

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Нижний Новгород 2020

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. № 2 (10). – 110 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков канд. техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	4
Коверникова Л.И., Буй Н.Х. Проблемы качества электрической энергии в системе электроснабжения комбината сортировки угля одного из угольных карьеров Вьетнама.....	4
Герман Л.А., Чивенков А.И. Потери электроэнергии в тяговой сети переменного тока со статическим генератором реактивной мощности	17
Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Оценка средней за период эксплуатации дизель-генераторной установки переменной частоты вращения стоимости вырабатываемой электроэнергии.....	29
Туркина О.А., Чайкин В.С., Иванов А.В. Практические аспекты применения языка разметки SCL при разработке файлов типа SSD в ходе проектирования энергообъектов электрической сети.....	43
Осокин В.Л. Моделирование процессов в системе «источник питания – электрогазоразрядный реактор» в Mathcad.....	54
Погорелов А.В., Прокопишин Д.И., Фальков Г.А. Анализ несинусоидальности рудничных сетей с использованием мгновенного сопротивления.....	65
Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Модернизация системы нечеткого вывода для оценки текущего состояния изоляции кабельных линий ...	74
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	82
Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Установленная мощность выпрямительных фазопреобразующих автотрансформаторов и трансформаторов.....	82
Вихорев Н.Н., Алешин Д.А. Аналоговый контур формирования задающего сигнала активно-адаптивного фильтра гармонических искажений.....	92
Наши авторы	105

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_4

Л.И. Коверникова^{1,2}, Н.Х. Буй²**ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
КОМБИНАТА СОРТИРОВКИ УГЛЯ
ОДНОГО ИЗ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ ВЬЕТНАМА**¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН² Иркутский национальный исследовательский технический университет

Анализируется качество электрической энергии в узле присоединения к питающей сети комбината сортировки угля на вьетнамском угольном карьере. Представлены схема системы электроснабжения сортировочного комбината, график его работы, состав технологического и электрического оборудования. Приведены требования нормативных документов к качеству электрической энергии, информация о приборе, использованном для измерения показателей качества электрической энергии и параметров режима. Представлены графики активных и реактивных мощностей, потребляемых сортировочным комбинатом, статистические оценки реактивных мощностей и коэффициентов мощности. Величина коэффициента мощности одной из фаз меньше нормативного значения. Приведены графики коэффициентов отклонения напряжений и суммарных коэффициентов гармоник напряжений трех фаз. Отклонения напряжений не превышают норму, а суммарные коэффициенты гармоник – превышают более, чем в 2,5 раза. Статистические оценки коэффициента гармонических составляющих напряжения одной из фаз показывают, что нормативное значение для некоторых гармоник превышено. Осциллограммы фазных токов сильно искажены, хотя коэффициенты гармонических составляющих тока не превышают норму. Для улучшения качества электрической энергии предложено использовать активный фильтр гармоник. Получены оценки величин реактивной мощности, которую фильтр должен генерировать для повышения коэффициента мощности нагрузки сортировочного комбината, и полной мощности гармоник для $n > 1$ для устранения гармоник.

Ключевые слова: активный фильтр, гармоники, измерения, качество электрической энергии, коэффициент мощности.

1. Введение

Добыча угля во Вьетнаме является важнейшей отраслью экономики страны, а угольные шахты и карьеры – центрами промышленных районов. Их системы электроснабжения имеют сложную топологию, много уровней напряжений, нагрузки различных типов и мощностей. В шахтах и карьерах, а также на относящихся к ним комбинатах сортировки угля, новое технологическое и электрооборудование работает параллельно с физически и технологически устаревшим. Часть электрооборудования, в том числе, большой мощности, имеет нелинейные вольтамперные характеристики, потребляется несинусоидальный ток, что становится причиной низкого качества электрической энергии.

На комбинатах сортировки угля основным электрооборудованием являются асинхронные двигатели, приводящие технологическое оборудование в работу. Большую часть из них представляют асинхронные двигатели с частотным регулированием, являющиеся источниками гармоник. Гармоники напряжений и токов, создавая дополнительные потери активной мощности (энергии), вызывают ускоренное старение изоляции электрооборудования, магнитной системы и, как результат, сокращение срока его службы. Увеличение суммарного коэффициента гармоник напряжения до 10-15 % вызывает снижение коэффициента мощности и вращающего момента на валу асинхронных двигателей [1]. Активная энергия гармоник рассеивается в электрооборудовании и элементах сети, вызывая потери электрической энергии, как следствие, дополнительные финансовые расходы за потребленную электроэнергию [2]. Также потребители вынуждены платить штрафы, если коэффициент мощности нагрузки меньше установленного нормативного значения [3]. Обе проблемы могут быть решены при использовании активного фильтра гармоник [4-7]. Активный фильтр способен генерировать реактивную мощность для повышения коэффициента мощности и токи гармоник для снижения искажения кривых токов и напряжений.

В статье представлены результаты измерений показателей качества электроэнергии и параметров режима в узле присоединения системы электроснабжения сортировочного комбината к питающей сети. Объектом исследования является угольный карьер с комбинатом сортировки угля компании «Kua Ong-Vinakomin». Выполнены оценки величин реактивной мощности и полной мощности гармоник, которые должен генерировать активный фильтр, что улучшает качество электрической энергии, и, следовательно, уменьшает финансовые потери компании «Kua Ong-Vinakomin».

II. Характеристика системы электроснабжения комбината сортировки угля

Схема системы электроснабжения комбината приведена на рис. 1.

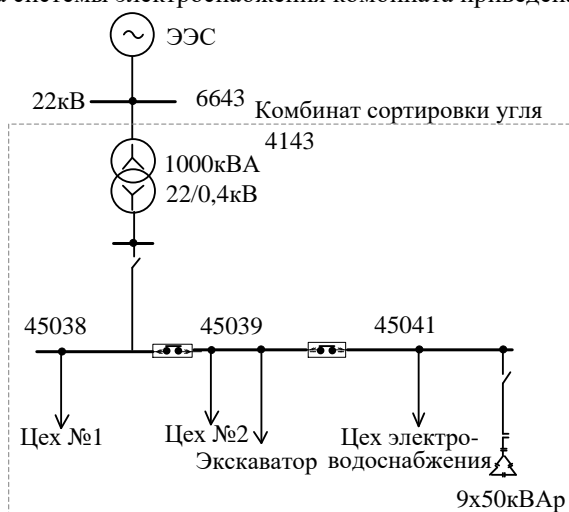


Рис. 1. Схема системы электроснабжения сортировочного комбината

Электроснабжение комбината сортировки угля осуществляется от двухтрансформаторной подстанции 110 кВ, получающей электрическую энергию по двум линиям электропередачи 110 кВ от двух независимых источников. Один из трансформаторов является резервным. От шин 22 кВ подстанции по двум линиям электропередачи 22 кВ электрическая энергия поставляется непосредственно в схему электроснабжения комбината в узле 6643. На рис. 1 данное оборудование входит в состав электроэнергетической системы (ЭЭС). Понижающий трансформатор 22/0,4 кВ мощностью 1 000 кВА принадлежит системе электроснабжения комбината сортировки угля. От шин 0,4 кВ трансформатора электрическую энергию получают два цеха сортировки угля (№ 1 и № 2) и цех электроводоснабжения. Уголь в карьере добывается открытым способом и автотранспортом доставляется на склад комбината. На складе он загружается экскаватором на конвейер (рис. 1), с помощью которого доставляется на сортировочный комбинат. В сортировочных цехах куски угля сортируются по величине. Сортировочные цеха имеют различное технологическое оборудование – вибраторы, сита с отверстиями различных размеров, дробилки, насосы, конвейеры и другое оборудование. Технологическое оборудование сортировочного цеха № 1 приводится в действие 17 асинхронными двигателями мощностью от 4 до 50 кВт. Переработка угля продолжается в цехе № 2. При

осуществлении технологического процесса здесь используются 18 асинхронных двигателей мощностью от 4 до 185 кВт. Цех электроводоснабжения осуществляет освещение сортировочного комбината, подачу воды, транспортировку угля на склад после сортировки. Для этого в цехе используются 23 асинхронных двигателя мощностью от 4 до 160 кВт. Большинство асинхронных двигателей имеют частотное регулирование скорости. Схема асинхронного двигателя с частотным регулированием приведена на рис. 2 [8]. Они потребляют несинусоидальный ток и являются источниками гармоник и интергармоник тока.

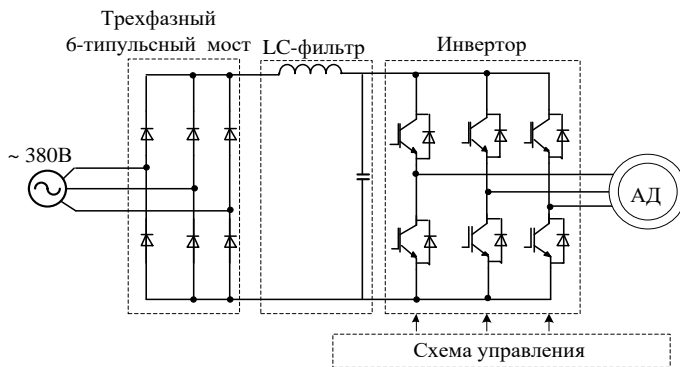


Рис. 2. Схема асинхронного двигателя с частотным регулированием

Основной производственный процесс сортировки угля осуществляется с 7 часов утра до 17 часов вечера. После этого до 7 часов следующего утра основное технологическое оборудование не работает. В это время в работе находится лишь небольшая часть оборудования цеха № 2, выполняющего специальный технологический процесс, и электрооборудование цеха электро-водоснабжения.

III. Требования нормативных документов Вьетнама к качеству электрической энергии

Во Вьетнаме требования к качеству электрической энергии регламентируются нормативными документами [3, 9]. Они характеризуют искажение как напряжения, так и тока. В табл. 1 приведены нормативные значения для следующих показателей: δU – отклонение величины напряжения от номинального значения; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения; $K_{U(n)}$ – коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения; $K_{I(n)}$ – коэффициент n -ой гармонической составляющей тока.

Таблица 1.
Нормативные значения показателей

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\delta U, \%$	$K_U, \%$	$K_{U(n)}, \%$	$K_{I(n)}, \%$
110	$\leq \pm 5,0$	$\leq 3,0$	$\leq 1,5$	$\leq 12,0$
0,1–35	$\leq \pm 5,0$	$\leq 6,5$	$\leq 3,0$	$\leq 12,0$

Также установлено требование, касающееся величины коэффициента мощности нагрузки ($\cos\varphi$) в узле присоединения потребителя электрической энергии к питающей сети. Величина $\cos\varphi$ должна соответствовать нормативному значению, установленному в техническом регламенте [3], т.е., $\cos\varphi \geq 0,85$.

IV. Результаты измерений показателей качества электрической энергии и параметров режима

Измерения, для которых использовался прибор PQ-Vox150 [10], проводились на стороне низкого напряжения понижающего трансформатора 22/0,4 кВ в узле 4 143 в течение 24 часов с интервалом измерений показателей качества электрической энергии и параметров режима 1 с. За 24 часа измерений было выполнено 86 964 замера.

На рис. 3 и 4 приведены графики активных и реактивных мощностей, потребляемых сортировочным комбинатом в течение 24 часов. Отмечено время перерыва в работе, весь остальной период оборудование комбината находится в действующем состоянии. В табл. 2 приведены статистические оценки измеренных величин реактивных мощностей и коэффициентов мощности трех фаз. Макс и Мин – максимальное и минимальное значения, МО – математическое ожидание. Из таблицы следует, что в фазе В среднее значение коэффициента мощности равно 0,82, минимальное – 0,73, что меньше нормативного значения 0,85, установленного в [9]. Из анализа измеренных значений $\cos\varphi$ за 24 часа также следует, что 58 % всех измеренных значений коэффициента мощности в фазе В имеют величины меньше нормативного значения. По этой причине каждый месяц компания, владеющая карьером и комбинатом, вынуждена платить штраф.

Таблица 2.

Статистические оценки величин реактивных мощностей и $\cos\varphi$

Значение	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_A$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_B$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_C$
Макс	127,1	0,98	173,0	0,93	136,2	1,00
Мин	15,0	0,90	43,7	0,73	0,0	0,91
МО	60,0	0,94	97,4	0,82	57,1	0,96
Норма		$\geq 0,85$		$\geq 0,85$		$\geq 0,85$

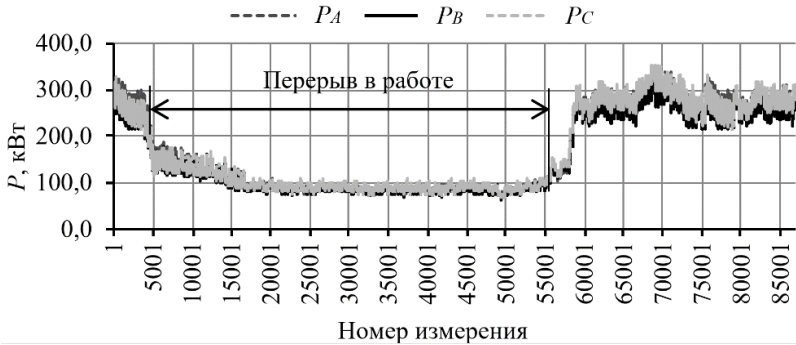


Рис. 3. Графики активных мощностей в трех фазах

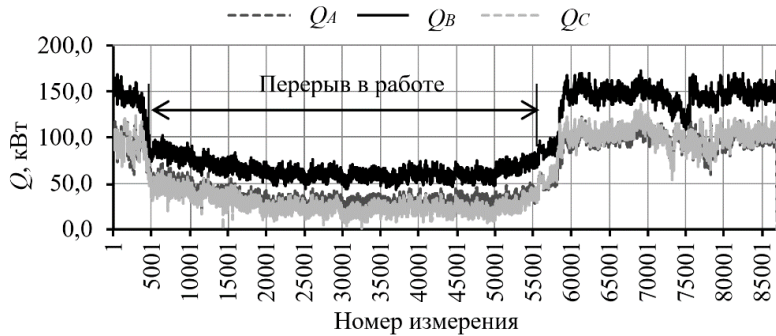


Рис. 4. Графики реактивных мощностей в трех фазах

Графики изменения величин напряжений в трех фазах в течение времени измерений показаны на рис. 5. Величины напряжений во всех фазах увеличиваются во время перерыва в работе комбината.

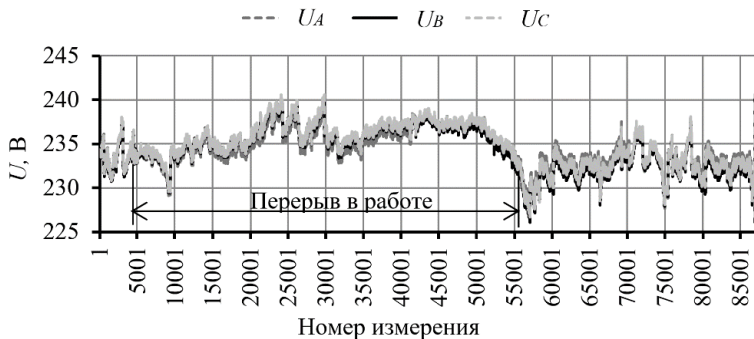


Рис. 5. Графики изменения величин напряжений в трех фазах

На рис. 6 приведены графики изменения δU в трех фазах. Несмотря на увеличение фазных напряжений во время перерыва в работе, величины показателя δU во всех фазах не выходят за нормативные значения $\pm 5\%$.

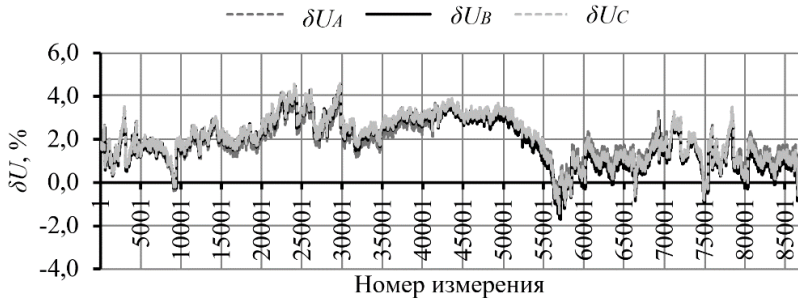


Рис. 6. Графики изменения показателя δU в трех фазах

На рис. 7 приведен график измеренных величин суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в фазе А. Нормативное значение коэффициента равно $6,5\%$ [9]. Из графика следует, что большую часть времени измерений показатель превышает нормативное значение. Во время перерыва в работе нормативное значение превышено более, чем в 2,5 раза.

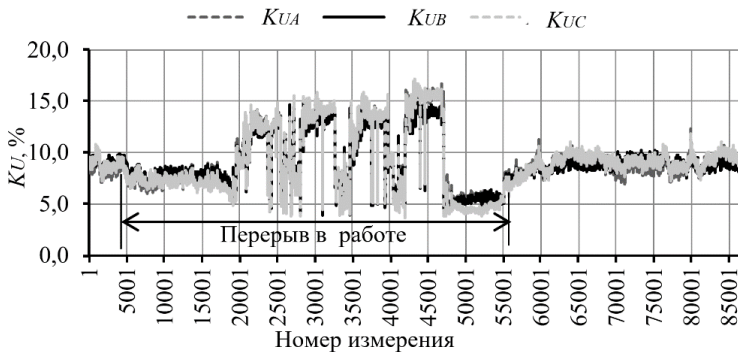


Рис. 7. Графики изменения показателя K_U в трех фазах

В табл. 3 приведены статистические оценки показателя $K_{U(n)}$ в фазе А для гармоник, на которых наиболее часто превышаются нормативные значения. В таблице обозначено: р – рабочее время, п – время перерыва в работе. Величины показателя, превышающие нормы, выделены жирным шрифтом.

Таблица 3.
Статистические оценки $K_{U(n)}$ в фазе А

Значение, %	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
Макс (р)	2,5	6,2	11	1,9	3,0	2,1	3,3	1,6	2,9	1,9
Мин (р)	0,6	1,1	3,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО (р)	1,5	3,4	7,1	1,0	0,6	0,7	1,4	0,5	0,9	0,6
Макс (п)	2,1	12,7	12,8	1,6	4,6	1,9	1,5	1,5	3,1	1,8
Мин (п)	0,5	0,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
МО (п)	1,2	5,4	6,9	0,8	1,8	0,5	0,7	0,4	0,8	0,4
Норма	≤ 3									

Из таблицы видно, что превышения имеют место на канонических гармониках для трехфазной 6-пульсной схемы выпрямления, которая применяется в асинхронных двигателях с частотным регулированием, а именно – на 5, 7, 11, 23-й. Превышение имеет место также на 17-й гармонике. На рис. 8 приведен скриншот экрана прибора, проводившего измерения, на котором представлены осциллограммы токов трех фаз. Осциллограммы показывают, что формы кривых токов несинусоидальные. Действующие значения токов в фазах равны 60,4 А; 57,4 А; 53,5 А.

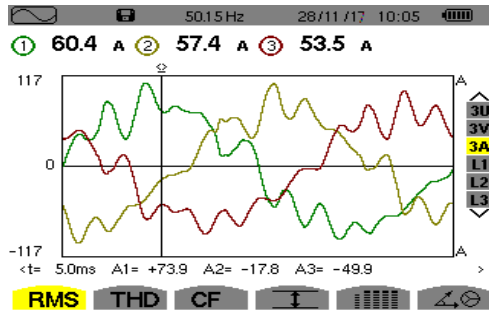


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов

В табл. 4 приведены статистические оценки коэффициентов n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$ для гармоник, на которых чаще всего нарушаются нормативные значения. Но из данных, приведенных в таблице, следует, что измеренные величины $K_{I(n)}$ не превышают норматив-

ное значение 12 %, установленное в [3]. Наибольшие значения коэффициента имеет на 3, 5, 7-й гармониках (выделены жирным шрифтом) во время перерыва в работе.

Таблица 4.
Статистические оценки $K_{I(n)}$ в фазе А

Значение, %	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
Макс (р)	5,6	6,0	3,4	2,2	1,2	1,5	1,9	1,3	2,7	1,1
Мин (р)	1,6	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
МО (р)	3,3	3,6	1,4	1,0	0,3	0,6	0,7	0,3	0,5	0,3
Макс (п)	7,1	6,8	6,7	2,9	3,9	1,9	2,3	1,9	2,5	2,4
Мин (п)	1,7	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
МО (п)	4,0	2,0	2,8	1,6	1,3	0,7	1,0	0,5	1,0	0,5
Норма	≤ 12									

Результаты анализа данных показывают, что в узле присоединения системы электроснабжения сортировочного комбината к питающей сети имеются проблемы с синусоидальностью напряжения и коэффициентом мощности нагрузки. Для улучшения качества электрической энергии в узле 4143 может быть установлен активный фильтр гармоник.

V. Оценка величины реактивной мощности, которую должен генерировать активный фильтр

Выше было отмечено, что сортировочный комбинат должен иметь коэффициент мощности нагрузки равный или больше 0,85 [3]. В приказе компании [11], владеющей карьером и сортировочным комбинатом, указывается на необходимость иметь коэффициент мощности равным или больше 0,95. По результатам измерений в фазе В значение $\cos\varphi$ составляет лишь 0,73. Для обеспечения требуемого $\cos\varphi$ нужно компенсировать недостаток реактивной мощности, что может быть выполнено активным фильтром гармоник. Реактивная мощность, которую должен дополнительно генерировать активный фильтр, определяется как

$$Q_{\text{ком}} = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ком}}$ – недостающая реактивная мощность; P – активная мощность нагрузки; φ_1 – фазовый угол между напряжением и током до компенсации реактивной мощности; φ_2 – фазовый угол между напряжением и током

после компенсации реактивной мощности, соответствующий $\cos\varphi = 0,95$. Вычисленные значения реактивных мощностей для каждой из трех фаз А, В, С оказались равными: 32,2 квар, 134,0 квар, 39,4 квар. Таким образом, активный фильтр в каждой фазе должен иметь возможность генерировать реактивную мощность величиной не менее 134,0 квар.

VI. Оценка величины полной мощности гармоник, которую должен генерировать активный фильтр

Полная мощность всех гармоник для $n > 1$ вычисляется в соответствии с [12]:

$$S_{n\Phi\Sigma} = \sum_{n=2}^{40} U_{n\Phi} \cdot I_{n\Phi}, \quad (2)$$

где $U_{n\Phi}$ – фазное действующее значение напряжения n -ой гармоники, $I_{n\Phi}$ – фазное действующее значение тока n -й гармоники.

Как указывалось ранее, за 24 часа было выполнено 86 964 замеров. Для каждой фазы каждого из них по формуле (2) была вычислена мощность $S_{n\Phi\Sigma}$. Затем для каждой фазы были выбраны максимальные значения полной мощности гармоник. Максимальные значения вычисленных полных мощностей гармоник по фазам А, В и С оказались следующими: 14,4 кВА; 12,3 кВА и 16,8 кВА. Таким образом, активный фильтр для устранения токов гармоник в каждой фазе должен иметь мощность не менее 17 кВА.

VII. Выводы

По результатам измерений показатели качества электрической энергии $K_{U(n)}$ и K_U превышают нормативные значения, установленные нормативными документами Вьетнама. Коэффициент мощности нагрузки меньше установленного нормативного значения. Для повышения качества электрической энергии на шинах трансформатора 22/0,4 кВ, питающего сортировочный комбинат, требуется установка активного фильтра гармоник, который должен в каждой фазе иметь возможность генерировать реактивную мощность не менее 134 квар и полную мощность не менее 17 кВА.

Библиографический список

- [1] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
- [2] Czarnacki L.S. Working, reflected and detrimental active powers // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6. Is. 3. Pp. 233-239.
- [3] National Technical Regulation on Electric Power. Vietnam, 2015.
- [4] Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999. Vol. 46. No. 5. Pp. 960-971.
- [5] El-Habrouk M., Darwish M.K, Mehta P. Active power filter: A review // IEEE Proceedings – Electric Power Applications. 2000. Vol. 147. No. 5. Pp. 403-413.
- [6] Orts S., Gimeno-Sales F.J., Abellan A., Segui-Chilet S., Alcaniz M. Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 23. Is. 2. Pp. 812-822.
- [7] Husen S.S, Patel P.J. A literature review and industrial survey on active power filter // International Journal of Engineering Development and Research. 2014. Vol. 2. Is. 1. Pp. 118-125.
- [8] Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электрика. 2008. № 10. С. 3-11.
- [9] Circular No. 39/2015/TT-BCT of 11/18/2015 of the Ministry of Industry and Trade of Vietnam for the distribution of electrical energy.
- [10] Operating Manual Network Analyzer PQ-Box 150. Power-Quality Evaluation Software [Электронный ресурс]. URL: <http://www.a-eberle.de> (дата обращения 01.02.2020).
- [11] Order No. 25 of 10/22/2018 of the «Kua Ong-Vinakomin» Company of Vietnam for the modernization of the electrical system.
- [12] Emanuel A.E. Power definitions and physical mechanism of power flow. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. – 280 p.

L.I. Kovernikova^{1,2}, N.H. Bui²
**PROBLEMS OF POWER QUALITY IN ELECTRICAL
SUPPLY SYSTEM OF COAL SORTING PLANT
IN ONE COAL QUARRY OF VIETNAM**

¹ Melentiev Energy Systems Institute
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. Coal mining is the most important economic sector in Vietnam. Coal mined in mines and quarries. Their power supply systems have a complex topology, many voltage levels and loads of various types. New technological and electrical equipment works in parallel with the outdated one. Coal mines and quarries have electrical equipment with non-linear current-voltage characteristics. It consumes a non-sinusoidal current, impairing the power quality. Therefore, there is the low power quality in industrial areas with coal mining. The article is devoted to the analysis of the power quality in the node of connection to the supply network of the coal sorting plant of one of the coal quarries. The scheme of the power supply system of the sorting plant, its work schedule, the composition of technological and electrical equipment are presented. The requirements of regulatory documents for the power quality, information about the device used to measure indexes of the power quality and mode parameters are given. The graphs of active and reactive power consumed by the sorting plant, statistical estimates of reactive capacities and power factors for three phases are presented. Oscillograms of phase currents are strongly distorted, although the n -th harmonic factors of the current do not exceed the normative value. It is proposed to use an active filter to improve the power quality. Estimates of the values of the reactive power of the fundamental frequency, which the active filter must generate to increase the power factor, and the apparent power of the not fundamental frequency to eliminate harmonics are given.

Keywords: active filter, harmonics, measurements, power factor, power quality.

References

- [1] I.V. Zhezhelenko, *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 2010 (in Russian).
- [2] L.S. Czarnecki, «Working, reflected and detrimental active powers», *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, is. 3, pp. 233-239, March 2012.
- [3] National Technical Regulation on Electric Power. Vietnam. 2015.
- [4] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, «A review of active filters for power quality improvement», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct. 1999.

- [5] M.El. Habrouk, M.K. Darwish, P. Mehta, «Active power filter: A review», *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 147, no. 5, pp. 403-413, Sept. 2000.
- [6] S. Orts, F.J. Gimeno-Sales, A. Abellan, S. Segui-Chilet and M. Alcaniz, «Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, is. 2, pp. 812-822, Apr. 2008.
- [7] S.S. Husen and P.J. Patel, «A literature review and industrial survey on active power filter», *International journal of engineering development and research*, vol. 2, no. 1, pp. 118-125, 2014.
- [8] I.V. Zhezhelenko, «Electromagnetic compatibility in systems for power supply of industrial enterprises», *Elektrika*, no. 10, pp. 3-11, 2008.
- [9] Circular No. 39/2015/TT-BCT of 11/18/2015 of the Ministry of Industry and Trade of Vietnam for the distribution of electrical energy.
- [10] Operating Manual Network Analyzer PQ-Box 150. Power-Quality Evaluation Software. [Online]. Available at: <http://www.a-eberle.de>.
- [11] Order No. 25 of 10/22/2018 of the «Kua Ong-Vinakomin» Company of Vietnam for the modernization of the electrical system.
- [12] A.E. Emanuel, *Power definitions and physical mechanism of power flow*. John Wiley & Sons Ltd, 2010.

