
4. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarcheva E.V., Makarov A.V. Comparative evaluation of starting methods of induction motors by the vibrational component of the electromagnetic moment. *VIII Mezhdunarodnaya (XIX vse-rossiyskaya) konferentsiya po avtomatizirovannomu elektropivodu AEP 2014* [VIII International (XIX Russian) Conference of Automatic Electric Drive AEP 2014], Saransk, 2014. P. 197–202. (In Russian)
5. Kashirskih V.G., Pereverzev S.S. Comparative analysis of soft start methods for asynchronous electric drives of mining machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal) GIAB], 2005 / Seminar no. 17. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207. (In Russian)
6. Klyuchev V.I. *Teoriya elektropivoda: uchebnik dlya vuzov* [Theory of electric drive: Textbook for universities] Moscow: Energoatomizdat, 1985. 560 p. (In Russian)
7. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektropivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg: URO RAN, 2000. 654 p. (In Russian)
8. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. US. 2006. 333 p. DOI 10.1002/9781119156079

9. Cadirci I., Ermis M., Nalcaci E., Ertan B., Rahman M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 14, Iss. 3, 1999. P. 402–412. DOI 10.1109/60.790889
10. Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017, DOI 10.1109/SIELMEN.2017.8123313
11. Güdelhöfer J., Gottkehasp R., Möckel A. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018. DOI 10.1109/ICELMACH.2018.8507162
12. Voldek A.I., Popov V.V.. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric machines. AC machines]. St. Petersburg: Piter, 2008. 350 p. (In Russian)
13. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh dvigateley*. [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p. (In Russian)
14. Omelchenko E., Khrumshin T., Tanich V. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / Proceedings – 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019. DOI 10.1109/PEAMI.2019.8915408
15. Omelchenko E.Ya., Telezhkin O.A., Moiseev V.O., Enin S.S. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM # 2014617766. Dinamicheskaya matematicheskaya model trekhfaznogo asinhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom* [Certificate of state registration of a computer program No. 2014617766. A dynamic mathematical model of a three-phase asynchronous motor with a short-circuited rotor] / OBPBT. 2014, no. 8. (In Russian)
16. Omelchenko E.Ya. Mathematical model of a three-phase asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Vestnik SUSU. Series "Energy"]. 2011. No. 15. P. 49–53. (In Russian)
17. Omelchenko E.Ya., Moiseev V.O., Telezhkin O.A. The mathematical model of the "Frequency Converter-Asynchronous Motor" system with improved starting torque. *AEP 2012: Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu*. [AEP 2012: Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) Conference on Automated Electric Drive]. Ivanovo, 2012. P. 169–172. (In Russian)
18. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik* [Asynchronous motors series 4A: Reference Book]. Moscow: Energoizdat, 1982. 504 p. (In Russian)
19. K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-h t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1.* [Theoretical fundamentals of electrical engineering: Textbook for universities. Vol. 1] St. Petersburg: Piter, 2003. 463 p. (In Russian)
20. Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. 2010. P. 3423–3427.
21. Omelchenko E.Y., Belyj A.V., Enin S.S., Fomin N.V. Energy-efficient test facility for electric motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. [Electrotechnical Systems and Complexes] 2018. №3(40). P. 12–19. DOI 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19. (In Russian)

Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений / Е.Я. Омелченко, А.Б. Лымарь, В.О. Танич, М.Ю. Петушков // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 47–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)

Omelchenko E.Ya., Lyamar A.B., Tanich V.O., Petushkov M.Yu. Reducing of Value of Starting Current and Moment of Asynchronous Motor with Squirrel Cage Rotor Using Phase Voltage Sequence. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2020, no. 2(47), pp. 47–54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179.18

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)

Бочкарев И.В.¹, Брякин И.В.²

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

²Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Предложен новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля, согласно которому посредством соответствующих спиновых модуляторов создают направленные переменные электрические поля, которыми одновременно воздействуют на контролируемый кабель и на эталонный дополнительный конечной длины отрезок этого кабеля без дефектов. Тем самым в электропроводящих элементах контролируемого и эталонного кабелей возбуждают волновые процессы поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации и регистрируют посредством соответствующих индукционных датчиков контрольный и эталонный сигналы в виде ЭДС индукции за счет указанных волновых процессов. Формируют в реальном масштабе времени вещественные и мнимые составляющие этих сигналов и по их разностным величинам между вещественными составляющими и между мнимыми составляющими эталонного и контрольного сигналов, по значениям нормированных разностных величин осуществляют допусковый контроль физико-технического состояния электропроводящих элементов контролируемого кабеля. Предложено устройство, реализующее разработанный способ дефектоскопии и позволяющее проводить оперативный контроль качества кабеля. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили его высокую эффективность и достоверность контроля.

Ключевые слова: электрический кабель, электропроводящие элементы, бесконтактный неразрушающий контроль, спиновой модулятор, индукционный датчик, поляризация спиновых магнитных моментов свободных электронов, резонансная частота, диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, синхронные детекторы квадратурной и синфазной составляющих сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Линии электропередач предназначены для транспортировки электрической энергии. Одновременно по ним осуществляется передача различных высокочастотных сигналов – телеметрических данных для измерений и сбора информации для удаленного контроля за состоянием объектов, сигналов релейной защиты и противоаварийной автоматики, диспетчерского управления различными отраслями и т.п. Очевидно, что перебои в работе указанных систем могут привести к весьма серьезным негативным последствиям.

Основу любой линии электропередачи, однозначно определяющую ее работоспособность, составляют электрические кабели и провода. Одной из причин преждевременного выхода из строя этих систем являются дефекты, не обнаруженные в процессе изготовления их электропроводящих элементов. Следовательно, необходимо проводить контроль этих элементов, как с точки зрения отсутствия обрывов и обеспечения требуемых геометрических параметров, так и качества материала, из которого они изготовлены - его структуру, химический состав и т.п. Решающая роль при этом принадлежит методам бесконтактного неразрушающего контроля (БНК) [1, 2]. Это объясняется тем, что неразрушающая диагностика обеспечивает не только контроль, но и управление качеством технических объектов, поскольку она позволяет решать две основные задачи:

- обеспечивает соблюдение предэксплуатационного качества за счет контроля требуемого уровня технических параметров и свойств материалов и комплек-

тующих элементов, используемых при изготовлении и монтаже линий электропередач;

- позволяет оптимизировать процессы отбраковки кабельной продукции путем точной локализации дефектов и, соответственно, возможности осуществления точечного, целенаправленного ремонта или замены конкретного дефектного места.

Очевидно, что контроль параметров кабеля необходимо проводить как во время его изготовления, так и непосредственно перед монтажом и укладкой кабельной линии. Последнее обусловлено тем, что условия хранения и транспортировки кабелей, а также процедуры их подготовки к укладке не идеальны и их электропроводящие элементы могут быть повреждены на любом из указанных этапов.

В настоящее время на рынке существует большое количество систем БНК, использующих различные методы, способы и средства контроля. При этом анализ показывает, что современные требования к системам БНК не могут быть в полной мере реализованы лишь путем их усовершенствования в рамках общеизвестных решений, реализуемых на практике уже многие годы. Поэтому необходим поиск новых путей и способов решения проблемы дефектоскопии электропроводящих элементов кабелей, направленных на повышение точности, оперативности и достоверности решения задач бесконтактного контроля.

РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Проведенный анализ показал, что известные системы диагностики кабельно-проводниковой продукции в основном направлены на контроль ее изоляции [3, 4]. Однако именно электропроводящие элементы

обеспечивают выполнение ее основных функциональных свойств. Поэтому работы, посвященные созданию новых систем диагностирования технического состояния именно этих основных элементов электрических кабелей и проводов, являются весьма востребованы и имеют высокую практическую ценность. В этом направлении известен ряд работ, базирующихся в основном на использовании вихревого способа БНК [5, 6]. Например, в [7] описан способ бесконтактного диагностического контроля электропроводящих объектов, заключающийся в том, что на продольно перемещающийся контролируемый длинномерный электропроводящий объект воздействуют направленным постоянным магнитным полем, которым в электропроводящих элементах возбуждают вихревой ток. Индукционным датчиком формируют и измеряют контрольный сигнал в виде ЭДС индукции, наведенной электромагнитным полем, образованным вихревым током. По параметрам полученного сигнала осуществляют дефектоскопию электропроводящих объектов. Однако данный способ БНК имеет низкую точность и чувствительность контроля, а также узкую область применения. Невысокие точность и чувствительность объясняются тем, что на величину наводимого вихревого тока существенно влияют величина и равномерность скорости перемещения объекта контроля, а также его поперечные колебания, вибрации и отклонения ориентации от плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Кроме того, результаты контроля зависят от пространственного положения контролируемого объекта относительно датчика. При этом указанные параметры в процессе контроля невозможно обеспечить полностью стабильными.

Относительно ограниченная область применения известного способа объясняется тем, что он не позволяет осуществлять контроль технического состояния медных электропроводящих элементов большого диаметра, парамагнитных металлических проводников, а также электрических кабелей с многожильными элементами.

Для ликвидации указанных недостатков авторами был предложен новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля, который базируется на принципиально новом физическом эффекте, ранее не использовавшемся в системах БНК [8, 9]. Он заключается в том, что на контролируемый участок кабеля воздействуют перпендикулярно его продольной оси направленным переменным электрическим полем. Этим полем в электропроводящих элементах кабеля возбуждают волновой физический процесс поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Формируют и измеряют посредством индукционного датчика контрольный сигнал в виде ЭДС индукции, создаваемой в электропроводящих элементах кабеля за счет указанного волнового физического процесса. Полученный контрольный сигнал подвергают обработке и осуществляют ранжирование дефекта посредством сравнения полученного результата измерения с соответствующим эталонным сигналом, хранящимся в статистической базе данных, составленной по результатам измерения в образцах кабеля с искусственными дефектами в их электропроводящих элементах.

Однако для создания статистической базы эталон-

ных сигналов необходимо провести большое количество измерений, предварительно создав большое количество образцов кабеля с искусственными дефектами в их электропроводящих элементах. Кроме того, при переходе на дефектоскопию очередного типа кабеля с другими эксплуатационными характеристиками необходимо вновь проделать указанные измерения и загрузить их в статистическую базу данных, что существенно затрудняет и удлинняет процесс перенастройки системы контроля. Это приводит к повышению сложности и трудоемкости реализации предложенного способа дефектоскопии. Повышенная трудоемкость объясняется также необходимостью постоянного учета влияния температуры или других внешних факторов на текущие параметры контролируемого кабеля и обеспечения тем самым помехоустойчивости системы контроля путем соответствующей дополнительной калибровки ее измерительных блоков в режиме реального времени.

С целью ликвидации указанных недостатков предлагается новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля. Принципиальная схема реализации предложенного способа показана на рис. 1.

Здесь обозначено: 1 – контролируемый кабель; 2 – эталонный отрезок контролируемого кабеля конечной длины без дефектов; 3 и 4 – первый и второй спиновые модуляторы; 5 и 6 – рабочий и дополнительный индукционные датчики; 7 – источник переменного высокочастотного напряжения.

Спиновые модуляторы 3 и 4 выполнены в виде проходных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов с сосредоточенной емкостью с идентичными конструктивными параметрами, а индукционные датчики 5 и 6 выполнены в виде проходных катушек индуктивности, идентичных по своим конструктивным параметрам.

На контролируемый кабель 1 в зоне контроля воздействуют перпендикулярно его продольной оси направленным переменным электрическим полем \vec{E} . Это поле создают посредством первого спинового модулятора 3 (проходного электрического конденсатора с сосредоточенной емкостью), электроды которого запитывают переменным высокочастотным напряжением вида $U_T(t) = U_m \cos \omega t$.

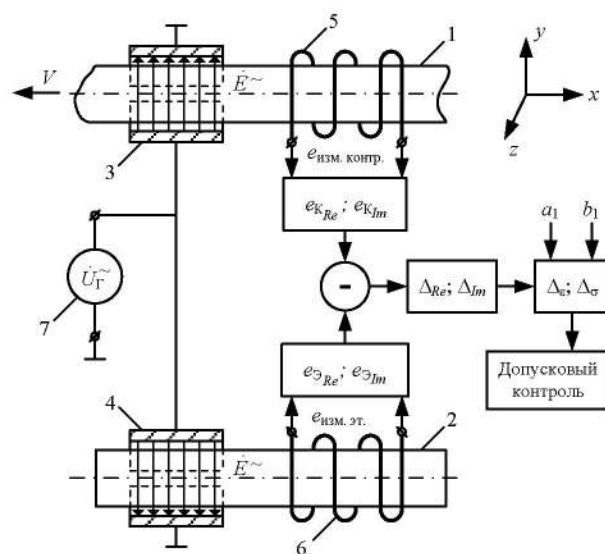


Рис. 1. Принципиальная схема реализации предложенного способа дефектоскопии кабеля

Одновременно это же напряжение подается на электроды второго спинового модулятора 4, который также создает направленное переменное электрическое поле, которым воздействуют на дополнительный эталонный отрезок контролируемого кабеля конечной длины без дефектов перпендикулярно его продольной оси.

Указанные направленные переменные электрические поля возбуждают в электропроводящих элементах контролируемого кабеля 1 и эталонного отрезка кабеля 2 физические процессы поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов. Следует отметить, что эти процессы возникают независимо от того, передвигаются кабели относительно спиновых модуляторов или находятся в состоянии покоя. Для создания необходимых условий для возникновения устойчивого процесса поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов переменное электрическое поле создают на резонансной частоте ω_0 поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов электропроводящих элементов кабелей.

Известно, что при распространении в реальных средах различные электродинамические процессы испытывают затухание, то есть происходит потеря энергии, переносимой этими процессами. При этом основные потери в электропроводящей среде связаны с проводимостью, которая для данных сред существенно отличается от нуля.

Для описания изменения фазы и затухания волны при распространении в среде с потерями используется комплексное волновое число \dot{k} . В электропроводящей среде между волновым числом \dot{k} , частотой ω , диэлектрической проницаемостью ε и удельной проводимостью σ существует следующее дисперсионное соотношение [10]:

$$\dot{k} = \sqrt{\varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega}. \quad (1)$$

Для наглядности выражение (1) представим в следующем виде:

$$\dot{k}^2 = \varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega = \alpha + i\beta. \quad (2)$$

Из представленных выражений (1) и (2) следует, что действительная часть α пропорциональна диэлектрической проницаемости среды ε , а мнимая часть β пропорциональна удельной проводимости среды σ .

Для диа- и парамагнетиков, к которым относятся соответственно медь и алюминий, из которых изготавливают электропроводящие элементы кабелей, магнитная проницаемость μ мало отличается от единицы. Следовательно, в (2) будем иметь $\mu_k \approx 1$. Для ферромагнитных материалов величина μ значительно отличается от единицы. Но при этом намагниченность ферромагнетиков достаточно инерционна. За счет этого в переменном высокочастотном электрическом поле она не успевает изменяться синхронно с полем. Поэтому в отличие от стационарных полей в переменном поле намагниченность ферромагнетика в среднем оказывается незначительной и значения μ , соответствующие этой намагниченности, отличаются от единицы незначительно, и можно считать, что для ферромагнетиков в случае поляризации спинов магнитных моментов сво-

бодных электронов направленным переменным электрическим полем $\mu_k \approx 1$ [11].

Следовательно, предлагаемый способ дефектоскопии может быть распространен и на ферромагнитные электропроводящие материалы, которые являются хорошими проводниками.

С учетом выражений (1) и (2) рассмотрим физические процессы, происходящие в электропроводящих структурах кабелей.

