ISSN 0033-1155

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2021 4

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

ЭНЕРГО СБЕРЕЖЕНИЕ

Гамазин Станислав Иванович

(1939 – 2021)



Станислав Иванович Гамазин родился 3 августа 1939 г. в селе Чернава Рязанской области. После окончания средней школы в 1956 г. поступил в Московский энергетический институт. В 1962 г. по рекомендации Ученого совета был принят в аспирантуру, после защиты кандидатской диссертации направлен преподавателем в Волжский филиал МЭИ (Чебоксары), где исполнял обязанности заведующего кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

С 1968 г. Станислав Иванович работал в МЭИ сначала в должности доцента, после защиты докторской диссертации в 1994 г. — профессора, с 1997 по 2004 г. — заведующим кафедрой ЭПП.

С. И. Гамазин являлся руководителем приоритетного научного направления “Повышение надежности функционирования технологических процессов промышленных производств после кратковременных перерывов электроснабжения”. Внес существенный научный вклад в разработку и внедрение устройств быстродействующего автоматического ввода резерва электроснабжения (БАВР) аналогового (1990 г.) и микропроцессорного (2007 г.) типов.

В период военных действий в Афганистане С. И. Гамазин работал в Кабульском политехническом институте. Комитетом по делам воинов-интернационалистов при Совете Глав Правительств государств — участников СНГ награжден: памятным знаком “Участник Афганской войны”; медалью “Ветеран боевых действий”; юбилейной медалью “15 лет вывода Советских войск из Афганистана”.

Результаты научных работ С. И. Гамазина опубликованы в более, чем в 200 печатных трудах, из которых 5 монографий, 14 патентов на изобретения. Им подготовлены 2 доктора и 29 кандидатов технических наук.

За высококвалифицированную педагогическую и научную деятельность Станиславу Ивановичу было присвоено почетное звание **“Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации”**.

Коллектив кафедры “Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий” НИУ “МЭИ” скорбит о кончине Станислава Ивановича Гамазина — замечательного человека, выдающегося ученого и преподавателя.

ЭНЕРГО СБЕРЕЖЕНИЕ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО “ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС”,
КОРПОРАЦИЯ “ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС”, НТФ “ЭНЕРГОПРОГРЕСС”,
НП “НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС”

4 Апрель 2021

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ “Энергопрогресс”

СОДЕРЖАНИЕ

Экономия энергетических ресурсов

Семутникова Е. Г., Гашо Е. Г., Локтионов О. А. Энергоэкологическая модернизация промышленного комплекса Москвы: увязка энергосбережения и внедрения наилучших доступных технологий 2

Проекты и исследования

Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Черненко А. Н., Пудовинников Р. Н. Реактивная нагрузка синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием квазипостоянных токов 11

Надтока И. И., Осадчий П. В., Тропин В. В. Сравнение потерь мощности в двух структурах распределительной электрической сети коммунально-бытового назначения 20

Егоров М. Ю. Концепция стабилизатора напряжения для устройств с импульсными блоками питания 29

Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Режимы работы белых и красных зеркальных инфракрасных излучателей при питании током сложной формы 39

Буланин В. А. Энергетический анализ эффективности когенерации 46

Эксплуатация, монтаж и наладка

Щемелева Ю. Б., Щемелев А. Н., Давыдов С. К. Практический опыт исследования структуры электрических потерь 53

Гамазин С. И. (некролог) . . . . . 3 стр. обложки

© НТФ “Энергопрогресс”, “Промышленная энергетика”, 2021 г.

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

DOI 10.34831/EP.2021.55.34.001

Энергоэкологическая модернизация промышленного комплекса Москвы: увязка энергосбережения и внедрения наилучших доступных технологий

Семутникова Е. Г., канд. физ.-матем. наук
Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы
Гашо Е. Г., доктор техн. наук, Локтионов О. А., ассистент
НИУ "МЭИ", Москва

Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) является ключевым фактором энергосбережения в промышленности и энергетическом комплексе крупных городов. Рассмотрен опыт Москвы, позволивший за истекшие десять лет существенно повысить энергетическую и экологическую эффективность энергопромышленного комплекса города. Выявлены ключевые резервы роста энергетической эффективности без снижения темпов развития города. Ключевые НДТ, реализованные в городском энергетическом комплексе, — это комбинированная выработка тепла и электроэнергии, а также модернизация свыше четверти мощности турбинного парка парогазовыми установками. Показаны основные механизмы и инструменты реализации данной задачи, рассмотрены пути их дальнейшего тиражирования в других регионах.

Ключевые слова: высвобождение мощности, когенерация, комбинированная выработка тепла и электроэнергии, наилучшие доступные технологии, городская программа энергосбережения, энергетика мегаполиса, энергетический баланс, эмиссия вредных веществ, энергоэкологическая модернизация.

Оценки энерго- и ресурсоэффективности отраслей экономики Москвы выполнялись в разное время с различной детализацией, обусловленной соответствующими исследовательскими или управленческими задачами.

Основными источниками информации являлись соответствующие статистические формы (11-ТЭР, 6-тп и др.), а также результаты частных энергетических обследований промышленных предприятий, энергетических объектов и систем инфраструктуры города. В табл. 1 представлен краткий анализ городских программ энергосбережения, в которых в той или иной степени декларировались цели и задачи повышения энергетической эффективности экономики города с сопутствующими экологическими показателями. Как видно из табл. 1, каждая из представленных программ опиралась на цели и задачи своего периода времени.

Наиболее эффективной можно признать программу энергосбережения на 2009 – 2011 гг. и на перспективу до 2020 г. Надо напомнить, что в диапазоне 10 – 15 лет назад ситуация в энергетике Москвы была в какой-то степени критической. "Блэкаут" в мае 2005 г., суровая зима 2006 г., палящий зной лета 2010 г. и ледяные дожди 2011 г. испытали энергетику столичного региона на прочность по всем возможным климатическим нагрузкам.

В связи с ростом пиковых нагрузок в конце 1990-х и начале 2000-х годов в Москве введено в практику ограничение в потреблении электроэнергии в период максимума электрической нагрузки. В 2007 г. была относительно теплая зима, но даже при этом избежать отключений не удалось. Разрыв между потребностью в период максимума электрических нагрузок и возможностью энергосистемы достигал на то время более 2 тыс. МВт. Этот разрыв может быть ликвидирован к 2010 г. (отмечалось в преамбуле к программе энергосбережения на 2009 – 2013 гг.) только при условии, что программа строительства новых генерирующих мощностей будет четко выполнена и будут реализованы задания по

Таблица 1

Сравнительные особенности городских программ по энергосбережению за последние 20 лет

Сроки действия	Наименование программ	Особенности программ энергосбережения
1999 – 2001 гг.	Первая программа энергосбережения в Москве осуществлялась в период упадка промышленности, когда основными потребителями энергии были комплекс жилищно-коммунального хозяйства, транспорт, торговля и офисные помещения	Целью данной программы было проведение научно-исследовательских разработок. Отобранные проекты не носили программного характера и не затрагивали массовых потребителей энергетических ресурсов. Программа являлась планом выполнения конкретных мероприятий на объектах городской инфраструктуры
2001 – 2003 гг.	Городская программа по энергосбережению, утвержденная постановлением Правительства Москвы от 09 октября 2001 г. № 912-ПП, была значительно расширена. В поле ее влияния входили уже отрасли городского хозяйства Москвы: топливно-энергетическое хозяйство (гос. сектор), ОАО “Мосэнерго”, жилищно-коммунальное хозяйство, строительный комплекс, промышленность, транспорт, социальная сфера	Программой было предусмотрено выполнение конкретных мероприятий в организациях городского хозяйства. Вместе с тем программа не охватывала процессом энергосбережения многие важные направления. Управление программой сводилось в основном к отчетам о выполнении конкретных действий, установленных программой. Оценить эффективность мер данной программы затруднительно
2004 – 2008 гг. и на период до 2010 г.	Программа энергосбережения на перспективу до 2010 г., одобренная постановлением Правительства Москвы от 28 сентября 2004 г. № 672-ПП, уже декларировала комплексный подход к решению задач по энергосбережению. Финансирование программы планировалось как за счет бюджета, так и за счет привлекаемых средств	Программа была разработана на основе программ предприятий и охватывала не всех потребителей. Механизмы финансово-экономического регулирования были представлены не в полной мере. Управление программой строилось исключительно на выполнении плановых задач, но не на решении проблем в целом. В 2004 – 2007 гг. плановые задания по экономии топлива выполнялись на 64 – 89 %
2009 – 2011 гг. и на перспективу до 2020 г.	Городская целевая программа на перспективу до 2020 г. впервые охватывала практически все ключевые сферы экономики города. Принципиальным отличием программы является наличие подпрограмм: “Развитие нормативно-правовой базы энергосбережения”, “Сокращение потребляемой электрической мощности”, “Пропаганда энергосбережения в г. Москве” и разделов: “Тарифное стимулирование энергосбережения”, “Механизм перераспределения присоединенной мощности на территории Москвы”	Исходя из утвержденных параметров энергосбережения в рамках принятой концепции, объем экономии энергоресурсов в целом по подпрограмме “Энергосбережение при потреблении” определен натуральными показателями. Общее задание по экономии ТЭР на 2009 г. составляет 750 млн кВт · ч (0,19 млн т у.т) и 1 млн Гкал (0,166 млн т у.т), или совокупно 0,356 млн т у.т. Эти задания по экономии ТЭР распределяются пропорционально по соответствующим группам потребителей (городская и федеральная бюджетные сферы, промышленность, строительство, транспорт, сфера ЖКХ, население)
Утверждена в 2011 г., актуализируется ежегодно	В последнее десятилетие в г. Москве функционирует программа “Развитие коммунально-инженерной инфраструктуры и энергосбережение”. Цели программы: 1. Гарантированное обеспечение потребителей Москвы необходимым набором коммунальных услуг при надежной и эффективной работе коммунальной инфраструктуры. 2. Снижение энергоемкости валового регионального продукта. Утверждена постановлением Правительства Москвы от 04.06.2019 г. № 630-ПП “О внесении изменения в постановление Правительства Москвы от 27 сентября 2011 г. № 451-ПП”	Все мероприятия можно разделить на три основные группы: направленные на снижение потребления первичного топлива при производстве электрической и тепловой энергии, снижение себестоимости при передаче и распределении топливно-энергетических ресурсов и воды; направленные на экономию топливно-энергетических ресурсов и воды в учреждениях бюджетной сферы; направленные на экономию топливно-энергетических ресурсов и воды в жилом фонде. Программа включает в себя 11 окружных программ энергосбережения, 18 отраслевых программ соответствующих департаментов и комитетов Правительства Москвы, а также программы энергосбережения основных городских регулируемых организаций