УДК 621.33

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_17

Л.А. Герман ¹, А.И. Чивенков ²

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАТИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

¹ Самарский государственный университет путей сообщения

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены задачи увеличения пропускной способности участков железной дороги и снижения потерь мощности в тяговой сети. В качестве решения предлагается регулирование мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирования. Целью исследования является оценка снижения потерь мощности в тяговой сети при стабилизации напряжения на шинах статических генераторов реактивной мощности (СГРМ). Предложена схема замещения СГРМ в тяговой сети, позволяющая рассчитать потери мощности. Особенностью схемы является определение параметров с помощью итерационного расчета схемы электроснабжения межподстанционной зоны участка железной дороги. Рассмотрен закон регулирования мощности установленных СГРМ на постах секционирования отечественных железных дорог. Разработаны решения по увеличению эффективности компенсации реактивной мощности в тяговой сети.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, потери электроэнергии, регулирование напряжения, статический генератор реактивной мощности, тяговая сеть.

1. Постановка задачи

В последние годы установки поперечной емкостной компенсации стали устанавливаться на постах секционирования (ПС) для повышения напряжения в тяговой сети и, следовательно – увеличения пропускной способности электрифицированного участка и снижения потерь мощности в тяговой сети. В настоящее время на постах секционирования включают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) серии «RU-DRIVE SVG», изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг» [1-4], которые доказали свою эффективность в повышении пропускной способности участков железной дороги. Для условий электроснабжения железной дороги в общем случае требования к автоматике регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирования определяются следующими двумя условиями.

Во-первых, необходимо повысить напряжение на шинах поста секционирования. При этом напряжение на токоприемнике должно удовлетворять требованиям нормативных документов (21 кВ в общем случае и 24 кВ для скоростных участков). Кроме того, дополнительно устанавливается условие: для повышения пропускной способности участка следует повысить напряжение в контактной сети так, чтобы пропустить заданное число поездов (включая «тяжелые»). Во-вторых, одновременно следует минимизировать потери электроэнергии, а это значит, что следует выбрать на шинах поста секционирования такой уровень напряжения, при котором будет обеспечена заданная пропускная способность при минимальной потере электроэнергии в тяговой сети. Эти два существенных требования к задаче регулирования мощности установки на посту секционирования и учитываются в статье.

В соответствии с [1], в СГРМ можно реализовать следующие законы регулирования мощности.

- *Фиксированная компенсация.* В режиме фиксированной компенсации «RU-DRIVE SVG» генерирует определенную величину реактивного тока в соответствии с уставкой.
- *Динамическая компенсация.* В режиме динамической компенсации «RU-DRIVE SVG» автоматически генерирует необходимый ток для поддержания заданного значения коэффициента мощности сети.
- *Регулирование напряжения.* В данном режиме в соответствии с верхним и нижним пределом напряжения, установленным в настройках параметров, «RU-DRIVE SVG» автоматически регулирует выходную мощность, тем самым осуществляя регулирование напряжения.
- *Коэффициент мощности.* Компенсация в данном режиме производится исходя из уставок коэффициента мощности в контрольных точках.
- *Регулирование реактивной мощности с ограничением по напряжению.*

В данном режиме «RU-DRIVE SVG» работает по контрольным точкам. Если напряжение контрольной точки не выходит за пределы допустимого диапазона, устройство работает в соответствии с режимом динамической компенсации. Если напряжение находится вне установленного диапазона, реализуется режим регулирования напряжения.

В настоящее время на электрифицированных участках железной дороги принят закон регулирования мощности СГРМ – «регулирование напряжения». Он определяет стабилизацию напряжения на шинах ПС на заданном напряжении $U_{зад}$, обычно на уровне от 27 до 28 кВ. В частности, на СГРМ Оричи Горьковской железной дороги установлено $U_{зад} = 28$ кВ, а на СГРМ Северной железной дороги – 27 кВ.

Цель исследования – оценить эффект снижения потерь мощности в тяговой сети при стабилизации напряжения на шинах СГРМ. В статье рас-

смотрены простые мгновенные схемы двухпутного участка с постом секционирования и СГРМ, рассчитаны уровни напряжения и потери мощности. Для расчетов, прежде всего, необходимо было определиться со схемой замещения межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока с СГРМ на посту секционирования.

II. Схема замещения межподстанционной зоны

Схема замещения СГРМ представлена на рис. 1. Регулируемое емкостное сопротивление подключено к шине поста секционирования, на котором установлено заданное напряжение $U_{\text{зад}}$, поддерживаемое СГРМ и которое генерирует ток $I_{\text{сг}}$. Ток нагрузки $I_{\text{нагр}}$, приходящийся на ПС, рассчитывается путем переноса (перераспределения) нагрузки тяговой сети между тяговыми подстанциями и ПС [6]. Следует учесть, что этот ток нельзя измерить на ПС. Например, при равных токах, симметрично расположенных от ПС, ток ПС будет равен нулю, в отличие от тока ПС после перераспределения.

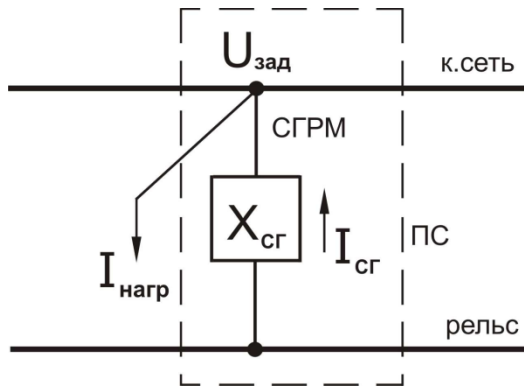


Рис.1. Схема замещения с СГРМ

Трудности измерения тока нагрузки, приходящегося на ПС, определяют погрешности расчета (и генерирования) необходимого емкостного тока существующих установок СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети.

Предлагается расчет мгновенной схемы вести в два шага. На первом шаге при расчете мгновенной схемы электроснабжения межподстанционной зоны тяговой сети схема замещения СГРМ представляется емкостным сопротивлением, значение которого определяется мощностью СГРМ. Es-

ли, например, мощность – 10 Мвар, то его сопротивление равно $X_{сг} = 10^3 \cdot 0,65 / 27,5$ Ом, где 0,65 – коэффициент, учитывающий увеличение мощности СГРМ для генерации инверсных гармоник.

После расчета мгновенной схемы участка анализируют напряжение на шинах СГРМ. Если это напряжение меньше заданного $U_{зад}$ (обычно от 27 до 28 кВ), то на втором шаге корректируют $X_{сг}$ для получения заданного напряжения путем изменения емкостного сопротивления (отрицательное сопротивление), при этом изменяется ток и мощность СГРМ. Если же после расчета мгновенной схемы напряжение выше заданного, заменяют емкостное сопротивление на индуктивное и изменяют его (регулируют положительное сопротивление) для достижения заданного напряжения $U_{зад}$. Обычно после второго этапа напряжение на шинах соответствует заданному. В противном случае необходим следующий шаг итерационного расчета. Нагрузочный режим для расчетных экспериментов задан, исходя из нагрузок по двум межподстанционным зонам реального участка Бумкомбинат-Лянгасово-Марадыковский Горьковской железной дороги с двумя постами секционирования, на которых работают СГРМ. По эксплуатационным данным средняя мощность тяговой нагрузки межподстанционной зоны принята равной 13 МВА с $tg = 0,75$ ($\cos = 0,8$). Равномерно распределенная нагрузка тяговой сети для упрощенного расчета сосредоточена на тяговых подстанциях и постах секционирования. Тогда на ПС приходится мощность $13/2 = 6,5$ МВА, т.е., средняя нагрузка равна $6500 / 27,5 = 236$ А. Таким образом, приняты нагрузки ПС в мгновенных схемах: минимальная – 120 А, средняя 200-300 А, максимальная – 500 А.

На межподстанционной зоне находятся три нагрузочных узла: два узла (1, 2) – тяговые подстанции и один узел (4) – ПС (рис. 2 и 3). Кроме того, для расчета добавлены еще нагрузочные узлы (3, 5) – два пункта параллельного соединения (ППС), их токи 200-400 А. Параметры тяговой сети двухпутного участка в 56 км с параллельным питанием путей: сопротивления $r = 0,12$ Ом/км, $x = 0,28$ Ом/км. Межподстанционная зона разделена постом секционирования и двумя ППС на четыре равных участка $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$ по 14 км (рис. 3). Нагрузки I_3, I_4, I_5 приложены к ППС и ПС. Сопротивления трансформаторов тяговых подстанций мощностью 40 МВА и напряжением 110 / 27,5 кВ совместно с сопротивлением питающих линий принимаем $Z_{01} = Z_{02} \approx X_{01} = X_{02} = 2,7$ Ом (приведено к напряжению 27,5 кВ, принимаем $X_{01} = X_{02} \approx Z_{01} = Z_{02}$). В расчетах используется программа РАСТ-05К [4].

В схеме замещения (рис. 3), принятой для расчетов по программе РАСТ-05К, специально сформированы по правилам в программе нагрузочные узлы в тяговой сети 4,6 (ППС) и 5 (ПС). Мощность СГРМ принята равной 10 Мвар, следовательно, максимальный генерируемый СГРМ ем-

костной ток равен $10 \cdot 10^3 \cdot 0,65 / 27,5 = 236 \text{ А}$ (коэффициент 0,65 определяет мощность СГРМ на компенсацию реактивной мощности без доли мощности на активный фильтр).

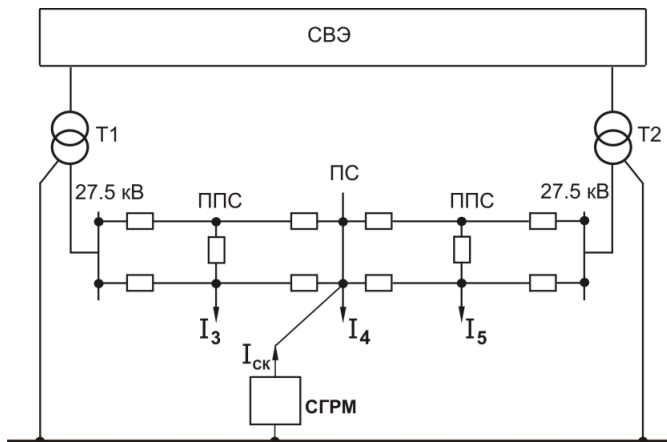


Рис. 2. Межподстанционная зона тяговой сети

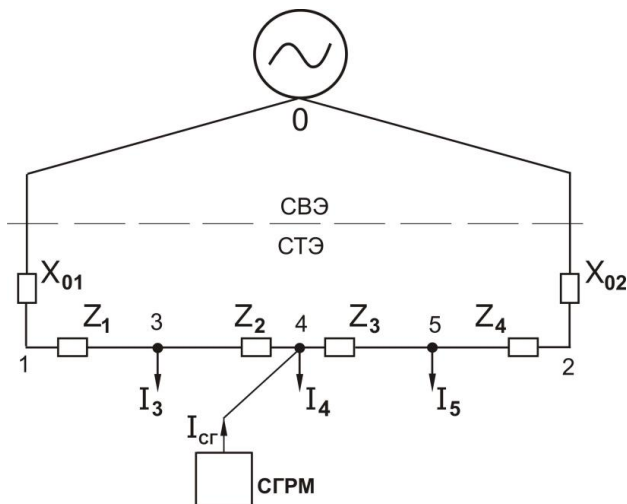


Рис. 3. Схема замещения межподстанционной зоны

III. Расчеты потерь мощности по программе РАСТ-05К

Расчеты выполнены при различной расстановке токов и их значений на ПРС и ПС. Принят режим заданного напряжения на шинах СГРМ –

$U_{\text{зад}} = 27$ или 28 кВ, а напряжение холостого хода на ПС – 28 кВ. Выборочно в табл. 1 даны результаты расчетов потерь мощности в тяговой сети.

Таблица 1.
Результаты измерений

№	Токи ПС и ППС, А (мощность нагрузки, МВА)	Потери мощности без СГРМ $\Delta P_{6-сг}$, кВт	Потери мощности при включении СГРМ $\Delta P_{с-сг}$, кВт	Ток СГРМ, $I_{сг}$, А	$\Delta P_{с-сг} / \Delta P_{6-сг}$
1	ПС $I_4 = 600 = 360 + j \cdot 480$ (16,5)	1083	778 при $U_{сг} = 27$ кВ 913 при $U_{сг} = 28$ кВ	403 549	0,72 0,84
2	ПС $I_4 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (11)	481	353 при $U_{сг} = 27$ кВ 446 при $U_{сг} = 28$ кВ	208 373	0,73 0,93
3	ПС $I_4 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (8,3)	271	202 при $U_{сг} = 27$ кВ 245 при $U_{сг} = 28$ кВ	128 267	0,74 0,9
4	ПС $I_4 = 200 = 120 + j \cdot 160$ (5,5)	120	¹ 98 при $U_{сг} = 28$ кВ	- 155	- 1,29
5	ППС $I_3 = 600 = 360 + j \cdot 480$ (16,5)	850	777 при $U_{сг} = 27$ кВ 863 при $U_{сг} = 28$ кВ	225 350	0,91 1,02
6	ППС $I_3 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (11)	378	343 при $U_{сг} = 27$ кВ 391 при $U_{сг} = 28$ кВ	108 222	0,9 1,03
7	ППС $I_3 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (8,3)	183	¹ 187 при $U_{сг} = 28$ кВ	164	- 1,02
8	ППС $I_3 = I_5 = 400 = 240 + j \cdot 320$ (22)	959	860 при $U_{сг} = 27$ кВ 968 при $U_{сг} = 28$ кВ	245 389	0,9 1,01
9	ППС $I_3 = I_5 = 300 = 180 + j \cdot 240$ (16,5)	463	460 при $U_{сг} = 27$ кВ 486 при $U_{сг} = 28$ кВ	158 209	0,99 1,05
10	ППС $I_3 = I_5 = 200 = 120 + j \cdot 160$ (11)	206	¹ 225 при $U_{сг} = 28$ кВ	- 164	- 1,09

¹ при указанных нагрузках напряжение на ПС около 27 кВ и выше и СГРМ не генерирует емкостный ток.

При сосредоточении нагрузки у поста секционирования происходит эффективная компенсация реактивной мощности и потери в тяговой сети

снижаются на 7...18 % как при $U_{\text{зад}} = 27$ кВ, так и при 28 кВ. Причем при $U_{\text{зад}} = 28$ кВ повышается генерация емкостного тока и в результате перекompенсации уменьшается эффект в снижении потерь мощности. Также эффективна компенсация реактивной мощности по потерям электроэнергии при больших токах нагрузки, сосредоточенных у ППС. В общем случае при удалении тяговой нагрузки от поста секционирования (от СГРМ) и при ее уменьшении эффективность в снижении потерь мощности уменьшается.

Обобщим результаты всех измерений, в частности, указанных в табл. 1, в пяти положениях.

1. Расчет потерь мощности в тяговой сети при различных нагрузочных режимах показал, что возможны ситуации, когда при работе СГРМ на посту секционирования наблюдается режим перекompенсации реактивной мощности, что уменьшает эффект снижения потерь мощности.

2. Оценка целесообразного значения $U_{\text{зад}}$. При повышенном значении заданного напряжения $U_{\text{зад}}$ (например – 28 кВ) увеличивается емкостной ток СГРМ и, следовательно, расширяется зона работы СГРМ с перекompенсацией тяговой нагрузки. Как следствие, повышаются активные потери в тяговой сети. Например, при $U_{\text{зад}} = 27$ кВ потери – 778 кВт, а при $U_{\text{зад}} = 28$ кВ – 913 кВт (строка 1 в табл.1). Поэтому рекомендуется установить $U_{\text{зад}} = 27$ кВ, по крайней мере, на Северной железной дороге доказана возможность такого решения. Тем не менее, при росте числа тяжеловесного движения, с ростом их массы (например, до 12 000 т) возможен переход на повышенное значение $U_{\text{зад}} = 28$ кВ, так как в этом случае приоритет должен определяться надежным пропуском поездов повышенной массы, а не потерями электроэнергии. Это же относится и для вынужденных режимов и аварийных случаев.

3. Оценка режима тяговой сети при малых токах нагрузки. При снижении тяговой нагрузки повышается напряжение в тяговой сети и напряжение на ПС приближается к заданному напряжению на СГРМ $U_{\text{зад}}$. В этом случае при напряжении больше (или равно) $U_{\text{зад}}$ СГРМ переходит в режим генерации индуктивной нагрузки для стабилизации напряжения на уровне $U_{\text{зад}}$. Естественно, потери в тяговой сети растут. Это видно по строкам 4, 7, 9 табл. 1. В этом случае предлагается повышение $U_{\text{зад}}$ до значения 28 кВ, то есть следует $U_{\text{зад}}$ переключить с 27 на 28 кВ.

4. Расчеты показывают, что если по межподстанционной зоне перемещается «тяжелый» поезд, при расположении его между ППС и подстанциями потери мощности в тяговой сети при включенной СГРМ могут увеличиваться за счет перекompенсации. Однако, при приближении его к посту секционирования будет повышаться эффект компенсации реактивной мощности в тяговой сети. В реальных условиях на межподстанционной

зоне перемещается не один поезд, поэтому в дальнейшем следует рассматривать процесс работы межподстанционной зоны при пропуске заданного числа поездов с контролем суммарной потери электроэнергии.

5. Перспективы учета изменения параметров структур мгновенных схем замещения. СГРМ, установленный на посту секционирования, осуществляет генерацию реактивной составляющей тока контактной сети, потребляемой подвижными составами поездов. СГРМ компенсирует реактивные составляющие токов тяговых подстанций, соответственно во внешней сети электроснабжения. Таким образом, потери от реактивных токов сконцентрированы на участках от точки подключения СГРМ до точки потребления мощности подвижным составом. Для оценки пропорциональных соотношений величин потерь и формирования оптимальных режимов работы следует учитывать изменение сопротивлений отдельных участков контактной сети при движении составов.

На рис. 4 представлена схема замещения контактной сети при наличии двух движущихся поездов, сформированная из распределенных сопротивлений участков сети $Z_{кc1}$, $Z_{кc2}$, $Z_{кc3}$, $Z_{кc4}$. С точки зрения формирования схемы замещения, количество поездов, участков распределенных сопротивлений не имеет принципиального значения и может быть определено в зависимости от графика движения поездов.

На рис. 4 обозначены узлы подключения нагрузки 1, 2 с токами нагрузки I_1 , I_2 и узел 3 подключения СГРМ с током $I_{сг}$. Сопротивления отдельных участков являются переменными при движении поездов, но соблюдается условие $Z_{кc1} + Z_{кc2} = \text{const}$, $Z_{кc3} + Z_{кc4} = \text{const}$. Следовательно, при определении параметров величин токов и их фазовых углов СГРМ требуется учет изменения распределенных параметров контактной сети.

Очевидно, что существуют режимы, при которых компенсация реактивных составляющих токов может приводить к увеличению суммарных потерь. Минимальные потери соответствуют подключению точки потребления тока подвижным составом в узле 3 (рис. 4). Оптимизация алгоритмов регулирования с учетом переменных во времени параметров является задачей для продолжения исследований.

Следует учитывать, что потери от протекания реактивных составляющих токов на любом участке рассматриваемой сети компенсируются из системы внешнего электроснабжения. Исследования аналогичных процессов в промышленных сетях электроснабжения *FACTS* рассмотрены в [7, 8].

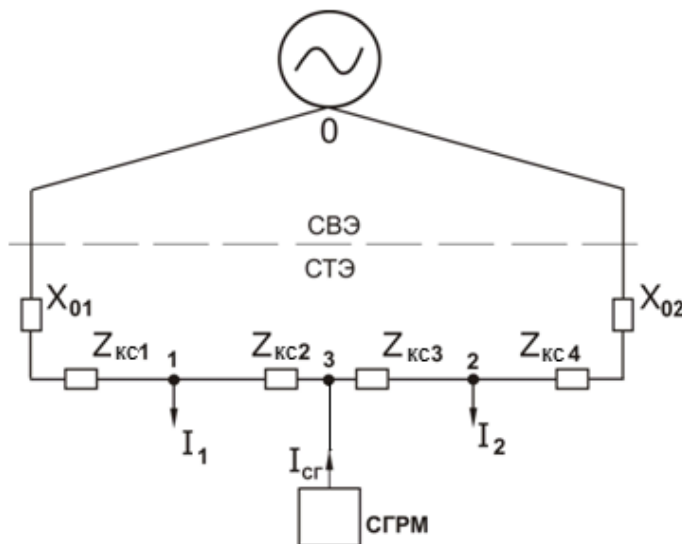


Рис. 4. Схема замещения при наличии двух поездов

IV. Выводы

Включение СГРМ на посту секционирования обеспечивает существенное повышение пропускной способности участков железной дороги.

1. Для расчета потерь мощности предложена схема замещения СГРМ в тяговой сети, параметры которой определяются путем итерационного расчета мгновенной схемы электроснабжения межподстанционной зоны участка железной дороги.

2. При различных нагрузочных режимах возможны ситуации, когда при работе СГРМ на посту секционирования в режиме стабилизации напряжения наблюдается режим перекомпенсации реактивной мощности, что уменьшает эффект снижения потерь мощности.

3. Закон регулирования мощности установленных СГРМ на постах секционирования отечественных железных дорог принят как стабилизация напряжения на шинах СГРМ на уровне заданного напряжения $U_{зад}$. Для снижения режимов перекомпенсации реактивной мощности предложено устанавливать заданное напряжение на уровне $U_{зад} = 27$ кВ.

4. При малых нагрузках в тяговой сети и приближении напряжения на посту секционирования к 27 кВ предлагается переключать режим $U_{зад}$ с 27 кВ на 28 кВ, что увеличит зону компенсации реактивной мощности, включая малые нагрузки, и поднимет уровень эффективной работы по компенсации реактивной мощности в тяговой сети до 28 кВ.

5. Трудности измерения тока нагрузки, проходящегося на ПС, определяют погрешности расчета необходимого емкостного тока существующих установок СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети.

© Герман Л.А., 2020
© Чивенков А.И., 2020

Библиографический список

- [1] Статический генератор реактивной мощности. Руководство по эксплуатации, ООО НПП «РУ Инжиниринг». – 26 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения 06.05.2020).
- [2] Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 316 с.
- [3] Герман Л.А. Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 2. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 6. С. 35-49.
- [4] Вржезинский А.Е., Смирнов С.А. Опыт внедрения устройств компенсации реактивной мощности на Северной железной дороге // Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта», Июнь 5, 2019, Москва, Россия. М.: РАС, 2019. Часть 2. С. 161-166.
- [5] Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: МИИТ, 2010. – 59 с.
- [6] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [7] Чивенков А.И., Севастьянов В.В. Силовой модуль интегрированной системы управления электрическими сетями // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 196-204.
- [8] Кубарьков Ю.П., Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Способ регулирования тока линии электропередачи в узле нагрузки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 1 (61). С. 128-138.

L.A. German ¹, A.I. Chivenkov ²

ELECTRICITY LOSSES IN AC TRACTION NETWORK WITH STATIC REACTIVE POWER GENERATOR

² The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper is devoted to the tasks of increasing the throughput capacity of railway sections and reducing power losses in the traction network. As a solution, it is proposed to control the power of the transverse capacitive compensation installation at the sectioning station. The purpose of the study is to assess the reduction of power losses in the traction network while stabilizing the voltage on the buses of static var generators (SVG). The equivalent circuit of the SVG in the traction network which allows calculating the power loss is proposed. A feature of the scheme is the determination of parameters using iterative calculation of the power supply scheme of the inter-substation zone of the railway section. The law of regulating the capacity of installed SVG at the sectioning stations of Russian railways is considered. Solutions to increase the efficiency of reactive power compensation in the traction network have been developed.

Keywords: electricity loss, reactive power compensation, traction network, static var generator, voltage regulation.

References

- [1] Sticheskiy generator reaktivnoj moshchnosti. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Static var generator. Manual], NPP «RU Inzhiniring» JSC. [Online]. Available at: <https://ru-drive.com/products/sticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> [Accessed: May 6, 2020] (in Russian).
- [2] L.A. German and A.S. Serebryakov, *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensatsii v sistemah tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Adjustable capacitive compensation devices in railway traction power supply systems]. Moscow: UMC ZHDT, 2015 (in Russian).
- [3] L.A. German, «The adjustable filter compensating plants in AC current electric traction network. Part 2», *Electronics and electrical equipment of transport*, no. 6. pp. 36-40, 2018.
- [4] A.E. Vrzhezinsky and S.A. Smirnov, «Opyt vnedreniya ustrojstv kompensatsii reaktivnoj moshchnosti na Severnoj zheleznoj doroge [Experience in implementing reactive power compensation devices on the Northern Railway]», in proc. *All-Russian Conf. Aktual'nye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta* [Actual issues of the development of railway transport], June 5, 2019, Moscow, Russia, vol. 2, pp. 161-666 (in Russian).

- [5] L.A. German and D.A. Morozov, *Raschet tipovykh zadach tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na EVM [Calculation of typical tasks of traction power supply of alternating current on a computer]*. Moscow: MIIT, 2010 (in Russian).
- [6] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Electricity supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982.
- [7] A.I. Chyvenkov and V.V. Sevastyanov, «The power module of integrated control sistem by power grids», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 2 (99), pp. 196-204, 2013.
- [8] Y.P. Kubarkov, A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev, A.V. Shalukho and I.A. Lipuzhin, «Algorithm of power line current formation at load node», *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, no. 1 (61), pp. 128-138, 2019.

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_29

А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов

ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ЗА ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СТОИМОСТИ ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются варианты построения дизель-генераторных установок переменной частоты вращения. Проведена оценка средней за период эксплуатации стоимости вырабатываемой ими электроэнергии. Актуальность работы определяется тем, что одним из направлений развития распределенной энергетики России является разработка дизель-генераторных установок переменной частоты вращения. Регулирование частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания в функции мощности нагрузки обеспечивает снижение удельного расхода топлива до 30 % и более.

Ключевые слова: дизель-генератор, дизель-генератор с переменной частотой вращения, преобразователь частоты, синхронный генератор, стоимость электроэнергии

I. Введение

Около десяти миллионов россиян, живущих на Дальнем Востоке и в северных регионах, получают энергию преимущественно от автономных дизельных электростанций. Для энергообеспечения районов России с децентрализованным энергоснабжением используется более 50 тыс. дизель-генераторных установок (ДГУ) суммарной мощностью 17 млн кВт и выработкой электроэнергии около 50 млрд кВт·ч в год. Расход топлива этими электростанциями составляет около 6 млн т в год. [1-3]. Поскольку такие электростанции работают с постоянной частотой вращения вала, у них нет возможности экономии топлива при пониженной нагрузке. В связи с этим актуальной становится разработка дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ), обеспечивающих значительную экономию топлива (до 30 % и более) [4-12].

Ряд топологий силовых структур ДГПЧВ, в которых основным устройством, обеспечивающим стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии, является полупроводниковый преобразователь, уже раз-

работан [6-10]. Среди возможных структур построения ДГПЧВ можно выделить следующие основные схемы, наиболее приемлемые для практического применения (рис. 1).