Процесс в контролируемом кабеле 1 регистрируют рабочим индукционным датчиком 5, которым формируют контрольный сигнал (КС) в виде ЭДС индукции $U_k(t)$:

$$U_k(t) = e_{\text{кнзм}} = -w_k \cdot \frac{d\Phi_{\text{кс}}}{dt} = -w_k \omega_0 S_k B_{\text{ксм}} \cdot \sin(\omega_0 t - \dot{k}_k x), \quad (3)$$

где w_k – количество витков первого индукционного датчика для контролируемого объекта (КО); $\Phi_{\text{кс}}$ – поток спиновой индукции через КО; S_k – средняя площадь сечения КО; $B_{\text{ксм}}$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции КО; \dot{k}_k – комплексный коэффициент распространения спиновой волны для КО; $\dot{k}_k^2 = \varepsilon_k \mu_k \omega_0^2 + i\sigma_k \mu_k \omega_0 = \alpha_k + i\beta_k$; ω_0 – резонансная частота спиновой поляризации; ε_k – диэлектрическая проницаемость КО; σ_k – удельная проводимость КО, фактически определяющая электродинамические свойства ферромагнитных металлов; $\mu_k \approx 1$ – магнитная проницаемость КО; α_k – коэффициент фазы спиновой волны при распространении по длине КО; β_k – коэффициент затухания спиновой волны при распространении по длине КО; x – координатная ось, совпадающая с продольной осью КО.

Для комплексного значения КС в соответствии с (1) ÷ (3) можем записать:

$$\dot{U}_k = U_{\text{кRe}} + iU_{\text{кIm}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{кRe}}$ и $U_{\text{кIm}}$ – соответственно вещественная (синфазная) и мнимая (квадратурная) составляющие комплексного значения ЭДС индукции (контрольного сигнала) датчика 5, регистрируемые соответственно синфазным и квадратурным синхронными детекторами измерительного канала КС.

Известно, что в общем случае статическую функцию преобразования (СФП) практически любой измерительной системы можно представить в виде [12]:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1}, \quad (5)$$

где y – выходная величина; a_1, \dots, a_n – параметры СФП; x – измеряемая величина.

Тогда статические функции синхронного и квадратурного преобразования КС в соответствии с (1)–(5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} U_{\text{кRe}} = a_1 + a_2 \varepsilon_k; \\ U_{\text{кIm}} = b_1 + b_2 \sigma_k; \end{cases} \quad (6)$$

где a_1 и a_2 – параметры статической функции синхрон-

ного преобразования КС; b_1 и b_2 – параметры статической функции квадратурного преобразования КС.

Параметры СФП a_1 и b_1 представляют собой медленно меняющиеся случайные величины, содержащие аддитивную помеху и представляющие собой нулевой дрейфовый сигнал.

Процесс в эталонном отрезке кабеля 2 регистрируют дополнительным индукционным датчиком 6, которым формируется эталонный сигнал (ЭС) в виде ЭДС индукции $U_3(t)$. По аналогии с (3) имеем

$$U_3(t) = e_{\text{ЭИЗМ}} = -w_3 \frac{d\Phi_{3\text{Э}}}{dt} = -w_3 \omega_0 S_3 B_{3\text{Э}} \sin(\omega_0 t - \dot{k}_3 x), \quad (7)$$

где $w_3 = w_k$ – количество витков второго индукционного датчика для эталонного объекта; $\Phi_{3\text{Э}}$ – поток спиновой индукции через ЭО; $S_3 = S_k$ – средняя площадь сечения ЭО; $B_{3\text{Э}} = B_{k\text{Э}}$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции ЭО; \dot{k}_3 – комплексный коэффициент распространения спиновой волны для ЭО; $\dot{k}_3^2 = \epsilon_3 \mu_3 \omega_0^2 + i\sigma_3 \mu_3 \omega_0 = \alpha_3 + i\beta_3$; ϵ_3 – диэлектрическая проницаемость ЭО; σ_3 – удельная проводимость ЭО; ω_0 – резонансная частота спиновой поляризации; $\mu_3 \approx 1$ – магнитная проницаемость ЭО; α_3 – коэффициент, характеризующий распределение амплитуды спиновой волны по длине ЭО; β_3 – коэффициент фазы спиновой волны при распространении по длине ЭО.

Для комплексного значения ЭС в соответствии с (4) можем записать:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{3\text{Re}} + i\dot{U}_{3\text{Im}}, \quad (8)$$

где $U_{3\text{Re}}$ и $U_{3\text{Im}}$ – соответственно вещественная (синфазная) и мнимая (квадратурная) составляющие комплексного значения ЭДС индукции (контрольного сигнала) датчика 6, регистрируемые соответственно синфазным и квадратурным синхронными детекторами измерительного канала ЭС.

С учетом того, что индукционные датчики 5 и 6, а также функциональные узлы вторичной обработки КС и ЭС в виде соответствующих наборов синхронных и квадратурных детекторов обладают достаточно высокой степенью идентичности своих параметров, то для статических функций синхронного и квадратурного преобразования ЭС согласно (8) можем аналогично (6) записать:

$$\begin{cases} U_{3\text{Re}} = a_1 + a_2 \epsilon_3; \\ U_{3\text{Im}} = b_1 + b_2 \sigma_3, \end{cases} \quad (9)$$

где a_2 и b_2 – параметры СФП, определяемые на этапе предварительной калибровки для каждого вида ЭО и обладающие достаточной временной стабильностью.

Решая совместно системы уравнений (6) и (9), определим нормированную разностную величину Δ_ϵ между вещественными составляющими ЭС и КС и нормированную разностную величину Δ_σ между мнимыми составляющими ЭС и КС:

$$\begin{cases} \Delta_\epsilon = \frac{U_{3\text{Re}} - U_{k\text{Re}}}{a_2} = \frac{\Delta_{\text{Re}}}{a_2}; \\ \Delta_\sigma = \frac{U_{3\text{Im}} - U_{k\text{Im}}}{b_2} = \frac{\Delta_{\text{Im}}}{b_2}. \end{cases} \quad (10)$$

Посредством нормированных разностных величин Δ_ϵ и Δ_σ осуществляется допусковый контроль физико-технического состояния КО по диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости σ , результаты которого не зависят от состояния дрейфовых параметров СФП.

В соответствии с изложенным, предлагаемый способ дефектоскопии можно представить в следующей интерпретации:

1. Одновременно воздействуют посредством соответствующих спиновых модуляторов направленным переменным электрическим полем на КО и ЭО.

2. Регистрируют посредством соответствующих индукционных датчиков волновые процессы спиновой поляризации свободных электронов в КО и ЭО.

3. Регистрируют посредством набора синхронных и квадратурных детекторов, синхронизируемых частотой переменного электрического поля, вещественные и мнимые составляющие КС ($e_{k\text{Re}}$ и $e_{k\text{Im}}$) и ЭС ($e_{3\text{Re}}$ и $e_{3\text{Im}}$).

4. Определяют нормированную разностную величину Δ_ϵ и между вещественными составляющими ЭС и КС и нормированную разностную величину Δ_σ между мнимыми составляющими ЭС и КС, посредством которых осуществляется допусковый контроль физико-технического состояния КО.

Следует отметить, что рассматриваемые процессы спиноволновой динамики существенно отличаются от электродинамических процессов, которые, как правило, сопровождаются возникновением токов проводимости и вихревых токов в электропроводящих структурах с соответствующим разогревом электропроводящего материала и выделением тепловой энергии. В рассматриваемом случае происходит преобразование энергии переменного электрического поля в энергию бегущей волны спиновой поляризации свободных электронов без дополнительных побочных эффектов в виде электромагнитных или тепловых излучений.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Предлагаемый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля можно реализовать посредством различных аппаратных решений, например, при помощи устройства, схема которого приведена на рис. 2. На рис. 2 обозначено: 1 – многожильный кабель (объект контроля); 2 – отрезок многожильного кабеля без дефектов (эталон); 3 и 4 – первый и второй спиновые модуляторы, представляющие собой профильные конденсаторы с двумя полуцилиндрическими электродами; 5 и 6 – первый и второй индукционные датчики в виде регистрирующих проходных катушек индуктивности; 7 – генератор высокочастотного переменного напряжения; 8 – формирователь опорных сигналов; 9 – сумматор; 10 – синхронный детектор квадратурной составляющей сигнала с сумматора 9; 11 – первый масштабный усилитель квадратурного измерительного канала; 12 – первый АЦП квадратурного измерительного

ного канала; 13 – синхронный детектор синфазной составляющей сигнала с сумматора 9; 14 – второй масштабный усилитель синфазного измерительного канала; 15 – второй АЦП синфазного измерительного канала; 16 – электронно-вычислительное устройство; 17 – блок индикации; U_{Γ} – высокочастотное напряжение питания спинного модулятора; U_{κ} – контрольный сигнал, пропорциональный фактическому текущему значению параметров проверяемого кабеля; U_{Σ} – эталонный сигнал, пропорциональный эталонному значению параметров кабеля.

Устройство работает следующим образом. От генератора высокочастотного переменного напряжения 7 к электродам первого 3 и второго 4 спинных модуляторов подводится напряжение вида $U_{\Gamma} = U = U_m \cos \omega t$. За счет этого в зонах контроля создаются направленные переменные электрические поля \vec{E} , которые действуют соответственно на контролируемый кабель 1 и на дополнительный эталонный отрезок 2 контролируемого кабеля конечной длины без дефектов и возбуждают в электропроводящих элементах этих кабелей 1 и 2 физический процесс поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Процесс в контролируемом кабеле 1 регистрируют первым индукционным датчиком 5, которым формируется контрольный сигнал в виде ЭДС индукции U_{κ} .

Процесс в эталонном отрезке кабеля 2 регистрируют вторым индукционным датчиком 6, которым формируется эталонный сигнал в виде ЭДС индукции U_{Σ} . При этом число витков w_1 в регистрирующей катушке первого индукционного датчика 5 равно числу витков w_2 в регистрирующей катушке второго индукционного датчика 6.

Контрольный U_{κ} и эталонный U_{Σ} сигналы сравнивают противофазным сложением в сумматоре 9, на выходе которого формируется напряжение:

$$\Delta U = U_{\kappa} - U_{\Sigma}. \quad (11)$$

Сигнал ΔU с сумматора 9 поступает к информационным входам синхронных детекторов 10 и 13, к опорным входам которых подключены выходы соответственно квадратурного или синфазного опорных напряжений формирователя 8. Таким образом, на опорные входы первого и второго синхронных детекторов 10 и 13 подаются соответственно «квадратурные» (сдвинутые на 90°) и «синфазные» относительно выходного напряжения возбуждающего генератора 7 стробирующие опорные сигналы.

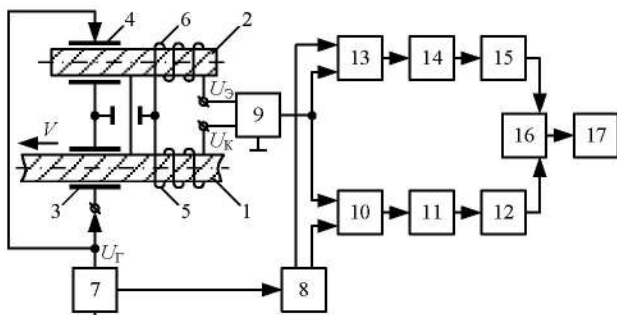


Рис. 2. Схема устройства для реализации предложенного способа дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля

Таким образом, в основе построения системы контроля лежит двухканальная измерительная структура:

а) измерительный канал синфазной составляющей выходного сигнала датчика, образованный совокупностью функциональных блоков 10, 11, 12;

б) измерительный канал квадратурной составляющей выходного сигнала датчика, образованный совокупностью функциональных блоков 13, 14, 15.

Полученная информация с этих измерительных каналов вводится в блок 16, которым осуществляется ее алгоритмическая обработка и результат поступает на блок индикации 17, где выдаются соответствующие результаты идентификации обнаруженных дефектов в контролируемом кабеле. При этом если получают не нулевой сигнал на выходе первого измерительного канала «10-11-12», то блок 16 фиксирует, что имеет место уменьшение живого сечения или обрыв электропроводящих элементов кабеля, а если получают ненулевой сигнал на выходе второго измерительного канала «13-14-15», то блок 16 фиксирует, что имеет место изменение химического состава материала этих элементов.

Допустимое процентное отклонение величин выходных сигналов обоих измерительных каналов устанавливается заранее в процессе наладки измерительной системы. Кроме того, перед началом работы систему калибруют. Для этого вместо контролируемого кабеля 1 устанавливают отрезок этого кабеля с гарантированным отсутствием дефектов и подают напряжение U_{Γ} на спинные модуляторы 3 и 4. При этом посредством электронной регулировки напряжения смещения амплитудных детекторов 10 и 13 добиваются, чтобы сигналы на выходе первого измерительного канала «10-11-12» и на выходе второго измерительного канала «13-14-15» были равны нулю.

Дополнительной калибровки блока 16 для исключения влияния температуры или других внешних факторов, влияющих на величины измерительных сигналов, не требуется, так как обе измерительные катушки основного 5 и дополнительного 6 индукционных датчиков работают в одинаковых условиях, что упрощает процесс контроля.

Процедура контроля электропроводящих элементов кабеля во многом зависит от поставленных целей этого контроля. Если требуется провести просто процесс отбраковки неисправного кабеля, например непосредственно в полевых условиях при укладке кабеля, то необходимо зафиксировать только сам факт наличия дефекта в его электропроводящих элементах без определения конкретных параметров этого дефекта. В этом случае система просто контролирует отличие величин контрольного и эталонного сигналов по обоим каналам и при превышении заданного численного порога отличия формирует сигнал на отбраковку.

В случае необходимости выявления конкретных параметров дефекта требуется проведение ряда предварительных действий. Например, если необходимо решить задачу оценки численного отличия реального живого сечения электропроводящих элементов кабеля от заданного номинального значения, то необходимо провести следующие технологические процедуры:

1. На участке контролируемого кабеля устанавливают отрезок кабеля с известным значением потери площади поперечного сечения по металлу, например 10% номинальной площади поперечного сечения по металлу, и с помощью соответствующей настройки блока 16 добиваются, чтобы на дисплее блока индикации 17 появилось численное значение 10% потери номинальной площади поперечного сечения по металлу.

2. В электронно-вычислительное устройство 16 вносится алгоритм оценки процентного отклонения фактически измеренных показателей контролируемого кабеля от показателей эталонного кабеля.

3. По результатам измерений информационного сигнала алгоритмически вычисляют численные значения указанных процентных отклонений [13], которые фактически и обеспечивают необходимый уровень достоверности контроля и отбраковки кабеля по текущим значениям живого сечения его электропроводящих элементов.

Аналогичные технологические процедуры следует провести и при необходимости оценки отклонения удельной проводимости σ электропроводящих элементов кабеля от ее заданного номинального значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Экспериментальная проверка эффективности предложенного способа дефектоскопии и основных принципов построения варианта устройства для его реализации осуществлялась с использованием специально разработанной для этой цели информационно-измерительной системы (ИИС).

Для удобства рассмотрения воспользуемся компонентной структурой ИИС (рис. 3) [14], где под компонентом ИИС понимается входящее в ее состав техническое устройство, ориентированное на выполнение одной из предусматриваемых процессом измерений функций или реализующее преобразование измерительной информации в другие виды информации.

В соответствии с указанными функциями рассматриваемую ИИС можно структурировать в виде следующих компонент: измерительных, связующих, вычислительных и информационных. Следует отметить, что для рассматриваемого варианта ИИС измерительный компонент представлен совокупностью сенситивного элемента (датчика) и преобразовательного элемента, осуществляющего первичную и вторичную обработку информационного сигнала.

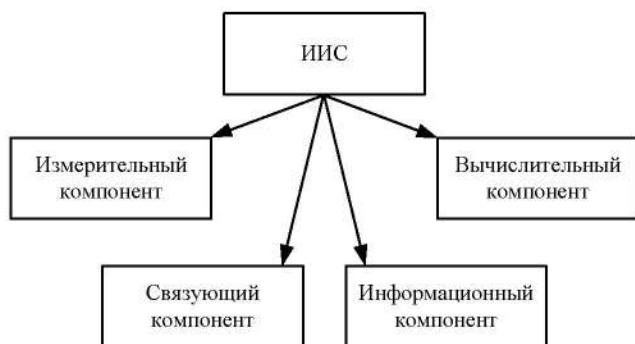


Рис. 3. Компонентная структура ИИС

Используемая ИИС была построена на основе следующих базовых принципов [13]:

- сенситивный элемент измерительного компонента ИИС представлен в виде набора измерительных индукционных датчиков;
- преобразовательный элемент измерительного компонента ИИС и связующий компонент ИИС организованы микропроцессорными модулями на базе PIC-микроконтроллеров и представляют собой фактически аппаратную часть ИИС, функционально ориентированную на USB-порт персонального компьютера (ПК);
- информационно-вычислительный компонент ИИС представлен в формате ПК и прикладной пользовательской программы (ППП), разработанной на языке программирования C++ и ориентированной на создание библиотеки стандартных пользовательских программ первичной и вторичной обработки сигналов путем соответствующей их компиляции из среды MatLab;
- взаимодействие программных и аппаратных компонент осуществляется через стандартный драйвер USB HID.