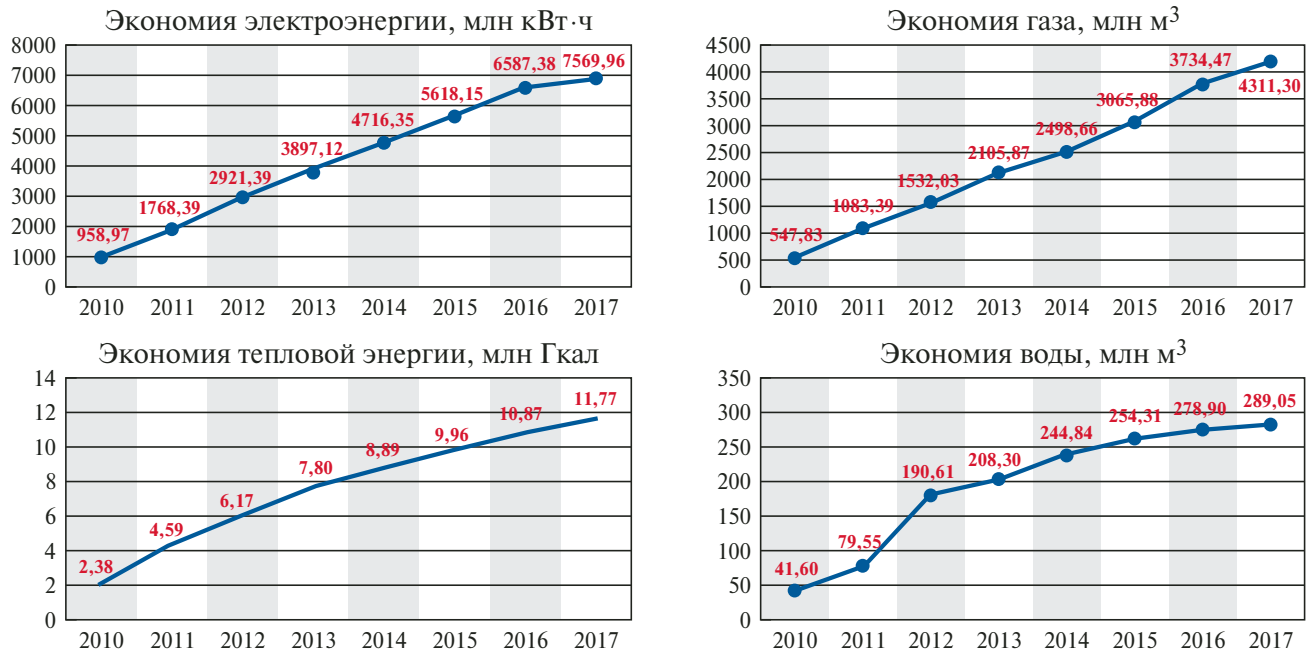


Рис. 1. Показатели экономии энергоресурсов в последней действующей городской программе "Развитие коммунальной инфраструктуры и энергосбережение"

энергосбережению, заложенные в городскую программу[1].

Предполагалось, что целенаправленные меры по сокращению потребляемой электрической энергии в масштабах города за счет энергосберегающих мероприятий могут снизить максимум нагрузки на 3 – 3,5 тыс. МВт, что соизмеримо с реализацией программы развития генерирующих мощностей.

Принципиальными отличиями комплексной целевой Программы энергосбережения Москвы на 2009 – 2011 гг. и на перспективу до 2020 г., принятой более 10 лет назад, является наличие подпрограмм "Развитие нормативно-правовой базы энергосбережения", "Сокращение потребляемой электрической мощности", "Пропаганда энергосбережения в г. Москве" и разделов "Тарифное стимулирование энергосбережения", "Механизм перераспределения присоединенной мощности на территории Москвы".

По итогам прошедших 10 – 12 лет видно, насколько сработали те или иные идеи, заложенные в энергетическую политику Москвы в 2008 – 2009 гг. Практически все подпрограммы, заложенные при разработке программы, реализованы в значительной степени: на источниках введены блоки ПГУ суммарной мощностью 2861 МВт (эл), существенно модернизированы тепловые и электрические сети, активно проводились переключение тепловой нагрузки, капитальный ремонт и модернизация жилого фонда и бюджетной сферы.

В совокупности это привело к целому ряду эффектов энергосбережения, некоторому снижению пиков и высвобождению в первую очередь тепловой мощности энергоисточников. Именно за счет их высвобождения за эти годы свыше 55 млн м^2 недвижимости введено и подключено к тепловым сетям практически без роста теплопотребления. Некоторые уже построенные ТЭЦ пока не имеют тепловой нагрузки и не работают, часть из них покрывает только электрическую нагрузку (ГТЭС "Строгино").

Более того, планируемый во всех прогнозах тех лет рост потребления газа на рубеже 2012 – 2013 гг. сменился на спад, по отношению к 2008 г. сокращение составляет около 12 – 12,5 % (с учетом участия ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27 в энергобалансе Москвы).

Именно целостный подход к городу как к единой системе оказался адекватным задачам повышения эффективности, надежности и устойчивости работы городских систем жизнеобеспечения. Эстафету динамичного повышения энергетической и экологической эффективности приняла последняя городская программа "Развитие коммунально-инженерной инфраструктуры и энергосбережение", разработанная с учетом последних изменений и требований законодательства.

[1] https://base.garant.ru/390723/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/

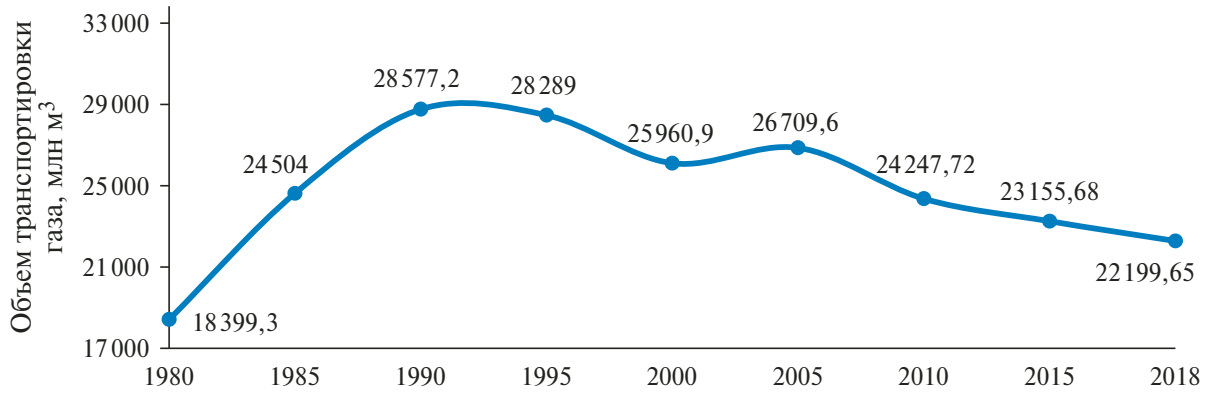


Рис. 2. Снижение потребления газа в г. Москве[3], млн м^3

Программа сочетает в себе отраслевые и территориальные подпрограммы энергосбережения, учитывает все эффекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности во всех секторах городской экономики (рис. 1).

Решение насущных задач ликвидации дефицита электрической мощности, повышения режимной и климатической устойчивости топливно-энергетического комплекса города позволило перейти к следующим целям: обеспечению снижения энергоемкости экономики мегаполиса, решению новых экологических задач, определенных законодательством о НДТ.

Комплекс мер, реализованных в предыдущем десятилетии, заложил для этого неплохую основу. Технологическая эффективность 50 предприятий I категории Москвы в среднем выше эффективности предприятий II категории в 1,5 раза[2].

Внутри предприятий I категории наиболее эффективными являются предприятия энергетики (6 ТЭЦ), их технологическая эффективность выше, чем у предприятий обрабатывающего комплекса в среднем в 1,4 раза. В группе энергетических предприятий выделяются наиболее эффективная подгруппа ТЭЦ и крупных котельных (потребляющая 18 % энергоресурсов) и наименее эффективная подгруппа (потребляющая 4,9 % энергоресурсов). Это распределение энергетических предприятий по эффективности не вполне коррелирует с особенностями установленного на ТЭЦ оборудования (в частности ПГУ), а скорее связано с режимными особенностями их загрузки.

В настоящее время теплоэнергетический комплекс Москвы — один из самых экологически чистых в мире: доля природного газа в топливном балансе российской столицы приближается к 100 %. Использование природного газа в качестве топлива позволяет исключить попадание широкого спектра вредных выбросов в воздушный бассейн мегаполиса. При этом за период с 2010 по 2018 г. отмечается снижение объемов ежегодного потребления природного газа более, чем на 13,67 %. Это связано с реализацией городской политики энергосбережения, повышения энергоэффективности и экологической безопасности.