1. ДГПЧВ на основе матричного преобразователя частоты (МПЧ).
2. ДГПЧВ на основе синхронного генератора (СГ) специального типа.
3. ДГПЧВ на основе двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ).
4. ДГПЧВ на основе широтно-импульсного преобразователя (ШИП).
5. ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора.

II. Методика определения средней стоимости энергии, вырабатываемой дизель-генераторными установками

Объективный выбор наиболее приемлемого варианта ДГПЧВ по нескольким критериям (удельная стоимость электростанции, удельный расход топлива, средняя наработка на отказ) представляет собой задачу многокритериального анализа. Сложность данной задачи заключается в том, что вышеуказанные критерии имеют разную физическую природу, разную размерность и разную степень значимости для конкретного применения. Известен целый ряд методов многокритериального анализа. Однако создать единый показатель качества при многокритериальном анализе невозможно. Переход к относительным единицам, весовым коэффициентам, как правило, не позволяет получить объективного результата. Поэтому технико-экономическое сравнение рассматриваемых вариантов и ДГУ постоянной частоты вращения целесообразно проводить по средней за нормативный период эксплуатации стоимости выработанного электростанцией кВт·ч энергии. За нормативный период эксплуатации электростанции целесообразно принять среднюю наработку на отказ T .

В табл. 1 представлены расчетные значения средней наработки на отказ рассматриваемых вариантов электростанций для коэффициента нагрузки K_n , равной 50, 60, 70 и 80 %.

Средняя стоимость кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации определяется по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{топ}} \cdot g_e \cdot K_n \cdot P_{\text{ном}} \cdot T + C_{\text{уд}} \cdot P_{\text{ном}}}{T \cdot K_n \cdot P_{\text{ном}}} = C_{\text{топ}} \cdot g_e + \frac{C_{\text{уд}}}{T \cdot K_n}, \quad (1)$$

где $C_{\text{топ}}$ – стоимость 1 кг топлива, руб/кг; $C_{\text{уд}}$ – удельная стоимость электростанции, руб/кВт; g_e – удельный расход топлива, кг/кВт·ч; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электростанции, кВт; T – средняя наработка на отказ, ч.

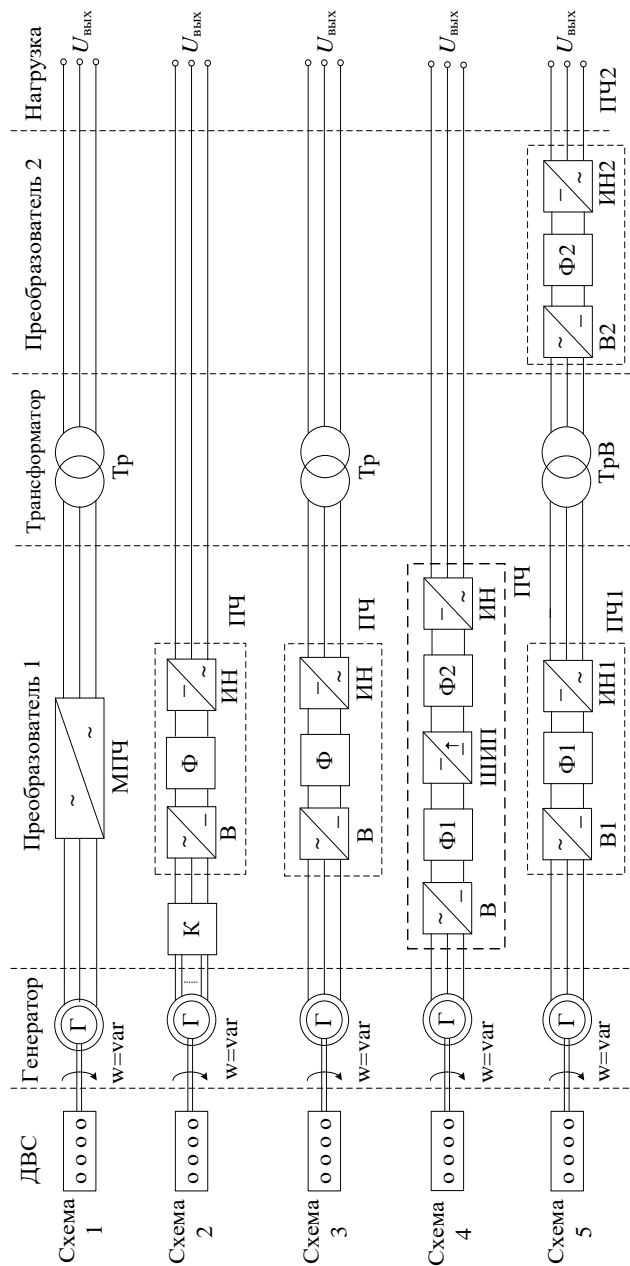


Рис. 1. Структуры силового канала ДГПЧВ:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Г – генератор; ПЧ – преобразователь частоты;
 МПЧ – матричный преобразователь частоты; В – выпрямитель; Ф – фильтр; ИН – инвертор;
 ШИП – широтно-импульсный преобразователь; К – коммутатор; Тр – трансформатор;
 ТрВ – трансформатор высокочастотный

Таблица 1.
Средняя наработка на отказ ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПЧВ при частичной нагрузке

№ п/п	Мощность нагрузки	ДГУ постоянной частоты вращения	ДГПЧВ на основе МПЧ	ДГПЧВ на основе СГ специального типа	ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ	ДГПЧВ на основе ШИП	ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора
1	80	17 241	10 661	10 293	10 310	9 497	8 379
2	70	17 667	13 441	12 270	12 837	11 765	10 482
3	60	21 186	16 935	15 129	16 026	14 993	13 937
4	50	25 641	19 444	17 109	18 716	17 082	15 225

Показатель $C_{ср}$ учитывает удельную стоимость электростанции, удельный расход топлива и среднюю наработку на отказ, поэтому может применяться как интегральный для сравнения электростанций, построенных по различным схемам. При расчете средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации $C_{ср}$ приняты значения удельного расхода топлива g_e (табл. 2), полученные с помощью методики [13].

Таблица 2.
Удельный расход топлива ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПЧВ при частичной нагрузке

№ п/п	Номинальная мощность ДГУ, кВт	Мощность нагрузки	ДГУ постоянной частоты вращения	ДГПЧВ на основе МПЧ	ДГПЧВ на основе многообмоточного СГ	ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ	ДГПЧВ на основе ШИП	ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора
1	160	80	245	218	217	222	220	224
2		70	250	215	214	218	217	219
3		60	255	213	212	215	214	217
4		50	270	214	213	215	215	218
5	40	80	280	251	248	256	255	259

Продолжение табл. 2.

№ п/п	Номинальная мощность ДГУ, кВт	Мощность нагрузки	ДГУ постоянной частоты вращения	ДГПЧВ на основе МПЧ	ДГПЧВ на основе многообмоточного СГ	ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ	ДГПЧВ на основе ШИП	ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора
6	40	70	290	252	249	256	255	260
7		60	300	251	248	255	254	259
8		50	315	257	255	262	260	265
9	4	80	343	275	272	283	280	285
10		70	340	290	288	297	294	300
11		60	370	300	298	307	305	310
12		50	390	322	318	327	324	330

Значения удельной стоимости электростанции $C_{уд}$ (рис. 2) рассчитаны на основе экспертных оценок стоимости составляющего их оборудования.

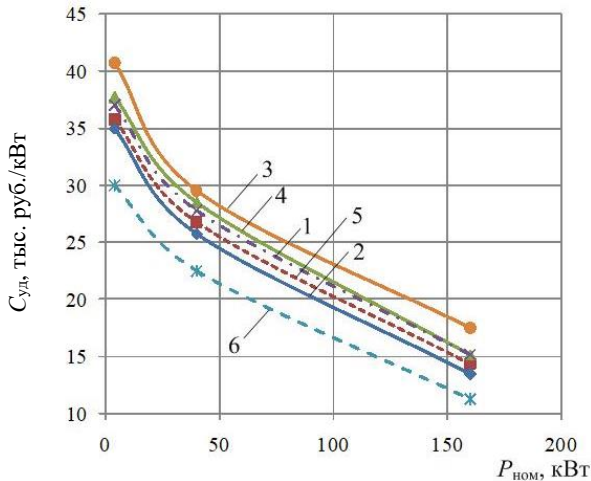


Рис. 2. Зависимости удельной стоимости электростанции от номинальной мощности для вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения

На рис. 2-10 приняты следующие обозначения: 1 – ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ; 2 – ДГПЧВ на основе ШИП; 3 – ДГПЧВ на основе

высокочастотного трансформатора; 4 – ДГПЧВ на основе СГ специального типа; 5 – ДГПЧВ на основе МПЧ; 6 – ДГУ постоянной частоты вращения

Цена дизельного топлива $C_{\text{топ}}$ принята равной 54,5 руб/кг. Для рассматриваемых вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения зависимости расчетных значений $C_{\text{ср}}$ от номинальной мощности электростанции $P_{\text{ном}}$ представлены на рис. 3-6 при частичной нагрузке электростанции, равной соответственно 50, 60, 70 и 80 %.

III. Результаты расчета

Как видно из рис. 3-6, средняя стоимость кВт·ч энергии за период эксплуатации зависит от мощности нагрузки электростанции. При мощности нагрузки электростанции, равной 80 % от номинальной, средняя стоимость кВт·ч энергии ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора, двухзвенного ПЧ и ШИП выше, чем у ДГУ постоянной частоты вращения. Средняя стоимость кВт·ч энергии ДГПЧВ на основе СГ специального типа и на основе МПЧ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения при номинальных мощностях электростанции более 80-100 кВт.

При мощности нагрузки электростанции, равной 70, 60, 50 % и, очевидно, меньшей 50 %, средняя стоимость кВт·ч энергии рассматриваемых вариантов ДГПЧВ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения во всем диапазоне рассматриваемых номинальных мощностей электростанций. Наименьшая средняя стоимость кВт·ч характерна для ДГПЧВ на основе МПЧ.

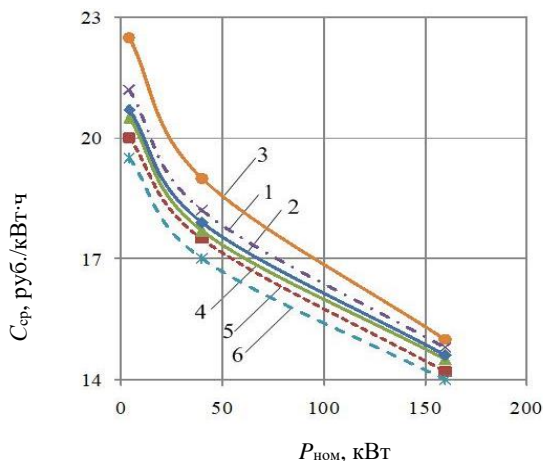


Рис. 3. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (80 % номинального значения)

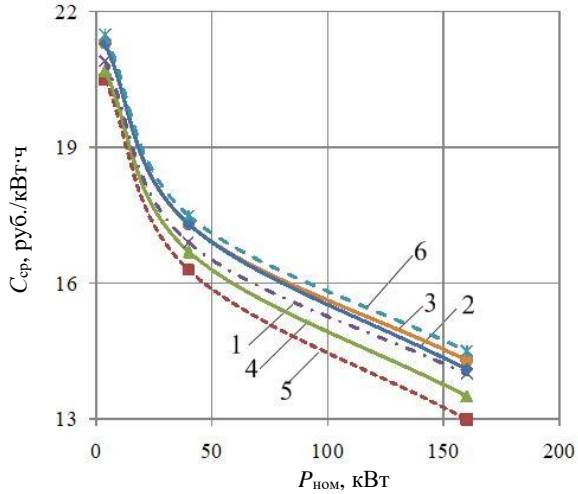


Рис. 4. Зависимости средней стоимости энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (70 % номинального значения)

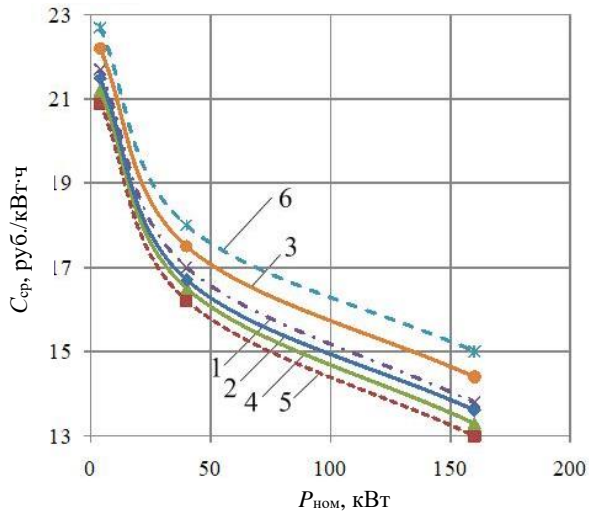


Рис. 5. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

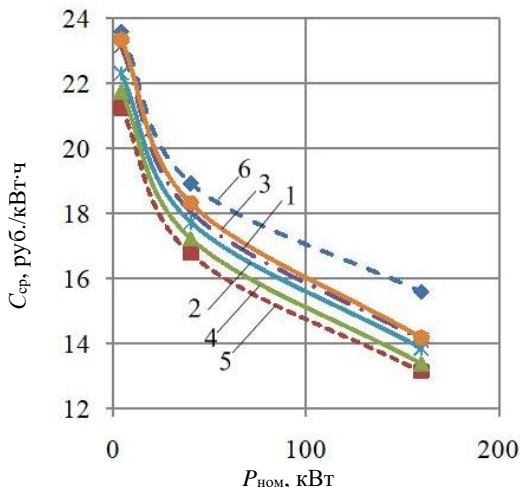


Рис. 6. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (50 % номинального значения)

На рис. 7-10 представлены зависимости снижения стоимости электроэнергии, вырабатываемой рассматриваемыми вариантами ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения при частичной нагрузке, от номинальной мощности электростанции $P_{ном.}$. Зависимости представлены соответственно для частичной нагрузки электростанции, равной 50, 60, 70 и 80 % номинального значения.

Снижение стоимости энергии, вырабатываемой ДГПЧВ:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{срДГПЧВ} - C_{срДГУ}}{C_{срДГУ}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $C_{срДГПЧВ}$ — средняя стоимость кВтч энергии за нормативный период эксплуатации для ДГПЧВ; $C_{срДГУ}$ — средняя стоимость кВтч энергии за нормативный период эксплуатации для ДГУ постоянной частоты вращения.

Как видно из рис. 7, при мощности нагрузки ДГПЧВ, составляющей 80 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения наблюдается только у ДГПЧВ на основе МПЧ в диапазоне номинальных мощностей электростанций менее 3 кВт и более 70 кВт и при мощности $P_{ном.} = 160$ кВт достигает 3,5 %.

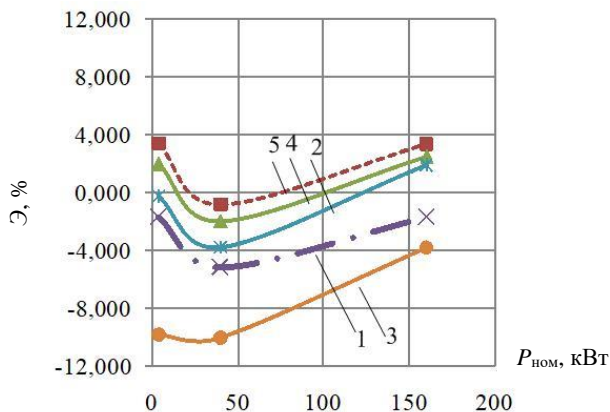


Рис. 7. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (80 % номинального значения)

При нагрузке ДГПЧВ, составляющей 70 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения (рис. 8) наблюдается у всех вариантов ДГПЧВ во всем рассматриваемом диапазоне номинальных мощностей электростанций. Причем с увеличением номинальной мощности электростанции стоимость кВт·ч снижается. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается у ДГПЧВ на основе МПЧ ($\mathcal{E} = 9\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт), наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора ($\mathcal{E} = 3,5\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт).

При нагрузке ДГПЧВ, составляющей 60 % и 50 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения (рис. 9 и 10) наблюдается также у всех вариантов ДГПЧВ во всем рассматриваемом диапазоне номинальных мощностей электростанций. Также с увеличением номинальной мощности электростанции стоимость кВт·ч снижается. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается у ДГПЧВ на основе МПЧ (при нагрузке, равной 60 % номинального значения, $\mathcal{E} = 12\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт; при нагрузке, равной 50 % номинального значения, $\mathcal{E} = 16\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт), наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора (при нагрузке, равной 60 % номинального значения, $\mathcal{E} = 6\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт; при нагрузке, равной 50 % номинального значения, $\mathcal{E} = 9\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт).

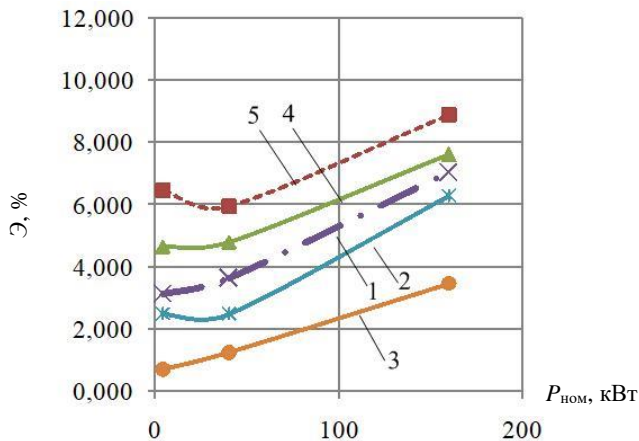


Рис. 8. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДППЧ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (70 % номинального значения)

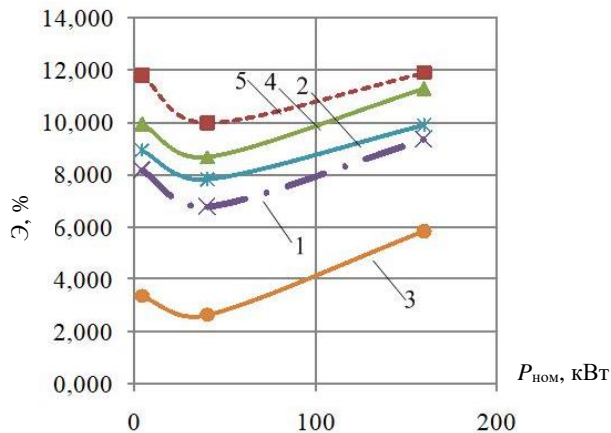


Рис. 9. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДППЧ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

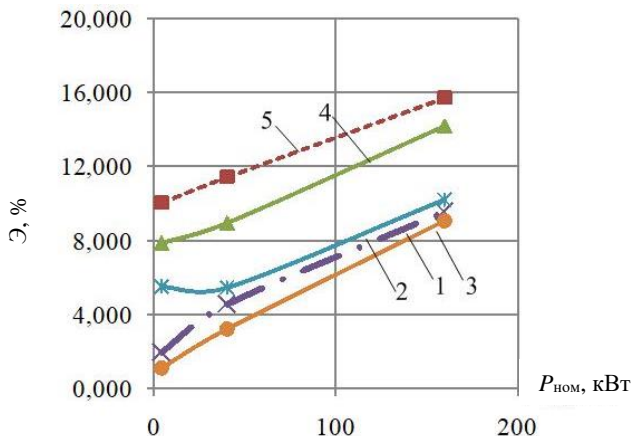


Рис. 10. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

Таким образом, для ДГПЧВ большей номинальной мощности характерна более низкая стоимость вырабатываемой энергии.

IV. Выводы

1. Техничко-экономическое сравнение различных вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения целесообразно проводить по средней за период эксплуатации стоимости кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой электростанцией.

2. При мощности нагрузки ДГПЧВ, составляющей менее 70 % номинального значения, средняя за период эксплуатации стоимость кВтч энергии исследуемых вариантов ДГПЧВ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения во всем диапазоне рассматриваемых номинальных мощностей электростанций.

3. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается также у ДГПЧВ на основе МПЧ, наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора.

Библиографический список

- [1] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 53-57.
- [2] Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 26-29.
- [3] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
- [4] Орлов А.В., Путятинский В.А., Сапожников В.В. Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения // Судостроение. 1976. № 10. С. 28-29.
- [5] Алешков О.А. Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: автореф. дис. канд. техн. наук, АлтГТУ, Барнаул, 2009. – 16 с.
- [6] Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 6. С. 80-82.
- [7] Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Исследование работы инверторной дизельной электростанции на частичных характеристиках дизеля // Электричество. 2009. № 12. С. 36а-40.
- [8] Малоземов А.А. Повышение эффективности многофункциональных энерготехнологических комплексов совершенствованием двигатель-генераторных установок: автореф. дис. докт. техн. наук, ЮУрГУ, Челябинск, 2011. – 34 с.
- [9] Обухов С.Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: дисс. докт. техн. наук, ТПУ, Томск, 2013. – 392 с.
- [10] Шакарян Ю.Г., Долуденко А.Н., Жораев Т.Ю., Новиков А.Н., Новиков Н.Л. Разработка многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbc> (дата обращения 21.04.2020).
- [11] Dar'enkov A.B., Guzev S.A., Fedorov O.V. Autonomous power plant with variable speed based on multi-windings generator // Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017», Май 16-19, 2017, Челябинск, Россия. 2017. № 8076250. P. 1-5.
- [12] Dar'enkov A., Samoyavchev I., Khvatov O., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion // Int. Conf. «International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ISMAA», Февраль 25-27, 2017, Малакка, Малайзия. МАТЕС Web of Conferences, 2017. Vol. 108. № 14002.
- [13] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С. Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения // Эксплуатация морского транспорта. 2013. № 1 (71). С. 47-50.

A.B. Dar'enkov, O.S. Khvatov

EVALUATION OF AVERAGE COST OF GENERATED ELECTRICITY FOR OPERATION PERIOD OF VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR SET

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One of the directions of development of distributed energy in Russia is the development of variable speed diesel generator sets. Adjusting the speed of the internal combustion engine shaft in the function of load power reduces the specific fuel consumption by more than 30 %. The paper discusses options for constructing variable speed diesel generator sets. The average cost of generated electricity for the operation period of variable speed diesel generator sets have been estimated.

Keywords: cost of electricity, diesel generator, frequency converter, variable speed diesel generator, synchronous generator.

References

- [1] O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov and I.M. Tarasov, «Diesel-generator power plant with shaft frequency rotation», *Vestnik IGEU*, vol. 2, pp. 53-57, 2010.
- [2] A.B. Dar'enkov and O.S. Khvatov, «Avtonomnaya dizel'naya elektrostanciya s nejrosetevym zadatchikom ekonomichnogo rezhima [Autonomous diesel power station with an economy mode setting device based on a neural network]», *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 26-29, 2013 (in Russian).
- [3] O.S. Khvatov and A.B. Dar'enkov, «Power plant based on a variable-speed diesel generator», *Russian Electrical Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 145-149, 2014.
- [4] A.V. Orlov, V.A. Putyatinsky and V.V. Sapozhnikov, «Perspektivy sozdaniya dizel'-elektricheskikh ustanovok s peremennoj chastotoj vrashcheniya [Prospects for the creation of diesel electric sets with variable rotation speed]», *Sudostroenie [Shipbuilding]*, № 10, pp. 28-29, 1976 (in Russian).
- [5] O.A. Aleshkov, «Povyshenie toplivnoj ekonomichnosti pervichnogo dizelya v sostave mnogofunktional'nogo energotekhnologicheskogo kompleksa optimizaciej skorostnogo rezhima [Improving the fuel economy of a primary diesel engine as part of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode]», Cand. of Tech. S. thesis, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, 2009 (in Russian).
- [6] B.V. Lukutin, G.N. Klimova, S.G. Obukhov, E.A. Shutov, N.M. Parnikov, «Formirovanie energoeffektivnykh rezhimov dizel'noj elektrostancii invertornogo tipa [Formation of energy-efficient modes of an inverter-type diesel power station]», *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, no. 6, pp. 80-82, 2009 (in Russian).

- [7] B.V. Lukutin, G.N. Klimova, S.G. Obukhov, E.A. Shutov, N.M. Parnikov, «Issledovanie raboty invertornoj dizel'noj elektrostancii na chastichnyh karakteristikah dizelya [The study of the inverter diesel power plant on the partial characteristics of a diesel engine]», *Elektrichestvo*, no. 12, pp. 36a-40, 2009 (in Russian).
- [8] A.A. Malozyomov, «Povyshenie effektivnosti mnogofunkcional'nyh energotekhnologicheskikh kompleksov sovershenstvovaniem dvigatel'-generatorynyh ustanovok [Improving the efficiency of multifunctional energy technology complexes by improving engine-generator sets]», Doctor of Tech. S. thesis, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, 2011 (in Russian).
- [9] S.G. Obukhov, «Povyshenie effektivnosti kombinirovannyh avtonomnyh sistem elektrosnabzheniya s vobnovlyaemyimi istochnikami energii [Improving the efficiency of combined autonomous power supply systems with renewable energy sources]», Doctor of Tech. S. thesis, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2013 (in Russian).
- [10] Yu.G. Shakaryan, A.N. Doludenko, T.Yu. Zhoraev, A.N. Novikov and N.L. Novikov, «Razrabotka mnogofunkcional'nogo energeticheskogo kompleksa na osnove gibridnoj vetrodizel'noj ustanovki s nakopitelem energii [Development of a multifunctional energy complex based on a hybrid wind-diesel engine with energy storage]», [Online]. Available at: <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbc> [Accessed: Apr. 21, 2020] (in Russian).
- [11] A.B. Dar'enzkov, S.A. Guzev and O.V. Fedorov, «Autonomous power plant with variable speed based on multi-windings generator», in proc. *2017 Int. Conf. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*, May 16-19, 2017, Chelyabinsk, Russia, no. 8076250, pp. 1-5.
- [12] A. Dar'enzkov, I. Samoyavchev, O. Khvatov and V. Sugakov, «Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion», in proc. *Int. Conf. on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ICMAA*, 2017, Feb. 25-27, Malacca, Malaysia. MATEC Web of Conferences, 2017. Vol. 108. № 14002.
- [13] O.S. Khvatov, A.B. Darienzkov and I.S. Samoiavchev, «The fuel profitability of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft», *Jekspluatacija morskogo transporta*, no. 1, pp. 75-50, 2013.

УДК 621.311+004.43

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_43

О.В. Туркина, В.С. Чайкин, А.В. Иванов

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЯЗЫКА РАЗМЕТКИ SCL ПРИ РАЗРАБОТКЕ ФАЙЛОВ ТИПА SSD В ХОДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

АО «Федеральный испытательный центр»

Представлены основы информационного и коммуникационного взаимодействия интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), совокупность которых образует инфокоммуникационную сеть на энергообъекте и выполняет функции вторичных цепей: функции управления, автоматике и релейной защиты. Описана роль языка разметки System Configuration description Language (SCL) в обеспечении взаимодействия ИЭУ. Рассмотрены элементы электрической части электросетевых объектов, описание которых на языке разметки SCL не регламентировано в явном виде в МЭК 61850, а именно: заземляющее устройство, нейтраль силового трансформатора, устройство регулирования под нагрузкой (РН) и автотрансформатор. Представлены возможные варианты описания перечисленных элементов электрической части в SCL файлах типа System Specification Description (SSD). Описания основаны на анализе последних на текущий момент обновлений SCL схемы (версия 2007В4), регламентированной структуры SCL документа, синтаксиса и семантики языка разметки SCL и направлены на повышение читабельности SCL файлов. Для обоснования корректности описаний приведены соответствующие фрагменты SCL схемы.