Следует отметить, что при разработке информационно-вычислительного компонента ИИС использовался метод экспорта алгоритмов из вычислительных программных комплексов (ВПК) MATLAB с последующей компоновкой этих алгоритмов в динамически подключаемые библиотеки (dll). Данный подход позволил создать динамически расширяемое с помощью библиотек DLL программное обеспечение ПК, не требующее процесса лицензирования.

Более детально рассмотрим особенности структурной блок-схемы аппаратной части ИИС, представленной на рис. 4 [15].

Согласно представленной структуре ИИС содержит два независимых модуля:

МИИП – модуль интерфейса с измерительными преобразователями;

МИПК – модуль интерфейса с ПК.

В свою очередь, данные модули взаимодействуют между собой посредством цифрового радиоканала ближней связи (до 100 м).

МИИП предназначен для взаимодействия с измерительными датчиками и содержит следующие функциональные узлы: АЦП – AD7329; контроллер МИИП и цифровой процессор обработки сигнала (ЦПОС) – dsPIC33FJ64GP206; модем МИИП – NRF24L01.

МИПК предназначен для согласования аппаратной части с ПК посредством протокола передачи данных USB и содержит следующие функциональные узлы: модем МИПК – NRF24L01; контроллер МИПК и интерфейс с ПК – PIC18F2550.

Применяемый в качестве модемов МИИП и МИПК радиотрансивер NRF24L01 имеет частотный диапазон 2,4 ГГц и максимальную пропускную способность 2 Мбит/с.

Кроме того, в трансивере nRF24L01 применен аппаратный протокол – Enhanced ShockBurst, который позволяет организовать цифровой интерфейс с управляющим микроконтроллером по последовательной шине SPI.

Радио-модуль NRF24L01 имеет 4-проводной полнодуплексный интерфейс, совместимый с интерфейсом SPI, и располагает для соответствующего взаимодействия дополнительными выводами IRQ и CE, которые не входят в интерфейс SPI.

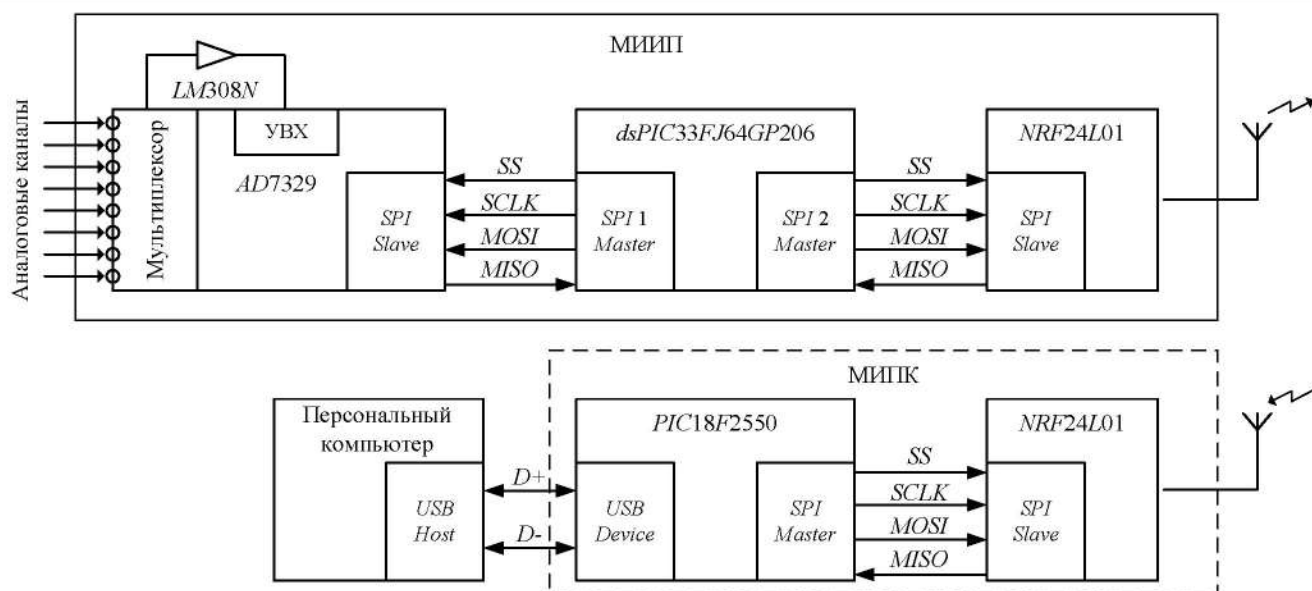


Рис. 4. Структурная блок-схема аппаратной части ИИС

В качестве вычислительного компонента рассматриваемой ИИС использовалась интегрированная среда MatLab, обладающая следующими возможностями:

- получение информационных сигналов и их визуализация в реальном времени;
- сохранение полученной информации в рабочем пространстве MatLab или в MAT-файлах на диске для последующей обработки;
- обработка измерительной информации в темпе измерений.

Информационные сигналы, полученные с соответствующих измерительных индукционных датчиков, обрабатывались в реальном времени преобразовательным элементом измерительного компонента ИИС и посредством связующей компоненты ИИС вводились в ПК, где осуществлялась процедура допускового контроля, результаты которого выводились на экран монитора ПК.

В таблице приводятся некоторые результаты отдельных экспериментальных исследований предлагаемого метода контроля на примере одножильных кабелей с медной и алюминиевой проволоками с различными номинальными сечениями, реализуемых посредством ИИС.

При эксперименте в контролируемом одножильном кабеле искусственно создавались дефекты в виде обрыва проволоки, локального уплотнения или локальной вытяжки материала проволоки.

Предельный параметр допускового контроля Δ^D_σ , представленный в таблице, условно определял $\pm 5\%$ диапазон возможных вариаций живого сечения контрольного одножильного кабеля по отношению к номинальному сечению эталонного одножильного кабеля.

Предельный параметр допускового контроля $\Delta^D_\varepsilon - \pm 50\%$ диапазон возможных аномальных вариаций физических свойств электропроводящего материала контрольного одножильного кабеля по отношению к физическим свойствам электропроводящего материала эталонного одножильного кабеля.

Анализ результатов, представленных в таблице, четко указал по знаку Δ_ε на диамагнитные свойства Cu и парамагнитные свойства Al, а по величине этого параметра выявил возможность определения уровня соответствия физических свойств материала проволоки одножильного кабеля соответствующим нормативным требованиям.

Результаты экспериментальных исследований

Материал проволоки в жиле	Номинальное сечение S, мм ²	Параметры измеряемых сигналов		Предельные параметры допускового контроля				Напряжение питания спинового модулятора В
		Δ_{σ}	Δ_{ε}	Δ^D_{σ}		Δ^D_{ε}		
		В		В				
				min	max	min	max	
Cu	обрыв	0,002	- 0,001	—	—	—	—	10
	4,0	1,022	- 0,182	0,950	1,050	- 0,120	- 0,200	
	8,0	1,831	- 0,216	1,900	2,100	- 0,140	- 0,220	
	16,0	4,352	- 0,241	3,800	4,200	- 0,160	- 0,240	
Al	обрыв	0,002	0,001	—	—	—	—	
	4,0	0,506	0,118	0,470	0,530	0,100	0,200	
	8,0	1,082	0,125	0,950	1,050	0,140	0,240	
	16,0	2,089	0,169	1,900	2,100	0,160	0,260	

Следует отметить, что из данных таблицы по параметру измеряемого сигнала $\Delta\sigma$ также следует вывод о том, что предлагаемый метод оперативного контроля обладает достаточно высокой степенью селективности, как по материалу проволоки одножильного кабеля, так и по ее геометрическим параметрам в виде величины живого сечения.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования возможного варианта реализации разработанного способа показали высокую эффективность и точность контроля качества электропроводящих элементов электрических проводов и кабелей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества предложенного способа и разработанного на его основе устройства дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля заключаются в следующем:

- позволяет оперативно выполнять отбраковку неисправного кабеля в полевых условиях непосредственно в процессе монтажа кабеля при его размотке с бобины;

- обеспечивает быструю перенастройку для контроля различных кабелей путем соответствующей замены эталонного отрезка конечной длины этого кабеля без дефектов;

- обнаружение дефектов реализуется как в случае неподвижного, так и перемещающегося контролируемого кабеля;

- возможность выявления дефектов в электропроводящих элементах из пара- и диамагнитных материалов, а также в стальных и сталеалюминевых проводах;

- обеспечивает высокую точность измерения и повышение помехоустойчивости за счет существенного снижения влияния внешних дестабилизирующих факторов, например влияния температуры на текущие параметры контролируемого кабеля;

- обеспечивает упрощение конструкции измерительной системы.

Разработанный способ БНК достаточно универсален и может быть использован для диагностики не только длинномерных, но и электропроводящих изделий ограниченной длины и различной формы, например стержней, шпилек, пластин и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В. В. Клюева. В 8 т. М.: Машиностроение, 2006.
2. Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation / Edited by N. Ida, N. Meyendorf. - Springer Nature Switzerland AG, 2018. 1550 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_13-1.
3. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 232 с.
4. Таджибаев А.И., Канискин В.А., Пугачев А.А. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2007. 173 с.
5. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 88 с.
6. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихревого метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
7. Патент RU № 2542624. Способ вихревого контроля медной катанки и устройство для его реализации. Опубликовано 20.02.2015, бюл. № 5.
8. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Храпшин В.Р. Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4(41). С. 4-10.
9. Брякин И. В., Бочкарев И. В. Способ определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля / Патент РФ 2701754. Опубликовано 01.10.2019. Бюл. № 28.
10. Якубовский Ю. Я., Ренард И. В. Электроразведка. М.: Недра, 1991. 358 с.
11. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / под общ. ред. В.П. Вейко. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. 141 с.
12. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. М.: Энергия, 1978. 176 с.
13. Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора данных Л КАРД E502 // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 42-48.
14. Брякин И.В. Магнитометрические средства измерения, контроля и технической диагностики: монография. Бишкек: Илим, 2012. 212 с.
15. Брякин И.В., Добровольский Н. Концепция создания информационно-вычислительного компонента сложных систем // Проблемы автоматизации и управления. №2. 2011. С. 74-84.

Поступила в редакцию 30 марта 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPERATIONAL QUALITY CONTROL OF ELECTRIC CONDUCTING CABLE ELEMENTS

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Chief of the Laboratory of information and measuring systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

A new method for defectoscopy of electrically conductive cable elements is proposed, according to which, using the appropriate spin modulators, directional alternating electric fields

are created, which simultaneously affect the controlled cable and the reference additional finite length of the cable segment without defects. Thus, wave processes of polarization of the spin

magnetic moments of free electrons at the resonance frequency of this polarization are excited in the electrically conductive elements of the controlled and reference cables and the control and reference signals are recorded in the form of induction emf due to the indicated wave processes by means of corresponding induction sensors. The real and imaginary components of these signals are formed in real time and by the difference values between the material components and between the imaginary components of the reference and control signals, tolerance monitoring of the physical and technical state of the electrically conductive elements of the controlled cable is carried out according to the values of the normalized difference values. A device is proposed that implements the developed flaw detection method and allows for operational control of cable quality. The conducted experimental studies confirmed its high efficiency and reliability of control.

Keywords: electric cable, electrically conductive elements, non-destructive testing, spin modulator, induction sensor, polarization of the spin-magnetic moments of free electrons, resonant frequency, dielectric constant, specific conductivity, synchronous detectors of quadrature and in-phase components of the signal.

REFERENCES

1. *Nerazrushaiushchiy kontrol: spravochnik* [Non-destructive testing: Reference book] / Under the editorship of V.V. Klyuyev, in 8 volumes. Moscow: Mechanical Engineering, 2006. (In Russian)
2. Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation / Edited by N. Ida, N. Meyendorf. – Springer Nature Switzerland AG, 2018. 1550 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_13-1.
3. Kholodny S. D., Serebryannikov S. V., Boyev M. A. *Metody ispytaniy i diagnostiki v elektroizolatsionnoy i kabelnoy tekhnike* [Test methods and diagnostics in electrical insulation and cable technology]. Moscow: Publishing House MPEI, 2016. 232 p. (In Russian)
4. Tadzhibayev A.I., Kaniskin V.A., Pugachev A.A. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kabeley i kabelnykh setei* [Assessment of the technical state of cables and cable networks]. St. Petersburg: PEIPK, 2007. 173 p. (In Russian)
5. Yakovlev S.G. *Metody i apparatura magnitnogo i vikhrevogo kontrolya* [Methods and apparatus of magnetic and vortex control]. St. Petersburg: Publishing house of SPbGETU "LETI", 2003. 88 p. (In Russian)
6. Shubochkin A.E. *Razvitie i sovremennoe sostoyanie vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya* [Development and current state of the eddy current method of non-destructive testing]. Moscow: Publishing House "Spectrum", 2014. 288 p. (In Russian)
7. *Sposob vikhretokovogo kontrolya mednoy katanki i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of eddy current control of a copper wire rod and device for its implementation]. Patent RU No. 2542624. Published 02/20/2015, bull. Number 5.
8. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Development of a new method for flaw detection of electric cables. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 4(41). P. 4-10. (In Russian)
9. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob opredeleniya mesta defekta elektroprovodyashchikh elementov kabelya* [A method for determining the location of a defect in electrically conductive cable elements] / Patent RF 2701754. Published 01.10.2019. Bull. Number 28.
10. Yakubovsky Yu.Ya., Renard I.V. *Elektrorazvedka* [Geoelectric Prospecting]. Moscow: Nedra, 1991. 358 p. (In Russian)
11. Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom. Chast I. Pogloshchenie lazernogo izlucheniya v veshchestve* [Interaction of laser radiation with matter. Part I. Absorption of laser radiation in matter]. Under the general editorship of V.P. Veiko. St. Petersburg: SPb GU ITMO, 2008. 141 p. (In Russian)
12. Bromberg E.M., Kulikovskiy K.L. *Testovye metody povysheniya tochnosti izmereniy* [Test methods to improve measurement accuracy]. Moscow: Energy, 1978. 176 p. (In Russian)
13. Verzunov S.N., Bochkarev I.V. Development of the software component of the locator based on the L KARD E502 data acquisition device. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No 2(39). P. 42-48. (In Russian)
14. Bryakin, I.V. *Magnitometricheskie sredstva izmereniya, kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki* [Magnetometric measuring instruments, control and technical diagnostics]. Bishkek: Ilim, 2012. 212 p. (In Russian)
15. Bryakin I.V., Dobrovolsky N. The concept of creating an information and computing component of complex systems. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of automation and control], No. 2. Bishkek: Ilim, 2011. pp. 74-84. (In Russian)

Бочкарев И.В., Брякин И.В. Оперативный контроль качества электропроводящих элементов кабеля // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 55-63. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)

Bochkarev I.V., Bryakin I.V. Operational Quality Control of Electric Conducting Cable Elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 55-63. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 62-52

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)

Ефимов А.Ю., Горькавый М.А., Соловьев В.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ**

В работе представлен подход, обеспечивающий возможность идентификации нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота, входящего в состав автоматизированного технологического процесса, посредством использования нейро-нечетких моделей. Экспериментально подтверждено наличие существенных различий в значениях мгновенной мощности энергопотребления робота в зависимости от состояния его осей, что, в свою очередь, определяет потенциал энергосбережения при реализации возможности выбора наименее энергозатратных зон рабочей области робота при формировании управляющей программы. Была выполнена комплексная процедура измерений и сформирован массив данных мгновенных значений мощности и соответствующих значений координат шестой оси робота. На базе обучающей выборки посредством инструментов интеллектуальных нейро-нечетких систем была сформирована модель энергопотребления промышленного робота, позволяющая спрогнозировать энергетические затраты при исполнении конкретной управляющей программы технологического процесса. Подробно описаны параметры полученной нейро-нечеткой системы и также алгоритмы, реализуемые в ее подсистемах. На основании результатов репрезентативного тестирования модели во всей рабочей зоне промышленного робота и соотнесения с данными, полученными с измерительных устройств, в рамках проведения эксперимента продемонстрирована возможность существенного сокращения энергетических затрат в пределах 7–15 %. Обозначены пути интеграции предложенных инструментов управления в производственные процессы промышленного предприятия, а также определены задачи перспективных исследований.