С 2007 г. на ТЭЦ ПАО “Мосэнерго” введено в эксплуатацию семь новейших парогазовых энергоблоков мощностью около 2,9 ГВт. Их эксплуатация позволила достичь экономии природного газа и существенно снизить выбросы в атмосферу (рис. 2). К сокращению выбросов загрязняющих веществ приводят и другие мероприятия, а именно: установка фильтров на ТЭЦ, уменьшение использования резервных видов топлива — таких, как мазут и уголь.

Как видно из диаграммы сводного топливно-энергетического баланса Москвы (рис. 3), двумя наиболее крупными кластерами — потребителями топливно-энергетических ресурсов в Москве — являются предприятия ТЭК (2/3) и комплекс нефтепереработки (МНПЗ — Газпромнефть — 1/3). В обоих кластерах наблюдается устойчивая тенденция роста энергетической и экологической эффективности производственных комплексов.

Удельное потребление тепла на осуществление технологического процесса существенно зависит от загрузки производственных мощностей. Удельные показатели потребления тепла и других энергоресурсов на МНПЗ снижаются в последние 5 лет в результате

[2] https://open-era.ru/analitika/obzory

[3] ЖКХ меняется: информационно-аналитические материалы Комплекса ЖКХ Правительства г. Москвы. — 2019 г.

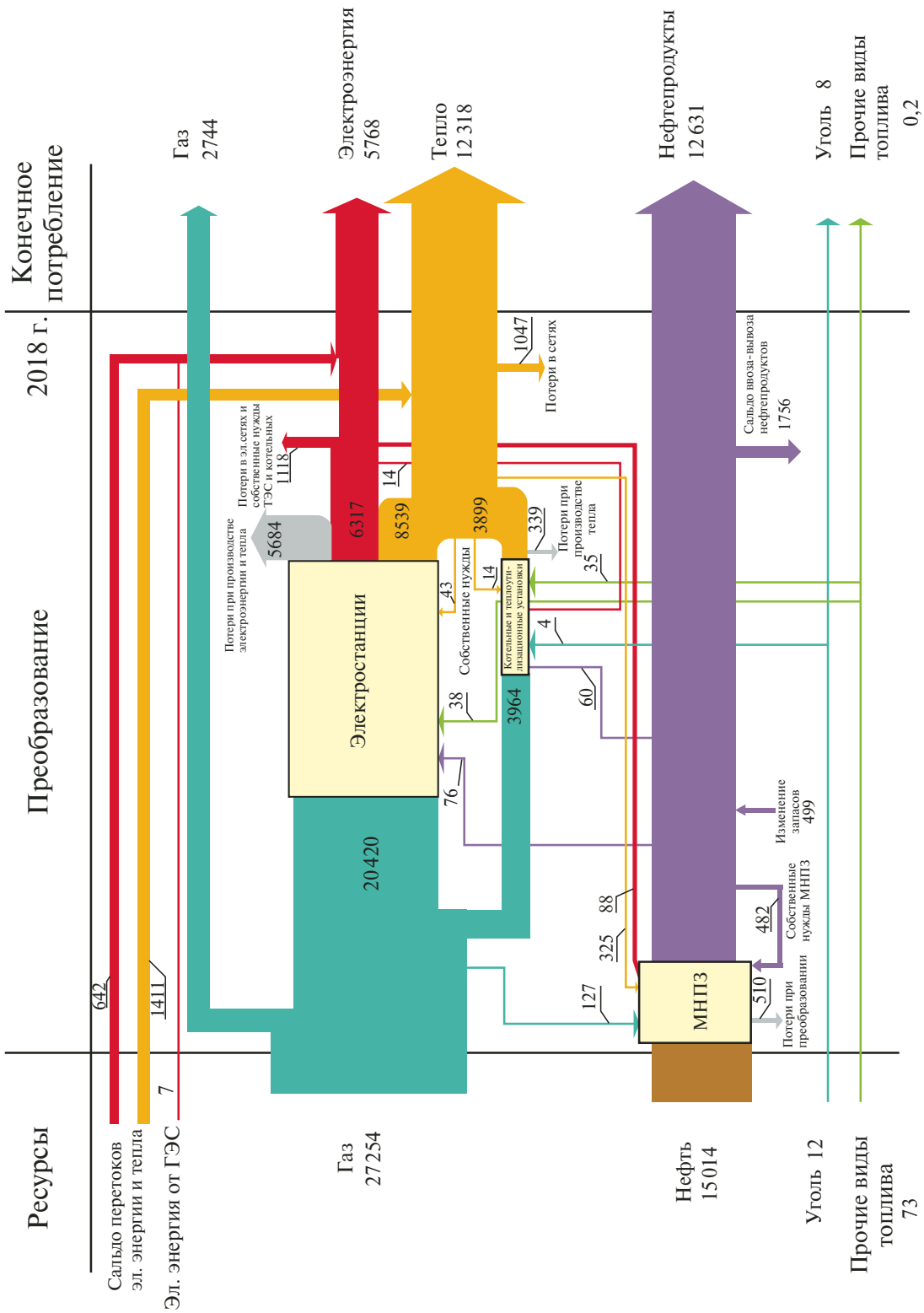


Рис. 3. Сводный топливно-энергетический баланс Москвы 2018 г. (в т у.т)[5]

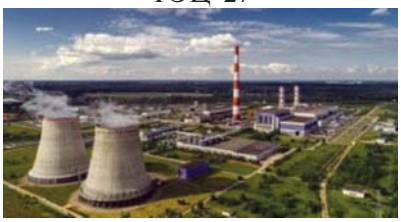
комплексной модернизации ключевых технологических процессов: при валовом потреблении заводом 11 млн т нефтепродуктов глубина переработки достигает в настоящее время 76 %, выбросы в атмосферу за 2015 – 2020 гг. снизились на 36 %, а общее совокупное воздействие на окружающую среду упало вдвое[4]. Замена малого технологического кольца

[4] https://mnpz.gazprom-neft.ru/factory/

[5] Антонов Н. В. Топливно-энергетический баланс — основа перспективного прогнозирования. Энергобаланс Москвы // Энергосбережение. — 2020. — № 5.

Таблица 2

Сравнительные параметры ПГУ на ТЭЦ ПАО “Мосэнерго”

Параметры ТЭЦ	ТЭЦ	
Доля ПГУ — 22 ÷ 23 %	ТЭЦ-21 	ТЭЦ-26 
Доля ПГУ — 35 ÷ 36 %	ТЭЦ-12 	ТЭЦ-20 
Доля ПГУ — 60 %	ТЭЦ-16 	
Доля ПГУ — 80 %	ТЭЦ-27 	

МНПЗ в 2018 г. комплексной установкой переработки нефти “Евро+” привела к двукратному росту производительности и сокращению удельных затрат энергии.

Если для нефтеперерабатывающего комплекса повышение энергетической и экологической эффективности тесно связано с процессами модернизации основного технологического оборудования, то для энергетического комплекса города ситуация существенно иная.

В приоритетах повышения энергетической и экологической эффективности теплоэнергетического комплекса города необходимо отметить следующее:

модернизация энергоисточников с установкой парогазовых энергоблоков;

рост загрузки турбин и другого оборудования ТЭЦ ПАО “Мосэнерго”;

передача тепловой нагрузки от неэффективных котельных источникам комбинированной выработки тепла и электроэнергии (ТЭЦ);

рост доли комбинированной выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ;

оптимизацию структуры и состава энергоблоков для наиболее рационального покрытия тепловых и электрических нагрузок города;

оптимизация гидравлических режимов теплосетевого комплекса и сокращение тепловых потерь в сетях.

Некоторые из этих направлений взаимоувязаны, поэтому трудно отделить их частный вклад в общий рост энергетической эффективности. Именно совместное их применение приводит к значительным эффектам (табл. 2).

Таблица 3

Применение НДТ согласно ИТС-48-2017 на предприятиях Москвы

НДТ	Наименование	Применение
НДТ-1	Использование инструментов энергетического менеджмента	ПАО “Мосэнерго”, МНПЗ — Газпромнефть
НДТ-2	Оптимальные контроль и управление системой потребления энергии и производственным процессом с использованием современных средств автоматизации	ПАО “Мосэнерго”, МНПЗ — Газпромнефть, ПАО “МОЭК”
НДТ-3	Утилизация тепловой энергии выбросов, отходов продукции, систем охлаждения	ПАО “Мосэнерго”, МНПЗ — Газпромнефть
НДТ-4	Оптимизация термодинамических параметров (температура, время, давление) производственных процессов, в том числе теплоизоляция объектов с повышенной температурой	ПАО “Мосэнерго”, МНПЗ — Газпромнефть, ПАО “МОЭК”
НДТ-5	Повторное использование отходов технологических процессов и уменьшение их количества	МНПЗ — Газпромнефть
НДТ-6	Инфраструктурные и технологические приемы по повышению энергоэффективности	ПАО “Мосэнерго”
НДТ-7	Комплексный подход к выявлению резервов энергосбережения и повышения энергетической эффективности теплоэнергетических и энерготехнологических систем предприятий	ПАО “Мосэнерго”, МНПЗ — Газпромнефть

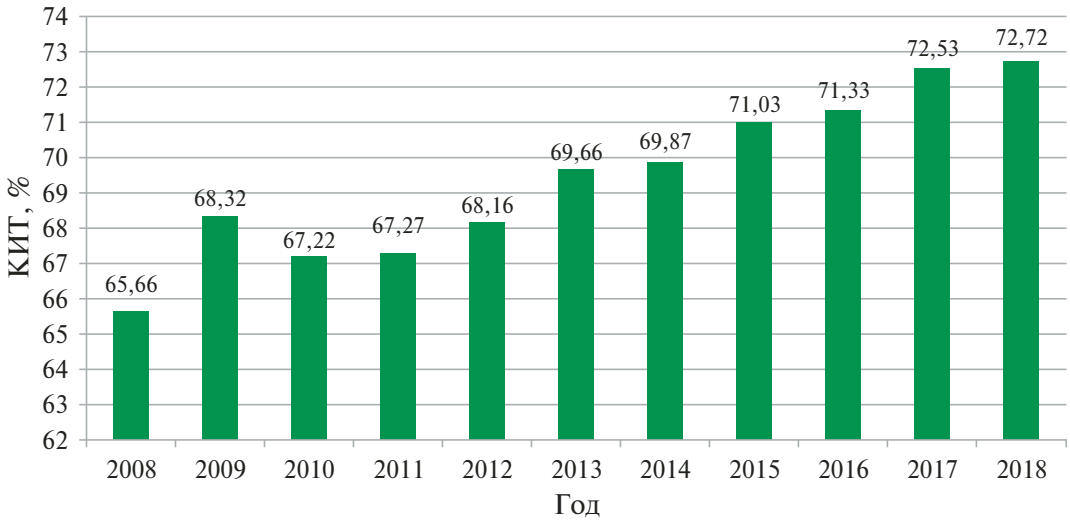


Рис. 4. Динамика эффективности ТЭЦ ПАО “Мосэнерго” (источник: расчёты на основе данный годовых отчётов ПАО “Мосэнерго”)

Напомним перечень НДТ из информационно-технического справочника [5] по наилучшим доступным технологиям энергосбережения и повышения энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и/или иной деятельности (ИТС-48-2017). В табл. 3 представлены НДТ, реализованные на ключевых энергоемких предприятиях Москвы.