Ключевые слова: МЭК 61850, цифровизация, SCL, SCL схема, SSD.

1. Введение

Основной целью серии стандартов МЭК 61850 является обеспечение взаимодействия (interoperability) между установленными на энергообъекте интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ). Под взаимодействием в данном случае понимается возможность двух и более ИЭУ одного или разных производителей обмениваться информацией и использовать ее для корректного выполнения конкретных специализированных функций [1, 2].

Очевидно, что информационный обмен между ИЭУ разных производителей может существовать только в случае, если все заинтересованные стороны используют единый (общий, разделяемый всеми), регламентирующий все требуемые аспекты коммуникации, источник. Примени-

тельно к электроэнергетике заинтересованными сторонами являются производители оборудования, проектировщики, эксплуатирующие организации и т.д., а единым источником – МЭК 61850.

Для достижения цели МЭК 61850 регламентирует информационную модель и средство для ее описания – язык разметки System Configuration Language (SCL) [3, 4], основанный на расширяемом языке разметки eXtensible Markup Language (XML) [5].

SCL используется при разработке электронной проектной документации и структурирует информацию согласно правилам лексики и синтаксиса XML с целью обеспечения возможности ее автоматизированного анализа различными программными средствами разработки и конфигурирования электронной документации [6]. SCL файлы типа System Specification Description (SSD) являются примером такой документации. SSD файл содержит структурированную информацию об однолинейной электрической схеме энергообъекта и функциональных возможностях используемого оборудования [7, 8]. В ходе разработки SCL файлов типа SSD для отечественных энергообъектов авторами статьи было выявлено, что правила описания отдельных элементов электрической части электросетевых объектов на языке SCL не представлены явно в текстовом описании или вообще отсутствуют.

Статья содержит пояснения для элементов электрической части электросетевых объектов, представление которых в SCL файле типа SSD может вызвать у специалистов затруднения, а также возможные подходы для описания элементов электрической части, не затронутых МЭК 61850.

II. Описание заземляющего устройства энергообъекта в SCL файле типа SSD

Для представления потенциала «земли» (нулевой потенциал) SCL содержит зарезервированное (predefined – англ. предопределенный, заранее установленный) значение «grounded» атрибута name SCL элемента <ConnectivityNode></ConnectivityNode> [3, 4]. В то же время МЭК 61850-6 однозначно не регламентирует описание заземляющего устройства, но устанавливает следующие общие ограничения:

- наименования SCL элементов (значения атрибутов name) одного уровня иерархии внутри секции Substation должны быть уникальными, обеспечивая тем самым уникальность ссылок на каждый объект SCL файла (так называемые path names) [9];
- SCL элемент <ConnectivityNode></ConnectivityNode> в соответствии с SCL схемой может быть дочерним элементом исключительно SCL элементов <Bay></Bay> и <Line></Line> [3, 4].

Соответствующие фрагменты SCL схемы представлены на рис. 1, 2.

```

<xs:complexType name="tBay">
  <xs:complexContent>
    <xs:extension base="tEquipmentContainer">
      <xs:sequence>
        <xs:element name="ConductingEquipment" type="tConductingEquipment" minOccurs="0"
maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="ConnectivityNode" type="tConnectivityNode" minOccurs="0"
maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="Function" type="t-function" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
          <xs:unique name="uniqueSubFunctionInFunction">
            <xs:selector xpath="/scl:SubFunction"/>
            <xs:field xpath="@name"/>
          </xs:unique>
          <xs:unique name="uniqueGeneralEquipmentInFunction">
            <xs:selector xpath="/scl:GeneralEquipment"/>
            <xs:field xpath="@name"/>
          </xs:unique>
        </xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:extension>
  </xs:complexContent>
</xs:complexType>

```

Рис. 1. Фрагмент SCL схемы, регламентирующий правило вложенности элемента <ConnectivityNode></ConnectivityNode> в элемент <Bay></Bay>

```

<xs:complexType name="tLine">
  <xs:complexContent>
    <xs:extension base="tGeneralEquipmentContainer">
      <xs:sequence>
        <xs:element name="Voltage" type="tVoltage" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="ConductingEquipment" type="scl:tConductingEquipment" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="ConnectivityNode" type="scl:tConnectivityNode" minOccurs="0"
maxOccurs="unbounded"/>
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="type" type="tLineType" use="optional"/>
      <xs:attribute name="nomFreq" use="optional">
        <xs:simpleType>
          <xs:restriction base="xs:decimal">
            <xs:minInclusive value="0"/>
          </xs:restriction>
        </xs:simpleType>
      </xs:attribute>
      <xs:attribute name="numPhases" use="optional">
        <xs:simpleType>
          <xs:restriction base="xs:unsignedByte">
            <xs:minExclusive value="0"/>
          </xs:restriction>
        </xs:simpleType>
      </xs:attribute>
    </xs:extension>
  </xs:complexContent>
</xs:complexType>

```

Рис. 2. Фрагмент SCL схемы, регламентирующий правило вложенности элемента <ConnectivityNode></ConnectivityNode> в элемент <Line></Line>

В большинстве случаев разработчики SCL файлов типа SSD, руководствуясь SCL схемой (рис. 1, 2), описывают подключение оборудования к заземляющему устройству с помощью объявленных «локально» SCL

элементов <ConnectivityNode></ConnectivityNode>. Под «локальным» объявлением подразумевается вложение <ConnectivityNode></ConnectivityNode> в элемент <Bay></Bay>, описывающий состав присоединения распределительного устройства. Пример «локального» объявления представлен на рис. 3. При данном подходе каждый <Bay></Bay> должен содержать свой <ConnectivityNode></ConnectivityNode> с именем «grounded». Учитывая, что с точки зрения электрического подключения заземляющее устройство может абстрактно рассматриваться как точка, данный подход не совсем логичен.

```

<Substation name="ObjName" desc="ObjName">
  <VoltageLevel name="KV10" desc="PY-10кВ">
    <Voltage unit="V" multiplier="k">10</Voltage>
    <Bay name="MainBay" desc="Описываемое присоединение">
      <ConductingEquipment name="QS1" desc="P1" type="DIS">
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/E3" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="E3"/>
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L1" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L1"/>
      </ConductingEquipment>
      <ConductingEquipment name="Q1" desc="B1" type="CBR">
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L1" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L1"/>
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L2" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L2"/>
      </ConductingEquipment>
      <ConductingEquipment name="QS2" desc="P2" type="DIS">
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L2" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L2"/>
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L3" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L3"/>
      </ConductingEquipment>
      <ConductingEquipment name="QSG1" desc="3H1" type="DIS">
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/grounded" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="grounded"/>
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L3" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L3"/>
      </ConductingEquipment>
      <ConductingEquipment name="CLin1" desc="OKJ1" type="IFL">
        <Terminal connectivityNode="ObjName/KV10/MainBay/L3" substationName="ObjName"
          voltageLevelName="KV10" bayName="MainBay" cNodeName="L3"/>
      </ConductingEquipment>
      <ConnectivityNode name="E3" pathName="ObjName/KV10/MainBay/E3"/>
      <ConnectivityNode name="L1" pathName="ObjName/KV10/MainBay/L1"/>
      <ConnectivityNode name="L2" pathName="ObjName/KV10/MainBay/L2"/>
      <ConnectivityNode name="L3" pathName="ObjName/KV10/MainBay/L3"/>
      <ConnectivityNode name="grounded" pathName="ObjName/KV10/MainBay/grounded"/>
    </Bay>
  </VoltageLevel>
</Substation>

```

Рис. 3. Пример «локального» объявления
<ConnectivityNode></ConnectivityNode>

Для улучшения читаемости SCL документа и его логики целесообразно использование одного, «глобального» элемента `<ConnectivityNode>`. В связи с этим авторами предлагается следующий подход описания заземляющего устройства:

- создать в секции `Substation` дополнительный элемент `<VoltageLevel>`;
- в содержании элемента `<Voltage>` записать «0»;
- создать в дополнительном элементе `<VoltageLevel>` элемент `<Bay>` с дочерним элементом `<ConnectivityNode>`, значение атрибута `name` которого установить как «grounded».

Реализация подхода представлена на рис. 4. «Глобальный» `<ConnectivityNode>` может использоваться любым `<Bay>` при выполнении единственного условия: рассматриваемые `<Bay>` и «глобальный» `<ConnectivityNode>` вложены в один и тот же элемент `<Substation>`.

```

<VoltageLevel name="Zero potential" desc="Нулевой потенциал">
  <Voltage unit="V">0</Voltage>
  <Bay name="Ground" desc="Заземлитель">
    <ConnectivityNode name="grounded"
      pathName="SubstationName/Zero potential/Ground/grounded"/>
  </Bay>
</VoltageLevel>

<ConductingEquipment name="DSG1" desc="SH1" type="DIS">
  <Terminal connectivityNode="SubstationName/Zero potential/Ground/grounded" substationName="SubstationName"
    voltageLevelName="Zero potential" bayName="Ground" cNodeName="grounded"/>
  <Terminal connectivityNode="SubstationName/110 kV/BayName/L3" substationName="SubstationName"
    voltageLevelName="110 kV" bayName="BayName" cNodeName="L3"/>
</ConductingEquipment>

<ConductingEquipment name="DSG3" desc="SH3" type="DIS">
  <Terminal connectivityNode="SubstationName/Zero potential/Ground/grounded" substationName="SubstationName"
    voltageLevelName="Zero potential" bayName="Ground" cNodeName="grounded"/>
  <Terminal connectivityNode="SubstationName/10 kV/BayName/Li4" substationName="SubstationName"
    voltageLevelName="10 kV" bayName="BayName" cNodeName="Li4"/>
</ConductingEquipment>

```

Создание дополнительного элемента `<VoltageLevel>`

Элементы `<Terminal>`, находящиеся в разных `<VoltageLevel>`, ссылаются на один «глобальный» `<ConnectivityNode>`

Рис. 4. Реализация предложенного подхода к описанию заземляющего устройства в SCL файле

III. Описание заземления нейтрали силового трансформатора в SCL файле типа SSD

Представленный в [3, 4] пример SCL файла типа SSD для подстанции «Baden220_132» является неполным с точки зрения описания заземления нейтрали силового трансформатора.

Согласно последним обновлениям SCL схемы (версия 2007B4) [3-5, 7, 10] в элемент `<TransformerWinding>` может быть вложен элемент `<NeutralPoint>` (рис. 5). `<NeutralPoint>`

</NeutralPoint> и <Terminal></Terminal> идентичны по своей структуре и набору атрибутов, так как имеют один и тот же тип (одинаковое значение атрибута type=«tTerminal» в SCL схеме). До версии 2007В.2013-09-25 нейтральная точка силового трансформатора описывалась с помощью атрибутов элемента <Terminal></Terminal> (starPoint, neutralPoint). SCL файл, использующий для описания заземления нейтрали атрибуты starPoint или neutralPoint, согласно требованиям SCL схемы версии 2007В4 будет считаться невалидным.

```

<xs:complexType name="tTransformerWinding">
  <xs:complexContent>
    <xs:extension base="tAbstractConductingEquipment">
      <xs:sequence>
        <xs:element name="TapChanger" type="tTapChanger" minOccurs="0">
          <xs:unique name="uniqueLNodeInTapChanger">
            <xs:selector xpath="/scl:LNode"/>
            <xs:field xpath="@lnInst"/>
            <xs:field xpath="@lnClass"/>
            <xs:field xpath="@iedName"/>
            <xs:field xpath="@ldInst"/>
            <xs:field xpath="@prefix"/>
          </xs:unique>
          <!--<xs:unique name="uniqueSubEquipmentLTC">
            <xs:selector xpath="/scl:SubEquipment"/>
            <xs:field xpath="@name"/>
            <xs:field xpath="@phase"/>
          </xs:unique-->
          <xs:unique name="uniqueChildNameInLTC">
            <xs:selector xpath="/*"/>
            <xs:field xpath="@name"/>
          </xs:unique>
        </xs:element>
        <xs:element name="NeutralPoint" type="tTerminal" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="EqFunction" type="scl:EqFunction" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
          <xs:unique name="uniqueLNodeInFuncForPTW">
            <xs:selector xpath="/scl:LNode"/>
            <xs:field xpath="@lnInst"/>
            <xs:field xpath="@lnClass"/>
            <xs:field xpath="@iedName"/>
            <xs:field xpath="@ldInst"/>
          </xs:unique>
        </xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:extension>
  </xs:complexContent>
</xs:complexType>

```

Рис. 5. Фрагмент SCL схемы, регламентирующий правило вложенности элемента <NeutralPoint></NeutralPoint> в элемент <TransformerWinding></TransformerWinding>

При описании глухозаземленной нейтрали силового трансформатора в SCL файле типа SSD <NeutralPoint></NeutralPoint> ссылается на заранее объявленный <ConnectivityNode></ConnectivityNode> с name=«grounded». В случае эффективно-, резистивно- или резонансно-заземленной нейтрали: <NeutralPoint></NeutralPoint> и вложенный в секцию ConductingEquipment, используемую для SCL описания нейтралеобразующего оборудования (заземляющий нож, резистор, реактор и т.д.), <Terminal></Terminal> должны ссылаться на один <ConnectivityNode>

</ConnectivityNode>. В качестве примера на рис. 6 представлено описание силового трансформатора с глухозаземленной нейтралью в SCL файле.

```
<PowerTransformer name="T-1" desc="Трансформатор_1" type="PTR">
  <TransformerWinding name="TW1" desc="BH" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV1/MainBay1/L1" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV1" bayName="MainBay1" cNodeName="L1" />
    <NeutralPoint connectivityNode="ObjName/KV0/Ground/grounded" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV0" bayName="Ground" cNodeName="grounded" />
  </TransformerWinding>
  <TransformerWinding name="TW2" desc="HH" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV2/MainBay2/L2" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV2" bayName="MainBay2" cNodeName="L2" />
  </TransformerWinding>
</PowerTransformer>
```

Концы обмотки образуют нейтральную точку, которая соединяется с заземляющим устройством. (Схема соединения обмотки ВН: Yn)

Рис. 6. Пример описания силового трансформатора с глухозаземленной нейтралью в SCL файле

IV. Описание РПН силового трансформатора в SCL файле типа SSD

Ситуация с описанием устройства регулирования под нагрузкой (РПН) силового трансформатора аналогична ситуации с описанием заземления нейтрали силового трансформатора: пример, представленный в [3, 4], не содержит описания устройства РПН силового трансформатора в SCL файле типа SSD. В элемент <TransformerWinding></TransformerWinding> помимо <NeutralPoint></NeutralPoint> может быть также вложен элемент <TapChanger></TapChanger>, предназначенный для описания РПН (рис. 5).

В качестве примера на рис. 7 представлено дополненное описание силового трансформатора, в обмотке высокого напряжения (ВН) которого установлено устройство РПН.

```
<PowerTransformer name="T-1" desc="Трансформатор_1" type="PTR">
  <TransformerWinding name="TW1" desc="BH" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV1/MainBay1/L1" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV1" bayName="MainBay1" cNodeName="L1" />
    <TapChanger name="LTC 1" desc="РПН T-1" type="LTC"/>
    <NeutralPoint connectivityNode="ObjName/KV0/Ground/grounded" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV0" bayName="Ground" cNodeName="grounded" />
  </TransformerWinding>
  <TransformerWinding name="TW2" desc="HH" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV2/MainBay2/L2" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV2" bayName="MainBay2" cNodeName="L2" />
  </TransformerWinding>
</PowerTransformer>
```

Рис. 7. Пример описания устройства РПН силового трансформатора в SCL файле

V. Описание автотрансформатора в SCL файле типа SSD

Основное отличие автотрансформатора от прочих силовых трансформаторов – наличие электрической связи между обмоткой высокого и среднего напряжения (СН). Фактически вывод обмотки СН автотрансформатора – это дополнительный вывод обмотки ВН. Отметим также, что в большинстве случаев автотрансформаторы используются в сетях с глухо- и эффективно заземленной нейтралью.

В связи с указанными особенностями, описание автотрансформатора до введения элемента `<NeutralPoint></NeutralPoint>` (до версии 2007В.2013-09-25 SCL схемы) было невозможно, так как при описании обмотки ВН (и, соответственно, СН как ее части) требовалось минимум три вложенных в `<TransformerWinding></TransformerWinding>` элемента `<Terminal></Terminal>`: для описания силовых выводов обмоток ВН и СН и для вывода нейтральной точки. При этом, согласно SCL схеме, `<TransformerWinding></TransformerWinding>` может иметь максимум два дочерних элемента `<Terminal></Terminal>`.

На рис. 8 в качестве примера представлено описание силового автотрансформатора с соединением обмотки ВН по схеме «звезда с нулем», глухозаземленной нейтралью и с устройством РПН.

```
<PowerTransformer name="T-1" desc="Автотрансформатор_1" type="PTR">
  <TransformerWinding name="TW1_2" desc="ВН/СН" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV1/MainBay1/L1" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV1" bayName="MainBay1" cNodeName="L1" />
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV2/MainBay2/L2" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV2" bayName="MainBay2" cNodeName="L2" />
    <TapChanger name="LTC_1" desc="РПН T-1" type="LTC"/>
    <NeutralPoint connectivityNode="ObjName/KV0/Ground/grounded" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV0" bayName="Ground" cNodeName="grounded" />
  </TransformerWinding>
  <TransformerWinding name="TW3" desc="НН" type="PTW">
    <Terminal connectivityNode="ObjName/KV3/MainBay3/L3" substationName="ObjName"
      voltageLevelName="KV3" bayName="MainBay3" cNodeName="L3" />
  </TransformerWinding>
</PowerTransformer>
```

Рис. 8. Пример описания силового автотрансформатора в SCL файле

VI. Заключение

Возможность обеспечения коммуникационного взаимодействия ИЭУ на энергообъектах напрямую зависит от корректности понимания и применения информационной модели МЭК 61850 и языка разметки SCL. Однако, большинство описаний, представленных в МЭК 61850, носят абстрактный характер. Это необходимо для легкой адаптации стандартов к будущим информационным технологиям [1, 9], но в то же время может привести к неправильной реализации требований стандартов. Поэтому во

многих случаях текстового описания SCL схемы и комментариев в [3, 4] недостаточно для полного понимания логики использования SCL элементов и атрибутов. Для комплексного понимания SCL как языка и его корректного применения, т.е., для разработки «валидных» файлов электронной проектной документации, необходимо использовать SCL схему как первоисточник. При этом стоит учитывать, что обновление SCL схемы может осуществляться чаще, чем обновление раздела.

Использование всеми заинтересованными сторонами единых SCL описаний элементов электрической части электросетевых объектов упростит организацию коммуникационного взаимодействия ИЭУ, а также позволит применять средства автоматизированного анализа при разработке файлов электронной проектной документации.

© Туркина О.В., 2020

© Чайкин В.С., 2020

© Иванов А.В., 2020

Библиографический список

- [1] МЭК 61850-1. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 1: Введение и обзор. Введ. 2013-03. МЭК: 2013. – 78 с.
- [2] МЭК 61850-2. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 2: Словарь терминов. Введ. 2019-04. МЭК: 2019. – 44 с.
- [3] МЭК 61850-6. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2009-12. МЭК: 2009. – 220 с.
- [4] МЭК 61850-6. Изм. 1. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2018-06. МЭК: 2018. – 274 с.
- [5] Расширяемый язык разметки (XML) 1.0, редакция 5. Консорциум Всемирной паутины (W3C), 2008. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/xml/> (дата обращения 20.06.2020).
- [6] Указ Президента РФ «О стратегии научно-технического развития Российской Федерации» от 1 декабря 2016 г. № 642 // Сайт Президента России. [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>. (дата обращения 20.06.2020).
- [7] Соснина Е.Н., Иванов А.В. Особенности проектирования электротехнических комплексов при переходе к цифровой экономике // VI Всерос. науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики», декабрь 17-18, 2020, Нижний Новгород, Россия (*в печати*).
- [8] Соснина Е.Н., Иванов А.В. Проектирование электротехнических комплексов в условиях цифровой экономики // XII Всерос. науч.-технич. конф. «Информа-

- ционные технологии в электротехнике и электроэнергетике», июнь, 5, 2020, Чебоксары, Россия (*в печати*).
- [9] МЭК 61850-5. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 5: Требования к связи для функций и моделей устройств. Введ. 2013-01. МЭК: 2013. – 310 с.
- [10] XML схема, редакция 2. Консорциум Всемирной паутины (W3C), 2004. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/xmlschema-0/> (дата обращения 20.06.2020).

O.V. Turkina, V.S. Chaykin, A.V. Ivanov

PRACTICAL ASPECTS RELATED TO APPLICATION OF MARKUP LANGUAGE SCL IN DEVELOPING SSD FILES DURING POWER FACILITIES DESIGN PROCESS

JSC «Federal Test Center»

The article deals with data communication basis of intelligent electronic devices (IED) which in combination form communication network of energy facilities and serve as secondary circuits: perform functions of control, automation and protection. The role of markup language System Configuration description Language (SCL) in IED interoperation is presented. The article is focused on electrical elements of power networks specifications aren't explicitly presented in IEC 61850, namely: earthing arrangement, neutral point of power transformer, load tap changer and autotransformer. Possible SCL specifications of the elements for System Specification Description (SSD) files are presented. Specifications are based on analysis the latest amendments of SCL schema (version 2007B4) as of this writing, regulated structure of SCL document, syntax and semantics of SCL and focused on improving SCL files readability. The corresponding blocks of the SCL schema are presented to demonstrate validity of the specifications.

Keywords: IEC 61850, digitalization, SCL, SCL schema, SSD.

References

- [1] Communication networks and systems for power utility automation – Part 1: Introduction and overview, IEC 61850-1, March 2013.
- [2] Communication networks and systems for power utility automation – Part 2: Glossary, IEC 61850-2, Apr. 2019.
- [3] Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs, IEC 61850-6, Dec. 2009.
- [4] Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs, IEC 61850-6. Amd. 1, June 2018.

-
- [5] Extensible Markup language (XML) 1.0, Edition 5. World Wide Web Consortium (W3C), 2008. [Online]. Available at: <https://www.w3.org/TR/xml/>. [Accessed: Jun. 20, 2020].
- [6] Russian Federation Presidential Decree «O strategii nauchno-tehnicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii» [Strategies for Science and Technology Development] of 1 December 2016 № 642 // Internet website of the president of Russia. [Online]. Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>. [Accessed: Jun. 20, 2020]. (in Russian).
- [7] E.N. Sosnina and A.V. Ivanov, «Osobennosti proyektirovaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov pri perekhode k tsifrovoy ekonomike [The features of digital electrotechnical complex designing in transition to the digital economy]», in proc. *VI All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Dec. 17-18, 2020, Nizhniy Novgorod, Russia (in Russian), *in press*.
- [8] E.N. Sosnina and A.V. Ivanov, «Proyektirovaniye elektrotekhnicheskikh kompleksov v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Designing of electrotechnical complex in a digital economy]», in proc. *XII All-Russian Conf. Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike [Information technology in electric-power industry and electrotechnics]*, Jun. 5, 2020, Cheboksary, Russia (in Russian), *in press*.
- [9] Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models, IEC 61850-5, Jan. 2013.
- [10] XML schema, Edition 2. World Wide Web Consortium (W3C), 2004. [Online]. Available at: <https://www.w3.org/TR/xmlschema-0/> [Accessed: Jun. 20, 2020].

УДК 621.311.6

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_54

В.Л. Осокин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ЭЛЕКТРОГАЗОРАЗРЯДНЫЙ РЕАКТОР» В MATHCAD

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Широкое использование озона в промышленности возможно только при работе надежных электрогенераторов озона. Электрогенератором озона или озонатором служит электрогазоразрядный реактор. Эффективность его работы во многом определяется параметрами высоковольтных источников питания. Это обуславливает необходимость рассматривать источник питания и озонатор в целом как единую систему «источник питания – озонатор».

Разработана программа решения нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши, описывающих процесс в системе «источник питания – электрогазоразрядный реактор» (СИПЭР). Приведены нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие процессы в СИПЭР, и программа для их решения в интегрированном пакете MathCad. Нелинейная характеристика озонатора задается с применением функции с условием. Для решения использован метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом интегрирования. Приведены результаты решения в виде мгновенных значений напряжений и токов в озонаторе при различных значениях питающего напряжения.

Кривая тока имеет несинусоидальный характер. Показано, что форму кривой тока озонатора можно улучшить за счет демпфирования индуктивной катушкой гармонических составляющих, что повышает его электромагнитную совместимость.

Ключевые слова: вольтамперная характеристика озонатора, газовый промежуток, диэлектрический барьер, озонатор, электрогазоразрядный реактор, электрогенератор озона, электронно-ионная технология.

I. Введение

Применение озона в большинстве отраслей промышленности и в агропромышленном комплексе дает существенный экономический эффект. Многие технологии с применением озона продолжают успешно развиваться. За этим направлением закрепилось название – электронно-ионная технология; сфера его применения в последнее время значительно расширилась. Современная техническая база и новые полупроводниковые приборы позволили за счет автоматизации процессов повысить интенсивность работы аппаратов электронно-ионной технологии и сделать их более надеж-

ными. В настоящее время рассматривается вопрос не только о насыщении воздуха отрицательными аэроионами, но и его обеспыливания и очистке от болезнетворных бактерий путем воздействия озона. Для решения этих проблем и достижения указанных целей как нельзя лучше подходит способ электрогазоочистки, который позволяет в одном аппарате решать одновременно три задачи: обеспыливание, ионизация и озонирование воздуха. Эти задачи очень непростые и требуют дальнейших глубоких теоретических исследований.

Широкое использование озона возможно только при работе надежных электрогенераторов озона. Разработка таких электрогенераторов требует углубленного анализа их работы и дальнейшего совершенствования конструкций. Эффективность работы озонаторов определяется, в первую очередь, параметрами применяемых высоковольтных источников питания. Поэтому следует не анализировать процессы по отдельности в каждом элементе, а рассматривать электрогенератор озона как сложное устройство, включающее в себя электрогазоразрядный реактор и высоковольтный источник для его питания, проводить анализ этой сложной системы.

Многие вопросы создания теории электрического разряда в электрогазоразрядных реакторах при электросинтезе озона в настоящее время еще не решены до конца и требуют более глубокого изучения. Проблемам повышения энергетических показателей, расширения частотного диапазона и функциональности полупроводниковых преобразователей посвящены работы таких ученых, как А.М. Бамдас, В.И. Пантелеев, Ю.М. Голембиовский, Д.А. Тихомиров, Г.С. Зиновьев, А.С. Серебряков, Л.Э. Рогинская, Н.Ю. Лысов, С.В. Шапиро, N. Marham, А.И. Метельков, Шэнь Цин Тун, С. В. Вендин, А.Г. Возмилов, В.Ф. Сторчевой [1-8].

II. Цель и задачи исследования

В известных работах анализ процессов в озонаторе с учетом нелинейности его характеристик проводится, как правило, методом припасовывания. По данному методу весь цикл работы системы «источник питания – электрогазоразрядный реактор» (СИПЭР) делится на отдельные стадии, в течение которых свойства отдельных элементов системы не меняются, и процессы в каждой отдельной стадии описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями. При этом начальные условия в каждой последующей стадии формируются из конечных условий предыдущей стадии.