Ключевые слова: автоматизация, робототехника, энергосбережение, роботизированные процессы, оптимизация, управление.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития промышленности роботизированные технологические комплексы позволяют значительно ускорить производство готовых и промежуточных изделий. Промышленные роботы, обладая рядом преимуществ по сравнению со станками ЧПУ, с каждым годом завоевывают все больше и больше сегментов производства, таких как: сборка, покраска, сварка, клепка, перемещение грузов, механообработка и др. При этом одним из основных ресурсов во всех сегментах роботизированного производства является электроэнергия.

Если отдельно взятый промышленный робот автономно является энергоэффективным устройством [1, 2] под управлением оптимальных, в том числе по критерию энергосбережения, алгоритмов, то организованный на базе роботов любой производственный процесс имеет значительный потенциал энергосбережения [3, 4].

Как правило, алгоритмы управления составляющими робота как автономного устройства являются недоступными для конечного пользователя (промышленного предприятия) и представляют собой коммерческую тайну производителя. В этом направлении реализация потенциала энергосбережения для пользователя закрыта, он может лишь полагаться только

на компетентность проектировщиков робототехнического оборудования.

В то же самое время пользователь, обладая возможностью организации процесса проектирования роботизированных ячеек и локального оборудования технологического комплекса на своем предприятии, имеет широкий спектр возможностей по повышению энергоэффективности процесса в целом. Это может быть достигнуто за счет реализации оптимальных решений в части конфигурирования роботизированных ячеек, реализующих определенный класс технологических операций, а также внесения оперативных корректировок в управляющие программы исполнительных механизмов. Оба «организационных» пути сокращения электропотребления позволяют уменьшить удельный вес электроэнергии в себестоимости конечной продукции, но в первом случае (статическое позиционирование оборудования) мероприятие носит разовый характер и возможно только на этапе наладки роботизированной ячейки, ее повторная трансформация является оправданной, если технологический процесс меняется кардинально. Оперативная же коррекция управляющих программ под каждую технологическую операцию не связана с привлечением дополнительных ресурсов и позволяет добиться положительного эффекта. При этом аппаратная часть роботизированного комплекса задействуется только один раз для идентификации процесса, в дальнейшем все операции по поиску оптимального решения вы-

полняет программная часть в виртуальном пространстве технологического процесса.

ПРОЦЕДУРА ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

В работах авторов [5-7] были представлены промежуточные результаты исследования, ставивших перед собой цели минимизации (формула (1)) электропотребления роботизированного процесса в условиях ограничений на значения основных параметров технологического процесса, например: время изготовления детали, скорость подачи инструмента, масса оснастки и т.д.

$$F = \min(W), \lim(v, t), \quad (1)$$

где W – потребленная энергия; v – скорость перемещения манипулятора; t – время выполнения технологической операции.

Решалась задача поиска оптимального (с точки зрения энергоэффективности) положения заготовки в рабочем пространстве робота.

Так, только за счет оптимизации пространственного положения обрабатываемого изделия в рамках процесса механообработки материалов с твердостью не более 32 кгс/мм² по Бринеллю (в эксперименте не проводились исследования по механообработке материалов с твердостью свыше 32 кгс/мм² в силу ограничений по функциональности имеющегося роботизированного оборудования) наблюдался потенциал экономии электропотребления до 15%. Эксперимент проводился в соответствии с параметрами, представленными в табл. 1.

На основе эмпирических данных есть все основания полагать, что потенциал энергосбережения, заложенный в возможности автоматизированного поиска оптимального положения изделия в пространстве, в задачах механообработки материалов с твердостью свыше 32 кгс/мм², а также в других технологических процессах, связанных с перемещением руки робота на высоких скоростях, может составлять до 30-40%, что подтверждается результатами исследований, отраженных в работах [5, 8].

Несмотря на значительный эффект от оптимизационных действий приведенного выше примера, данный результат не гарантирован на всем множестве роботизированных процессов, поскольку не во всех технологических операциях роботов есть возможность изменения положения подпространства комплекса траекторий движений (совокупность движений манипулятора, реализуемых в ходе выполнения управляющей программы) относительно глобальной системы координат робота, в других эта возможность ограничена исполнительными устройствами, например рабочий ход осей позиционного стола или вспомогательного робота, осуществляющего захват и удержание обрабатываемой детали.

Таблица 1

Параметры технологического процесса

Параметр технологического процесса	Значение параметра
Тип механообработки	Фрезерование
Материал	Сплав алюминия (твердость 28 кгс/мм ²)
Тип изделия	Фланец приварной
Основной исполнительный механизм	KUKA KR – 60 Грузоподъемность – 60 кг Радиус рабочий – 2052 мм
Скорость подачи инструмента	1200 мм/мин.
Средняя мгновенная мощность робота без шпинделя	1,25 кВт

Для того чтобы гарантировать достижение положительного эффекта в условиях имеющихся ограничений, необходимо реализовать следующую последовательность действий.

Этап 1: автоматизированная оценка потенциала энергосбережения конкретного роботизированного процесса в случае оптимизации подпространства комплекса траекторий движения робота в пространстве рабочей области.

Этап 2: автоматизированная идентификация нелинейных зависимостей электропотребления экземпляра конкретного класса промышленных роботов от положения его осей и скорости подачи.

Этап 3: моделирование электропотребления роботом при изменении начальной точки системы координат изделия относительно глобальной системы координат робота (сдвига подпространства траекторий движения робота). Поиск оптимального положения изделия в пространстве рабочей области робота.

В данной статье предлагаются варианты решения вопросов второго и частично третьего этапов. Синтез алгоритмов автоматизированного решения задач первого этапа целесообразно проводить в рамках исследования после получения экспериментальных результатов второго и третьего этапов во взаимосвязи с параметрами надпроцессов роботизированного участка (производственные процессы промышленного предприятия), например, объем производства, номенклатура продукции, возможный процент брака и т.п.

Приведенные ниже результаты исследований базируются и адекватны для роботизированного процесса механообработки изделий, при этом применимость данного подхода не исключается для технологических процессов, для которых характерны малые перемещения высокой плотности на низких скоростях подачи. В остальных случаях необходимо доопределять процедуру идентификации нелинейных зависимостей получения траекторий-шаблонов.

Для обеспечения возможности поиска оптимального расположения комплекса траекторий необходимо иметь информацию о мощности, потребляемой роботом при нахождении его инструмента в том или

ином сегменте пространства. Получение точных и достоверных данных представляется возможным только путем проведения измерений мощности на конкретном промышленном роботе. Для этого была разработана процедура по измерению потребляемой мощности в различных сегментах пространства [6].

Измерения проводились в подпространстве рабочей области робота, ограниченной кубом со стороной 1000 мм, которое располагалось напротив главной оси робота в глобальной системе координат (декартовой системе координат, начальная точка которой находится в основании робота [5, 6]); координаты вершин куба: a (800,500,800), b (1800,500,800), c (1800,-500,800), d (800,-500,800), e (800,500,1800), f (1800,500,1800), g (1800,-500,1800), h (800,-500,1800).

Подпространство условно разделено на горизонтальные слои толщиной 100 мм, где каждый слой состоит из базовых сегментов – кубов со стороной 100 мм. Математически изучаемую область можно представить в виде многомерного массива P размерностью $j, k, m = 10$. Схематичное изображение области измерений, разделённой на базовые сегменты пространства, показано на рис. 1.

В программном обеспечении Sprut Cam для робота KUKA KR 60 была сформирована управляющая программа, состоящая из 450 перемещений типа LIN и CIRC (линейные движения по прямой и движения по окружности) [9, 10], характерных для механообработки и не выходящих за рамки установленного базового сегмента (куба с ребром 100 мм).

Для определения мощности в разрыв силового кабеля питания робота и его управляющего контроллера было подключено измерительное устройство регистрации фазных токов трехфазной сети, собранного на базе трансформаторов тока Talema AC1030 и платы Arduino Nano, передающей на ЭВМ мгновенные значения потребляемой мощности в определенные промежутки времени (дважды в секунду).

Управляющая программа была тиражирована для всех 1000 сегментов и последовательно запущена на исполнение промышленным роботом. При этом навесное оборудование на роботе отсутствовало.

После проведения серии измерений была реализована процедура агрегации и найдены значения средней потребленной мощности для каждого сегмента подпространства по формуле (2), результаты которой представлены на рис. 2.

$$P(j, k, m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\phi} (I_{i,1}^{j,k,m} + I_{i,2}^{j,k,m} + I_{i,3}^{j,k,m}), \quad (2)$$

где $P(j, k, m)$ – среднее значение потребляемой мощности роботом в базовом сегменте подпространства с индексами (j, k, m) ; n – число измерений; $I_{i,1}^{j,k,m}, I_{i,2}^{j,k,m}, I_{i,3}^{j,k,m}$ – зафиксированные значения фазных токов каждой из трех фаз в рамках сегмента с индексами (j, k, m) ; U_{ϕ} – фазное напряжение (220 В).

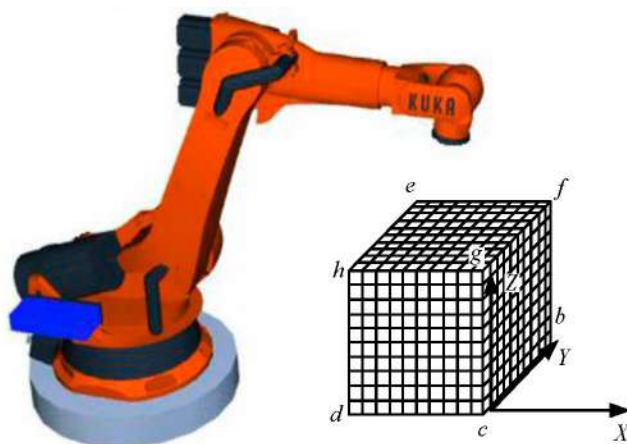


Рис. 1. Схематичное изображение области измерений

Результаты исследований, визуализированные на рис. 3, демонстрируют области как наиболее энергозатратные, так и наоборот – обеспечивающие минимальное потребление промышленного робота. Результаты дают предпосылки для формирования алгоритма управления роботом с целью реализации выбора оптимальных траекторий движения и снижению общих затрат электрической энергии.

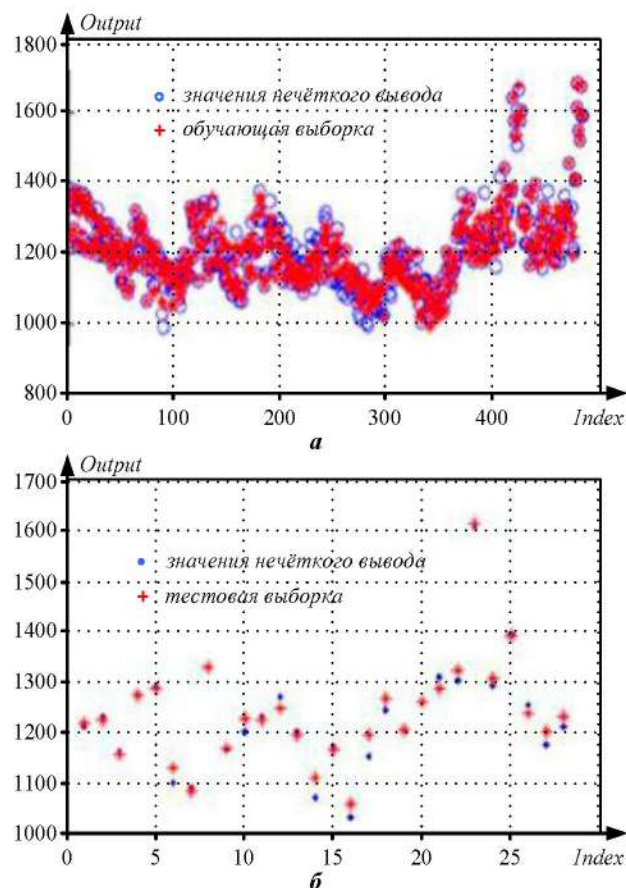


Рис. 2. Результаты нечеткого логического вывода: а – обучающая выборка; б – тестовая выборка

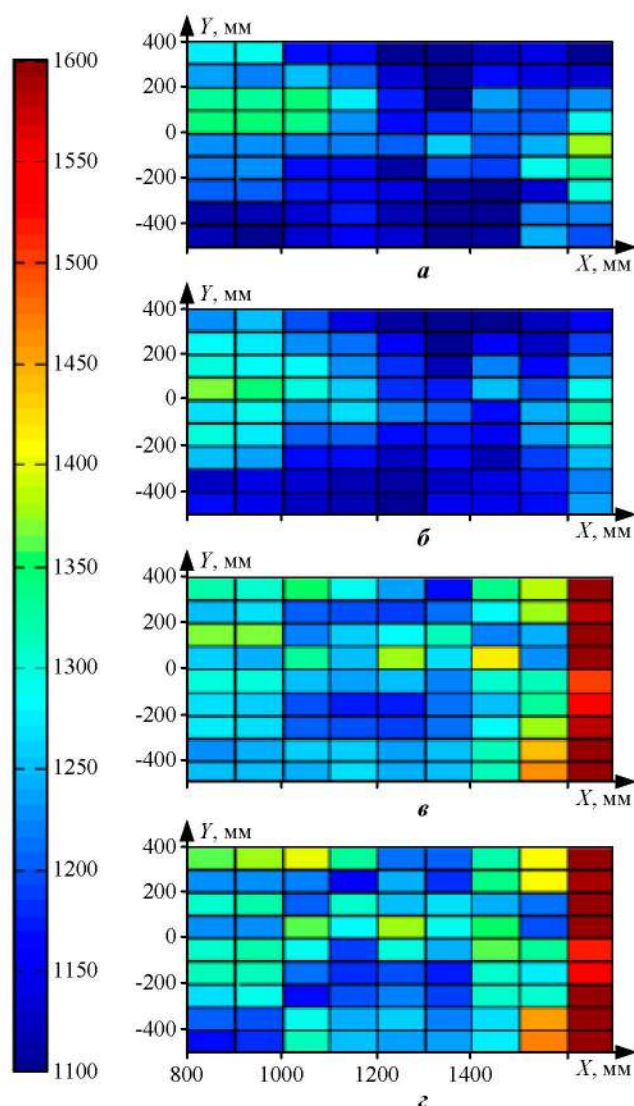


Рис. 3. Контурные графики, полученные в результате проведения измерений значений мощности: *а* – слой на высоте 1100 мм, *б* – слой на высоте 1200 мм, *в* – слой на высоте 1500 мм, *г* – слой на высоте 1600 мм

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Для получения эмпирической зависимости энергопотребления робота от траектории движения (этап 3 – моделирования энергопотребления роботом) целесообразен перевод полученного массива дискретных данных (P) в непрерывную функцию. Для этого было принято решение использовать инструмент адаптивной нейро-нечеткой системы вывода [11-13] с помощью встроенной функции ANFIS среды MATLAB. На рис. 2 представлены графики значений нечеткого вывода с наложением на обучающую и тестовую выборку. При обучении системы использовался гибридный метод и 16 итераций обучения, а также был подобран тип функций принадлежности – сигмоидальный.

Структура разработанной системы схожа со структурой многослойной нейронной сети прямого распространения и состоит из 5 слоев.

В первом слое происходит определение терм – множеств для входных переменных $u_i^A(x)$, $u_i^B(y)$ и $u_i^C(z)$. Здесь A, B, C – лингвистические переменные, x, y, z – входная переменная. В целом выход этого слоя опре-

деляет степень, в которой данное входное значение сети x удовлетворяет A_i .

Во втором слое реализуется процедура определения уровней активации правил. Выходом узла является степень выполнения правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов (по Ларсену). В частности, для рассматриваемого случая:

$$w_i = u_i^A(x)u_i^B(y)u_i^C(z),$$

где w_i – выход узлов второго слоя сети (степень выполнения нечеткого правила).