Среди главных НДТ, приведенных в ИТС-38-2017 и реализованных в энергетическом комплексе Москвы, необходимо в первую очередь отметить теплофикацию (или комбинированную выработку тепла и электроэнергии на ТЭЦ) — это НДТ-2, реализацию парогазовых блоков — это НДТ-6 и перевод тепловой нагрузки с котельных на ТЭЦ (это НДТ-6 и НДТ-7).

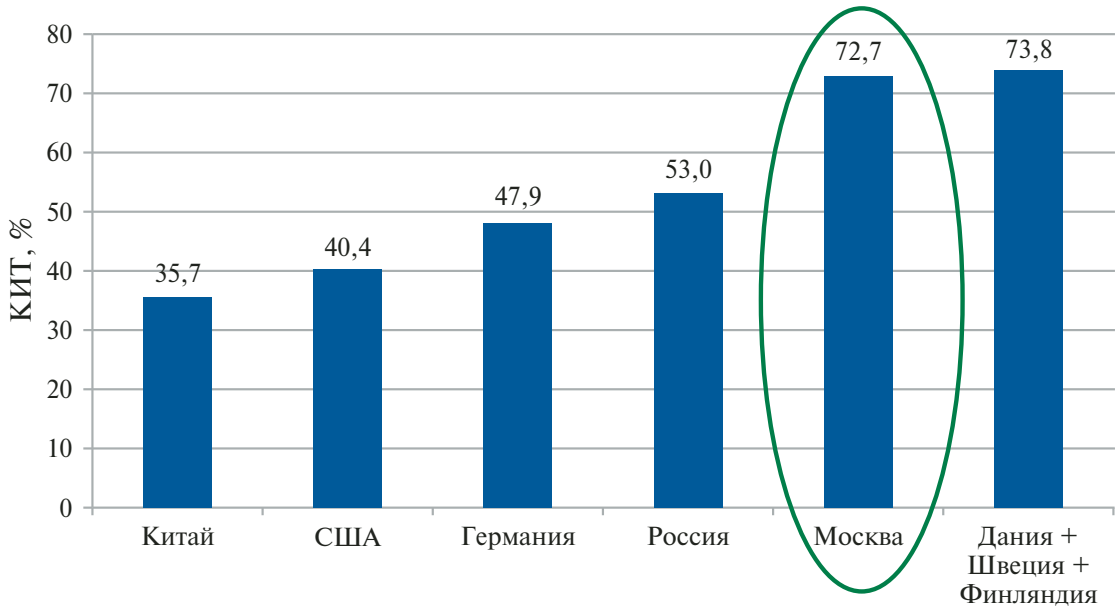


Рис. 5. Сравнение показателей эффективности ТЭЦ "Мосэнерго" и электростанций ряда зарубежных ведущих энергетических комплексов

Ключевой показатель энергетической эффективности энергоисточников — коэффициент использования тепла топлива (КИТТ) — вырос за последнее десятилетие более чем на 13,5 % (рис. 4). Рост КИТТ и снижение выбросов CO_2 являются результатами улучшения режимов загрузки оборудования, увеличения доли комбинированной выработки электроэнергии и тепла, роста доли ПГУ.

Постоянный рост КИТТ практически всех ТЭЦ ПАО "Мосэнерго" за последнее десятилетие является закономерным итогом проводимой энергетиками работы по всем рассмотренным направлениям энергосбережения. Также впечатляет сравнение показателей эффективности ТЭЦ "Мосэнерго" и электростанций зарубежных ведущих энергетических комплексов (рис. 5).

Выводы

1. Комплексный подход к Московскому мегаполису как к единой экономической и энергетической целостности позволил выявить ключевые резервы роста энергетической эффективности без снижения темпов развития города.

2. Реализация комплекса наилучших доступных технологий в двух крупнейших кластерах потребления ТЭР (теплоэнергетический комплекс Москвы и нефтеперерабатывающий завод) позволила значительно повысить их суммарную энергетическую и экологическую эффективность, снизить вредные выбросы в атмосферу на 24 – 29 %.

3. Внедрение НДТ в разных секторах промышленности имеет соответствующие особенности. Увязка энергосбережения и экологической модернизации в рамках масштабных энерготехнологических комплексов, как показывает опыт Москвы, может давать значительные совокупные эффекты.

4. Опыт комплексного подхода к энергосбережению в тесной увязке с внедрением НДТ вполне может быть реализован в других регионах, мегаполисах с высокой плотностью тепловых нагрузок, развитым промышленным производством.

Список литературы

1. **Гашо, Е. Г. Энергосбережение — ключевой фактор модернизации** / Е. Г. Гашо, Ю. Ф. Тихоненко // Коммунальный комплекс России. — 2008. — № 10. — С. 42 – 47.
2. **Антонов, Н. В. Топливно-энергетический баланс — основа перспективного прогнозирования. Энергобаланс Москвы** / Н. В. Антонов, Ю. В. Агафонова // Энергосбережение. — 2020. — № 5. — С. 40 – 44.
3. **Гашо, Е. Г. Приоритеты энергоэкологической модернизации предприятий в разрезе внедрения наилучших доступных технологий. Общие принципы нового межотраслевого справочника по энергосбережению ИТС 48** / Е. Г. Гашо // Промышленная энергетика. — 2018. — № 3.
4. **Скобелев, Д. О. Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития** / Д. О. Скобелев // Journal of New Economy. — 2020. — Т. 21. — № 4. — С. 153 – 173. DOI: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-8

5. **ИТС НДТ 48-2017 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям "Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности"**. — М.: Бюро НДТ, 2017 г.

References

1. **Gasho E. G., Tikhonenko Yu. F. Kommunal'nyi kompleks Rossii** (Communal complex of Russia), 2008, No. 10, pp. 42 – 47.
2. **Antonov N. V., Agafonova Yu. V. Energosberezhenie** (Energysaving), 2020, No. 5, pp. 40 – 44.
3. **Gasho E. G. Prioritety energoekologicheskoi modernizatsii predpriyatii v razreze vnedreniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii. Obshchie printsipy novogo mezhotraslevogo spravochnika po energosberezheniyu ITS 48** (Priorities of energy-ecological modernization of enterprises in terms of implementation of the best available technologies General principles of the new cross-sectoral reference book on energy saving ITS 48), Industrial power engineering, 2018, No. 3.
4. **Skobelev D. O. Journal of New Economy** (Journal of New Economy), 2020, Vol. 21, No. 4, pp. 153 – 173, DOI: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-8.
5. **ITS NDT 48-2017 Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam "Povyshenie energeticheskoi effektivnosti pri osushchestvlenii khozyaistvennoi i (ili) inoi deyatel'nosti"** (ITS NDT 48-2017 Information and technical guide on the best available technologies "Energy Efficiency Improvement During Economic and / or Other Activities"), Moscow, Bureau of NTD, 2017

gashoyg@mpei.ru

Energy-ecological modernization of the industrial sector of Moscow: linking of the energy saving and implementation of the best available technologies

Semutnikova E. G., Gasho E. G., Loktionov O. A.

Introduction of the best available technologies (BAT) is a key factor of the energy saving both in industry and energy economy of large cities. The experience gained in Moscow, which provided a significant advance in the energy and environmental efficiency of the energy and industrial complex of the city over the past ten years is considered. The key reserves that can provide for the growth of the energy efficiency without slowing down the pace of city development have been identified. Combination of heat and power generation, as well as modernization of the turbine fleet providing about a quarter of the total capacity with combined cycle units appeared the key BAT implemented in the city energy sector. The main mechanisms and tools for the implementation of this goal are considered along with the ways of their further replication in other regions.

Keywords: power release, cogeneration, combined heat and power generation, best available technologies, energy saving program of the city, power engineering in a megapolis, energy balance, emission of harmful substances, energy-ecological modernization.

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI 10.34831/EP.2021.96.41.002

Реактивная нагрузка синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием квазипостоянных токов

Кувшинов А. А., Вахнина В. В., доктора техн. наук,
Черненко А. Н., канд. техн. наук, Пудовинников Р. Н., магистр
Тольяттинский государственный университет

Показано, что воздействие квазипостоянных токов, возникающих в периоды геомагнитных возмущений, на блочный трансформатор вызывает увеличение реактивной нагрузки синхронного генератора. Определен гармонический состав тока намагничивания блочного трансформатора при насыщении магнитной системы под воздействием квазипостоянного тока, протекающего по обмоткам высокого напряжения, с учетом параметров выдачи мощности синхронного генератора в электроэнергетическую систему. Отмечено, что наиболее значимой является основная гармоника тока намагничивания, которая ответственна за многократное увеличение мощности намагничивания блочного трансформатора и пропорциональна интенсивности квазипостоянного тока. Показано, что основная особенность режима функционирования синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора обусловлена суммированием основной гармоники тока намагничивания с реактивной составляющей статорного тока, вызывающей увеличение реактивной нагрузки и возникновение симметричной перегрузки вплоть до срабатывания релейной защиты. На примере блока “турбогенератор ТВВ-320 — блочный трансформатор ТДЦ-400000/242/20” установлены диапазоны безопасных для функционирования блока значений квазипостоянного тока и значений, способных инициировать отключение блока и даже повреждение турбогенератора вследствие недопустимой перегрузки статорным током.