Аналитическое решение нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в электрогазоразрядном реакторе, указанным методом припасовывания достаточно трудоемко и дает невысокую точность при расчетах из-за вносимых в расчет упрощений. Целью исследо-

вания является разработка программы для решения численным методом Рунге-Кутта с фиксированным шагом нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс в СИПЭР, с помощью интегрированного пакета MathCad для анализа процессов при электросинтезе озона и улучшения электромагнитной совместимости рассматриваемой системы.

III. Материалы и методы

При анализе процессов в электрогазоразрядном реакторе будем считать, что высоковольтный источник питания имеет синусоидальную форму выходного питающего напряжения, а его внутреннее активное сопротивление равно R . Индуктивность источника питания принимаем равной нулю. Уравнение баланса мгновенных значений напряжений для схемы замещения СИПЭР:

$$R \cdot i + u_{\text{си}} + u_{\text{сб}} = u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

где i – ток; U_m – амплитуда питающего напряжения; ω – угловая частота; t – текущее время.

Мгновенное значение тока из (1):

$$i = \frac{u(t) - u_{\text{сб}} - u_{\text{си}}}{R}. \quad (2)$$

Для решения нелинейных дифференциальных уравнений в интегрированном пакете MathCad численным методом необходимо задать выражения для производных искомых величин, т.е., записать данные уравнения в форме Коши. Интегрирование дифференциальных уравнений проводим методом Рунге-Кутта четвертого порядка с шагом интегрирования – rkfixed.

Электрический ток цепи:

$$i = C_{\text{б}} \cdot \frac{du_{\text{сб}}}{dt}, \quad (3)$$

где $C_{\text{б}}$ – емкость диэлектрического барьера.

Используя (2) и (3), выразим производную напряжения на диэлектрическом барьере:

$$\frac{du_{\text{сб}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{б}}} \cdot i = \frac{1}{C_{\text{б}}} \cdot \left(\frac{u(t) - u_{\text{сб}} - u_{\text{си}}}{R} \right). \quad (4)$$

Соответственно, производная напряжения на газовом промежутке при отсутствии электрического разряда:

$$\frac{du_{\text{СП}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{П}}} \cdot i = \frac{1}{C_{\text{П}}} \cdot \left(\frac{u(t) - u_{\text{СБ}} - u_{\text{СП}}}{R} \right), \quad (4)$$

где $C_{\text{П}}$ – емкость газового промежутка.

При электрическом разряде напряжение на газовом промежутке (в случае его электрического пробоя) будет неизменным в течение интервала горения разряда. При этом производная напряжения на газовом промежутке:

$$\frac{du_{\text{СП}}}{dt} = 0. \quad (5)$$

На рис. 1 показаны матрицы начальных условий (x) и производных напряжений на конденсаторах СБ и СП $D(t, x)$, используемые для решения дифференциальных уравнений. Начальные условия (НУ) приняты нулевыми, поскольку в исходный момент времени напряжение на конденсаторах равно нулю.

Решение дифференциальных уравнений оозонатора

$U_m := 10000$ Амплитуда питающего напряжения В $T := 0.1$

$U_g := 4000$ Напряжение горения, В

$R := 5$ $C_p := 1 \cdot 10^{-6}$ $C_b := 4 \cdot 10^{-6}$ $u(t) := U_m \cdot \sin(314 \cdot t)$

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Начальные условия

$$D(t, x) := \left[\begin{array}{c} \frac{1}{C_b} \cdot \left(\frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \\ \text{if} \left(\frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} > 0, \text{if} \left(x_1 < U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R}, 0 \right), \text{if} \left(x_1 > -U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R}, 0 \right) \right) \end{array} \right]$$

$Z := \text{rkfixed}(x, 0, T, 10000, D)$ $n := 0..10000$ $t_n := \frac{T \cdot n}{10000}$ $ub_n := Z_{n,1}$ $up_n := Z_{n,2}$

$i_n := \frac{u(t_n) - ub_n - up_n}{R}$

Рис. 1. Матрица начальных условий (x) и матрица производных напряжений на конденсаторах $D(t, x)$:

C_b – емкость линейного конденсатора СБ; C_p – емкость нелинейного конденсатора СП; t – текущее время; x_0 и x_1 – переменные

Решение дифференциальных уравнений выдается в виде матрицы Z из трех столбцов. Первый столбец содержит точки t , в которых ищется решение, а второй и третий столбцы содержат результаты решения – значения напряжений на конденсаторах СБ и СП схемы замещения озонатора (переменные x_0 и x_1). Производная напряжения газового зазора записывается с помощью функции с условием if . В скобках функции if первоначально указывается проверяемое условие – «ток, протекающий в озонаторе, больше нуля?» Затем после запятой указывается выражение функции для случая, когда заданное условие выполняется, а после второй запятой записывается выражение функции для случая, если проверяемое условие не выполняется.

На рис. 2 приведены результаты расчета в виде графиков, на которых показаны мгновенные значения напряжений и токов в электрогазоразрядном реакторе при различных значениях выходного напряжения источника питания. Значение тока определяется из (2). Графики приведены для трех значений амплитуды питающего напряжения источника питания: $U_{m1} = 6$ кВ, $U_{m2} = 8$ кВ, $U_{m3} = 10$ кВ.

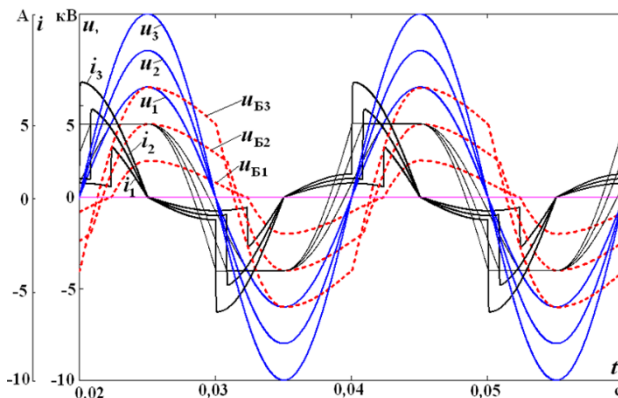


Рис. 2. Мгновенные значения напряжений и токов в электрогазоразрядном реакторе при разных значениях синусоидального напряжения источника питания

Из рис. 2 видно, что чем больше амплитуда питающего напряжения, тем раньше по фазе начинается пробой газового промежутка, при котором ток в электрогазоразрядном реакторе резко возрастает, а напряжение на газовом промежутке становится постоянным. Чем больше питающее напряжение, тем дольше длится разряд газа в озонаторе и больше его производительность. Одновременно с увеличением производительности озо-

натора увеличивается и выделяемая в газовом промежутке электрическая энергия, больше нагревается диэлектрик барьера, и требуется большая мощность для его охлаждения. Приведенные зависимости позволяют оценить производственные характеристики озонатора.

На рис. 3 показаны динамические вольт-амперные характеристики электрогазоразрядного реактора (а, б, в) и зависимость напряжения на диэлектрическом барьере от напряжения на газовом промежутке (г).

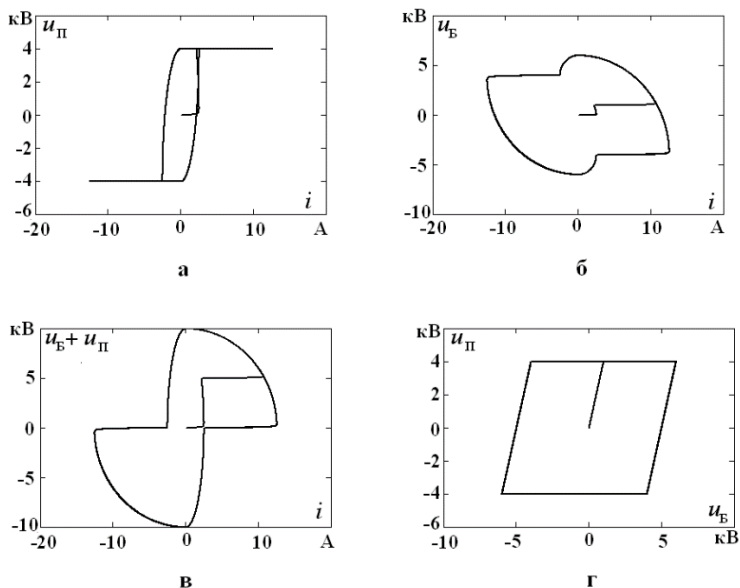


Рис. 3. Динамические вольт-амперные характеристики мгновенных значений электрогазоразрядного реактора (а, б, в) и зависимость мгновенных значений напряжения на диэлектрическом барьере от напряжения на газовом промежутке (г)

В приведенных на рис. 3 зависимостях наблюдается заметная разница в фазах исследуемых величин. Возрастание и убывание тока происходит по несовпадающим ветвям петли. Несовпадение восходящей и нисходящей ветвей объясняется поглощением энергии в газовом промежутке во время пробоя. Эта энергия тратится на электросинтез озона. Зависимость тока от времени имеет несинусоидальную форму. Это ухудшает электромагнитную совместимость озонатора. Улучшить форму тока, протекающего через озонатор, можно за счет включения последовательно с ним индуктивной катушки. Ниже приведен анализ процессов для этого случая.

Если индуктивная катушка соединена последовательно с электрогазоразрядным реактором, то в этом случае в цепи будет три накопителя энергии – линейный элемент – индуктивная катушка и два конденсатора – линейный и нелинейный элементы. Уравнение баланса напряжений для схемы замещения с учетом линейной индуктивной катушки L имеет вид:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + u_{\text{СП}} + u_{\text{СБ}} = u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t). \quad (6)$$

Запишем (6) в форме Коши:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u(t) - R \cdot i - u_{\text{СП}} - u_{\text{СБ}}}{L}. \quad (7)$$

Производные напряжения на конденсаторах СБ и СП остаются такими же, как и раньше.

IV. Результаты

На рис. 4 показаны матрица-столбец x начальных условий и матрица-столбец $D(t, x)$ производных напряжений на конденсаторах СБ и СП при последовательном включении источника питания и индуктивной катушки.

Решение дифференциальных уравнений оозонатора с индуктивной катушкой

$U_m := 8000$ Амплитуда питающего напряжения В $T := 0.1$

$U_g := 4000$ Напряжение горения В

$R := 80$ $C_p := 1 \cdot 10^{-6}$ $C_b := 4 \cdot 10^{-6}$ $L := 0.4$ $u(t) := U_m \cdot \sin(314 \cdot t)$

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Начальные условия

$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{u(t) - R \cdot x_0 - x_1 - x_2}{L} \\ \frac{1}{C_b} \cdot x_0 \\ \text{if} \left(\frac{u(t) - x_2 - x_1}{R} > 0, \text{if} \left(x_2 < U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_2 - x_1}{R}, 0 \right), \text{if} \left(x_2 > -U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_2 - x_1}{R}, 0 \right) \right) \end{pmatrix}$

$Z := \text{rkfixed}(x, 0, T, 10000, D)$ $n := 0..10000$ $t_n := \frac{T \cdot n}{10000}$ $u_{b_n} := Z_{n,2}$ $u_{p_n} := Z_{n,3}$ $i_n := Z_{n,1}$

Рис. 4. Матрица-столбец x начальных условий и матрица-столбец $D(t, x)$ производных напряжений на конденсаторах СБ и СП при включении последовательно с источником питания индуктивной катушки

На рис. 5 приведены результаты расчетов в интегрированном пакете MathCad в виде мгновенных значений напряжений и токов в электрогазоразрядном реакторе при последовательном включении индуктивной катушки с источником питания и различных значениях питающего напряжения.

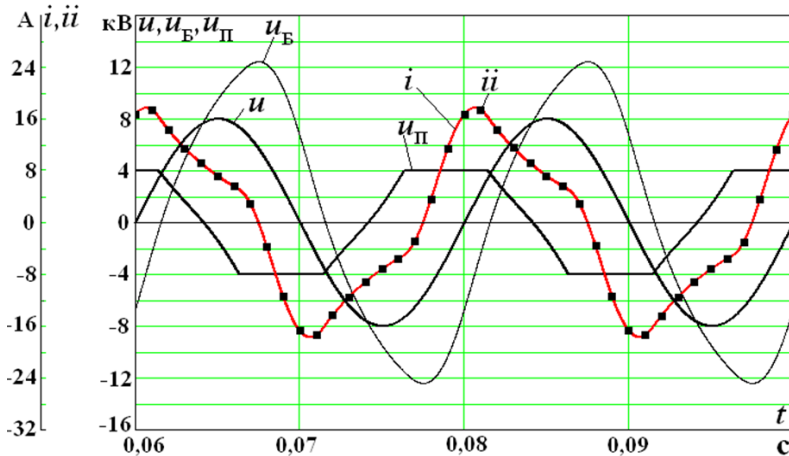


Рис. 5. Мгновенные значения напряжений и тока в электрогазоразрядном реакторе при включении индуктивной катушки и разных значениях напряжения источника питания

Как видно из рис. 5, форма кривой тока озонатора улучшается за счет демпфирования индуктивной катушкой гармонических составляющих. Гармонический анализ выполнен по формулам, приведенным на рис. 6.

Фурье-анализ

$$k := 1, 3 \dots 41$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$A_k := \frac{1}{1000} \cdot \left[\sum_{n=8000}^{10000} (i_n \cdot \sin(k \cdot 314 t_n)) + j \cdot \sum_{n=8000}^{10000} (i_n \cdot \cos(k \cdot 314 t_n)) \right]$$

$$t_{nn} := 0, 0.001 \dots 0.1 \quad u_n := U_m \cdot \sin(314 t_n)$$

$$ii(t_{nn}) := \sum_k (|A_k| \cdot \sin(k \cdot 314 t_{nn} + \arg(A_k))) \quad K := \sqrt{\frac{\sum_k ((|A_k|)^2 - (|A_1|)^2)}{(|A_1|)^2}}$$

Рис. 6. Фурье-анализ тока электрогазового разряда реактор с индуктивной катушкой

Амплитудно-частотная характеристика тока озонатора с индуктивной катушкой показана на рис. 7, а коэффициенты гармоник приведены в табл. 1, которая показывает, что в этом случае остаются только две гармоники – третья и пятая.

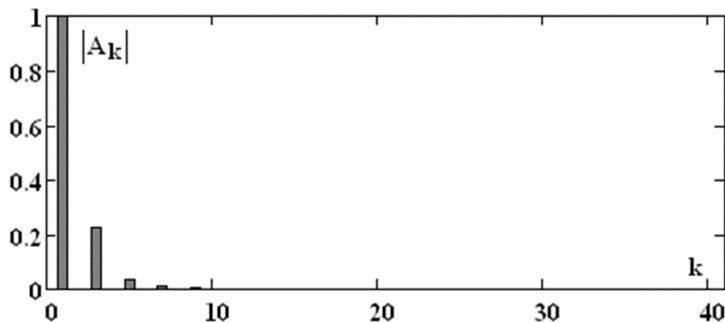


Рис. 7. Зависимость модулей амплитуд гармоник тока электрогазоразрядного реактора с индуктивной катушкой от номера гармоник

Таблица 1.

Коэффициенты гармоник тока озонатора с индуктивной катушкой при разных значениях амплитуды питающего напряжения

U_m , кВ	Коэффициент гармоник, %					
	K_3	K_5	K_7	K_9	K_{11}	K
6	24,01	4,4	0,806	0,647	0,16	2464
8	22,69	3,325	1,011	0,407	0,265	23
10	21,64	2,56	1,08	0,223	0,287	2168

V. Заключение

Приведены результаты решения численным методом нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши, описывающих процессы, происходящие в системе «источник питания – электрогазоразрядный реактор». Представлены расчеты мгновенных значений напряжений и токов в электрогенераторе озона, а также его вольт-амперные характеристики.

Показано, что электромагнитную совместимость системы СИПЭР можно повысить за счет включения последовательно с источником питания индуктивной катушки.

Библиографический список

- [1] Мануйленко А.Н., Вендин С.В. Достоинства и недостатки применения электротехнологии озонирования воздуха в животноводческих помещениях // Актуальные вопросы энергетики, Ноябрь 28, 2018, Майский, Россия. Майский: Белгородский ГАУ, 2019. С. 24-27.
- [2] Возмилов А.Г., Мельников А.В., Астафьев Д.В., Звездакова О.В., Пархомчук Г.Е. Разработка схем замещения однозонного и двухзонного электрофильтров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 3. С. 37-46.
- [3] Возмилов А.Г., Астафьев Д.В., Илимбетов Р.Ю. Использование озона для дезинфекции яиц и стимулирования эмбрионального развития цыплят в период инкубации // АПК России. 2019. Т. 26. № 5. С. 811-817.
- [4] Белопухов С.Л., Сторчевой В.Ф. Озон и его применение в АПК. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2017. – 145 с.
- [5] Бамдас А.М., Разуваев Ю.П., Шапиро С.В. Аналоговое моделирование исполнительных ферромагнитных устройств. М.: Наука, 1975. – 440 с.
- [6] Пантелеев В.И., Серебряков А.С. Тиристорный регулятор напряжения для регулирования на первичной стороне трансформатора // Труды ГПИ им. А. А. Жданова. 1969. Т. XXV, № 15. С. 68-70.
- [7] Серебряков А.С. MATHCAD и решение задач электротехники. 2-е изд. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 568 с.
- [8] Шамин А.Е., Серебряков А.С., Осокин В.Л., Романов П.Н. Моделирование процесса синтеза озона в интегрированном пакете MATHCAD // Вестник НГИЭИ. 2019. № 5 (96). С. 48-60.

V.L. Osokin

**MODELING OF PROCESSES IN SYSTEM
«POWER SOURCE – ELECTRO-GAS DISCHARGE
REACTOR» IN MATHCAD**

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics
Knyaginino, Russia

Abstract. Widespread use of ozone in industry is possible only with the operation of reliable ozone generators. An ozone generator or an ozonator serves as an electric-gas discharge reactor. The efficiency of ozonizers is largely determined by the parameters of high-voltage power sources. This makes it necessary to consider the power source and the ozonizer as a whole as a single system "power source - ozonizer".

The article is devoted to the development of a program for solving nonlinear differential equations in the Cauchy form, which describe the process in the system "power supply – electric gas-discharge reactor" (SPSEGDR). Nonlinear differential equations

describing the processes in SPSEGDR and a program for their solution in the integrated package MathCad are presented. The non-linear characteristic of the ozonizer is set using a function with a condition. For the solution, the Runge-Kutta method with a fixed integration step was used. The results of the solution are presented in the form of instantaneous values of voltages and currents in the ozonizer at various values of the supply voltage.

The current curve has a non-sinusoidal character. It is shown that the form of the ozonator current curve can be improved by damping the harmonic components with an inductive coil, which increases its electromagnetic compatibility.

Keywords: current-voltage characteristic, dielectric barrier, electric gas-discharge reactor, electron-ion technology, gas gap, ozone generator, ozonizer.

References

- [1] A.N. Manuilenko and S.V. Vendin, "Advantages and disadvantages of the use of electrotechnology ozonation of air in livestock buildings", in proc. *Aktual'nye voprosy energetiki [Actual questions of electric power industry]*, Nov. 28, 2018, Maysky, Belgorod oblast, Russia, pp. 24-27, 2019 (in Russian).
- [2] A.G. Vozmilov, A.V. Melnikov, D.V. Astafev, O.V. Zvezdakova and G.E. Parkhomchuk, "Substitution schemes development for single-stage and two-stage electric precipitators", *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, no. 3, vol. 14, pp. 37-46, 2018.
- [3] A.G. Vozmilov, D.V. Astafiev and R.Yu. Ilimbetov, "Using ozone to disinfect eggs and stimulate the embryonic development of chickens during the incubation period", *Agro-Industrial Complex of Russia*, vol. 26, no 5, pp. 811-817, 2019.
- [4] S.L. Belopukhov and V.F. Storchevoy, *Ozon i ego primeneniye v APK [Ozone and its use in agriculture]*. Irkutsk: LLC Megaprint, 2017 (in Russian).
- [5] A.M. Bamdas, Yu.P. Razuvaev and S.V. Shapiro, *Analogovoe modelirovaniye ispolnitel'nykh ferromagnitnykh ustrojstv [Analog modeling of executive ferromagnetic devices]*. Moscow: Nauka, 1975 (in Russian).
- [6] V.I. Panteleev and A.S. Serebryakov, "Tiristornyj regulyator napryazheniya dlya regulirovaniya na pervichnoj storone transformatora [Tiristornyj regulyator napryazheniya dlya regulirovaniya na pervichnoj storone transformatora]", *Trudy GPI im. A.A. Zhdanova [Proceedings of the GPI n.a. A.A. Zhdanova]*, vol. XXV, no. 15, pp. 68-70, 1969 (in Russian).
- [7] A.S. Serebryakov, *MATHCAD i resheniye zadach elektrotekhniki [MATHCAD and the solution of problems of electrical engineering]*, 2nd ed. Moscow: FsbI DPO "Educational and methodical center on education in railway transport", 2019 (in Russian).
- [8] A.E. Shamin, A.S. Serebryakov, V.L. Osokin and P.N. Romanov, "Modeling of the process of ozone synthesis in an integrated package MATHCAD", *Bulletin NGIEI*, no. 5 (96), pp. 48-60, 2019.

УДК 621.31

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_65

А.В. Погорелов, Д.И. Прокопишин, Г.А. Фальков**АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ
РУДНИЧНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МГНОВЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

В электрических сетях с нелинейными электроприемниками возникают искажения синусоидальной формы кривых тока и напряжения. Для оценки несинусоидальности широко применяется гармонический анализ с помощью представления функций в виде рядов и интегралов Фурье. Однако гармонический анализ имеет ряд недостатков, в связи с чем необходимо обоснование возможности анализа несинусоидальности с использованием мгновенных значений сопротивлений. Для выявления физической природы искажений была разработана имитационная модель рудничной сети с нелинейной нагрузкой в виде тиристорного электропривода скиповой подъемной установкой в программном комплексе Matlab. Имитационное моделирование позволило выявить взаимосвязь изменения мгновенных значений тока и напряжения от изменения мгновенного значения сопротивления. На основании полученных данных были рассчитаны мгновенные значения мощности и потеря электрической мощности, сделан вывод о возможности представления исходной сети в виде параметрической цепи с переменным мгновенным сопротивлением. Актуальным остается совершенствование математического аппарата исследования несинусоидальности без использования методов гармонического анализа.

Ключевые слова: имитационное моделирование, мгновенное сопротивление, несинусоидальность тока и напряжения, рудничные сети.

1. Введение

В высоковольтных рудничных сетях присутствует мощная нелинейная нагрузка в виде регулируемых электроприводов подъемных установок [1], что приводит к искажениям синусоидальной формы токов и напряжений [2-5].

В качестве основного математического аппарата для исследования несинусоидальности используются методы посредством Фурье-анализа [6]. Однако спектральный состав можно достоверно определить в только том случае, если в нем присутствуют целочисленные высшие гармонические составляющие [7]. Анализ гармонических составляющих затруднен также при нестационарных режимах работы электроустановок [6]. Поэтому актуальной является разработка новых методов исследования несину-

соидальности. Для этого предлагается рассматривать электрическую сеть с нелинейными электроприемниками как параметрическую цепь с сопротивлением, зависящим от времени. При таком рассмотрении можно избежать анализа конкретных нелинейных вольтамперных характеристик электроприемников и перейти к универсальным методам исследования мгновенных значений сопротивления в рудничных сетях. Зная характер изменения мгновенного сопротивления, можно оценивать влияние искажений тока и напряжения на работу электрооборудования, на потери электрической мощности, а также отслеживать другие негативные явления.

II. Материалы и методы

Согласно [8], можно определить мгновенное значение сопротивления в электрической сети $z(t)$ как отношение мгновенного значения напряжения $u(t)$ к мгновенному значению тока $i(t)$:

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)}. \quad (1)$$

Для синусоидальных напряжений и токов при линейной нагрузке мгновенное сопротивление будет определяться:

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{U_m \sin(\omega t + \varphi)}{I_m \sin(\omega t)} = Z \cdot \left(\cos \varphi + \sin \varphi \cdot \frac{\cos \omega t}{\sin \omega t} \right) = R + X \cdot \operatorname{ctg} \omega t, \quad (2)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения; ω – угловая частота; φ – угол сдвига фаз между током и напряжением; Z , R , X – полное, активное и реактивное сопротивление сети, соответственно. Таким образом, мгновенное сопротивление при синусоидальных токах и напряжениях описывается периодической функцией, изменяющейся по котангенциальному закону.

Для анализа изменения мгновенных значений сопротивлений при появлении искажений тока и напряжения в рудничной сети электроснабжения подъемной установки была разработана имитационная модель в программном комплексе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой Sim Power Systems (рис. 1). Модель состоит из источника синусоидального напряжения 110 кВ, воздушной линии 110 кВ, понижающего трансформатора 110/6 кВ, кабельной линии 6 кВ, согласующих трансформаторов, тиристорного преобразователя, двигателя постоянного тока, реверсивного тиристорного возбудителя, блоков для измерений фазных токов и напряжений на шине 6 кВ, блока выходных осциллограмм и системы

управления электроприводом. Параметры элементов модели представлены в табл. 1 [9, 10].

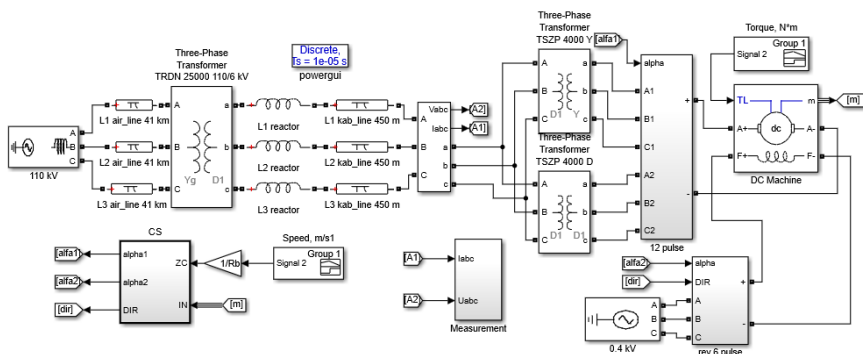


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения скиповой подъемной установки в Matlab Simulink

Таблица 1.
Параметры системы электроснабжения и электроприемника

Блок	Параметры блока
Воздушная линия АС-185	$U = 110$ кВ, $L = 40,6$ км
Трансформатор ТРДН-25000/110	$S = 25000$ кВА, $U_1/U_2 = 115/6,3$ кВ
Реактор РБСГ 10-2-1600-0,25	$X_L = 0,25$ Ом
Кабельная линия ААБЛГ-6,3х150	$U = 6,3$ кВ, $L = 0,45$ км
Трансформаторы ТСЗП-4000/10 УЗ	$S = 4000$ кВА, $U_1/U_2 = 6/0,825$ кВ
Тиристорные преобразователи УКТЭШ-6300/1050-211-500УХЛ4	$P_H = 6615$ кВт, $U_H = 1050$ В, $I_H = 6300$ А
Тиристорный возбудитель ЭКТ 500/440-95 УХЛ4	$P_H = 220$ кВт, $U_H = 440$ В, $I_H = 500$ А
Двигатель П2Ш-800-256-7КУХЛ4	$P_H = 5000$ кВт, $U_H = 930$ В, $I_H = 5790$ А

III. Результаты

На рис. 2 представлены результаты моделирования рудничной сети для электроснабжения скиповой подъемной установки (в начале разгона).

Анализируя полученные осциллограммы, можно сделать вывод, что при нелинейной нагрузке, представленной тиристорным электроприводом, возникают искажения синусоидальной формы кривой тока, напряжения, так как происходит искажение котангенциальной формы кривой мгновенного сопротивления.