Третий слой – вычисление относительной степени выполнения нечеткого правила (нормализованных значений уровней активации) согласно выражению

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^m w_j},$$

где \bar{w}_i – нормализованное значение уровня активации i -го нечеткого правила.

Четвертый слой производит расчет вклада каждого нечеткого правила в выход сети (нечеткий логический вывод по Сугено):

$$y_i = \bar{w}_i (p_{0,i} + p_{1,i}x_1 + \dots + p_{n,i}x_n) i = 1 \dots m,$$

где y_i – вклад i -го нечеткого правила в выход сети; p – параметры функций принадлежности.

В последнем слое суммируются результаты предыдущего слоя, то есть вклады всех правил:

$$y = \sum_{j=1}^m y_j.$$

Параметры системы и их расшифровка представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры системы нечеткого вывода

№	Наименование	Обозначение MATLAB	Значение
1	Имя	PowerDat	PowerDat
2	Тип	sugeno	Сугено
3	Число входов, выходов	-	3,1
4	Число функций принадлежности входных переменных	-	7, 7, 7
5	Число функций принадлежности выходных переменных	-	343
6	Число правил	-	343
7	Метод логистической конъюнкции	prod	Алгебраическое произведение
8	Метод логистической дизъюнкции	probor	Алгебраическая сумма
9	Метод вывода заключения	prod	Алгебраическое произведение
10	Метод агрегирования	sum	Граничная сумма
11	Метод дефазификации	wtaver	Метод взвешенного среднего

При этом среднеквадратичная ошибка отклонения на обучающей выборке составила 2,7 %, на тестовой – 3,2%.

Таким образом, была получена функция countP, возвращающая значение мгновенной мощности потребления робота для вектора входных аргументов (три координаты положения инструмента в пространстве рабочей области робота, скорость подачи инструмента). На рис. 4 показаны поверхности, построенные на основе данных, полученных в результате нейро-нечеткого вывода.

На рис. 4 эмпирическая визуализация полученной эмпирической зависимости наглядно демонстрирует дифференциацию зон энергопотребления робота и может служить частично руководством к выбору оптимального положения изделия в пространстве рабочей области робота. Необходимо отметить, что если некоторые точки поверхности однозначно связаны с электромеханическими параметрами робота, то для некоторых положений такую однозначную взаимосвязь проследить невозможно, что обусловлено нелинейными связями между приводами осей робота.

В результате появляется возможность осуществлять расчет затрат электроэнергии как отдельной траектории перемещения, так и всего комплекса траекторий движения робота, за счет ассоциирования моделей траекторий движения робота управляющей программой с моделью энергопотребления.

Суммарные энергетические затраты в рамках комплекса траекторий движения представляются формулой 3 (при этом отдельной траекторией считается элементарное движение типа LIN или CIRC):

$$W = \sum_{i=1}^n Wm_i, \quad (3)$$

где W – значение потребленной энергии на выполнение комплекса траекторий движений управляющей программой; Wm_i – значение потребленной энергии на отдельную i -ю траекторию движения управляющей программы; n – число траекторий движения в рамках всего комплекса траекторий движений управляющей программы.

В свою очередь, значение потребления электрической энергии на отдельную траекторию движения (формула (4)) определяется как сумма произведений мгновенной мощности, возвращаемой функцией countP (координаты точки x , y и z) и времени нахождения рабочего инструмента в окрестностях этой точки (окрестность точки задается в зависимости от требуемой точности расчёта) в рамках отдельной траектории движения управляющей программы:

$$Wm_i = \sum_{j=1}^k [\text{countP}(x_j, y_j, z_j)] t_j, \quad (4)$$

где Wm – значение потребления электрической энергии на отдельное движение управляющей программы; $\text{countP}(x_j, y_j, z_j)$ – возвращаемое системой нейро-нечеткого вывода значения мощности в точке с координатами (x_j, y_j, z_j) ; t_j – время нахождения инструмента в окрестностях точки; k – число итераций смещения в рамках отдельного движения.

Значение k определяется исходя из длины i -го движения и величины d (шаг дискретизации одной траектории движения на отрезки), устанавливаемой пользователем. При увеличении значения d увеличивается точность, однако возрастает также и время расчета.

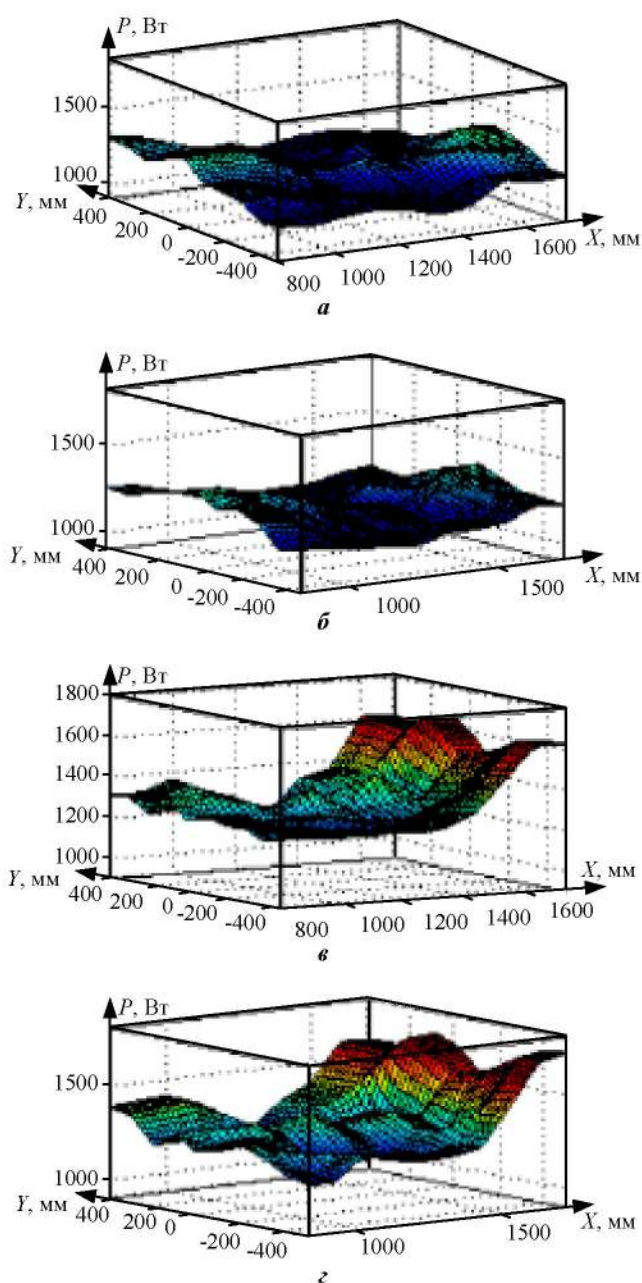


Рис. 4. Поверхности, полученные с помощью функции countP:

a – слой на высоте 1100 мм, b – слой на высоте 1200 мм, v – слой на высоте 1500 мм, z – слой на высоте 1600 мм

Время нахождения рабочего инструмента в окрестностях промежуточных точек (формула (5)) определяется выражением

$$t_j = \frac{l_i}{vd}, \quad (5)$$

где l_i – длина i -го движения; v – скорость перемещения манипулятора; d – шаг дискретизации одной траектории движения на отрезки.

Длина движения l_i определяется исходя из данных о начальных и конечных координатах траектории движения:

$$l_i = \sqrt{(x_i^e - x_i^b)^2 + (y_i^e - y_i^b)^2 + (z_i^e - z_i^b)^2}, \quad (6)$$

где (x_i^e, y_i^e, z_i^e) – координаты конечной точки i -го движения;
 (x_i^b, y_i^b, z_i^b) – координаты начальной точки i -го движения.

Координаты точек $P(x, y, z)$ для отдельного движения управляющей программы (7) определяются выражениями

$$x = x_b + \frac{2(x_e - x_b)}{d} + \frac{x_e - x_b}{d}k, \quad (7)$$

где k – номер итерации смещения для отдельного движения управляющей программы ($k = 0 \dots d$).

ДЕМОНСТРАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
 МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ РОБОТА
 ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТАЛИ
 В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ РОБОТА

Ниже представлены результаты моделирования по предложенным результатам исследования (табл. 2) демонстрирующие эффективность процедуры. Необходимо отметить, что предложенное во второй части подпространство траекторий движений не претендует на оптимальность, но тем не менее демонстрирует значительный положительный эффект.

Данные, приведенные в табл. 3, получены на основании реализации технологического процесса изготовления фланца (рис. 5), для обработки которого была разработана управляющая программа.

Таблица 3

Параметры моделирования и результаты

Параметр	Значение параметра (типовое положение изделия)	Значение параметра (положение с учетом коррекций)
Число движений программы	8400	8400
Координаты базовой системы координат	$(x - 900, y - 0, z - 900)$	$(x - 1100, y - 0, z - 1300)$
Время обработки	51 мин.	51 мин.
Потребление фактическое	730 Вт·ч	664 Вт·ч
Потребление по модели	762 Вт·ч	679 Вт·ч

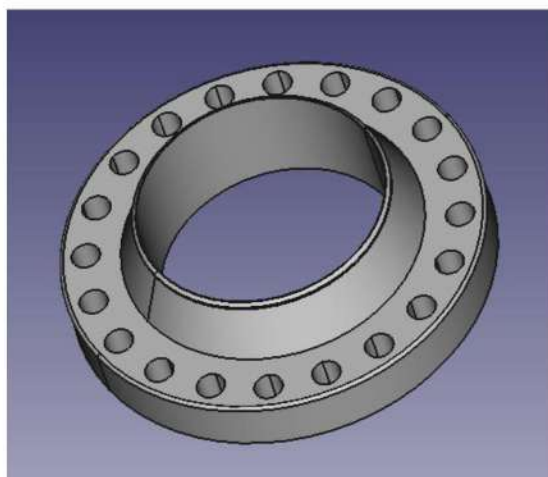


Рис. 5. Фланец приварной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов приведенных экспериментов показано, что рабочее пространство промышленного робота характеризуется различными дискретными значениями энергопотребления. Для математического описания энергопотребления робота в технологическом процессе был разработан подход (основанный на инструментарию нейро-нечетких систем) идентификации нелинейной зависимости энергопотребления от траекторий движения, открывающий перспективы дальнейшей разработки методов, позволяющих прогнозировать необходимые коррекции (смену положения заготовки) управляющей программы промышленного робота в рамках автоматизированного технологического процесса.

Экспериментально доказано, что изменение базовых координат размещения изделия на основе разработанного подхода обеспечивает снижение энергопотребления на 15%. При этом предлагаемый подход не связан с изменениями технологических алгоритмов производства изделий, а значит, негативно не сказывается на качестве выходной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chemnitz M., Schreck G., Kruger J. Analyzing energy consumption of industrial robots. Emerging Technologies and Factory Automation, 2011, pp. 8-13.
2. Siar M.V.S., Fakharian A. Energy efficiency in the robot arm using genetic algorithm. 8th Conference of AI & Robotics and 10th RoboCup Iranopen International Symposium (IRANOPEN), 2018, pp. 14-20.
3. Ефимов А.Ю., Горькавый М.А. К вопросу создания интеллектуальной системы прогнозирования и оптимизации энергетических затрат роботизированного участка // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. 2017. С. 88-90.
4. Ефимов А.Ю., Горькавый М.А. Концептуальный анализ направлений оптимизации роботизированных технологических процессов // ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ - 2018. 2018. С. 311-312.
5. Gorkavyy M.A., Efimov A.Y., Soloviev V.A., Solovev D.B. Algorithmization and Principles of Construction of Information Support of the Automated Module for Energy Outlays Optimization of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
6. Gorkavyy M.A., Efimov A.Y., Gudim A.S., Solovev D.B. Intelligent System for Prognostication and Optimization of Power Expenses of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
7. Mahdavian M., Shariat-Panahi M., Yousefi-Koma A., Ghasemi-Toudeshki A. Optimal trajectory generation for energy consumption minimization and moving obstacle avoidance of a 4DOF robot arm. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015, pp. 353-358.
8. Feng L., Ulutan D., Mears L. Energy consumption modeling and analyses in automotive manufacturing final assembly process. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2015, pp. 224-228.
9. Gao M., Ding P., Yang Y. Time-Optimal Trajectory Planning of Industrial Robots Based on Particle Swarm Optimization. Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, pp. 1934-1939.
10. Zheng X., Zheng Y., Shuai Y., Yang Y., Tian Y. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Auto-

- mation Control Conference (ITNEC), 2019, pp. 1749-1754.
11. Зайченко И.В. Разработка и исследование нечетких систем управления сложными объектами: дис... канд. техн. наук / Зайченко Илья Владимирович. Комсомольск-на-Амуре, 2011.
 12. Трусев Р.Е., Горькавый М.А., Соловьев В.А. Разработка принципа нечеткого иерархического вывода автоматизированных модулей управления производственными процессами электросетевых компаний // Информатика и системы управления. 2017. №3(53). С.96-108.
 13. Горькавый М.А. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки производственных процессов предприятия металлургической

- отрасли: дис... канд. техн. наук / Горькавый Михаил Александрович. Комсомольск-на-Амуре, 2011.
14. Egorova V.P., Gorkavyi M.A., Efimov A. Y., Solovov D.B. Synthesis of an Adaptive System for Diagnosing the Quality of Automated Welding Products. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp.1-4.
 15. Efimov A.Y., Gorkavyi M.A., Gorkavyi A.I., Solovov D.B. Improving the Efficiency of Automated Precision Robotics-Enabled Positioning and Welding. International Science and Technology Conference (EastConf), 2019

Поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY-EFFICIENT ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING PRODUCTS BASED ON AN INDUSTRIAL ROBOTIC SYSTEM

Alexey Yu. Efimov

Assistant Professor, Department of Management of innovative processes and projects, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: alexey.efimov.1996@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4272-4990>

Michael A. Gorkavyi

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Management of innovative processes and projects, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: uipp@knastu.ru.

Vyacheslav A. Soloviev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical drive and automation of industrial facility, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

The paper presents an approach that provides the possibility of identifying nonlinear dependencies of energy consumption of an industrial robot, which is part of an automated technological process, through the use of neuro-fuzzy models. The research group experimentally confirmed the presence of significant differences in the values of the average power consumption of the robot depending on the state of its axes, which, in turn, determines the potential for energy saving when implementing the possibility of choosing the least energy-consuming zones of the robot working area when forming the control program. A complex measurement procedure was performed and a data array of instantaneous power values and corresponding coordinate values was formed. On the basis of a training sample, using the tools of neuro-fuzzy systems, a model of energy consumption of an industrial robot was formed, which allows predicting energy costs when executing a specific control program of the technological process. The parameters of the resulting neuro-fuzzy system and the algorithms implemented in its subsystems are described in detail. Based on the results of representative testing of the model in the entire working area of the industrial robot and correlation with data obtained from measuring devices, the experiment demonstrated the possibility of a significant reduction in energy costs in the range of 7 – 15 %. The ways of integrating the proposed management tools into the production processes of an industrial enterprise are outlined and the tasks of prospective research are defined.

Keywords: automation, robotics, energy saving, robotic processes, optimization, management.