Ключевые слова: синхронный генератор, блочный трансформатор, мощность намагничивания, квазипостоянный ток, симметричная перегрузка.

Блоки “генератор — трансформатор” служат основой главных схем тепловых, гидравлических, атомных электростанций. В обычных условиях режим работы магнитной системы блочного трансформатора не выходит за пределы области рабочего перемагничивания электротехнической стали и практически не оказывает влияния на функционирование синхронного генератора (СГ) в части генерации реактивной мощности [1].

Воздействие квазипостоянных токов (КПТ) частотой до 0,1 Гц, значения которых зависят от интенсивности геомагнитных возмущений, вида блока, количества блоков в составе электростанции, количества и географической ориентации отходящих линий электропередачи (ЛЭП), вызывает одностороннее насыщение магнитной системы блочного трансформатора. В блочных трансформаторах с номинальной мощностью более 80 – 100 МВ · А используют бронестержневую или броневую конструкцию магнитной системы при трехфазном или однофазном исполнении соответственно. В таких трансформаторах для смещения режима перемагничивания магнитной системы в область технического насыщения достаточно КПТ, соизмеримого с паспортным значением тока холостого хода [2 – 4].

При насыщении магнитной системы ток намагничивания блочного трансформатора приобретает практически униполярную форму и содержит полный спектр высших гармоник (2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й и т. д.) на фоне многократного увеличения тока основной гармоники. Увеличение основной гармоники тока намагничивания сопровождается ростом мощности намагничивания блочного трансформатора на два порядка и более. В результате увеличивается реактивная нагрузка синхронного генератора, создавая угрозу перегрузки по полной мощности.

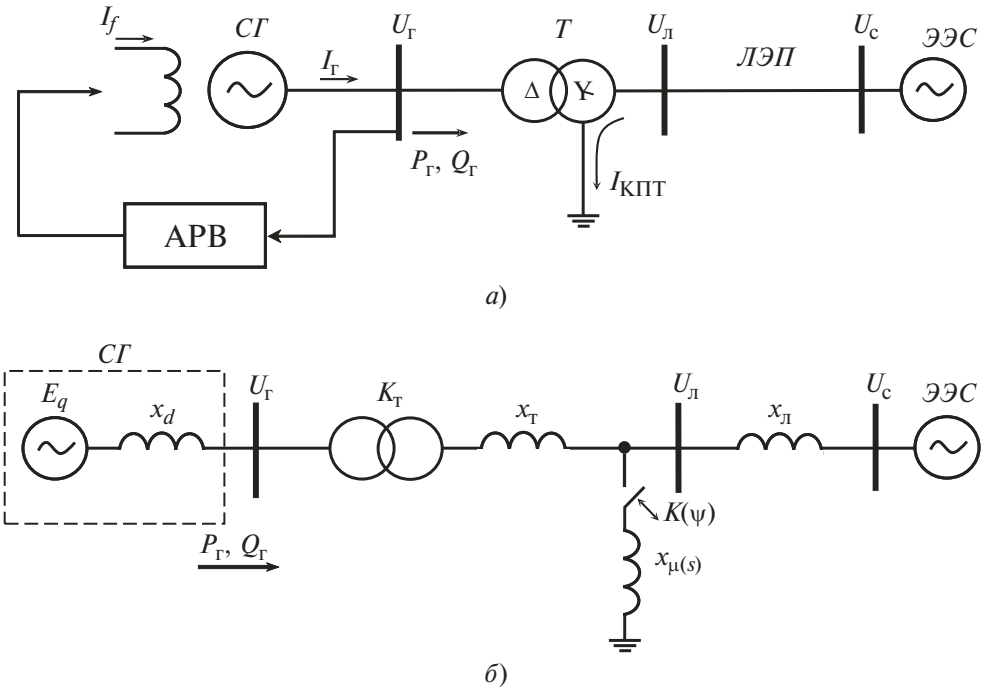


Рис. 1. Упрощенная структурная схема блока “генератор — трансформатор” (*а*) и схема замещения с учетом насыщения магнитной системы блочного трансформатора (*б*)

Увеличение мощности намагничивания блочного трансформатора при неизменной механической мощности турбины и соответственно генерации активной мощности сопровождается повышением тока статора синхронного генератора за счет возрастания реактивной составляющей тока. Возможна симметричная перегрузка по току статора, если исходный режим работы синхронного генератора близок к номинальному. Кратность перегрузки по току статора более 1,5 для синхронных генераторов не допускается даже кратковременно [5, 6]. Таким образом, актуальной является задача оценки опасных уровней КПТ, способных вызвать перегрузку синхронного генератора реактивной мощностью и отключение блока “синхронный генератор — трансформатор” в результате срабатывания защиты от симметричной перегрузки.

Гармоники тока намагничивания блочного трансформатора

На рис. 1, *а* показана упрощенная схема выдачи активной $P_г$ и реактивной $Q_г$ мощности блока “синхронный генератор *СГ* — трансформатор *Т*” в электроэнергетическую систему ЭЭС по линии электропередачи ЛЭП. Синхронный генератор оснащен автоматическим регулятором возбуждения АРВ, который обеспечивает поддержание неизменного уровня напряжения $U_г = \text{const}$ на генераторных шинах за счет соответствующего изменения тока возбуждения I_f. Обмотки высокого напряжения (ВН) блочного трансформатора *Т* соединены по схеме “звезда” с заземленной нейтралью. Это обусловливает возможность протекания КПТ по обмоткам ВН в периоды геомагнитных возмущений, вызывая насыщение магнитной системы блочного трансформатора *Т* и увеличение реактивной нагрузки синхронного генератора *СГ*.

Схема замещения блока (рис. 1, *б*) построена на основе следующих допущений:

не учитываются потери активной мощности в синхронном генераторе, блочном трансформаторе и фазных проводах ЛЭП, что позволяет исключить из схемы замещения активные сопротивления;

значение выдаваемой блоком активной мощности $P_г$ соответствует уровню натуральной мощности ЛЭП, что позволяет не учитывать зарядную мощность линии электропередачи;

принимается кусочно-линейная идеализация характеристики намагничивания блочного трансформатора, согласно которой индуктивное сопротивление ветви намагничивания при отсутствии насыщения бесконечно большое, а при насыщении магнитной системы уменьшается до $x_{\mu(s)}$, как показано на рис. 1, *б*.

На схеме замещения блока приняты следующие обозначения: E_q — синхронная ЭДС генератора; x_d — синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси; $x_т$ — индуктивная составляющая сопро-

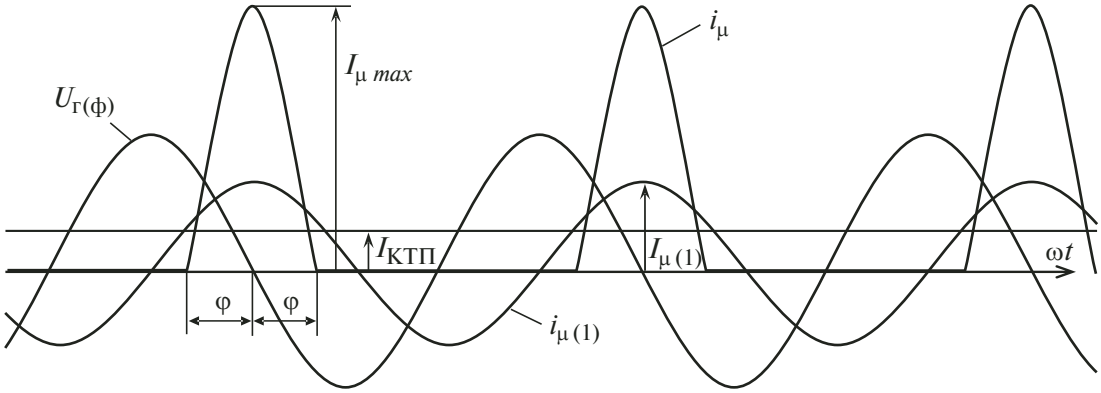


Рис. 2. Временны́е диаграммы мгновенных значений фазного напряжения $U_{г(ф)}$ на генераторных шинах, бросков тока намагничивания i_μ, и первой гармоники тока намагничивания ($i_{\mu(1)}$), и КПТ ($I_{КПТ}$)

тивления короткого замыкания блочного трансформатора; $x_{\mu(s)}$ — индуктивное сопротивление ветви намагничивания блочного трансформатора в области технического насыщения; $x_л$ — индуктивное сопротивление фазного провода ЛЭП.

Насыщение магнитной системы блочного трансформатора моделируется ключом $K(\psi)$, условие коммутации которого выражается логической функцией

$$K(\psi)=\begin{cases}1 — \text{магнитная система насыщена при } \psi \ge \psi_s;\\ 0 — \text{магнитная система не насыщена при } \psi < \psi_s,\end{cases} \qquad (1)$$

где ψ — мгновенное значение потокосцепления обмотки ВН блочного трансформатора; ψ_s — значение потокосцепления, при котором начинается насыщение магнитной системы блочного трансформатора.