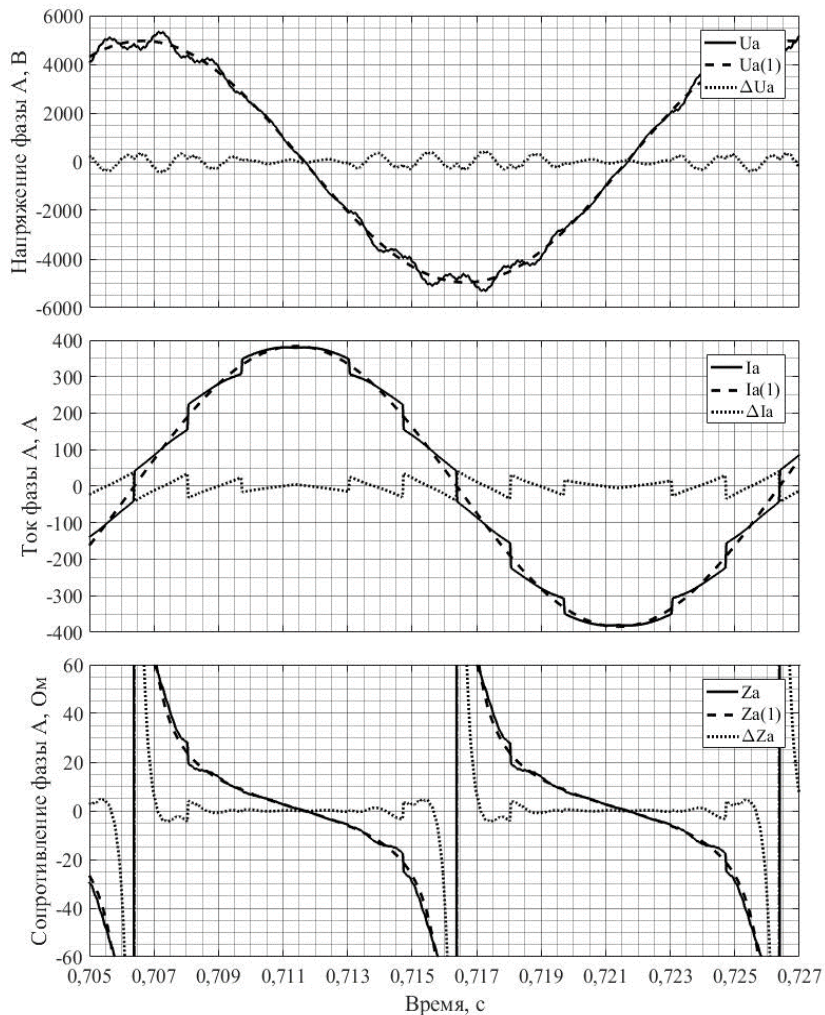


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, тока и сопротивления фазы A (сплошная линия), их первых гармоник (пунктирная линия) и разницы между ними (точечная линия)

Фрагмент результатов измерений мгновенного сопротивления за половину периода питающего напряжения, а также результаты расчета мгновенной мощности представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Результаты измерений и расчетов

Форма тока		Синусоидальная		Несинусоидальная		Разность	
i	t, c	$z(t),$ Ом	$p(t),$ кВт	$z(t),$ Ом	$p(t),$ кВт	$\Delta z(t),$ Ом	$\Delta p(t),$ кВт
1	0,70699	68,641	354,7	92,923	246,16	24,282	-108,54
2	0,70749	36,9	622,442	59,06	445,19	22,16	-177,25
3	0,70799	24,53	836,57	40,07	616,1	15,54	-220,47
4	0,708368	19,1	950,63	27,66	664,54	8,56	-286,09
5	0,70885	14,297	1024	16,78	1054,35	2,483	30,35
6	0,70933	10,815	1011,4	13,94	1091,66	3,125	80,26
7	0,70978	8,214	923,59	9,497	855,34	1,283	-68,25
8	0,71027	5,8	751,2	6,734	878,33	0,934	127,13
9	0,71077	3,611	510,97	4,851	684,28	1,24	173,31
10	0,71127	1,552	227,93	2,538	369,88	0,986	141,95
11	0,711677	-0,101	-14,72	0,675	98,18	0,776	112,9
12	0,71217	-2,157	-298,58	-1,514	-218,674	0,643	79,906
13	0,71265	-4,324	-541,62	-3,701	-505,77	0,623	35,85
14	0,71311	-6,669	-721,65	-5,725	-707,36	0,944	14,29
15	0,71359	-9,596	-838,31	-9,031	-773,2	0,565	65,11
16	0,71409	-13,562	-872,54	-13,68	-976,63	-0,118	-104,09
17	0,71459	-19,25	-812,82	-15,302	-860,24	3,948	-47,42
18	0,71502	-27,028	-691,54	-29,204	-576,13	-2,176	115,41
19	0,71552	-44,99	-480,9	-47,543	-535,73	-2,553	-54,83
20	0,71599	-101,4	-232,36	-67,74	-323,75	33,66	-91,39
$n=21$	0,71644	787,57	31,13	93,24	243,58	-694,33	212,45
Активная мощность, кВт		–	165,66	–	168,58	–	2,92

Значение активной мощности P определяется как интеграл от мгновенной мощности за период [11]. Так как период T мгновенного значения мощности в два раза меньше, то достаточно определить активную мощность за половину периода и умножить на два:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} p(t) dt = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} (i_k^2(t) \cdot z_k(t)) dt. \quad (3)$$

Рассчитаем интеграл на основе численного интегрирования методом прямоугольников [12]:

$$P = \frac{2}{T} \cdot \sum_{k=1}^n p_i(t) \cdot \Delta t_i = \frac{2}{T} \cdot \frac{T}{n} \cdot \sum_{k=1}^n p_i(t) = \frac{2}{n} \cdot \sum_{k=1}^n p_i(t), \quad (4)$$

где i – номер отсчета, n – количество отсчетов за половину периода. Значения мгновенной мощности зависят от мгновенного сопротивления и потери электрической мощности при искажениях тока за половину периода питающего напряжения равняются 1500 Вт.

На основании вычислений были получены графики мгновенной мощности за половину периода питающего напряжения (рис. 3).

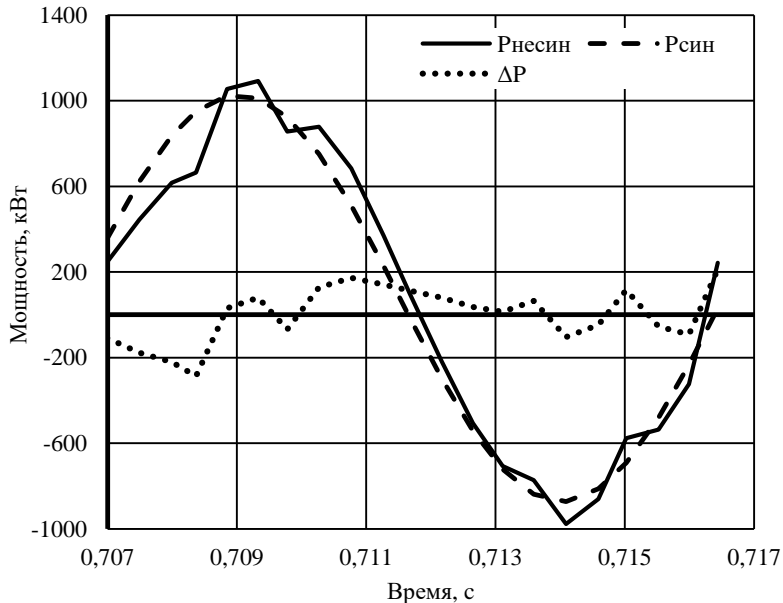


Рис. 3. Графики мгновенного значения мощности: реальной мощности в сети $P_{несин}$ (сплошная линия), идеальных значений мощности $P_{син}$ (пунктирная линия) и потерь мощности ΔP (точечная линия)

Таким образом, анализ мгновенных значений сопротивления позволяет оценить потери электрической мощности в высоковольтных рудничных цепях.

IV. Заключение

Для анализа качества электрической энергии в рудничных сетях актуальна разработка новых методов исследования, что позволит повысить эффективность оценки и устранения искажений. Анализ характера изменения мгновенного сопротивления позволит оценивать несинусоидаль-

ность исходя из физической природы данного явления, а не его спектральной модели.

Искажения синусоидальных кривых тока и напряжения пропорциональны изменениям мгновенных значений сопротивления, а также отклонение формы кривой мгновенного сопротивления от котангенциальной формы, приводят к дополнительным потерям электрической энергии.

Планируется проведение дальнейших исследований, так как применение новых методов анализа несинусоидальности тока с использованием мгновенного сопротивления позволит повысить эффективность работы активных фильтров высших гармоник.

© Погорелов А.В., 2020

© Прокопишин Д.И., 2020

© Фальков Г.А., 2020

Библиографический список

- [1] Авербух М.А., Прасол Д.А., Погорелов А.В. Минимизация потерь мощности при несинусоидальных режимах в высоковольтных рудничных сетях // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 38-46.
- [2] Ляхомский А. В., Плащанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 7. С. 207-213.
- [3] Боярская Н.П., Довгун В.П. Влияние гармонического состава токов и напряжений на эффективность энергосбережения // Вестник КрасГАУ. 2010. № 4. С. 130-134.
- [4] Мадаров А.Б. Исследование влияния несинусоидальности напряжения в электроустановках на качество электроэнергии // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 12 (115). С. 88-92.
- [5] Куренный Э.Г., Лютый А.П. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии // Электричество. 2005. № 8. С. 2-9.
- [6] Коровкин Н.В, Грицутенко С.С. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений // Известия российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 73-86.
- [7] Аничков С. П. Снижение уровней интергармоник в электрической сети // Приволжский научный вестник. 2011. № 1 (1). С. 11-13.
- [8] Малякова М.С., Калинов А.П. Анализ нелинейных электрических цепей с использованием ортогональных составляющих мгновенной проводимости и сопротивления // Електромеханічні і Енергозберігаючі Системи. 2013. № 1 (21). С. 32-39.
- [9] Pogorelov A.V., Simulation modeling of DC electric drive for mine hoist // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 643, 2019, p. 012037.

- [10] Погорелов А.В. Исследование частотных характеристик рудничной сети с пассивными фильтрокомпенсирующими устройствами // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 3. С. 27-35.
- [11] Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007.
- [12] Савенкова Н.П., Проворова О.Г., Мокин А.Ю. Численные методы в математическом моделировании. М.: Инфра-М, 2018. – 256 с.

A.V. Pogorelov, D.I. Prokopishin, G.A. Fal'kov

**ANALYSIS OF NON-SINUSOIDALITY
OF MINE POWER SUPPLY SYSTEM
USING INSTANTANEOUS RESISTANCE**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

Abstract. Distortions of the sinusoidal current and voltage curves occur in power supply systems with non-linear electrical receivers., Harmonic analysis by representing functions in the form of Fourier series and integrals is widely used to evaluate non-sinusoidality. However, harmonic analysis has several disadvantages, thus the purpose of this article is to justify the possibility of analysis of non-sinusoidality using instantaneous resistance values. A simulation model of an electrical mine network with non-linear load in the form of a thyristor electric drive by a skip hoist have been developed in the Matlab to identify the physical nature of distortions. Simulation results allowed to identify the relationship between the change in instantaneous values of current and voltage and the instantaneous value of resistance. Instantaneous values of power and losses of electric power were calculated based on the obtained data. It has been concluded that the initial electrical grid can be represented as a parametric circuit with a variable instantaneous resistance. Thus, further studies of the mathematical apparatus for the analysis of non-sinusoidality without the use of harmonic analysis methods are relevant.

Keywords: instantaneous resistance, non-sinusoidality of current and voltage, power supply system of mine, simulation.

References

- [1] M.A. Averbukh, A.V. Pogorelov and D.A. Prasol, «Minimization of power losses upon non-sinusoidal modes of high-voltage mine networks», *Industrial Power Engineering*, no. 7, pp. 38-46, 2018.
- [2] A.V. Lyakhomskiy, L.A. Plashchanskiy, S.N. Reshetnyak and M.Yu. Reshetnyak, «Highvoltage unit for automated monitoring of electrical energy quality in underground networks of coal mines», *Mining informational and analytical bulletin*, no. 7, pp. 207-213, 2019.

-
- [3] N.P. Boyarskaya and V.P. Dovgun, «Influence of current and voltage harmonic structure on the energy-saving efficiency», *Bulletin of KSAU*, no. 4, pp. 130-134, 2010.
- [4] A.B. Madarov, «Issledovanie vliyaniya nesinusoidal'nosti napryazheniya v elektroustanovkakh na kachestvo elektroenergii [Study of the influence of voltage non-sinusoidality in electrical installations on the electric power quality]», *Izvestia VSTU*, vol. 12, no.115, pp. 88-92, 2013 (In Russian).
- [5] E.G. Kurennyy and A.P. Lyutyuy, «Otsenka nesinusoidal'nosti napryazheniya pri analize kachestva elektroenergii [Assessment of voltage non-sinusoidality in the analysis of electric power quality]», *Elektrichestvo*, vol. 8, pp. 2-10, 2005 (In Russian).
- [6] N.V. Korovkin, S.S. Gritsutenko, «About applicability of the fast fourier transform for a harmonic analysis of non sinusoidal currents and voltages», *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*, vol. 2, pp. 73-86, 2017.
- [7] S.P. Anichkov, «Level recession of interharmonic in the current network», *Privolzhskiy nauchnyy vestnik [Volga Scientific Bulletin]*, vol. 1, no. 1, pp. 11-13, 2011 (In Russian).
- [8] M.S. Maliakova and A.P. Kalinov, «The nonlinear electric circuits analysis with the usage of instantaneous admittance and resistance components», *Electromechanical and energy saving systems*, vol. 1, no. 21, pp. 32-39, 2012.
- [9] A.V. Pogorelov, «Simulation modeling of DC electric drive for mine hoist», *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 643, 2019, p. 012037.
- [10] A.V. Pogorelov, «Research of frequency responses of mine power supply system with passive filter-compensating devices», *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, pp. 27-35, 2019.
- [11] H. Akagi, E.H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007.
- [12] N.P. Savenkova, O.G. Provorova and A.Yu. Mokin, *Chislennyye metody v matematicheskom modelirovanii [Numerical methods in mathematical modeling]*. Moscow: Infra-M, 2018 (in Russian).

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_74

В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Юго-Западный государственный университет

Рассматриваются вопросы оценки состояния изоляции кабельных линий электрических сетей. Для оценки состояния изоляции предложено использовать модернизированную систему нечеткого логического вывода. Система обеспечивает получение численных значений выходного параметра и промежуточных нечетких переменных, что позволяет получать более обоснованные результаты по сравнению с оценкой на основе значений только выходного параметра.

Ключевые слова: изоляция, нечеткие значения, нечеткие множества, силовые кабели, экспертные оценки.

I. Введение

Для построения электрических распределительных сетей как на промышленных предприятиях, так и в населенных пунктах, широко используются кабельные линии (КЛ) различного класса напряжений. При работе электрических сетей на изоляцию силовых кабелей непрерывно воздействуют различные факторы. В результате их воздействия в диэлектрических материалах изоляции имеют место различные физические и химические процессы. С течением времени их протекание вызывает снижение электрической прочности изоляции и в конечном итоге – ее пробой [1]. Указанные негативные факторы можно разделить на три категории.

К первой категории относятся: глубина, на которой находятся силовые кабели в траншее; конфигурация трассы прохождения КЛ; механические и другие свойства грунтов вдоль трассы КЛ; наличие или отсутствие точек пересечения КЛ как с другими инженерными сетями, так и с транспортными сооружениями и дорогами. Известны результаты, приведенные, например, в [2-3], из которых видно, что действие данных факторов при определенных обстоятельствах усиливает негативные процессы в изоляции силовых кабелей: возникают повреждения из-за перемещений грунта при больших сезонных изменениях температуры грунта и связанных с этим разрывающих усилий на КЛ, расположенные в траншеях.

Вторая категория факторов объединяет разнообразные воздействия, возникающие непосредственно при эксплуатации. К ним можно отнести постепенное снижение сопротивления изоляции, возникновение частичных разрядов, тепловое воздействие на материалы изоляции токов в жилах кабелей в различных режимах работы, в том числе ненормальных и аварийных. Итоги воздействия всех этих факторов трудно определить из-за сложности контроля состояния диэлектрических материалов изоляции по всему ее объему.

В процессе эксплуатации КЛ имеется вероятность появления механических повреждений изоляции кабелей из-за проведения различных строительных и ремонтных работ. Конечно, для проведения таких работ должно выполняться согласование с организациями, эксплуатирующими электросети, но как показывает практика, это не всегда выполняется и приводит к повреждению кабелей. Следует обратить внимание, что скорость развития процессов необратимых негативных изменений в изоляционных материалах может существенно зависеть от конфигурации рассматриваемой схемы электроснабжения. Согласно результатам исследований [1, 3, 4], промежутки времени изоляции кабелей от момента ввода в работу до появления пробоя изоляции у кабелей, расположенных на верхних уровнях электрических сетей, заметно короче (около 186 календарных месяцев), по сравнению с КЛ на нижних уровнях (примерно 200 календарных месяцев). Такое соотношение объясняется тем, что по КЛ верхних уровней электросети протекают токи КЗ с большими значениями, чем на других участках.

Третья категория включает факторы, обусловленные уровнем квалификации и характером мотивации персонала, непосредственно работающего на рассматриваемых КЛ как при монтаже, так и при эксплуатации.

II. Постановка цели и задач исследования

Таким образом, задача определения текущего состояния изоляции КЛ или же получения ее оценки имеет сложный характер из-за неопределенности исходной информации. Решение задачи затрудняется также неоднозначностью во взаимных зависимостях между параметрами работы КЛ и внешними проявлениями возникновения и развития дефектов изоляционных материалов. Для получения обоснованной оценки текущего положения изоляции силовых кабелей необходима и экспертная оценка воздействия тех или иных негативных факторов. Все это ограничивает возможности применения существующих методов, рассчитанных на обработку исходной количественной информации. Следовательно, сложность создания математических моделей оценки текущего положения изоляции

силовых кабелей объясняется наличием большого количества разнообразных причин снижения электрической прочности изоляции.

III. Материалы и методы

Решение схожих проблем, появляющихся в ходе исследований сложных организационно-технических систем, успешно производится с применением математического аппарата нечеткого моделирования [5]. Сегодня такой способ моделирования сложных систем представляет собой один из наиболее эффективных подходов при рассмотрении сложных систем [5], в том числе, и электроэнергетических. Применение нечетких моделей для разрешения схожих задач является очень продуктивным [6-8]. Для решения задач с исходной информацией, выраженной в количественном и качественном виде, а также учитывая неполноту и неопределенность в этих данных, используется система нечеткого логического вывода (СНЛВ) [9-11].

IV. Результаты исследования

В [12] предложена СНЛВ для оценки положения изоляции силовых кабелей. Данная система представляет все имеющиеся причины снижения электрической прочности изоляции контролируемой КЛ в виде некоторой логической системы. Эта система определяется четырьмя компонентами [13]:

$$M = \langle T, P, A, B \rangle, \quad (1)$$

где T – набор рассматриваемых в системе базовых элементов; P – совокупность используемых синтаксических правил; A – набор принятых заранее аксиом; B – созданные при разработке модели правила получения выходных значений.

Во входной информации для этой СНЛВ проявляются факторы, приводящие к снижению электрической прочности изоляции КЛ. Выходное значение СНЛВ представляет собой оценку текущего состояния изоляционных материалов. Такая СНЛВ является MISO-системой, использующей большое количество (n) входных переменных и одну выходную переменную. В данном случае система имеет число входов, соответствующее количеству исходных переменных, один выход для нахождения величины оценки текущего состояния изоляции и реализуется с применением алгоритма Мамдани. Данные системы создают следующее отображение:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n), \quad (2)$$

где y – выходное значение СНЛВ или в нашем случае оценка степени текущего состояния (износа) изоляции рассматриваемой КЛ; $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ – входные переменные.

Все неблагоприятные для изоляции факторы соответствуют свойствам СНЛВ, которые используются нечеткой моделью. Они выражаются качественным способом, например: «уровень квалификации персонала, производящего эксплуатацию рассматриваемого кабеля». Каждый рассматриваемый фактор снижения электрической прочности диэлектрических материалов изоляции выражается своей лингвистической переменной. Такие переменные представляют собой по существу терм-множества $T_i = \{T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{mi}\}$. Эти термы представляются нечеткими оценками возможных проявлений входных переменных, например, «ниже среднего», «средний», «выше среднего».

Обработка исходной информации выполняется известными действиями: вычисление степеней принадлежности исходных переменных входным нечетким множествам; нахождение результирующей функции принадлежности выходной величины этой модели; получение четкого численного значения выходной величины на основе полученной ранее результирующей функции принадлежности [6, 12].

Такая СНЛВ отображает влияние входных переменных этой системы X_1, \dots, X_N на ее выходное значение Q :

$$X = (X_1, \dots, X_N) \rightarrow Q[0,100]. \quad (3)$$

На основе получаемого выходного значения формируются оценки, отражающие текущее состояние изоляции контролируемого кабеля:

- от 0 до 20 – значение оценки текущего состояния или уровня изоляции «очень низкая», необходимо незамедлительно выводить линию в КЛ для предотвращения возникновения аварии и перерыва в электропитании;
- от 20 до 40 – оценка уровня состояния изоляции «низкая»;
- от 40 до 60 – оценка уровня состояния изоляции «средняя»;
- от 60 до 80 – оценка уровня состояния изоляции «выше среднего»;
- от 80 до 100 – оценка уровня состояния изоляции «высокая».

Эта СНЛВ использует в своей работе значения тринадцати входных переменных, соответствующих учитываемым факторам [12]. Их влияние уместно представить для наглядности иерархическим деревом логического вывода [10] или графом. В таких графах выходное итоговое значение баз знаний нижнего уровня является входной для базы знаний верхнего уровня [13] – рис. 1. Свертки F_Y отображают рассмотренные выше категории факторов, негативно воздействующих на уровень изоляции. Можно также

представить каждую такую свертку F_Y как подсистему нечеткого вывода более низкого уровня, чем вся система в целом.

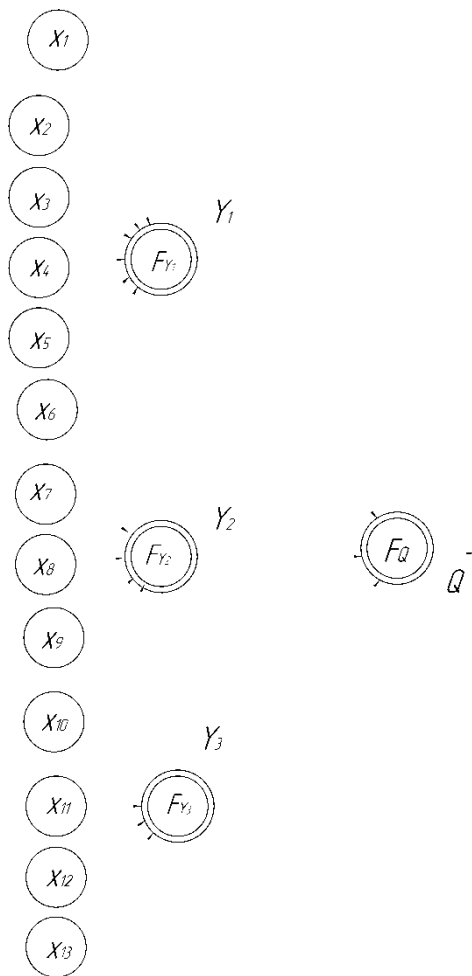


Рис. 1. Дерево нечеткого вывода

В подобных СНЛВ обычно не производится дефаззификация промежуточных нечетких значений (получение численных величин). Предлагается модернизировать рассмотренную систему НЛВ таким образом, чтобы производить дефаззификацию промежуточных нечетких значений

наряду с дефазификацией выходной нечеткой переменной. Это позволит определять вклад каждой из групп входных переменных (факторов) в текущее состояние изоляции рассматриваемой КЛ в случае получения низких числовых значений выходного параметра Q . На основе изучения числовых значений выходного параметра Q и сверток F_Y (промежуточных нечетких переменных) повышается обоснованность принимаемых решений по состоянию изоляции КЛ, поскольку при таком построении СНЛВ наглядно видны причины снижения качества изоляции.

В. Заключение

Представленная модернизация системы НЛВ дает возможность, наряду с численным значением выходного параметра (переменной), определять численные промежуточные оценки вклада групп факторов в итоговый результат. Это позволяет получать более обоснованные оценки негативных действий факторов, снижающих качество или состояние изоляции. В результате персонал электросетей может принимать необходимые меры по поддержанию нормального состояния изоляции КЛ.

© Бирюлин В.И., 2020

© Куделина Д.В., 2020

Библиографический список

- [1] Юрченко Е.Ю. Оценка состояния изоляции городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ с разработкой рекомендаций по улучшению условий электробезопасности: дис. канд. техн. наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, 2009. – 147 с.
- [2] Коржов А.В. Оценка теплового режима работы изоляции в 2D-модели звена «кабель 6(10) кВ – грунт» в ANSYS с учетом подвижек грунта и уставок устройств релейной защиты // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13. № 1. С. 39-45.
- [3] Коржов А.В. Метод оценки значимости влияния проектных и эксплуатационных факторов на срок службы изоляции силовых кабелей 6(10) кВ городских электрических сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 1. С. 31-34.
- [4] Коржов А.В., Томашева Е.В. Причины старения бумажно-масляной изоляции силовых кабелей // Электробезопасность. 2006. № 1. С. 12-17.
- [5] Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
- [6] Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
- [7] Капустин В.Ф. Неопределенность: виды, интерпретации, учет при моделировании и принятии решений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5: Экономика. 1993. Вып. 2 (№ 12). С. 108-114.

- [8] Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1978. – 128 с.
- [9] Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 172-215.
- [10] Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 228 с.
- [11] Вагин В.Н., Поспелова Д.А. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: Физматлитгиз, 2004. – 704 с.
- [12] Куделина Д.В. Нечеткая система контроля состояния изоляции // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика Информатика. 2017. № 2 (251). Вып. 41. С. 102-107.
- [13] Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 452 с.

V.I. Biryulin, D.V. Kudelina

MODERNIZATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM FOR EVALUATING CURRENT STATE OF CABLE LINES INSULATION

Southwest State University
Kursk, Russia

Abstract. The article considers the assessments of the cable lines insulation state for various electrical networks. It is proposed to use a modernized fuzzy inference system to obtain an assessment of the insulation state. This system provides numerical values of both the output parameter and intermediate fuzzy variables, that allows more reasonable results to be obtained compared to using only the values of the output parameter.

Keywords: cable lines, expert estimates, fuzzy conclusion, fuzzy logic, insulation.

References

- [1] E.Yu. Yurchenko, «*Oценка sostoyaniya izolyacii gorodskih kabel'nyh linij napryazheniem 6–10 kV s razrabotkoj rekomendacij po uluchsheniyu uslovij elektrobezopasnosti [Assessment of the insulation status of urban cable lines with a voltage of 6–10 kV with the development of recommendations for improving the electrical safety conditions]*», Cand. of Tech. S. thesis, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, 2009 (in Russian).
- [2] A.V. Korzhov, «*Estimation of thermal conditions of insulation in the ANSYS 2D model of link «cable line 6(10) kV – soil» with consideration for movements of soil and relay protection set values*», *Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»*, vol. 13, no. 1, pp. 39-45, Jan. 2013.