REFERENCES

1. Chemnitz M., Schreck G., Kruger J. Analyzing energy consumption of industrial robots. Emerging Technologies and Factory Automation, 2011, pp. 8-13.
2. Siar M.V.S., Fakharian A. Energy efficiency in the robot arm

- using genetic algorithm. 8th Conference of AI & Robotics and 10th RoboCup Iranopen International Symposium (IRANOPEN), 2018, pp. 14-20.
3. Efimov A. Y., Gorkavyi M.A. On the issue of creating an intelligent forecasting system and optimize the energy costs of the robotic site. *Proizvodstvennye tehnologii budushhego: ot sozdaniya k vnedreniyu* [Production technologies of the future: from creation to implementation], 2017, pp. 14-20. (In Russian)
 4. Efimov A. Y., Gorkavyi M.A. Conceptual analysis of optimization directions of robotic technological processes. *Gagarinskije Chteniya – 2018* [Gagarin's readings – 2018], 2018, pp. 311-312. (In Russian)
 5. Gorkavyi M.A., Efimov A.Y., Soloviev V.A., Solovov D.B. Algorithmization and Principles of Construction of Information Support of the Automated Module for Energy Outlays Optimization of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
 6. Gorkavyi M.A., Efimov A.Y., Gudim A.S., Solovov D.B. Intelligent System for Prognostication and Optimization of Power Expenses of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
 7. Mahdavian M., Shariat-Panahi M., Yousefi-Koma A., Ghasemi-Toudeshki A. Optimal trajectory generation for energy consumption minimization and moving obstacle avoidance of a 4DOF robot arm. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015, pp. 353-358.
 8. Feng L., Ullutan D., Mears L. Energy consumption modeling and analyses in automotive manufacturing final assembly process. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2015, pp. 224-228.
 9. Gao M., Ding P., Yang Y. Time-Optimal Trajectory Planning of Industrial Robots Based on Particle Swarm Optimization. Fifth International Conference on Instrumentation

- and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, pp. 1934-1939.
 10. Zheng X., Zheng Y., Shuai Y., Yang Y., Tian Y. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2019, pp. 1749-1754.
 11. Zaychenko I.V. *Razrabotka i issledovanie nechetkih sistem upravleniya slozhnyimi obektami. Kand. Diss.* [Development and research of fuzzy control systems for complex mobile objects. Ph.D. Diss.]. Komsomolsk – on – Amur, 2011.
 12. Trusov R. E., Gorkavyy M. A., Soloviev V. A. Development of the principle of fuzzy hierarchical output of automated control modules for production processes of electric grid companies. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2017, No. 3 (53). P. 96-108. (In Russian)
 13. Gorkavyy M. A., *Modeli, metody i sredstva upravleniya i integriruyemykh informatsionnoy podderzhki proizvodstvennykh processov predpriyatija metallurgicheskoy otrasli. Kand. Diss.* [Models, methods and means of management and integrated information support of production processes in the metallurgical industry. Ph.D. Diss.]. Komsomolsk-on-Amur, 2010.
 14. Egorova V.P., Gorkavyy M.A., Efimov A. Y., Solovev D.B. Synthesis of an Adaptive System for Diagnosing the Quality of Automated Welding Products. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp.1-4.
 15. Efimov A.Y., Gorkavyy M.A., Gorkavyy A.I., Solovev D.B. Improving the Efficiency of Automated Precision Robotics-Enabled Positioning and Welding. International Science and Technology Conference (EastConf), 2019.
-
- Ефимов А.Ю., Горькавый М.А., Соловьев В.А. Идентификация нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота в задачах повышения эффективности управления автоматизированным технологическим процессом // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 64-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)
- Efimov A.Yu., Gorkavyy M.A., Soloviev V.A. Energy-Efficient Algorithms for Controlling the Technological Process of Manufacturing Products Based on an Industrial Robotic System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 64-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)
-

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ ПО ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Целью работы является построение и исследование упрощенной модели светодиодной осветительной линии с управляемыми светильниками для оценки применимости управления освещением для длинных линий. Для передачи команд управления используется низкочастотная PLC-технология, в которой информация кодируется числом полуволн сетевого напряжения, расположенными между маркерами, представляющими собой полуволны, модулированные по амплитуде. Рассмотрены параметры современных источников питания, применяемых в светодиодной технике. Показано, что применяемые источники питания обладают высоким коэффициентом мощности, широким диапазоном входных напряжений, имеют синусоидальную форму потребляемого тока. Качественный источник питания с корректором коэффициента мощности фактически является нагрузкой, в которой ток минимально опережает напряжение, что позволяет рассматривать источник питания как активное сопротивление. Экспериментально исследован диммируемый источник питания светодиодных ламп ИПС50-350TV. Выполнено сравнение осциллограмм входного напряжения и тока, подтверждена синусоидальность формы входного тока, выявлено опережение током напряжения на угол 4,3 градуса. В среде Matlab разработана и промоделирована упрощенная модель системы светодиодного освещения для длинных линий. В качестве входных изменяемых параметров использованы длина линии, сечение питающего провода, параметры источника питания светильника, количество осветительных приборов в линии. Получены и проанализированы временные диаграммы напряжения на дальнем конце линии при передаче команд управления. Показано, что разработанная модель позволяет получить форму напряжения в линии и сформировать требования к приемникам-демодуляторам команд управления, устанавливаемым в светильниках. Полученные результаты моделирования использованы при разработке системы диммируемого светодиодного освещения. Разработаны центральный шкаф управления освещением с реализованными функциями управления по линии электропитания, а также приемники-демодуляторы команд, расположенные в светильниках и задающие уровень диммирования светодиодных ламп.

Ключевые слова: PLC-технология, линия светодиодного освещения, маркер, диммируемый источник питания, осциллограммы напряжения и тока, модель системы освещения, Matlab, коэффициент мощности, потери напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Технология PLC (Power Line Communication) обеспечивает передачу данных по линиям электропитания [1-3]. Различают высокочастотную и низкочастотную PLC-технологии. Высокочастотная PLC-технология имеет ряд существенных недостатков: передающие устройства являются источниками радиопомех; сигналы не передаются через трансформаторные подстанции и сетевые фильтры; дальность действия ограничена несколькими сотнями метров.

Использование синусоиды напряжения питающей электросети для передачи информации подключаемым к сети устройствам имеет определенные преимущества по сравнению с другими видами информационного обмена. К таким преимуществам можно отнести помехозащищенность, использование уже существующих сетей электроснабжения в качестве линий связи, дешевизну реализации приема-передающих устройств.

Для реализации низкочастотной PLC-технологии необходимо проводить модуляцию синусоиды напряжения сети. Так в работах [4] предложено использовать широтную модуляцию полуволн напряжения в начале полупериода аналогично тому, как тиристорный регулятор изменяет подводимую к нагрузке мощность путем задержки включения тиристора на полупериоде переменного напряжения. Отмечено, что данный способ модуляции имеет очевидный недостаток –

уменьшение величины среднего напряжения в модулированной сети. В результате анализа потребителей электроэнергии авторы делают вывод, что в модулированной сети возможна работа только тех потребителей, блоки питания которых построены с использованием выпрямителя и сглаживающего конденсатора, а предложенный способ передачи информации может быть использован при построении систем управления наружным и уличным освещением.

Предложены аналоговый и цифровой способы передачи информации с помощью низкочастотной PLC-технологии [5]. При аналоговом способе информация кодируется широтно-модулированным сетевым сигналом с изменением фазы угла модуляции в пределах $0...50^\circ$. При цифровом способе предлагается при кодировании логического нуля фазовую модуляцию не использовать, а при кодировании единицы использовать фазовую модуляцию до $5...10^\circ$. Кодирование стартового бита возможно углом модуляции 20° . Очевидно, чем меньше угол модуляции, тем сложнее аппаратно реализовать модулятор и демодулятор сигнала.

Кроме того, использование широтной модуляции полуволн приводит к появлению импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания, а также может при больших углах модуляции приводить к фликкер-эффекту в осветительной линии. Следовательно, существующие технические решения имеют ограничения, связанные с ухудшением качества электроэнергии, которое регламентировано стандартами на качество и электромагнитную совместимость.

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТИЛЬНИКАМИ

Для устранения недостатков существующих способов передачи данных с помощью модуляции синусоиды напряжения сети предложен способ, который устраняет фликкер-эффект осветительной линии и снижает уровень импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания [6-10]. Суть данного способа заключается в том, что информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, прошедших между двумя маркерами. Маркеры же представляют собой полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде примерно на 10%. Маркеры отмечают начало передачи, разделяют адреса светильников и уровень диммирования, а также отмечают конец передачи информации. Во время передачи маркера амплитуда полуволны уменьшается до 280 В, что соответствует уменьшению действующего значения напряжения до 198 В.

Визуальные наблюдения заметного мерцания ламп при передаче команд управления не выявили. Количественная оценка уровня снижения помех и гармоник зависит от параметров модуляции и находится методом спектрального анализа. Поэтому предложенный способ может быть применен для дистанционного управления светодиодными осветительными приборами, однако сфера его использования может быть распространена и на другие области [6-10].

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В среде Matlab разработана имитационная модель воздушной линии со светодиодными осветительными приборами (рис. 1).

Данная модель предназначена для исследования временных диаграмм напряжения в линии при формировании сигналов управления, а также для нахождения распределения напряжения в зависимости от выбранного сечения провода, от количества светильников и от их потребляемой мощности. Нагрузкой линии является n -е количество модулей светодиодных светильников,

имеющих в своем составе демодуляторы сигналов управления, диммируемые источники питания и сами светодиодные излучатели.

Стандартную синусоиду с напряжением 220 В подают в линию блоки AC Voltage Source1, Pulse Generator1, Ideal Switch. Уменьшенные по амплитуде полуволны (маркеры) формируют блоки AC Voltage Source2, Pulse Generator2, Ideal Switch1. Блоки RL branch1...RL branch6 моделируют участки линии со светильниками, снятие осциллограмм и измерения осуществляют приборы Scope, Voltage Measurement, Current Measurement. Внутренняя структура отдельных участков линии со светильниками представлена в виде R-L узла на рис. 2.

В модели участка линии использованы следующие обозначения: $R1$ и $L1$ – активное и индуктивное сопротивление фазного проводника, $RN2$ и $LN2$ – активное и индуктивное сопротивление нулевого проводника, $Rled$ – активное сопротивление светильника.

При разработке математической модели уличного освещения автором в работе [11] принято допущение, что светильники представляют собой нагрузку с линейной зависимостью потребляемой мощности от напряжения, то есть сопротивление нагрузки постоянно. Однако это утверждение справедливо лишь для небольшой части светодиодных светильников.

Рассмотрим адекватность представления модели светильника в виде активного сопротивления. Известно, что схемотехника источников питания, используемых в светодиодных светильниках, непрерывно совершенствуется. Например, в них применяют активные корректоры коэффициента мощности, позволяющие получить коэффициент мощности светодиодного осветительного прибора больше 0,98 при малых нелинейных искажениях тока [12-14]. Кроме того, используются контроллеры управления энергетическими параметрами источников питания и преобразователей без накопительного конденсатора на первичной стороне, которые стремятся сделать форму тока, совпадающей с формой напряжения, то есть практически без сдвига тока по фазе относительно напряжения [15-18].

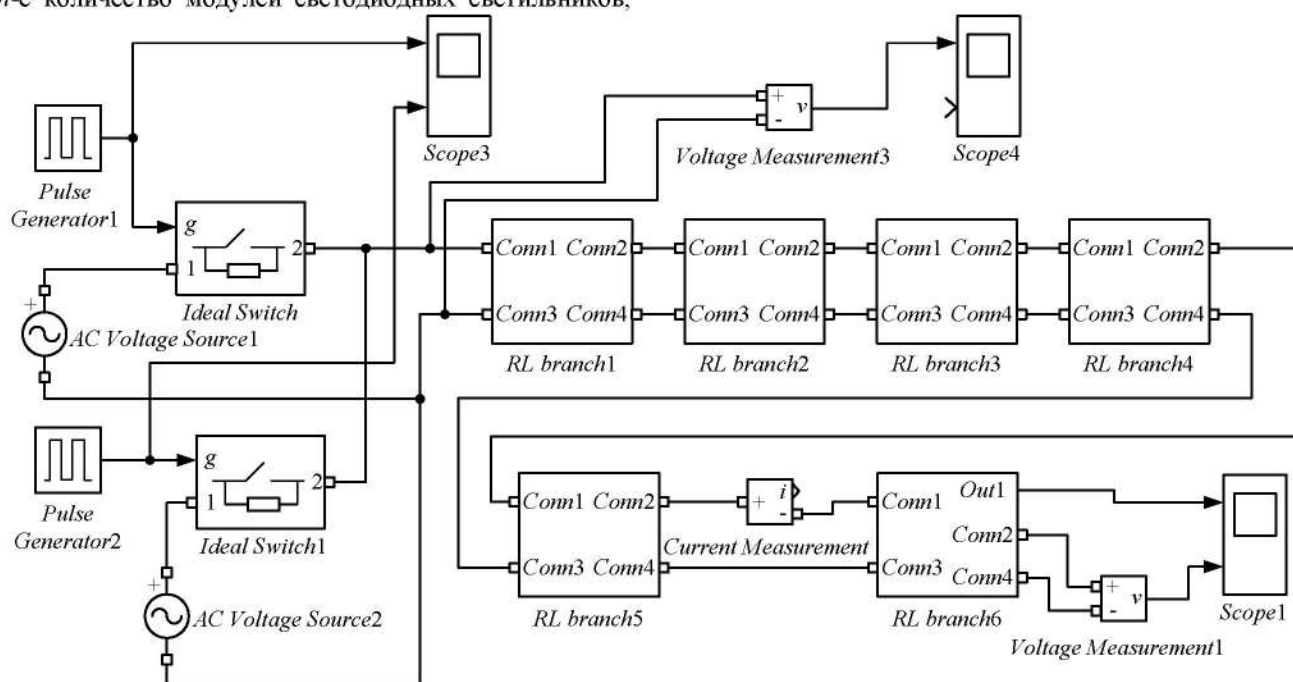


Рис. 1. Имитационная модель воздушной линии со светодиодными осветительными приборами

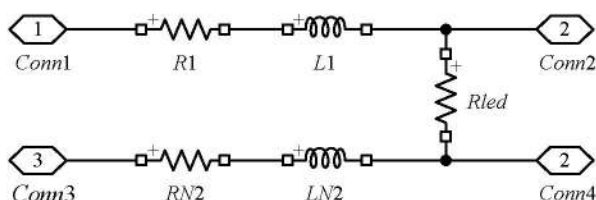


Рис. 2. Имитационная модель одного участка линии в виде R-L узла

Экспериментально исследован светодиодный светильник с диммируемым источником питания типа ИПС50-350ТУ. Входное переменное напряжение источника питания может находиться в диапазоне от 176 до 264 В. Снята зависимость входного тока источника от входного напряжения (рис. 3).

В диапазоне рабочих напряжений зависимость имеет близкий к линейному виду с крутизной около -1,33 мА/В. Из зависимости следует, что при изменении напряжения потребляемая мощность остается примерно на одном уровне порядка 44 Вт, в то же время входное сопротивление увеличивается с ростом напряжения. При напряжении 220 В сопротивление светильника составляет 1100 Ом. Визуальное наблюдение показывает, что яркость лампы не изменяется при изменении напряжения питания в широких пределах, поскольку качественные источники питания имеют драйвер, обеспечивающий стабилизацию тока светодиодов и яркости свечения.

Также исследована форма входного тока светильника. Полученные осциллограммы сетевого напряжения на светильнике и входного тока в цепи светильника приведены на рис. 4.

При проведении эксперимента последовательно с источником питания был соединен низкоомный резистор сопротивлением 6,2 Ом, сопротивление которого незначительно по сравнению с сопротивлением светильника. Падение напряжения на резисторе позволяет визуализировать форму тока через светильник. Из рис. 4, б видно, что ток опережает напряжение примерно на 240 мкс, что в пересчете дает угол 4,3 градуса.

Косинус этого угла составляет 0,997, что позволяет говорить об активном характере сопротивления светильника.

В имитационной модели сделаны следующие допущения. Один участок линии содержит один осветительный прибор, подключенный в конце участка. Вся линия содержит N таких участков, соединенных последовательно. Количество участков равно 24.