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания $x_{\mu(s)}$ при насыщении магнитной системы блочного трансформатора представляет собой индуктивное сопротивление обмотки без учета стали, значение которого можно определить с помощью выражения [7]:

$$x_{\mu(s)}=\mu_0\omega\pi\frac{W^2\left(D_{внут}+\frac{2}{3}a^2\right)}{4h}, \qquad (2)$$

где W — количество витков обмотки ВН; $D_{внут}$ — внутренний диаметр обмотки ВН; h — условная высота обмотки, принимаемая равной высоте окна магнитопровода; a — радиальный размер (толщина) обмотки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Для вычисления $x_{\mu(s)}$ с помощью выражения (2) необходима информация об основных размерах блочного трансформатора, которая обычно недоступна. Поэтому допускается значение $x_{\mu(s)}$ принимать равным удвоенному значению индуктивной составляющей ($x_т$) сопротивления короткого замыкания, т. е. $x_{\mu(s)} \approx 2x_т$ [8 – 10].

На рис. 2 показана форма бросков тока намагничивания (i_μ), фазного напряжения ($U_{г(ф)}$) на генераторных шинах, основной гармоники тока намагничивания ($i_{\mu(1)}$) и КПТ ($I_{КПТ}$) при значении фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора $\varphi = 60°$.

В данном случае состояние насыщения магнитной системы блочного трансформатора продолжается в течение 1/3 периода напряжения на генераторных шинах. В общем случае фазовый угол насыщения φ показывает, в течение какой части периода напряжения продолжается насыщение магнитной системы блочного трансформатора. Форма бросков тока намагничивания симметрична относительно момента перехода через нулевое значение фазного напряжения на генераторных шинах, а мгновенные значения бросков тока намагничивания в рамках принятых выше допущений описываются выражением

$$i_\mu(t) = I_m(\cos\varphi + \cos\omega t), \qquad (3)$$

где I_m — амплитуда тока намагничивания при насыщении магнитной системы блочного трансформатора в течение периода на генераторных шинах, т. е. при $\varphi = 180°$.

На рис. 3, *а* показана схема замещения блока, которая позволяет при $K(\psi) = 1$ (см. рис. 1, *б*) определять предельные параметры бросков тока намагничивания при условии насыщения магнитной системы блочного трансформатора в течение всего периода напряжения на генераторных шинах и шинах ЭЭС.

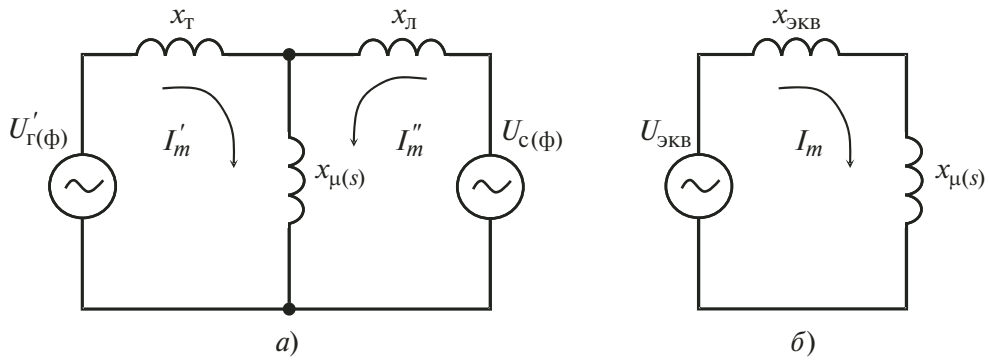


Рис. 3. Полная (*а*) и эквивалентная (*б*) схемы замещения для расчета установившегося тока короткого замыкания при полном насыщении магнитной системы блочного трансформатора

Как видно, броски тока намагничивания складываются из двух составляющих, одна из которых (I'_m) определяется фазным напряжением ($U_{г(ф)}$) на генераторных шинах, а другая (I''_m) — фазным напряжением $U_{с(ф)}$ на шинах ЭЭС. На рис. 3, *б* представлен результат дальнейшего преобразования исходной схемы замещения блока (см. рис. 1, *а*) к эквивалентному виду с одним источником эквивалентного напряжения

$$U_{экв} = \frac{x_л U_{г(ф)} + x_т U_{с(ф)}}{x_л + x_т}, \qquad (4)$$

включенным за эквивалентным индуктивным сопротивлением

$$x_{экв} = \frac{x_л x_т}{x_л + x_т}, \qquad (5)$$

который позволяет предельно упростить получение оценок амплитуды бросков тока намагничивания

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U_{экв}}{x_{μ(s)} + x_{экв}}. \qquad (6)$$

Как следует из выражений (4) – (6), амплитуда бросков тока намагничивания при сохранении режима работы АРВ, обеспечивающего $U_г = \text{const}$, не зависит от параметров синхронного генератора *СГ* (синхронной ЭДС E_q, индуктивного синхронного сопротивления x_d по продольной оси) и определяется внешними (относительно *СГ*) индуктивными сопротивлениями ($x_т$, $x_л$, $x_{μ(s)}$) тракта выдачи активной $P_г$ и реактивной $Q_г$ мощности в ЭЭС.

Амплитуда бросков тока намагничивания $I_{μ\,max}$ (см. рис. 2) при насыщении магнитной системы блочного трансформатора только в течение части периода напряжения на генераторных шинах определяется значением фазового угла насыщения:

$$I_{μ\,max} = I_m(1 - \cos\varphi). \qquad (7)$$

В свою очередь, фазовый угол насыщения магнитной системы блочного трансформатора определяется значением КПТ и находится в результате решения трансцендентного уравнения

$$\sin\varphi - \varphi\cos\varphi = \frac{\pi I_{КПТ}}{I_m}, \qquad (8)$$

которое является следствием равенства КПТ и постоянной составляющей бросков тока намагничивания.

В табл. 1 представлены зависимости фазового угла насыщения $\varphi = f(I^*_{КПТ})$ и амплитуды бросков тока намагничивания $I^*_{μ\,max} = I_{μ\,max}/I_m = f(I^*_{КПТ})$ от относительного значения КПТ $I^*_{КПТ} = I_{КПТ}/I_m$, которые удобно использовать в дальнейшем для оценки уязвимости блоков “генератор — трансформатор” к воздействию КПТ.

На основе выражения (3) можно провести гармонический анализ бросков тока намагничивания и определить амплитуду *n*-й гармоники тока намагничивания

$$I_{μ(n)} = \frac{I_m}{\pi}\left[\frac{\sin(n-1)\varphi}{(n-1)} + \frac{\sin(n+1)\varphi}{(n+1)} - \frac{2}{n}\cos\varphi\cdot\sin(n\varphi)\right], \qquad (9)$$

а также амплитуду основной гармоники тока намагничивания

$$I_{μ(1)} = \frac{I_m}{\pi}\left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2}\right). \qquad (10)$$

Таблица 1

Зависимости фазового угла насыщения и амплитуды бросков тока намагничивания от относительного значения КПТ

$I^*_{КПТ}$	0,00059	0,00447	0,001482	0,0345	0,0652	0,109	0,166	0,236	0,318
φ, °	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$I^*_{\mu\ max}$	0,0152	0,0603	0,134	0,234	0,357	0,5	0,658	0,826	1,0
$I^*_{КПТ}$	0,41	0,508	0,609	0,708	0,8	0,881	0,994	0,986	1,0
φ, °	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$I^*_{\mu\ max}$	1,17	1,34	1,5	1,64	1,77	1,87	1,94	1,98	2,0

Анализ выражений (9) и (10) позволяет отметить, что фазовый угол насыщения магнитной системы блочного трансформатора является при прочих равных условиях единственным параметром, который определяет не только гармонический состав тока намагничивания, но и количественные соотношения между отдельными гармониками.

На рис. 4 представлены относительные значения амплитуд ($I^*_{\mu(n)} = I_{\mu(n)}/I_m$) гармоник тока намагничивания ($n = 0, 1, 2, 3, ..., 10$) при значении фазового угла насыщения $\varphi = 60°$.

Как видно, в спектре тока намагничивания присутствуют все канонические гармоники. В качестве нулевой гармоники рассматривается КПТ. При любой глубине насыщения магнитной системы доминирующей всегда остается основная $I^*_{\mu(1)}$ гармоника тока намагничивания, которая ответственна за перегрузку синхронного генератора реактивной мощностью.

Особенности реактивной нагрузки синхронного генератора мощностью намагничивания блочного трансформатора

Кривая основной гармоники тока намагничивания $i_{\mu(1)}$ показана на рис. 2. Она, как видно, отстает на 90° от кривой фазного напряжения $U_{г(ф)}$ на генераторных шинах, т. е. является для синхронного генератора реактивной составляющей тока. Таким образом, основная гармоника тока намагничивания блочного трансформатора будет арифметически складываться с реактивной составляющей тока статора $I_р$, увеличивая реактивную нагрузку синхронного генератора:

$$I_{р\Sigma} = I_р + I_{\mu(1)эфф}. \qquad (11)$$

Поддержание неизменного напряжения на генераторных шинах $U_г = \text{const}$ возможно только за счет обеспечения баланса реактивных мощностей

$$Q_г = Q_\mu + Q_с, \qquad (12)$$

который может быть записан в развернутом виде

$$\sqrt{3}U_г I_{р\Sigma} = \sqrt{3}U_г I_{\mu(1)эфф} + \sqrt{3}U_г I_р \qquad (13)$$

в результате умножения выражения (11) на $\sqrt{3}U_г$.