-
- [3] A.V. Korzhov, «Assessment method applied to the significance of design and operational factor influence on the service life of 6 (10) kV power cable insulation in urban networks», *Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»*, vol. 14, no. 1, pp. 31-34, Jan. 2014.
- [4] A.V. Korzhov and E.V. Tomasheva, «Prichiny stareniya bumazhno-maslyanoy izol'yacii silovyh kabelej [Reasons for aging paper-oil insulation of power cables]», *Electrical Safety*, no. 1, pp. 12-17, Jan. 2006 (in Russian).
- [5] R.A. Aliev, A.E. Tserkovnyy and G.A. Mamedova, *Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoj iskhodnoj informacii [Production management with fuzzy source information]*. Moscow: Energoatomizdat, 1991 (in Russian).
- [6] A. Piegat, *Fuzzy modeling and control*. Physica-Verlag Heidelberg, 2001.
- [7] V.F. Kapustin, «Neopredelennost': vidy, interpretacii, uchet pri modelirovanii i prinyatii reshenij [Uncertainty: types, interpretations, accounting in modeling and decision making]», *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, no. 2, pp. 108-114, 1993 (in Russian).
- [8] L.S. Belyaev, *Reshenie slozhnyh optimizacionnyh zadach v usloviyah neopredelennosti [The solution of complex optimization problems in the face of uncertainty]*. Novosibirsk: Science, Siberian Branch, 1978 (in Russian).
- [9] R.E. Bellman and L.A. Zadeh, «Decision-making in a fuzzy environment», *Management Science*, vol. 17, pp. 141-164, 1970.
- [10] S.D. Shtovba, *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB [Designing fuzzy systems using MATLAB]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007 (in Russian).
- [11] V.N. Vagin and D.A. Pospelova, *Dostovernyy i pravdopodobnyj vyvod v intellektual'nyh sistemah [Reliable and plausible conclusion in intelligent systems]*. Moscow: Fizmatlitgiz, 2004 (in Russian).
- [12] D.V. Kudelina, «Fuzzy control system of the insulation state», *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information Technologies*, vol. 41, no. 2, pp. 102-107, March 2017 (in Russian).
- [13] D. Rutkovskaya, M. Pilinsky and L. Rutkovsky, *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004 (in Russian).

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314.25

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_82

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ФАЗОПРЕОБРАЗУЮЩИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрены автотрансформаторные и трансформаторные преобразователи числа фаз для питания многопульсных многомостовых выпрямителей. Охарактеризованы основные проблемы, возникающие при работе силовых трансформаторов и автотрансформаторов на нелинейную выпрямительную нагрузку, и принципиальные схемы таких устройств. Приведены результаты расчета величины установленной мощности при питании 18-пульсного трехмостового выпрямителя от фазообразующего трансформатора со вторичными обмотками, соединенными по схемам «звезда» и два «зигзага». Показан расчет установленной мощности при питании 24-пульсного выпрямителя на базе четырех мостов от трансформатора с вторичными обмотками, соединенными по схемам «звезда», «треугольник» и два «зигзага». Рассмотрены устройства с преобразованием числа и сдвига фаз на вторичной и первичной сторонах. Показана принципиальная схема трансформаторного преобразователя для питания 24-пульсного выпрямителя с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной стороне. Приведена расчетная осциллограмма суммарного первичного тока такого преобразователя, которая практически не отличается от аналогичной кривой первичного тока ранее рассмотренного трансформаторного преобразователя с преобразованием на вторичной стороне.

Ключевые слова: автотрансформатор, выпрямитель, обмотки, трансформатор, установленная мощность.

I. Введение

В настоящее время в связи с расширением применения постоянного тока в различных промышленных устройствах малой и высокой мощности, при низких и высоких уровнях напряжений, актуальной стала задача совершенствования соответствующих источников питания для получения

постоянного (или выпрямленного пульсирующего) тока. Одним из наиболее используемых направлений такого усовершенствования является разработка и применение многофазных (фазообразующих) трансформаторов и автотрансформаторов с повышением пульсности схем выпрямителей. Многопульсные выпрямители могут быть образованы путем использования n трехфазных выпрямительных мостов, соединенных по выходу последовательно или параллельно (при этом получается $6 \cdot n$ -пульсный выпрямитель). Недостатки мостовых выпрямителей, в частности – более высокие потери в вентилях, по сравнению с некоторыми другими трехфазными схемами, приводят к тому, что в настоящее время предлагается использовать многопульсных кольцевых выпрямителей. В таких выпрямителях снижено количество вентиляей, обтекаемых током нагрузки, по сравнению с трехфазными многомостовыми вариантами [1].

II. Схемы применяемых преобразователей числа фаз и величины их установленных мощностей

Рассмотренные выше многопульсные выпрямители питаются от источника питания с повышенным числом фаз, для чего используются фазообразующие выпрямительные трансформаторы и автотрансформаторы. Известно, что работа трансформаторов или автотрансформаторов для питания полупроводниковых преобразователей – выпрямителей, характеризующихся нелинейными свойствами полупроводниковых вентиляей, приводит к несинусоидальному характеру токов в обмотках преобразователя, превышению установленной мощности такого устройства по сравнению с мощностью нагрузки на стороне постоянного тока. В связи с этим, в настоящее время целесообразно применять схемы трансформаторных (или автотрансформаторных) преобразователей. В них, по сравнению с обычным трехфазным трехстержневым выпрямительным трансформатором, конфигурация обмоток и фазовый сдвиг между вторичными системами напряжений соответствуют минимально возможному превышению установленной мощности.

На рис. 1 приведена схема 18-пульсного выпрямителя, питаемого от автотрансформаторного преобразователя числа фаз. В литературе для применения в летательных аппаратах в составе источников питания постоянного тока предлагается несколько вариантов топологий построения обмоток для данного выпрямителя [2].

Применение автотрансформатора с использованием для питания выпрямителей обмоток, соединенных непосредственно с сетью (источником питания), обуславливает жесткую зависимость вторичного напряжения от первичного. Тем самым ограничиваются возможности широкого регулирования вторичного напряжения данного преобразователя. Извест-

но, что автотрансформаторы выгодно использовать при небольших значениях коэффициентов трансформации. Чтобы обеспечить возможность широкого регулирования вторичного напряжения, можно использовать дополнительные питающие трансформаторы или другие варианты регулируемых источников электропитания.

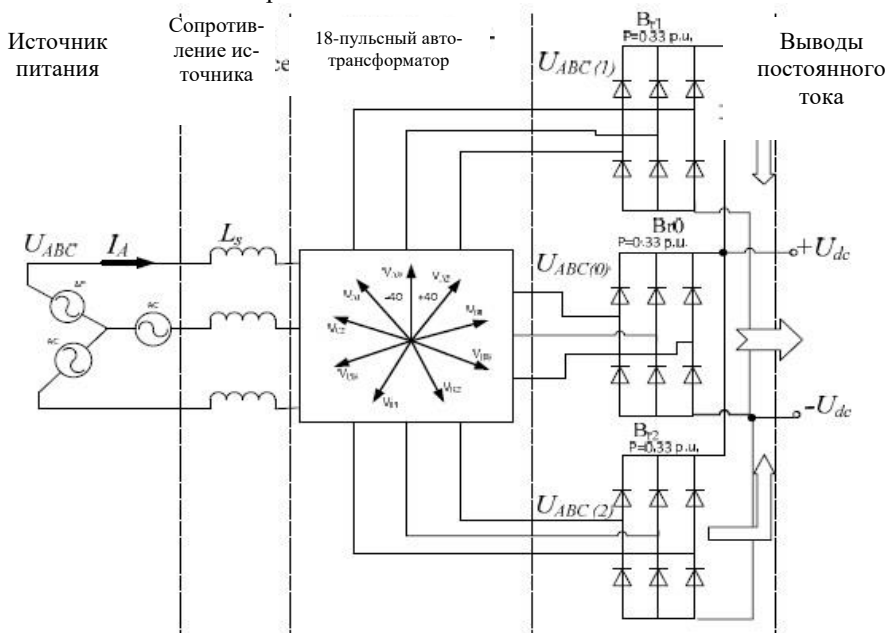


Рис. 1. Схема источника питания с автотрансформаторным преобразователем

По результатам расчетов, представленных в исследованиях, величины установленной мощности таких преобразователей числа фаз существенно меньше по сравнению с трансформаторными преобразователями. Это обуславливает эффективность применения таких устройств в составе летательных аппаратов, где вопрос достижения минимальных массогабаритных показателей является одним из важнейших, если перечисленные недостатки являются допустимыми при применении в конкретной технической системе.

Использование трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ) позволяет обеспечить гальваническую развязку первичной сети от вторичных цепей, трансформаторы могут быть выполнены в широком диапазоне коэффициентов трансформации.

Рассмотрим особенности расчета установленной мощности некоторых вариантов трансформаторных преобразователей для питания многопульсных выпрямителей. В таких преобразователях повышение установленной мощности происходит, в том числе, вследствие использования вторичных обмоток, образованных катушками, расположенными на разных стержнях магнитопровода. В результате геометрическая сумма магнитодвижущих сил (МДС) и чисел витков обмоток оказывается меньше соответствующей арифметической суммы.

В [3] показано, что с повышением числа вторичных фаз рассматриваемых ТПЧФ отношение чисел витков вторичной фазы к числу витков w_{21} «базовой» вторичной обмотки, соединенной в звезду, составляет:

$$\frac{w_{2k}}{w_{21}} = \frac{6}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{3}\right)} \cdot d\alpha = \frac{6 \cdot 0,5}{\pi \cdot 0,866} = 1,1, \quad (1)$$

где w_{2k} – число витков вторичной фазы ТПЧФ, α – угол между векторами вторичных напряжений фазы ТПЧФ.

При этом в частных случаях для различных схем ТПЧФ и различного числа вторичных фаз данное соотношение несколько изменяется в зависимости от количества используемых «базовых» вторичных обмоток, соединенных в звезду или треугольник.

На рис. 2 приведена принципиальная схема ТПЧФ 3/9, питающего 18-пульсный трехмостовой выпрямитель [4-6].

В данном преобразователе установленная мощность вторичной обмотки с числом витков w_{21} , соединенной в звезду, составляет [7]:

$$S_{21} = 3 \cdot U_2 \cdot I_{21} = \frac{3 \cdot U_d \cdot 0,816 \cdot I_d}{2,34} = 1,046 \cdot U_d \cdot I_d = \frac{1,046 \cdot U_{d1} \cdot I_d}{3} = 0,35 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \quad (2)$$

где U_2 – фазное напряжение, В; I_{21} – фазный ток, А; I_d – ток нагрузки, А; U_d – выпрямленное напряжение одного моста, В.

Суммарная установленная мощность ТПЧФ составляет:

$$\begin{aligned} S_{\text{уст}} &= 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n S_n = 0,5 \cdot (S_1 + S_{21} + S_{22} + S_{23}) = \\ &= 0,5 \cdot U_{d1} \cdot I_d \cdot (1,004 + 0,35 + 0,4 + 0,4) = 1,077 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где S_1 – установленная мощность первичной обмотки, о.е.; S_{2n} – установленные мощности вторичных обмоток, о.е.

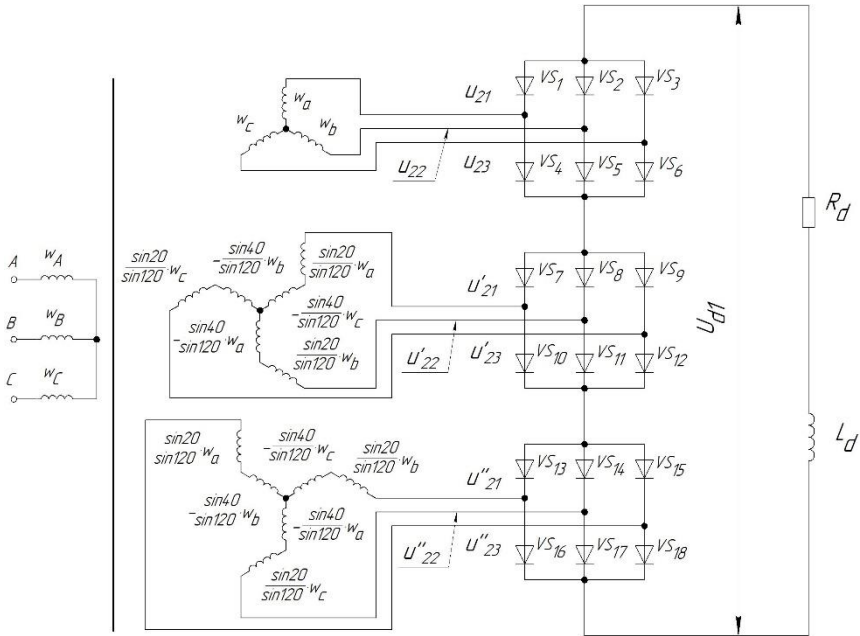


Рис. 2. ТПЧФ с 18-пульсным выпрямителем

На рис. 3 приведена принципиальная схема ТПЧФ 3/12 с 24-пульсным выпрямителем. ТПЧФ образован четырьмя вторичными обмотками, соединенными в звезду, треугольник и 2 зигзага [8, 9].

Установленная мощность обмоток, соединенных в зигзаги, составляет [3]:

$$S_2'' = S_2''' = 1,115 \cdot \frac{\pi \cdot U_{d1} \cdot I_d}{12}. \quad (4)$$

Суммарная установленная мощность ТПЧФ:

$$S_{\text{ТЧФ}}^* = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n S_n = \frac{\frac{\pi}{3} \cdot (0,998 + 1,058) \cdot U_{d1} \cdot I_d}{2} = 1,076 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \quad (5)$$

где S_n – установленные мощности первичной и вторичной сторон ТПЧФ, о.е.

Рассмотрим другой вариант построения ТПЧФ 3/12. Как известно, преобразование числа и сдвига фаз в трансформаторах может выполняться помимо вторичной стороны, также и на первичной стороне. Для этой цели первичные обмотки ТПЧФ могут выполняться по схемам зигзагов или могут использоваться несколько трансформаторов с первичными обмотками,

соединенными по схемам звезды, треугольника, зигзагов и т.д. На рис. 4 показан пример реализации ТПЧФ 3/12 на базе четырех силовых трансформаторов с первичными обмотками, соединенными по схемам двух зигзагов и двух звезд [10]. Именно таким образом достигается преобразование числа и сдвига фаз на первичной и вторичной стороне ТПЧФ.

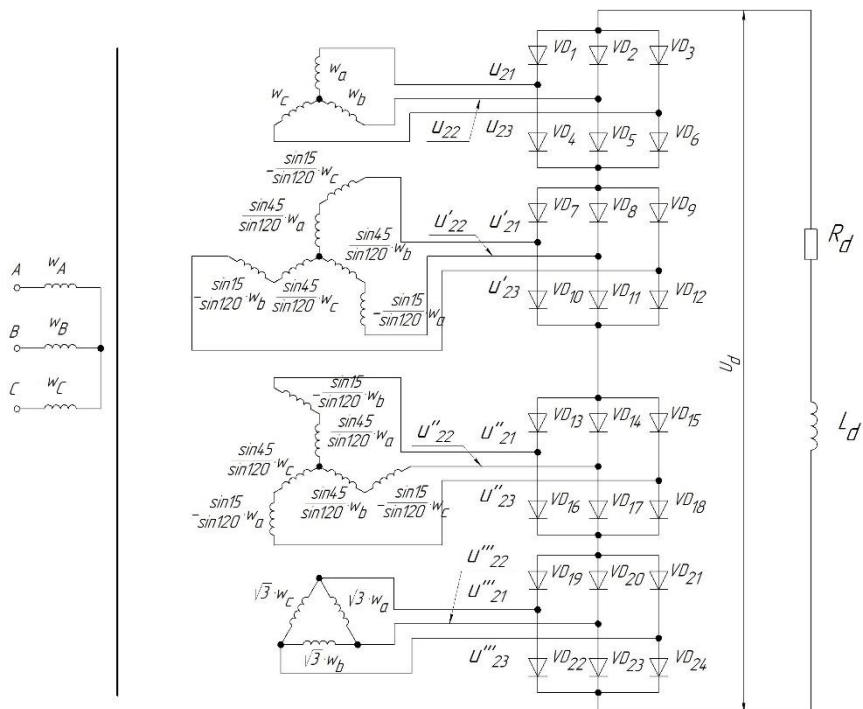


Рис. 3. ТПЧФ с 24-пульсным выпрямителем

На рис. 5 приведен расчетный график суммарной первичной МДС (или расчетного суммарного первичного тока, имеющего аналогичный вид).

Качество кривой суммарного потребляемого тока практически не отличается от случая однотрансформаторного преобразователя по рис. 3, при этом за счет параллельной работы трансформаторов возможно повышение надежности электроснабжения потребителей. Величина установленной мощности такого устройства незначительно отличается от случая одного трансформатора.

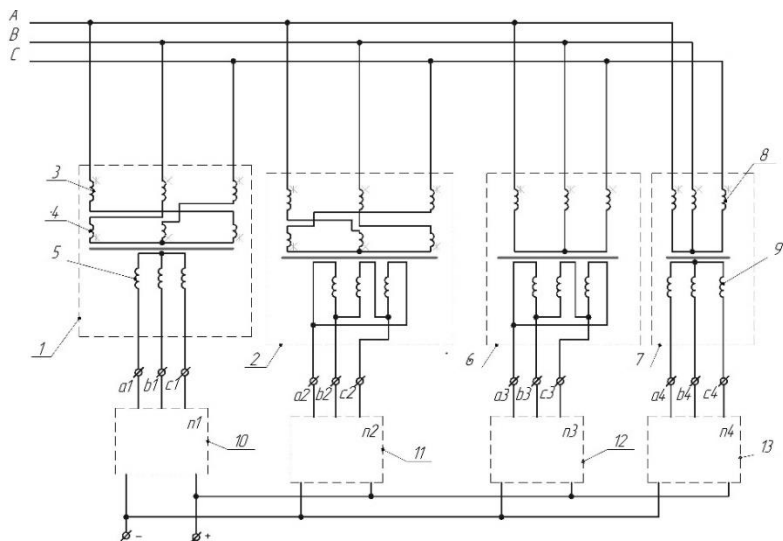


Рис. 4. ТПЧФ 3/12 с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной сторонах

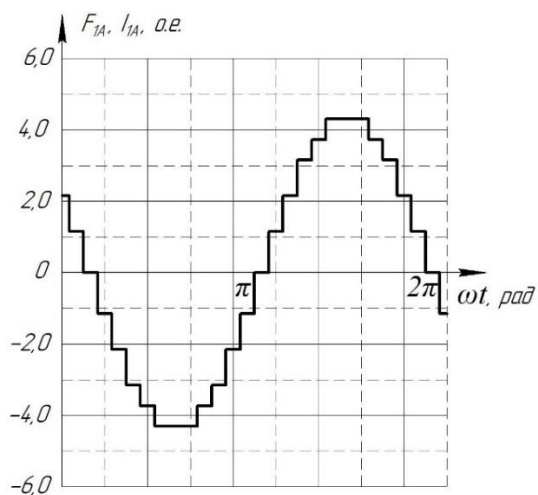


Рис. 5. Суммарная первичная МДС (суммарный первичный ток) ТПЧФ 3/12 с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной сторонах

III. Заключение

В настоящее время имеются разнообразные схемные решения автотрансформаторных и трансформаторных преобразователей числа фаз с различным количеством вторичных фаз. Установленные мощности ТПЧФ при их работе на 18- и 24-пульсные выпрямители незначительно отличаются от обычной величины установленной мощности трехфазного выпрямительного трансформатора. В относительных единицах она составляет $S_{уст}^* = 1,045 \cdot U_d \cdot I_d$, превышая ее на 1-5 %. У обычного трехстержневого трансформатора, питающего линейную нагрузку, данное превышение составит 5-10 %. Автотрансформаторные преобразователи числа фаз обладают при этом меньшими показателями установленной мощности.

В ряде случаев целесообразно применение питания многопульсных выпрямителей от ТПЧФ, образованных несколькими трансформаторами. При этом осциллограмма суммарного потребляемого тока практически не меняется, а надежность электроснабжения потребителей повышается за счет параллельной работы нескольких трансформаторов. Возможно также использование устройств, позволяющих производить преобразование числа и сдвига фаз как на вторичной, так и на первичной сторонах.

© Рогинская Л.Э., 2020

© Горбунов А.С., 2020

Библиографический список

- [1] Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 423 с.
- [2] Khan S., Zhang X., Saad M., Ali H., Khan B.M., Zaman H. Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unit topologies with intrinsic harmonic current cancellation // *Energies*. 2018. Vol. 11 (6). Pp. 1-18.
- [3] Roginskaya L., Gorbunov A. Installed power of transformers for equivalent multiphase rectification circuits // in proc. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Oct. 21-25, 2019, Ufa, Russia. 2020. P. 1-7.
- [4] Ялалова З.И., Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В. Определение электромагнитной совместимости фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2013. № 2. С. 16-19.
- [5] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И. Электромагнитные процессы в многофазном выпрямительном трансформаторе // *Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: Межвузовский научный сборник*. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 266-270.
- [6] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Фазообразующий трансформатор как элемент системы повышения электромагнитной совместимости управляемого полупроводникового преобразователя с сетью и нагрузкой // *Практическая силовая электроника*. 2016. № 3 (63). С. 28-34.

- [7] Roginskaya L.E., Gorbunov A.S. Determination of installed power of autotransformer phase number converters to improve electromagnetic compatibility // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 15-18, 2018, Moscow, Russia. 2019. P. 1-6.
- [8] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Уменьшение влияния на окружающую среду электромагнитных помех, создаваемых управляемыми полупроводниковыми преобразователями, при помощи фазопреобразующих трансформаторов // Экологические системы и приборы. 2017. № 11. С. 50-61.
- [9] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. № 3. Т. 10. С. 21-30.
- [10] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Многопульсное выпрямительное устройство, Пат. 184790 РФ, заявл. 13.06.18; опубл. 09.11.18. – Бюл. №31.

L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov

INSTALLED POWER OF AUTOTRANSFORMERS AND TRANSFORMERS RECTIFIER PHASE CONVERTER

Ufa State Aviation Technical University
Ufa, Russia

Abstract. The article deals with the use of autotransformer and transformer converters of the number of phases for powering multipulse multi-bridge rectifiers. The main problems that arise during the operation of power transformers and autotransformers for non-linear rectifier loading are given. The schematic diagrams of such devices are shown. So, the circuit of an 18-pulse autotransformer converter with a minimum installed power and intended for use in aviation is shown. The results of calculating the amount of installed power when supplying an 18-pulse three-bridge rectifier from a phase-converting transformer with secondary windings connected by star and two zigzag circuits are presented. The calculation of the installed power is shown when supplying a 24-pulse rectifier based on four bridges from a transformer with secondary windings connected according to the «star», «triangle» and two «zigzag» circuits. Devices with conversion of the number of phases and phase shift on the secondary and primary sides are considered. A schematic diagram of a transformer converter for supplying a 24-pulse rectifier with conversion of the number of phases and phase shift on the primary and secondary side is shown. The calculated waveform of the total primary current of such a converter is presented, which practically does not differ from the similar curve of the primary current of the previously considered transformer converter with conversion of the number of phases and phase shift on the secondary side.

Keywords: autotransformer, rectifier, windings, transformer, installed power.

References

- [1] S.A. Evdokimov and N.I. Schurov, *Strukturnyy sintez mnogofaznykh ventil'nykh preobrazovateley [Structural synthesis of multiphase semiconductor converters]*. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2010, 423 p (in Russian).
- [2] S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, B.M. Khan and H. Zaman, «Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unit topologies with intrinsic harmonic current cancellation», *Energies*, vol. 11, pp. 1-18, 2018.
- [3] L. Roginskaya and A. Gorbunov, «Installed Power of Transformers for Equivalent Multiphase Rectification Circuits», in proc. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Oct. 21-25, 2019, Ufa, Russia, pp. 1-7.
- [4] Z.I. Yalalova, L.E. Roginskaya and Yu.V. Rakhmanova, «Determination of electromagnetic compatibility of phase converting transformers of converting units», *ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, no. 2, pp. 16-19, 2013 (in Russian).
- [5] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and Z.I. Yalalova, «Elektromagnitnyye protsessy v mnogofaznom vypryamitel'nom transformatore [Electromagnetic processes in a multiphase rectifier transformer]», in proc. *Interuniversity Scientific Collection: Elektroenergeticheskiye sistemy i seti. Energoberezheniye [Electroenergetic systems and networks. Energy saving]*, 2013, Ufa, Russia, pp. 266-270 (in Russian).
- [6] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Phase-converting transformer as an element of controlled semiconductor converter electromagnetic compatibility increase with mains and load», *Practical Power Electronics*, no. 3 (63), pp. 28-34, 2016.
- [7] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Determination of installed power of autotransformer phase number converters to improve electromagnetic compatibility», in proc. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 15-18, 2018, Moscow, Russia, pp. 1-6.
- [8] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Reducing the influence on the environment of the electromagnetic interferences created by controlled semiconductor converters, using phase-converting transformers», *Ecological Systems and Devices*, no. 11, pp. 50-61, 2017 (in Russian).
- [9] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and Z.I. Yalalova, «Improving of electromagnetic compatibility of converter devices with mains and load using multiphase transformers», *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, no. 3, vol. 10, pp. 21-30, 2014.
- [10] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and A.A. Mednov, «Mnogopul'snoye vypryamitel'noye ustroystvo [Multipulse rectifier device]», R.F. Patent 184790, Nov. 09, 2018 (in Russian).

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_92

Н.Н. Вихорев, Д.А. Алешин

АНАЛОГОВЫЙ КОНТУР ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАЮЩЕГО СИГНАЛА АКТИВНО-АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены расчетные соотношения электрических параметров аналоговых контуров задающего сигнала, которые могут быть использованы при проектировании быстродействующих устройств активной фильтрации и подавления гармонических составляющих тока и напряжения в линиях электропередачи с нелинейными нагрузками и другими источниками искажений. Предложены схемотехнические решения, позволяющие реализовать аналоговые контуры измерения и адаптивной обратной связи, исключающие необходимость применения быстрого преобразования Фурье для формирования задающих сигналов активного фильтра гармоник. Представлены имитационные модели аналоговых узлов и приведены результаты моделирования, наглядно демонстрирующие эффективную работу фильтрующих узлов цепей измерения при их функционировании в системе управления.

Ключевые слова: активно-адаптивные фильтры гармоник, высшие гармонические составляющие тока и напряжения, коэффициент нелинейных искажений, операционный усилитель, полосовой фильтр, фильтр нижних частот, широтно-импульсная модуляция.

I. Введение

Подключение к электрической сети нелинейных нагрузок (электромагнитные устройства, двигатели, трансформаторы, сварочное оборудование и т.д.), полупроводниковых преобразовательных устройств (выпрямительные агрегаты, сетевые (ведомые сетью) инверторы, преобразователи частоты), тиристорных регуляторов напряжения и аналогичных им устройств, приводит к протеканию в линиях электропередачи гармонических составляющих тока (ГСТ). Это обуславливает искажения питающего напряжения в точках подключения других потребителей.

Отклонения формы питающего напряжения и протекание ГСТ приводят к различным негативным явлениям:

- увеличению тепловых потерь в сердечниках и снижению общего КПД электромагнитных приборов;
- ускоренному старению изоляции токоведущих кабелей;

- ложному срабатыванию устройств защиты;
- выходу из строя конденсаторных батарей устройств компенсации реактивной мощности;
- искажениям показаний приборов учета;
- сбоям в работе цифрового оборудования и многим другим.