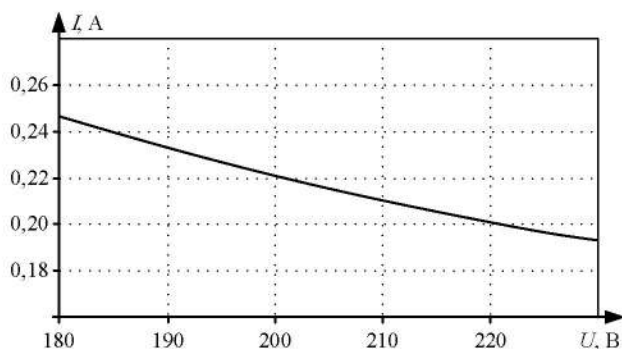


Рис. 3. Зависимость входного тока светильника от входного напряжения

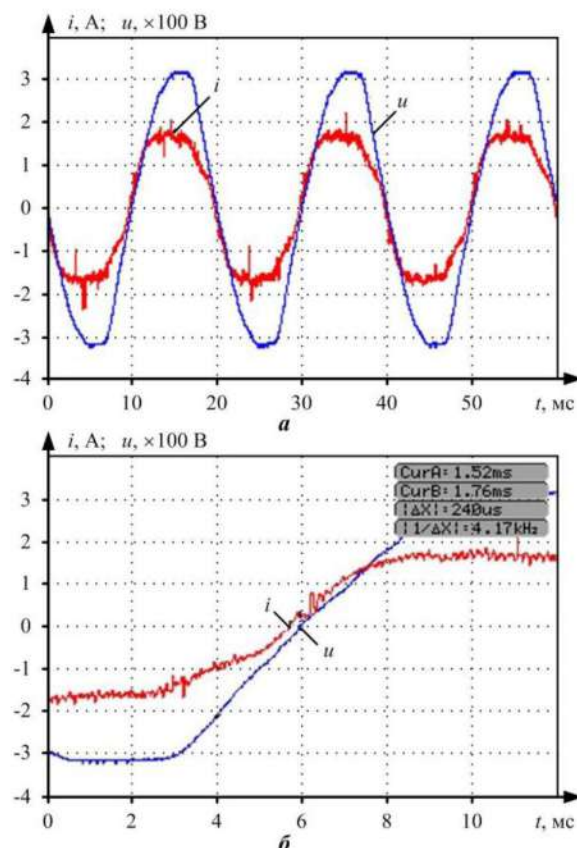


Рис. 4. Осциллограммы напряжения в сети и тока через диммируемый источник питания:
а — трех периодов сетевого напряжения;
б — области смены полярности напряжения

Для моделирования осветительной линии использованы следующие параметры: расстояние между светильниками $l = 32$ м, частота сети $f = 50$ Гц, действующее значение входного напряжения $U_n = 220$ В, площадь сечения кабеля $s = 25$ мм², мощность светильника $P = 44$ Вт, его коэффициент мощности $\cos\varphi > 0,98$, тип кабеля СИП-4 2×25. Удельное электрическое сопротивление кабеля 1,54 Ом/км, удельное индуктивное сопротивление 0,081 Ом/км.

Входное сопротивление светильника зависит от напряжения. Например, для светильника с ВАХ, приведенной на рис. 3, при уменьшении напряжения от 220 до 198 В (на 10 %) сопротивление светильника уменьшается с 1100 до 880 Ом, то есть на 20 %. Для учета данного факта активное сопротивление светильника при номинальном напряжении U_n определяется по формуле $R_{ledn} = U_n^2 / P$, а сопротивление светильника при модулированном напряжении маркера $U_m = 0,9 U_n$ определяется по формуле $R_{ledm} = U_m^2 / P$. Активное сопротивление участка провода между соседними светильниками $R_1 = \rho l / s$, где ρ — удельное сопротивление провода.

Для расчета индуктивности участка провода между соседними светильниками L_1 использовано выражение [19]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{4l}{d} - 0,75 \right), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; d – диаметр провода.

В качестве альтернативы рассмотренной имитационной модели в физических параметрах предложена масштабируемая имитационная модель распределенной системы освещения для произвольного количества светильников (рис. 5).

В качестве источника питания в данной модели использован источник ИПС50-350ТУ с мощностью 44 Вт [20]. Его входное напряжение может изменяться от 176 до 264 В. Внутренняя структура данной модели в среде Matlab, построенная с использованием коэффициента передачи осветительной линии, приведена на рис. 6.

Коэффициент передачи одного участка линии

$$k(j\omega) = \frac{R_{led}}{\sqrt{(2R_l + R_{led})^2 + (2 \cdot j\omega L_l)^2}} \quad (2)$$

Коэффициент передачи всей линии равен произведению коэффициентов передачи отдельных участков.

Из-за падения напряжения на сопротивлении провода на каждом последующем светильнике напряжение уменьшается. Как было отмечено, при снижении питающего напряжения сопротивление источника питания светильника также снижается. Для подтверждения достоверности моделирования разработана программа в среде LabVIEW и выполнен численный расчет линии (рис. 7). В массивах приведены рассчитанные параметры для четырех первых и четырех последних участков линии.

В каждом цикле программы рассчитываются ток в проводе, падение напряжения, сопротивление светильника и коэффициент передачи напряжения текущего

участка. При завершении программы выводятся напряжение в конце линии и суммарное падение напряжения в линии. Результаты моделирования в Matlab и в LabVIEW совпадают.

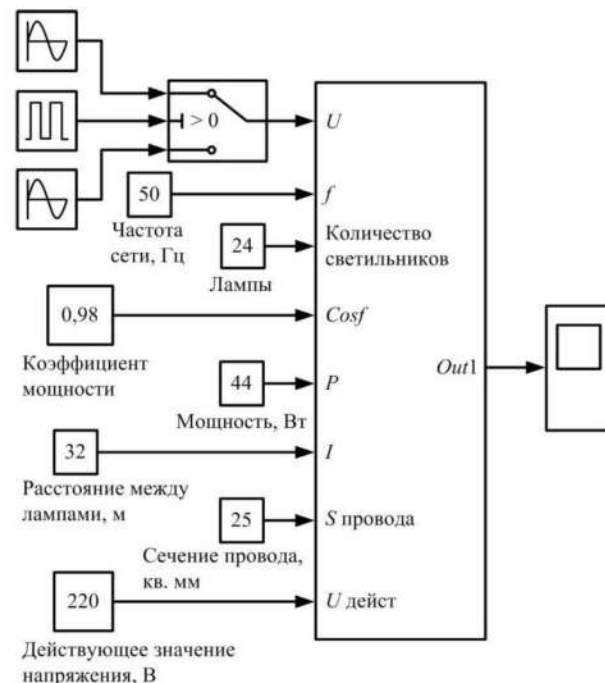


Рис. 5. Имитационная модель распределенной системы освещения для произвольного количества светильников

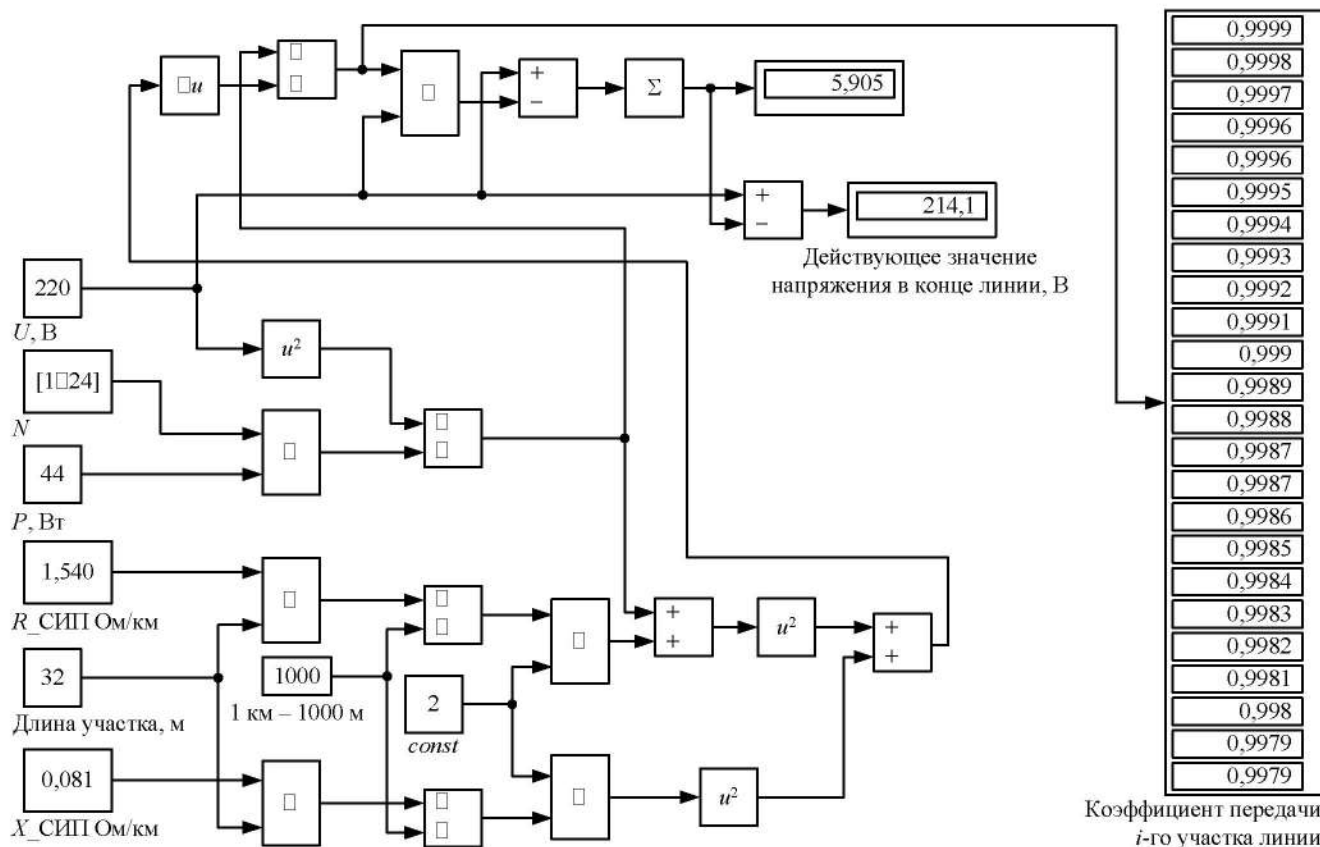


Рис. 6. Внутренняя структура модели с использованием коэффициента передачи линии освещения

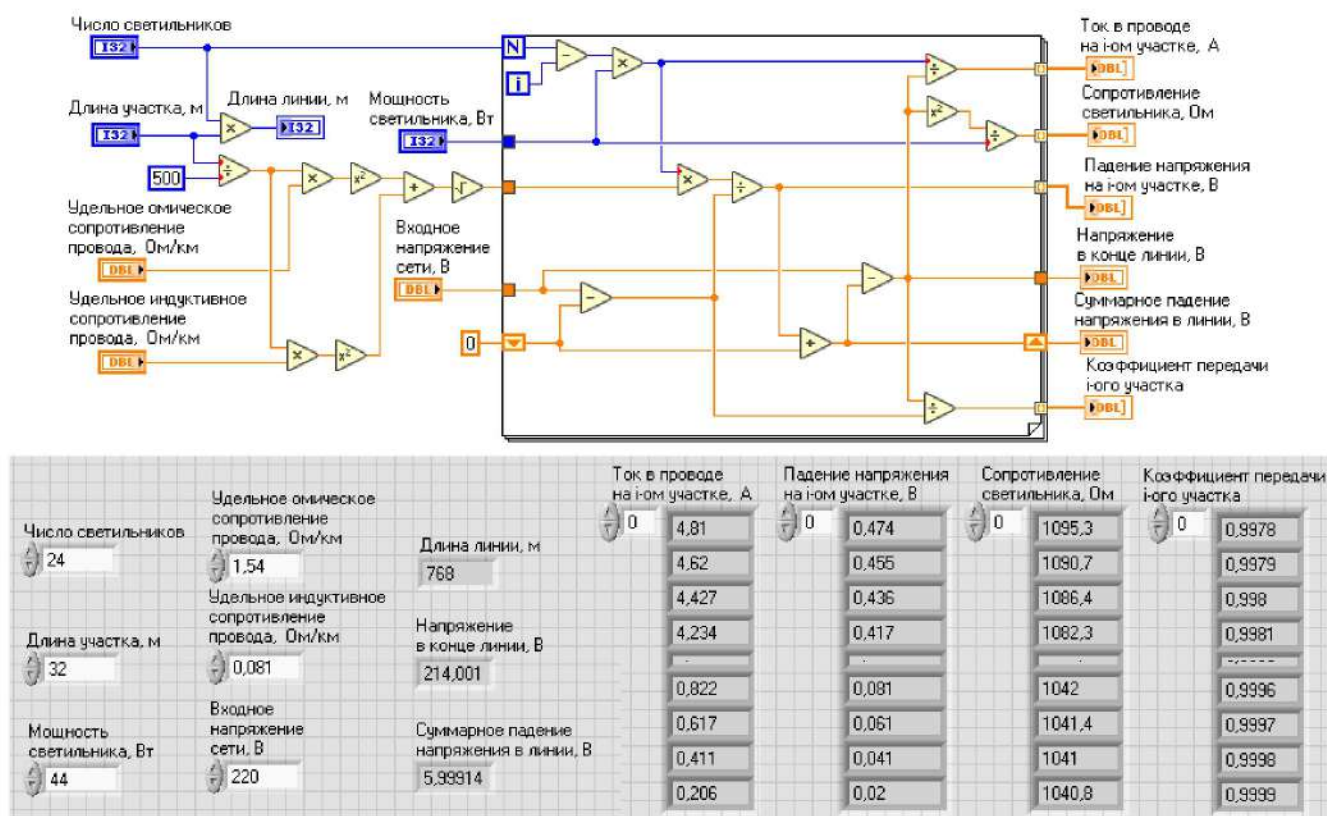


Рис. 7. Блок-диаграмма и результаты работы программы расчета осветительной линии

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Осциллограммы вершин модулированных полу- волн сетевого напряжения, используемых в качестве маркеров, на дальнем конце осветительной линии при- ведены на рис. 8.

Осциллограммы получены в результате использо- вания имитационной модели (см. рис. 5) линий с чис- лом светильников 1, 12 и 24. Для сравнения на рис. 9 приведены осциллограммы вершин полу- волн сетевого напряжения без модуляции.

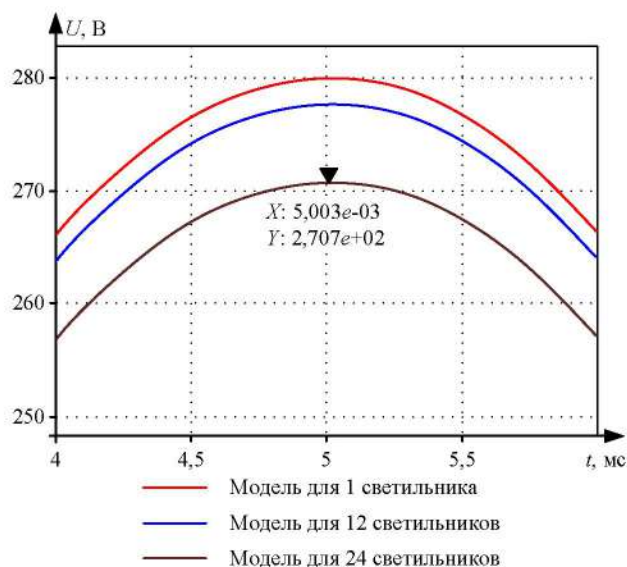


Рис. 8. Осциллограммы вершин полу- волн сетевого напряжения, используемых в качестве маркеров

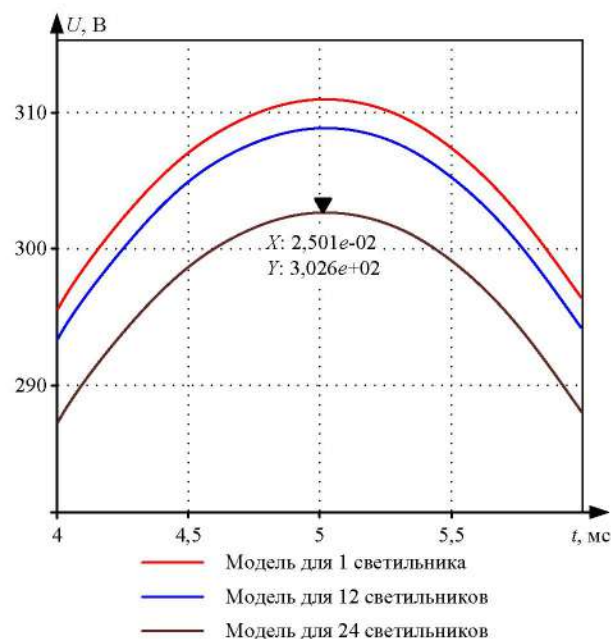


Рис. 9. Осциллограммы вершин полу- волн сетевого напряжения без модуляции

Осциллограммы показывают, что с увеличением числа светильников синусоидальный характер напря- жения остается, амплитуда полу- волн уменьшается, однако разница амплитуд немодулированных и моду- лированных полу- волн сохраняется. Например, для ли- нии с 24 светильниками амплитуда маркера в конце линии снижается примерно до 270,7 В (действующее значение 191,4 В) по сравнению с 280 В (действующее значение 198,0 В) в начале линии, то есть просадка амплитуды напряжения в конце линии составляет око- ло 9,3 В (действующее значение 6,6 В) (см. рис. 8).