Для сохранения неизменной реактивной мощности $Q_с$, выдаваемой в ЭЭС, увеличение мощности намагничивания Q_μ блочного

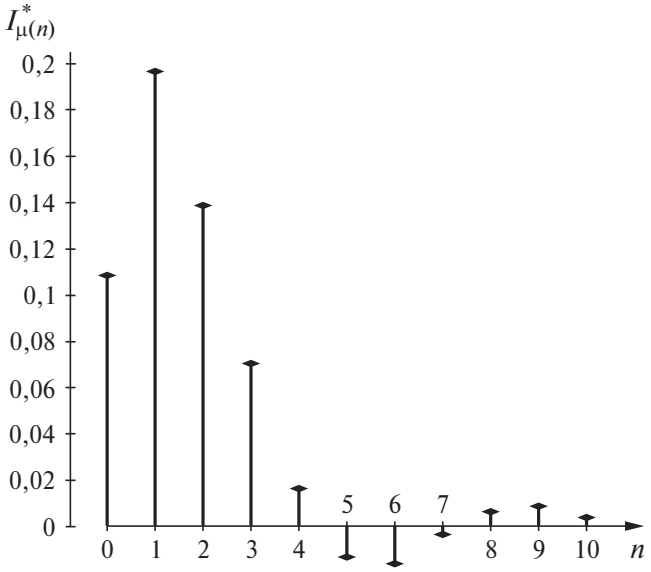


Рис. 4. Относительные значения амплитуды гармоник $I^*_{\mu(n)} = I_{\mu(n)}/I_m$ тока намагничивания блочного трансформатора при фазовом угле насыщения магнитной системы $\varphi = 60°$

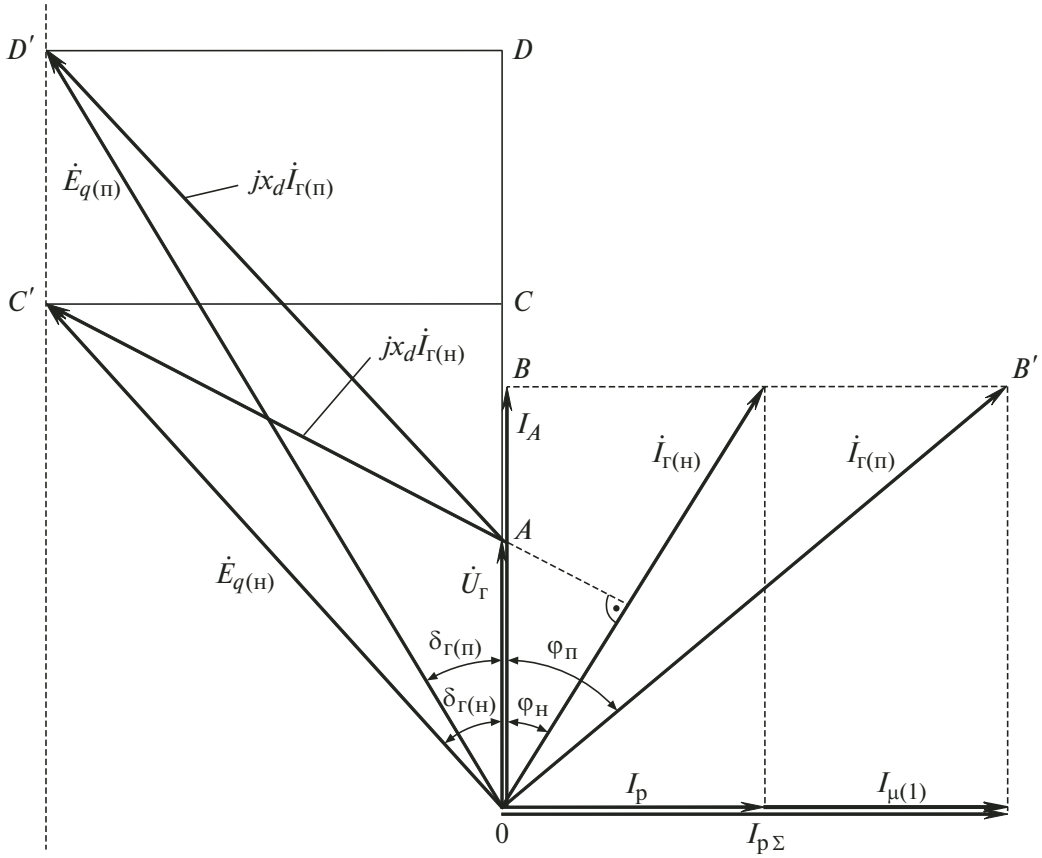


Рис. 5. Векторная диаграмма изменений режимных параметров синхронного генератора при насыщении блочного трансформатора

трансформатора под воздействием КПТ должно быть компенсировано увеличением генерации реактивной мощности $Q_г$ синхронным генератором. Как следует из выражений (11) – (13), увеличить генерацию реактивной мощности $Q_г$ можно путем увеличения реактивной составляющей $I_{рΣ}$ тока статора.

На рис. 5 совмещены (поскольку $U_г$ = = const) векторная диаграмма ($\dot{E}_{q(н)}$, $\dot{I}_{г(н)}$, $\varphi_{(н)}$, $\delta_{г(н)}$) исходного номинального режима синхронного генератора при отсутствии насыщения магнитной системы блочного трансформатора и векторная диаграмма ($\dot{E}_{q(п)}$, $\dot{I}_{г(п)}$, $\delta_{г(п)}$) режима перегрузки синхронного генератора реактивной мощностью при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием КПТ и сохранении прежнего уровня активной мощности ($P_г$ = const в обоих случаях).

Необходимо отметить, что поддержание неизменного уровня активной мощности синхронного генератора в условиях перегрузки реактивной мощностью возможно только при сохранении равенства

$$E_{q\,(н)} \cdot \sin \delta_{г(н)} = E_{q\,(п)} \cdot \sin \delta_{г(п)}. \qquad (14)$$

Векторная диаграмма на рис. 5 и равенство (14) подчеркивают характерную особенность режима перегрузки синхронного генератора реактивной мощностью, которая заключается в возможности физической его реализации только за счет увеличения синхронной ЭДС путем увеличения тока возбуждения. Следует отметить, что увеличение синхронной ЭДС при $P_г$ = const будет сопровождаться, как видно из равенства (14), уменьшением угла нагрузки $\delta_г$ синхронного генератора, способствуя дополнительному увеличению генерации реактивной мощности.

Однако возможности АРВ в части поддержания режима перегрузки реактивной мощностью ограничиваются двумя естественными факторами, к числу которых относятся допустимая перегрузка ротора током возбуждения и насыщение магнитной системы синхронного генератора.

Оценка реактивной нагрузки блока “турбогенератор ТВВ-320 — трансформатор ТДЦ-400000/242/20”

Протяженность ЛЭП-220, по которой мощность блока выдается в ЭЭС, принята равной среднему расстоянию между соседни-

Таблица 2

Зависимости амплитуды тока намагничивания, мощности намагничивания и фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора ТДЦ-400000/242/20 от КПТ

$I_{КПТ}$, А	2,42	19,33	63,58	147,78	280,53	468,28	713,13	1015,14	1367,4
$I^*_{КПТ}$	$0{,}563 \cdot 10^{-3}$	$0{,}45 \cdot 10^{-2}$	0,0148	0,0344	0,0653	0,109	0,166	0,2363	0,3183
φ, °	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$I^*_{\mu(1)}$	$1{,}12 \cdot 10^{-3}$	$0{,}881 \cdot 10^{-2}$	0,02884	0,0655	0,121	0,1955	0,287	0,39	0,5
$I_{\mu(1)}$, А	4,8	37,85	123,9	281,4	519,81	839,86	1232,94	1675,42	2148
Q_μ, Мвар	1,42	11,22	36,72	83,41	154,1	249	365,44	496,6	636,7

ми подстанциями, характерному для электрических сетей с номинальным напряжением 220 кВ. Тогда при номинальном напряжении на генераторных шинах ($U_г = 20$ кВ) на шинах приемной энергосистемы ЭЭС ($U_с = 220$ кВ) амплитуда тока намагничивания при условии полного насыщения магнитной системы, рассчитанная с помощью выражений (4) – (6), составит $I_m = 4295{,}96$ А.

В табл. 2 представлены значения фазового угла насыщения блочного трансформатора, амплитуды основной гармоники тока намагничивания (в относительных и именованных единицах), мощности намагничивания блочного трансформатора в зависимости от значения КПТ (также в относительных и именованных единицах), а мощность намагничивания блочного трансформатора определена с учетом условия $U_г = \text{const}$ с помощью выражения

$$Q_\mu = \sqrt{3} U_г K_т \frac{I_{\mu(1)}}{\sqrt{2}}. \qquad (15)$$

Зависимости $\varphi = f(I_{КПТ})$, $I_{\mu(1)} = f(I_{КПТ})$, $Q = f(I_{КПТ})$, представленные в табл. 2, определены для широкого диапазона значений КПТ — от значения 2,42 А, которое почти в 2 раза меньше паспортного значения тока холостого хода блочного трансформатора, до значения 1367,4 А, которое в 1,43 раза превышает номинальный ток обмотки ВН (954,3 А) блочного трансформатора. При этом фазовый угол насыщения магнитной системы блочного трансформатора возрастает до $\varphi = 90°$, при котором основная гармоника тока намагничивания (2148 А) в 2,25 раза превышает номинальный ток обмотки ВН, а мощность намагничивания (636,7 Мвар) в 1,59 раза превышает номинальную мощность блочного трансформатора.

Следует обратить внимание на два характерных значения фазового угла насыщения (и соответствующего значения КПТ) магнитной системы трансформатора:

$\varphi \approx 50°$, при котором мощность намагничивания начинает достигать уровня генерации реактивной мощности турбогенератора ТВВ-320 в исходном номинальном режиме при $I_{КПТ} = 0$;

$\varphi \approx 70°$, при котором мощность намагничивания достигает уровня номинальной полной мощности турбогенератора ТВВ-320.

Данные табл. 2 показывают, что формальное отношение значения мощности намагничивания блочного трансформатора к соответствующему значению КПТ

$$Q_\mu / I_{КПТ} = (0{,}47 \ldots 0{,}59)$$

изменяется сравнительно мало, т. е. характер зависимости $Q_\mu = f(I_{КПТ})$ близок к линейному. Такая особенность позволяет аппроксимировать реальную зависимость $Q_\mu = f(I_{КПТ})$ линейной зависимостью

$$Q_\mu = \Delta Q_X + K_{\mu(Q)} I_{КПТ}, \qquad (16)$$

где $K_{\mu(Q)} = 0{,}54$ Мвар/А — средневзвешенное значение коэффициента пропорциональности, определенное по данным табл. 2.