Снижение влияния гармонических искажений осуществляется различными способами:

- установкой пассивного фильтрующего оборудования непосредственно в конструкции источника искажений;
- обеспечение двойного преобразования энергии (выпрямление - инвертирование) между источником питания и потребителем, чувствительным к гармоническим искажениям питающего напряжения;
- установкой пассивных фильтров в линии электропередачи, осуществляющих подавление искажений в широкой полосе спектра, либо снижающих величину одной или нескольких из наиболее значимых гармоник тока;
- установкой устройств продольной компенсации искажения питающего напряжения в узле подключения нагрузки;
- установкой активных фильтров гармонических искажений (АФГ), осуществляющих индивидуальное регулирование каждой из величин ГСТ в автоматизированном режиме, или широкополосное подавление гармонических искажений в автоматическом режиме.

В настоящее время одним из наиболее перспективных решений в области фильтрации ГСТ является установка АФГ, выполненного на базе полупроводникового преобразователя энергии, что позволяет подавлять ГСТ на заданную величину [1, 2]. Важнейшим параметром АФГ является его быстродействие, известное также как скорость реакции или время отклика: период, по истечении которого прибор отреагирует на изменение спектрального состава тока в линии электропередачи. При этом следует учитывать, что большинство из представленных на сегодняшний день решений в области АФГ работает по следующему принципу: определение величин гармонических составляющих спектра с помощью быстрого преобразования Фурье, с последующим формированием тока каждой гармонической составляющей в противофазе.

При прямом подходе к измерениям и преобразованию Фурье требуется не менее одного периода питающего напряжения, чтобы получить параметры спектра напряжения. Напряжение, затрачиваемое на гармонический анализ, может быть уменьшено в несколько раз в зависимости от принятых допущений:

- анализ за половину периода ($T/2$) может быть осуществлен в случае, если заведомо известно, что в цепи электропитания отсутствует посто-

янная составляющая, либо она компенсирована с помощью технических средств;

- анализ за половину периода может проводиться независимо для каждой из полуволн питающего напряжения;
- анализ проводится за четверть периода, если во входном сигнале отсутствуют четные гармоники.

При реальном применении описанных способов время, затрачиваемое на измерения, может составить никак не менее, а подчас даже более одного периода, поскольку для точного определения величин составляющих необходимо отсесть влияние помех и колебания частоты основной гармоники. Длительность измерений при этом может составить 4-10 периодов питающего напряжения. Это приводит к значительному снижению динамических свойств АФГ и снижению его эффективности при эксплуатации в энергосистеме с изменчивым спектральным составом напряжения. Альтернативным решением в данной области является выделение с помощью преобразования Фурье только основной гармоники напряжения, относительно которой формируется сигнал искажений. При этом компенсация отклонений осуществляется посредством оперирования с мгновенными величинами напряжения искажения относительно основной гармоники [1].

Одним из перспективных решений в области разработок АФГ является устройство подавления гармонических составляющих (УПГС) (рис. 1). Принцип его работы заключается в формировании напряжения (в точке подключения преобразователя VT с LC -фильтром к дросселю L), искажения в котором инверсны по отношению к высшим гармоникам напряжения в линии. Возможно, таким образом, замкнуть ГСТ в контуре, включающем источник искажений и активный фильтр и тем самым снизить величину ГСТ в линии электропередачи [3-6]. Преимущество данного устройства заключается в том, что для его функционирования требуются только параметры первой гармонической составляющей напряжения, а искажения определяются как отклонения величин мгновенных значений напряжения от формы основной гармоники. Указанный подход позволяет значительно увеличить скорость реакции АФГ на изменение формы питающего напряжения, так как устройство фактически оперирует мгновенными значениями напряжения, в отличие от классических методов с полным гармоническим анализом сигнала.

Любой из описанных выше алгоритмов фильтрации для корректной работы требует, однако, применения средств предварительной (цифровой или аналоговой) фильтрации сигнала, что негативно влияет на динамику узла обратной связи в целом. Поэтому в данной работе рассматривается схемотехническое решение, позволяющее объединить задачи фильтрации,

выделения первой гармонической составляющей и формирования задающего напряжения для АФГ посредством аналоговой обработки сигнала, позволяющей минимизировать время отклика АФГ на динамическое изменение параметров напряжения питания.

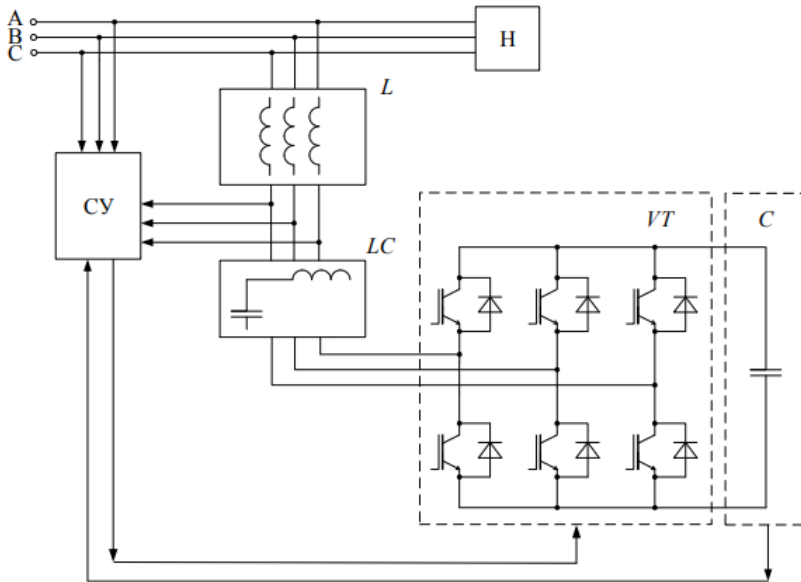


Рис. 1. Структура устройства подавления гармонических искажений тока в линии электропередачи:

H – нагрузка, $СУ$ – система управления, L – сетевые дроссели, LC – фильтр, VT – преобразователь, C – конденсатор звена постоянного тока, ABC – линия электропередачи.

II. Аналоговый контур выделения опорного сигнала

Предлагаемое решение основано на формировании аналогового контура выделения первой гармонической составляющей напряжения, выполненного на базе полосового фильтра, (в данной работе рассматривается решение со многопетлевой обратной связью) с фазовой и амплитудной коррекцией (рис. 2) [6].

Выходной сигнал фильтрующей цепи может быть использован как опорное напряжение для выделения искажений напряжения (вычитание – инверсия), а также формирования задающего сигнала для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (сложение – коэффициент подавления).

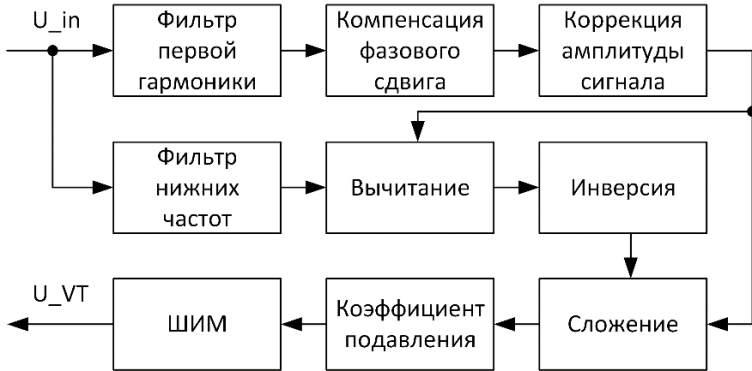


Рис. 2. Структура узла формирования сигнала управления ШИМ

Имитационная модель схемотехнического решения узла выделения первой гармонической составляющей приведена на рис. 3.

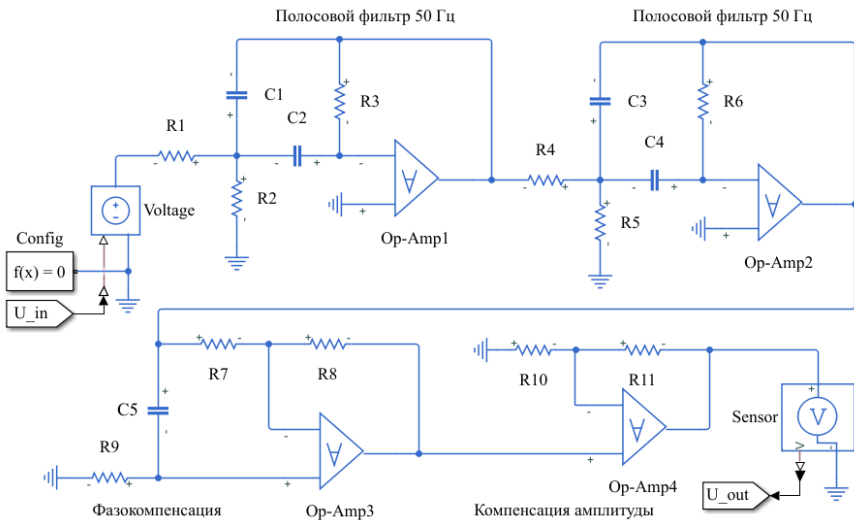


Рис. 3. Имитационная модель аналогового контура выделения первой гармонической составляющей сигнала питающего напряжения

Устройство состоит из двух последовательно включенных полосовых фильтров с идентичными параметрами для повышения коэффициента

подавления, звена фазовой коррекции и звена коррекции (компенсации) снижения амплитуды выходного сигнала [3, 7, 8].

Разновидность фильтра, его порядка и количества звеньев выбирается, исходя из величины возможных искажений в конкретных условиях применения АФГ, что требует предварительного расчета. В настоящей работе рассматривается аналоговый контур, способный формировать требуемый для работы АФГ сигнал в условиях питающего напряжения с суммарным коэффициентом искажений более 25 % и хаотическими высокочастотными помехами изменяемого сигнала, амплитуда которых может достигать 10 % от полезного сигнала.

Определение добротности Q звена полосового фильтра целесообразно производить на ширине полосы частот, максимально близкой (40–50 Гц) к резонансной ($f_{res} = 50$ Гц) [9-11] частоте:

$$Q = \frac{f_{res}}{f_{max} - f_{min}}. \quad (1)$$

где f_{max} – максимальная частота полосы пропускания; f_{min} – минимальная частота полосы пропускания. Для данного решения добротность составит 2,5.

Параметры конденсаторов могут быть выбраны одинаковыми ($C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$). В данном случае, емкости полосовых фильтров приняты равными 1 мкФ.

Сопrotivления резисторов обратной связи полосовых фильтров R_3 и аналогичного ему R_6 :

$$R_3 = R_6 = \frac{2 \cdot Q}{C \cdot \omega_{res}}. \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора полосового фильтра; ω_{res} – круговая резонансная частота.

Коэффициент передачи (модуль) для данной схемы определяется параметрами элементов:

$$|K| = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (3)$$

где R_1 – сопротивление резистора, образующего делитель напряжения первого полосового фильтра; C_1, C_2 – емкость конденсатора первого полосового фильтра.

Используя (3), могут быть определены R_1, R_2, R_4, R_5 :

$$R_1 = R_4 = \frac{Q}{|K| \cdot C \cdot \omega_{res}}; \quad (4)$$

$$R_2 = R_5 = \frac{Q}{(2 \cdot Q^2 - |K|) \cdot C \cdot \omega_{res}}. \quad (5)$$

где R_4 – сопротивление резистора, образующего делитель напряжения первого полосового фильтра; R_2, R_5 – сопротивление резисторов, образующих делитель напряжения полосовых фильтров. Расчетные параметры могут быть скорректированы для каждого конкретного случая.

Применяемые полосовые фильтры являются инвертирующими, и их последовательное соединение почти полностью компенсирует взаимный фазовый сдвиг. Однако данного эффекта сигнала может быть недостаточно, поэтому целесообразно ввести фазосмещающее звено, позволяющее компенсировать рассогласование сигналов [9-11]:

$$\varphi_{cor} = 180^\circ - 2 \cdot \arctg(R_9 \cdot C_5 \cdot \omega_{res}). \quad (6)$$

где φ_{cor} – корректирующий фазовый сдвиг; R_9 – сопротивление резистора в цепи корректировки; C_5 – емкость конденсатора в цепи корректировки. При этом резисторы отрицательной обратной связи R_7 и R_8 могут быть выбраны высокоомными, например, 10 кОм.

Входные резистивные цепи полосовых фильтров вносят наибольший вклад в снижение амплитуды выходного сигнала. Сами цепи фильтров также имеют сложную зависимость от установленных элементов, однако поправочный коэффициент усиления может быть определен, исходя из соотношений резисторов, и учтен в цепи неинвертирующего усилителя:

$$K_u = 1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}. \quad (7)$$

где R_{10}, R_{11} – сопротивление резисторов в цепи компенсации амплитуды.

Результатирующим сигналом вышеописанного контура является основная гармоника питающего напряжения, которая используется в качестве опоры для определения сигнала искажений в контуре формирования задающего напряжения ШИМ (рис. 4).

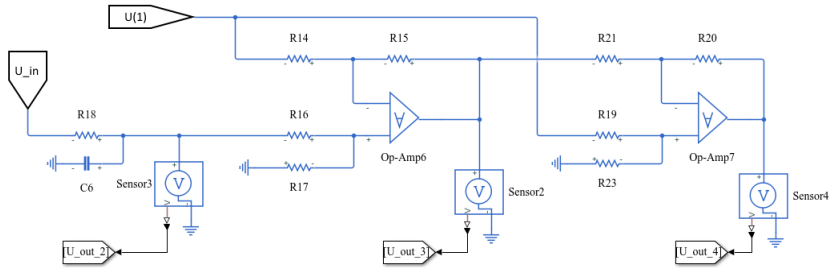


Рис. 4. Формирование задающего сигнала ШИМ

Для снижения искажений в работе фильтра целесообразно произвести фильтрацию входного сигнала от высокочастотных помех. При этом частоту среза наиболее рационально выбирать между наивысшей из подавляемых гармоник тока и частотой широтно-импульсной модуляции:

$$\omega_{res} = \frac{1}{R_{18} \cdot C_6}. \quad (8)$$

где R_{18} – сопротивление резистора фильтра нижних частот; C_6 – емкость конденсатора фильтра нижних частот.

Если частота среза многократно превышает частоту высшей гармоники, то условно можно считать коэффициент передачи данного фильтрующего звена равным единице. Фазовое смещение гармонических составляющих на выходе данного звена можно считать близким к нулю.

III. Результаты моделирования

На рис. 5 приведены временные диаграммы сигналов, подвергнутых обработке с помощью аналогового контура.

Сигнал U_{in} соответствует гипотетически измеряемому сигналу напряжения сети, к основной гармонике которого подмешаны частоты 10 Гц (0,1 В) и 250 Гц, амплитуда которых составляют 10 % от амплитуды основной гармоники. Также в сигнал введены импульсные искажения.

В момент времени, соответствующий 0,0055 с, основная гармоника ступенчато увеличивается на 20 %.

Диаграммы U_{noise} представляют собой сумму вышеописанного сигнала и белого шума, случайные величины которого также находятся в диапазоне 10 % от основной гармоники. Сигнал U_{noise} является входным для аналогового контура выделения основной гармоники напряжения.

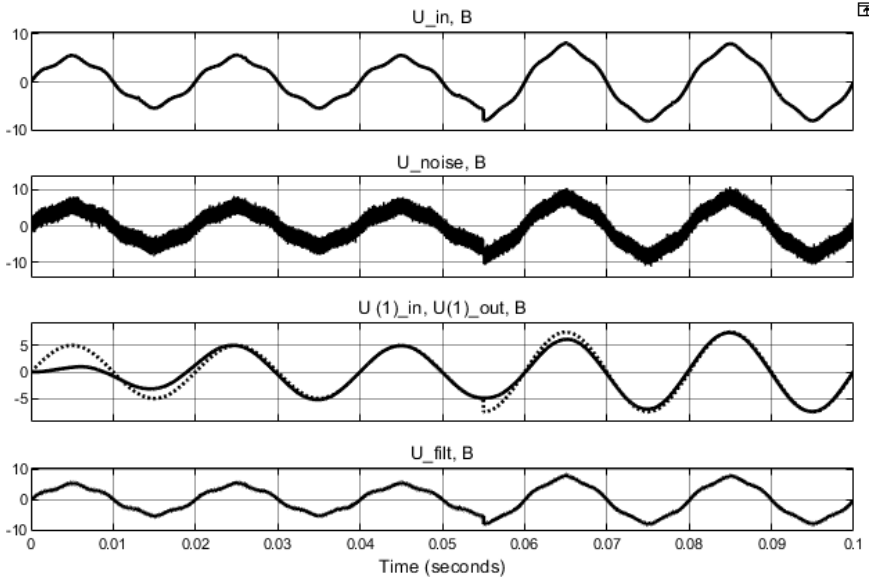


Рис. 5. Временные диаграммы устройства подавления гармоник тока

Сигнал $U(1)_{in}$, изображенный пунктирной линией, представляет собой заданную во входном сигнале первую гармоническую составляющую. Сигнал $U(2)_{out}$, изображенный сплошной линией, представляет собой первую гармоническую составляющую, отфильтрованную из искаженного сигнала U_{noise} . Как можно заметить из представленных временных диаграмм, сигналы полностью идентичны друг другу за исключением интервалов пускового переходного процесса и резкого увеличения амплитуды основной гармоники.

При указанных параметрах моделирование переходных процессов составляет не более одного периода напряжения, что совпадает с требованиями для анализа с помощью быстрого преобразования Фурье. Учитывая тот факт, что для реального гармонического анализа требуется более одного периода и предварительная фильтрация, в данном случае результат получен значительно быстрее, без дополнительных преобразований.

Диаграмма U_{filt} демонстрирует результат фильтрации с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). Как можно заметить, результат четвертой диаграммы почти идентичен первой диаграмме, из чего следует, что данный сигнал может быть использован как задающий для системы ШИМ АФГ.

На рис. 6 приведены временные диаграммы входного и выходного сигналов для всей аналоговой цепи формирования задающего напряжения. Тонкая линия соответствует входному сигналу, жирная линия соответствует задающему сигналу ШИМ, в котором гармонические искажения инвертированы по отношению к основной гармонике напряжения [12, 13].

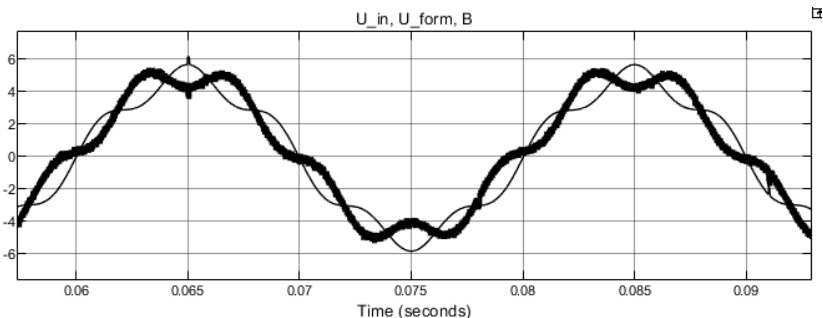


Рис. 6. Диаграммы входного и выходного сигналов для аналоговой цепи формирования задающего напряжения

Изменяя коэффициент усиления выходного сумматора или дополнительной цепи усиления, возможно варьировать эффект инверсии от нулевой до практически любой величины, что может быть использовано для управляемого воздействия на величину гармонических искажений.

IV. Заключение

Приведенные схемотехнические решения и расчетные соотношения могут быть использованы при проектировании активно-адаптивных фильтров гармонических искажений с высоким быстродействием и автоматическим управлением. Поскольку приведенная схемотехника чувствительна к настройке, температурной стабильности и разбегу параметров элементов, целесообразно рассматривать интегральное исполнение узлов, например, с помощью программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС).

Представленная реализация контура формирования задающего сигнала может быть использована и как дополнительное звено, улучшающее динамические показатели существующих фильтров гармоник.

Библиографический список

- [1] Вихорев Н.Н., Чивенков А.И., Алешин Д.А., Чернов Е.А. Устройство подавления высших гармоник тока // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/tu/magazine/archive/n4y2018/5240 (дата обращения 01.03.2020).
- [2] Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- [3] Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Алешин Д.А. Модуль регулирования фазового сдвига и амплитуды задающего напряжения. Пат. 178765 RU, заявл. 19.02.2018, опублик. 18.04.2018. – Бюл. № 11.
- [4] Штерн М.И. Силовая электроника. Расчеты и схемотехника. СПб.: Наука и техника, 2017. – 400 с.
- [5] Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
- [6] Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
- [7] Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. – 320 с.
- [8] Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Алешин Д.А. Регулирование фазового угла напряжения задания // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей, Декабрь 22, 2017, Нижний Новгород, Россия. С. 5-8.
- [9] Галочкин В.А. Схемотехника аналоговых и цифровых устройств. Самара: ФГБОУ ВПО ПГУТИ, 2016. – 441 с.
- [10] Пейтон А.Дж., Волш. В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.
- [11] Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2005. – 528 с.
- [12] Вихорев Н.Н., Чивенков А.И., Алешин Д.А. Регулирование тока активного фильтра гармонических искажений // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/tu/magazine/archive/n1y2019/5573 (дата обращения 13.04.2020).
- [13] Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Алешин Д.А. Устройство подавления высших гармоник тока. Пат. 184273 RU, заявл. 08.06.2018, опублик. 22.10.2018. – Бюл. № 30.

N.N. Vikhorev, D.A. Aleshin

ANALOGUE CONTOUR FOR DRIVING SIGNAL FORMATION OF ACTIVE ADAPTIVE FILTER OF HARMONIC DISTORTIONS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the parameters and their relationships that can be used in the design of high-speed devices for active filtering and suppression of the harmonic components of current and voltage in power transmission lines with non-linear loads and other sources of distortion.

The proposed circuit solutions make it possible to implement analog measurement and adaptive feedback loops, eliminating the need to use the fast Fourier transform to form the driving signals of the active harmonic filter.

Simulation models of analog nodes are presented and their simulation results clearly demonstrate the effective operation of filter nodes when they function as part of a control system.

Keywords: active adaptive harmonic filters, band-pass filter, harmonic distortion coefficient, higher harmonic components of current and voltage, low-pass filter, operational amplifier, pulse-width modulation.

References

- [1] N.N. Vikhorev, A.I. Chivenkov, D.A. Aleshin and E.A. Chernov, «Harmonic current suppression device», *Engineering Journal of Don*, no. 4 (51), 2018. [Online]. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5240.
- [2] M.V. Gelman, M.M. Dudkin and K.A. Preobrazhensky, *Preobrazovatel'naya tekhnika [Converting equipment]*. Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2009 (in Russian).
- [3] A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev and D.A. Aleshin, «Modul' regulirovaniya fazovogo sdviga i amplitudy zadayushchego napryazheniya [A module for controlling the phase shift and the amplitude of the reference voltage]», Patent RU 178765, Apr. 18, 2018 (in Russian).
- [4] M.I. Stern, *Silovaya elektronika. Raschety i skhemotekhnika [Power electronics calculations and circuitry]*. St. Petersburg: Science and Technology, 2017.
- [5] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor converter technology]*. Moscow: Technosphere, 2005 (in Russian).
- [6] V.S. Moin, *Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli [Stabilized transistor converters]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [7] F.V. Kushnir, *Elektroradioizmereniya [Electro-radio measurements]*. Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1983 (in Russian).
- [8] A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev and D.A. Aleshin, «Regulirovanie fazovogo ugla napryazheniya zadaniya [Regulation of the phase angle of the voltage task]», in

- proc. *Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Dec. 22, 2017, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 5-8 (in Russian).
- [9] V.A. Galochkin, *Analogovaya elektronika na operacionnyh usilitelyah [Circuitry of analog and digital devices]*. Samara: PSUTI, 2016 (in Russian).
- [10] A.J. Peyton and V. Walsh, *Analog Electronics with Op Amps. A source book of practical circuits*. Cambridge: University Press, 1993.
- [11] G.I. Volovich, *Skhemotekhnika analogovyh i analogo-cifrovyyh elektronnyh ustrojstv [Circuitry of analog and analog-digital electronic devices]*. Moscow: Dodeka-XXI Publishing House, 2005 (in Russian).
- [12] N.N. Vikhorev, A.I. Chivenkov and D.A. Aleshin, «Current regulation active harmonic distortion filter», *Engineering Journal of Don*, no. 1 (52), 2019. [Online]. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5573.
- [13] A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev and D.A. Aleshin, «Ustrojstvo podavleniya vysshih garmonik toka [Device for suppressing higher harmonics of the current]», Patent RU 184273, Oct. 22, 2018 (in Russian).

НАШИ АВТОРЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Бирюлин Владимир Иванович – доцент Юго-Западного государственного университета, кандидат технических наук; **bir1956@mail.ru**

Буй Нгок Хунг – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета; **hungbui83eec@gmail.com**

Герман Леонид Абрамович – профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в г. Нижнем Новгороде, доктор технических наук; **lagerman@mail.ru**

Дарьенков Андрей Борисович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **darenkov@nntu.ru**

Иванов Антон Валерьевич – главный специалист Управления цифровых технологий и IT-решений АО «ФИЦ»; **ivanov@ftc-energo.ru**

Коверникова Лидия Ивановка – старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, кандидат технических наук; **kovernikova@isem.irk.ru**

Куделина Дарья Васильевна – доцент Юго-Западного государственного университета, кандидат технических наук; **mary_joy@mail.ru**

Осокин Владимир Леонидович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, кандидат технических наук; **osokinvl@mail.ru**

Погорелов Алексей Владимирович – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; **pog_alex31@mail.ru**

Прокopiшин Дмитрий Игоревич – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; **prokopishin.dmitrij@yandex.ru**

Туркина Ольга Викторовна – начальник Департамента технического развития и инноваций АО «ФИЦ», кандидат технических наук; **turkina@ftc-energo.ru**

Фальков Георгий Александрович – магистрант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; **bag.falkova@gmail.com**

Хватов Олег Станиславович – профессор кафедры Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; **eos@nntu.ru**

Чайкин Вячеслав Сергеевич – начальник Управления цифровых технологий и IT-решений АО «ФИЦ»; **chaikin@ftc-energo.ru**

Чивенков Александр иванович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; **chyvenkov@mail.ru**

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Алешин Дмитрий Александрович – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **dima2995@mail.com**

Вихорев Николай Николаевич – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **nrvikhorev@gmail.com**

Горбунов Антон Сергеевич – старший преподаватель Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук; **freizer-anton@yandex.ru**

Рогинская Любовь Эммануиловна – профессор Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук; **roginskaya36@mail.ru**

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 2

Nizhny Novgorod 2020

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2020. No. 2 (10). – 110 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2020

CONTENTS

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
L.I. Kovernikova, N.H. Bui Problems of power quality in electrical supply system of coal sorting plant in one coal quarry of Vietnam	4
L.A. German, A.I. Chivenkov Electricity losses in AC traction network with static reactive power generator.....	17
A.B. Dar'enkov, O.S. Khvatov Evaluation of average cost of generated electricity for operation period of variable speed diesel generator set.....	29
O.V. Turkina, V.S. Chaykin, A.V. Ivanov Practical aspects related to application of markup language SCL in developing SSD files during power facilities design process.....	43
V.L. Osokin Modeling of processes in system «power source – electro-gas discharge reactor» in integrated package Mathcad.....	54
A.V. Pogorelov, D.I. Prokopishin, G.A. Fal'kov Analysis of non-sinusoidality of mine power supply system using instantaneous resistance.	65
V.I. Biryulin, D.V. Kudelina Modernization of fuzzy inference system for evaluating current state of cable lines insulation.....	74
POWER ENGINEERING	82
L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov Installed power of autotransformers and transformers rectifier phase converter	82
N.N. Vikhorev, D.A. Aleshin Analogue contour for driving signal formation of active adaptive filter of harmonic distortions.....	92
Authors	105

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 29.06.2020. Дата выхода в свет: 24.07.2020

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.