Если включено меньшее количество светильников, то просадка напряжения соответственно меньше. Аналогично для линии с 24 светильниками амплитуда полу- волн без модуляции в конце линии просаживается на 8,5 В (действующее значение 6,0 В) (см. рис. 9).

Моделирование показывает, что подбором числа светильников и сечения кабеля питания можно добиться приемлемого уровня падения напряжения в линии из-за наличия омического и индуктивного сопротивления линии. Кроме того, моделирование позволяет оценить дополнительное падение напряжения в линии, возникающее при уменьшении амплитуды напряжения в начале линии в результате модуляции. В случае использования 24 светильников это дополнительное падение напряжения составило 0,6 В для действующего значения. Дополнительное падение обусловлено тем, что ток в линии возрастает при уменьшении входного напряжения, так как для постоянства отбираемой мощности сопротивления светильников уменьшаются.

Приемники-демодуляторы должны надежно выделять маркеры на фоне немодулированных полу- волн, подсчитывать число немодулированных полу- волн между маркерами, преобразовывать приня- тую информацию в аналоговые или цифровые сигналы управле- ния, используемые в диммерах.

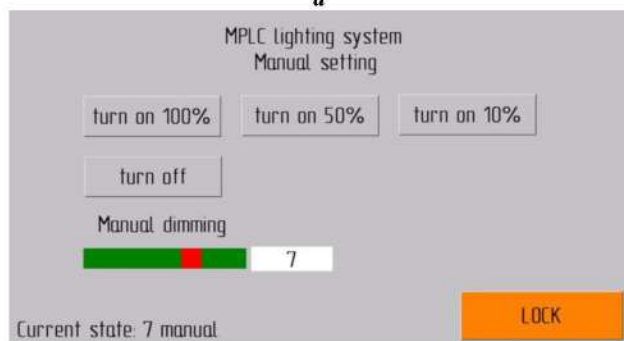
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Использование результатов моделирования для практической реализации предложенного способа передачи данных с помощью модуляции основной гар- моники представлено в работах [6-10].

Разработан и собран шкаф управления освещением с реализованными функциями управления по линии электропитания (рис. 10, а).



а



б

Рис. 10. Шкаф управления освещением по линии электропитания (а) и сенсорная индикаторная панель на лицевой дверке шкафа управления (б)

Задание режимов работы светильников осуществ- ляется с помощью сенсорной индикаторной панели, закрепленной на лицевой дверке шкафа управления (рис. 10, б). Команды управления принимают прием- ники-демодуляторы команд, расположенные в све- тильниках и взаимодействующие со стандартными диммерами светодиодных ламп.

Проведены испытания по адресному управлению уровнем яркости диммируемых светильников, кото- рые показали работоспособность системы освещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена имитационная модель воздушной осве- тительной линии с применением низкочастотной PLC- технологии, в которой для адресного управления дим- мируемыми светодиодными светильниками использует- ся амплитудная модуляция полу- волн-маркеров. Данный способ передачи информации устраняет фликкер- эффект в линии и снижает уровень импульсных помех и высокочастотных гармоник в сети питания.

Экспериментально полученные входные вольт- амперные характеристики диммируемого светильника и осциллограммы сетевого напряжения и входного тока позволяют сделать вывод об активном характере сопротивления светильника. Показано, что при изме- нении входного напряжения потребляемая мощность и яркость свечения лампы практически не изменяются.

В результате моделирования получены осцилло- граммы немодулированных и модулированных полу- волн сетевого напряжения на конце осветительных линий, содержащих различное количество светильни- ков. Осциллограммы позволяют оценить форму напряжения, его просадку, соотношение амплитуд мо- дулированных и немодулированных полу- волн.

Выбор кабеля с малым погонным сопротивлением обуславливает низкое падение напряжения на нем и, соответственно, малое изменение напряжения между удаленными светильниками. Заданное при модуляции соотношение модулированных и немодулированных полу- волн сохраняется независимо от числа работаю- щих светильников.

Предложенные модели систем светодиодного осве- щения с передачей команд управления по линии элек- тропитания позволяют проанализировать работу линий с различными наборами параметров их элементов. Ре- зультаты моделирования важны при выборе и проекти- ровании элементов системы. В частности, они необхо- димы для разработки схем приемников-демодуляторов светильников, которые должны четко отличать модули- рованные полу- волны от немодулированных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротченко Ф., Наташина Н. Создание сети передачи данных на основе PLC-технологии // CONTROL ENGI- NEERING РОССИЯ. 2019. № 6 (84). С. 64-68.
2. What is Power Line Communication? // Cypress Semicon- ductor. 2011. URL: <https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/> (дата обращения: 15.03.2020).
3. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), IEEE, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195> (дата обра- щения: 15.03.2020).
4. Вставская Е.В., Костарев Е.В. Способ передачи инфор-

- мации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 2. С. 81-84.
5. Построение систем передачи информации по проводам питающей сети / Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, Е.В. Костарев, В.И. Константинов // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 23. С. 60-64.
6. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибко Р.В. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 9 (22). С. 152-161. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-152-161.
7. Kopytov S.M. and Ulyanov A.V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technology // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430> (дата обращения: 15.03.2020).
8. S.M. Kopytov and A.V. Ulyanov, Development and Research of Marker Isolation Schemes from Low-Frequency PLC Signal // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934699 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934699> (дата обращения: 15.03.2020).
9. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибко Р.В. Разработка энергоэффективных систем освещения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-2. С. 199-206. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37465> (дата обращения: 15.03.2020).
10. Копытов С.М., Ульянов А.В. Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электропитания // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. № 1 (15). С. 52-59. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-52-59.
11. Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4 (41). С. 48-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55.
12. Tenti P., Spiazzi G. Harmonic Limiting Standards and Power Factor Correction Techniques // 6th European Conference on Power Electronics and Applications – EPE '95. URL: <http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1995/Epe/tutorial.pdf> (дата обращения: 15.03.2020).
13. Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г. Теория мощности в силовой электронике: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Промышленная электроника». М.: МЭИ, 2006. 85 с.
14. Герман-Галкин С.Г. Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink. Урок 14. Анализ, расчет и исследование корректора коэффициента мощности // Силовая электроника. 2011. № 4 (32). С. 90-96.
15. Белов Г., Серебрянников А., Павлова А. Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем управления импульсными преобразователями // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 98-106.
16. I. Castro, A. Vazquez, M. Arias, D.G. Lamar, M.M. Hernandez and J. Sebastian, A Review on Flicker-Free AC-DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10035-10057, Oct. 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2890716 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598951> (дата обращения: 15.03.2020).
17. G.G. Pereira, M.A. Dalla Costa, J.M. Alonso, M.F. De Melo and C.H. Barriuello, LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4520-4529, June 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815260> (дата обращения: 15.03.2020).
18. Y. Wang, J.M. Alonso and X. Ruan, A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5754-5765, July 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351> (дата обращения: 15.03.2020).
19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
20. Электронный каталог компании Агрос-Трейд [Электронный ресурс]. URL: <https://www.argos-trade.com/catalog/draivery/ips-50-350tu-ip20-0102> (дата обращения: 15.03.2020).

Поступила в редакцию 24 февраля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF LED LIGHTING SYSTEM WITH TRANSMISSION OF CONTROL COMMANDS VIA THE POWER SUPPLY LINE

Sergey M. Kopytov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: skopytov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7967-9460>

Aleksandr V. Ulyanov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: Ulyanov2@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2548-9132>

Denis S. Marushchenko

Postgraduate student, student of the Department of Industrial electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: D_E_CHA@mail.ru.

The aim of the work is the construction and study of a simplified model of a LED lighting line with controlled lights to assess the applicability of lighting control for long lines. To transmit control commands, low-frequency PLC technology is used, in which information is encoded by the number of half-waves of the mains voltage located between the markers, which are half-waves modulated in amplitude. The parameters of modern power supplies used in LED technology are considered.

It is shown that the applied power sources have a high power factor, a wide range of input voltages, and have a sinusoidal shape of the current consumption. A high-quality power source with a power factor corrector is actually a load in which the current is minimally ahead of the voltage, which allows us to consider the power source as an active resistance. The dimmable power supply of IPS50-350TU LED lamps was experimentally studied. Oscillograms of the input voltage and current are

compared, the sinusoidal shape of the input current is confirmed, the voltage current is outstripped by an angle of 4.3 degrees. In the Matlab environment, a simplified model of an LED lighting system for long lines was developed and modeled. As input variable parameters, the length of the line, the cross section of the supply wire, the parameters of the power source of the lamp, the number of lighting devices in the line are used. Time diagrams of voltage at the far end of the line were received and analyzed during transmission of control commands. It is shown that the developed model makes it possible to obtain a voltage form in the line and form requirements for the receiver-demodulator control commands installed in the fixtures. The obtained simulation results were used in the development of a dimmable LED lighting system. A central lighting control cabinet has been developed with implemented control functions on the power line, as well as command receivers-demodulators located in the luminaries and setting the dimming level of LED lamps.

Keywords: PLC technology, LED lighting line, marker, dimmable power supply, voltage and current waveforms, lighting system model, Matlab, power factor, voltage loss.

REFERENCES

1. Korotchenko F., Natashina N. Creating a data network based on PLC technology // CONTROL ENGINEERING RUS-SIA. 2019. No 6 (84). P. 64-68. (In Russian).
2. What is Power Line Communication? // Cypress Semiconductor. 2011. URL: <https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/> (accessed 15 March 2020).
3. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), IEEE, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109 / ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195> (accessed 15 March 2020).
4. Vstavskaya E.V., Kostarev E.V. The method of transmitting information through the supply network and its use in the construction of automated control systems for outdoor lighting. *Vestnik YuUrGu* [Bulletin of SUSU]. 2011. No. 2. P. 81-84. (In Russian)
5. Vstavskaya E.V., Barbasova T.A., Kostarev E.V., Konstantinov V.I. Construction of information transmission systems over the wires of the supply network // *Vestnik YuUrGu* [Bulletin of SUSU]. 2011. No. 23. P. 60-64. (In Russian)
6. Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Shibeko R.V. Mains voltage switch for controlling LED lighting devices using low-frequency PLC technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2018. No 9(22). P. 152-161. DOI: 10.21285 / 1814-3520-2018-9-152-161. (In Russian)
7. Kopytov S.M. and Ulyanov A.V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technological-ogy // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109 / FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430> (accessed 15 March 2020).
8. S.M. Kopytov and A.V. Ulyanov, Development and Research of Marker Isolation Schemes from Low-Frequency PLC Signal // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109 / FarEastCon.2019.8934699 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934699> (accessed 15 March 2020).
9. Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Shibeko R.V. Development of energy-efficient lighting systems. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii* [Modern high technology]. 2019. No 3-2. P. 199-206; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37465> (accessed 15 March 2020). (In Russian)
10. Kopytov S.M., Ulyanov A.V. Controller for controlling LED lighting networks along the power line. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems]. 2019. No 1 (15). P. 52-59. DOI: 10.17122 / 1999-5458-2019-15-1-52-59. (In Russian)
11. Valiullin K.R. Simulation modeling of an electro-technical street lighting system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 4(41). P. 48-55. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2018-4(41)-48-55. (In Russian)
12. Tenti P., Spiazzi G. Harmonic Limiting Standards and Power Factor Correction Techniques // 6th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE '95. URL: <http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1995/Epe/tutorial.pdf> (accessed 15 March 2020).
13. Chaplygin E.E., Kalugin N.G. *Teoriya moshchnosti v silovoy elektronike. Uchebnoe posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po spetsialnosti "Promyshlennaya elektronika"* [Power theory in power electronics. The manual for students studying in the specialty of Industrial Electronics]. Moscow: MPEI, 2006. 85 p. (In Russian)
14. German-Galkin S.G. School MATLAB. Virtual laboratories of power electronics devices in MATLAB-Simulink environment. Lesson 14. Analysis, calculation and research of the power factor corrector. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2011. No. 4(32). P. 90-96. (In Russian)
15. Belov G., Serebryannikov A., Pavlova A. Structural dynamic models and the frequency method for the synthesis of two-circuit control systems for pulsed converters. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2008. No. 3. P. 98-106. (In Russian)
16. I. Castro, A. Vazquez, M. Arias, D.G. Lamar, M.M. Hernando and J. Sebastian. A Review on Flicker-Free AC – DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10035-10057, Oct. 2019. DOI: 10.1109 / TPEL.2018.2890716 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598951> (accessed 15 March 2020).
17. G.G. Pereira, M.A. Dalla Costa, J.M. Alonso, M.F. De Melo and C.H. Barriuello, LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4520-4529, June 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815260> (accessed 15 March 2020).
18. Y. Wang, J.M. Alonso and X. Ruan, A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5754-5765, July 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351> (accessed on 15.03.20).
19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. *Raschet induktivnostey: Spravochnaya kniga* [Inductance Calculation: Reference Book]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 488 p. (In Russian)
20. The electronic catalog of the company Argos-Trade. URL: <https://www.compel.ru/infosheet/MW/ELG-150-48B> (accessed 15 March 2020). (In Russian)

Копытов С.М., Ульянов А.В., Марушенко Д.С. Моделирование системы светодиодного освещения с передачей команд управления по линии электропитания // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 72-79. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-72-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-72-79)

Kopytov S.M., Ulyanov A.V., Marushchenko D.S. Simulation of Led Lighting System with Transmission of Control Commands Via the Power Supply Line. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 72-79. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-72-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-72-79)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулваххаб Мохаммед Валид Абдулваххаб – аспирант, кафедра электроэнергетики и автоматики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия.

Авербух Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электроэнергетики и автоматики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, энергетический факультет, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, лаборатория информационно-измерительных систем, институт автоматики и информационных технологий, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Горькавый Михаил Александрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра управления инновационными процессами и проектами, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: uipr@knastu.ru

Ефимов Алексей Юрьевич – ассистент, кафедра управления инновационными процессами и проектами, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: alexey.efimov.1996@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4272-4990>

Жилин Евгений Витальевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики и автоматики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия. E-mail: zhilinevg@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2076-6463>

Зюзов Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Иоффе Игорь Святославович – инженер, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екате-

ринбург, Россия. E-mail: effect66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6595-206X>

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, профессор, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: klimash@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8150-5013>

Константинов Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: kamfes@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2342-1142>

Копытов Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: skopytov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7967-9460>

Костылев Алексей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-9819>

Лымарь Алексей Борисович – аспирант, старший преподаватель, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lymar.alexei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Марушенко Денис Сергеевич – магистрант, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: D_E_CHA@mail.ru

Мурзин Павел Валерьевич – старший преподаватель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>

Нестеров Константин Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: k.e.nesterov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-8556>

Нигаматуллин Руслан Миратович – студент, кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-9358>

Одинаев Исмоил Назримадович – инженер-исследователь, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ismoil.odinaev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Паздерин Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующей кафедрой, кафедры автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4826-2387>

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: m.petushkov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Рекотов Олег Геннадьевич – научный сотрудник, отдел преобразования постоянного напряжения, научно-исследовательский институт автоматики и электро-механики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: rekotov@niiuem.tomsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7464-5707>

Сизганова Евгения Юрьевна – канд. техн. наук, доцент, кафедры электротехнические комплексы и системы, Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

Танич Василий Олегович – доцент, кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shift-91@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0098-6431>

Тащилин Валерий Александрович – канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. <https://orcid.org/0000-0001-8763-3705>

Ульянов Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедры промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: Uliyanov2@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2548-9132>

Шукало Александр – АО «Электропренос-Электроприенос БиХ», г. Баня Лука, Босния и Герцеговина.

Юдинцев Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, директор, научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: yag@niiuem.tomsk.ru

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

С 26.03.2019 журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки);

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magt.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов:

- рукопись, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора



Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова»



Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
(профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова»:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматизации. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.