Аналогичным образом реальную зависимость $I_{\mu(1)} = f(I_{КПТ})$ можно также аппроксимировать линейным соотношением

$$I_{\mu(1)} = K_I I_{КПТ}, \qquad (17)$$

где $K_I = 1{,}82$ — коэффициент пропорциональности по току (безразмерный), средневзвешенное значение которого определено по данным табл. 2.

Таблица 3

Зависимости кратности перегрузки турбогенератора ТВВ-320 от значения КПТ

$I_{КПТ}$, А	0	2,42	19,33	63,58	147,78	280,5	468,3	713,13	1015,14	1367,4
φ, °	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
K_Q	1,0	1,017	1,067	1,2	1,44	1,8	2,28	2,88	3,55	4,27
K_S	1,0	1,0046	1,0187	1,0573	1,14	1,27	1,46	1,73	2,04	2,38
K_c	1,0	1,0042	1,0182	1,0568	1,13	1,27	1,46	1,73	2,04	2,38
K_f	1,0	1,0042	1,0182	1,054	1,12	1,22	1,36	1,54	1,74	1,95

Соотношения (16) и (17) могут использоваться для определения тока и мощности намагничивания блочного трансформатора при произвольном значении КПТ в пределах диапазона, указанного в табл. 2.

В табл. 3 представлены значения кратности перегрузки турбогенератора ТВВ-320 по реактивной K_Q и полной K_S мощности, по току статора K_c и возбуждения K_f.

Как видно из табл. 3, наибольшими значениями характеризуется кратность перегрузки турбогенератора ТВВ-320 реактивной мощностью, достигая значения $K_Q = 4{,}27$ при наступлении однополупериодного насыщения магнитной системы блочного трансформатора ТДЦ-400000/242/20, когда фазовый угол насыщения $\varphi = 90°$.

Такой результат является вполне закономерным, поскольку насыщение магнитной системы блочного трансформатора инициирует в первую очередь пропорциональное увеличение генерации турбогенератором ТВВ-320 реактивной мощности. Это необходимо для поддержания неизменного напряжения на генераторных шинах $U_г = \text{const}$, которое достигается за счет сохранения баланса реактивных мощностей при увеличении КПТ.

Выводы

1. Однозначное соответствие между КПТ и значением фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора (см. табл. 2) позволяет определить безопасные и недопустимые области значений фазового угла насыщения. В частности, в диапазоне значений фазового угла насыщения $0 < \varphi \le 30°$ симметричная перегрузка турбогенератора ТВВ-320 статорным током не превышает 6 % номинального значения.

2. Такая перегрузка может вызвать срабатывание защиты на сигнал, но сравнительно безопасна для турбогенератора ТВВ-320. Поэтому и диапазон значений $I_{КПТ} \le 64$ А может считаться вполне безопасным, не создающим недопустимых перегрузок током статора и полной мощностью.

3. В диапазоне значений фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора $30° < \varphi \le 60°$ кратность перегрузки турбогенератора током статора и полной мощностью продолжает возрастать и приближается к предельно допустимому значению ($K_c = K_s = 1{,}5$). При такой глубине насыщения магнитной системы блочного трансформатора возможно срабатывание защиты от симметричной перегрузки не только на сигнал, но и на отключение блока.

4. При значениях фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора $\varphi > 60°$ ($I_{КПТ} > 550$ А) кратность перегрузки током статора и полной мощностью превышает допустимое значение и способна привести в случае отказа релейной защиты к повреждению турбогенератора ТВВ-320.

Список литературы

1. **Электротехнический справочник**: В 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (Под общей редакцией профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др.) 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 880 с.
2. **Ngnegueu, T. Behaviour of transformers under DC/GIC excitation: Phenomenon, Impact on design/design evaluation process and Modelling aspects in support of Design** / T. Ngnegueu, F. Marketos, F. Devaux, T. Xu, R. Bardsley, S. Barker, J. Baldauf, J. Oliveira // CIGRE 2012. — P. 1 – 10.
3. **Walling, R. A. Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances** / R. A. Walling, A. H. Khan // IEEE Trans on Power Delivery. — 1991. — Vol. 6. Iss. 4. — Pp. 1707 – 1714.
4. **Nobuo, T. An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents** /

T. Nobuo, O. Tetsuo, M. Fumihiko, S. Sadamu, F. Yasuo // IEEE Transaction on Power Delivery. — 1994. — Vol. 9, Iss. 2. — Pp. 1173 – 1179.

5. **ГОСТ 533-2000 (МЭК 34-3-88). Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия**.
6. **ГОСТ 5616-89. Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия**.
7. **Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов** / Л. В. Лейтес. — М.: Энергия, 1981. — 392 с.
8. **Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода** / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — 2015. — № 1. — С. 12 – 24.
9. **Dommel, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP) Theory Book** / H. W. Dommel. — Portland: Bonneville Power Administration, 1986. — 483 p.
10. **Picher, P. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers** / P. Picher, L. Bolduc, A. Dutil, V. Q. Pham // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. — Vol. 12, Iss. 1. — Pp. 257 – 265.

References

1. **Orlova I. N. Elektrotekhnicheskii spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoi energii** (Electrotechnical reference book. Production and distribution of electrical energy), 7th ed., Moscow, Energoatomizdat, Vol. 3, Book 1, 1988, 880 p.
2. **Ngnegueu T., Marketos F., Devaux F., Xu T., Bardsley R., Barker S., Baldauf J., Oliveira J. Behavior of transformers under DC/GIC excitation: Phenomenon, Impact on design/design evaluation process and Modeling aspects in support of Design**, CIGRE 2012, pp. 1 – 10.
3. **Walling R. A., Khan A. H. Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances**, IEEE Trans on Power Delivery, 1991, Vol. 6, Issue 4, pp. 1707 – 1714.
4. **Nobuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Sadamu S., Yasuo F. An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents**, IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, Vol. 9, Issue 2, pp. 1173 – 1179.
5. **GOST 533-2000 (MEK 34-3-88). Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Turbogeneratory. Obshchie tekhnicheskie usloviya** (State Standard 533-2000 (IEC 34-3-88). Rotating electrical machinery. Turbo-generators. General specifications).
6. **GOST 5616-89. Generatory i generatory-dvigateli elektricheskie gidroturbinnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya** (State Standard 5616-89. Water-wheel type generators and motor-generators. General specifications).
7. **Leites L. V. Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov** (Electromagnetic calculations of transformers and reactors), Moscow, Energiya, 1981, 392 p.
8. **Novash I. V., Rumyantsev Yu. V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG. Energetika** (Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations), 2015, No. 1, pp. 12 – 24.
9. **Dommel H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP) Theory Book**, Portland, Bonneville Power Administration, 1986, 483 p.
10. **Picher P., Bolduc L., Dutil A., Pham V. Q. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, Vol. 12, Issue 1, pp. 257 – 265.

VVVahnina@yandex.ru

Reactive load of a synchronous generator at saturation of the magnetic system of a block transformer under the effect of quasi-constant currents

Kuvshinov A. A., Vakhnina V. V., Chernenko A. N., Pudovinnikov R. N.

It is shown that the effect of quasi-constant currents arising during periods of geomagnetic disturbances on a block transformer causes an increase in the reactive load of a synchronous generator. The harmonic composition of the magnetizing current of a block transformer at saturation of the magnetic system under the effect of a quasi-constant current flowing through the high voltage windings is determined taking into account the parameters of the power output of the synchronous generator to the power system. It is noted that the fundamental harmonic of the magnetizing current responsible for a multiple increase in the magnetizing power of a block transformer and proportional to the intensity of the quasi-constant current is the most significant. It is shown that the main feature of the operation mode of a synchronous generator at saturation of the magnetic system of a block transformer is attributed to the summation of the fundamental harmonic of the magnetizing current with the reactive component of the stator current, which causes an increase in the reactive load and the appearance of symmetrical overload up to actuation of the relay protection. On the example of the block "turbine generator TVV-320 — block transformer TDTs-400000/242/20", the ranges of quasi-direct current values that are safe for the operation of the block and the values capable of initiating a block shutdown and even damage to the turbine generator due to unacceptable stator current overload are determined.

Keywords: synchronous generator, block transformer, magnetizing power, quasi-constant current, symmetrical overload.

DOI 10.34831/EP.2021.75.38.003

Сравнение потерь мощности в двух структурах распределительной электрической сети коммунально-бытового назначения

Надтока И. И., доктор техн. наук, Осадчий П. В., инженер
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова

Тропин В. В., доктор техн. наук
Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина

Выполнено сравнение способов питания потребителей по значению дополнительных потерь энергии от несимметрии токов, задаваемому тремя равными независимыми полными токами нагрузки как в трёх лучах “звезды с нейтралью”, так и в трёх “плечах треугольника”. Показано, что относительные дополнительные потери мощности от несимметрии за счёт действия токов нулевой последовательности практически в 5 раз выше в четырехпроводной структуре распределительной сети “звезда с нейтралью”, чем в трехпроводной структуре сети “звезда без нейтрали”, в которой схема “треугольник” как преобразователь трёх независимых токов нагрузки в два независимых тока линии применяется непосредственно в распределительном устройстве нагрузки, а не в высоковольтной обмотке силового трансформатора четырехпроводной структуры сети.

Ключевые слова: распределительная сеть, “звезда с нейтралью”, “треугольник”, несимметрия, коэффициент превышения потерь, дополнительные потери мощности.

Применяющаяся в настоящее время в распределительных сетях коммунально-бытового назначения (КБН) простая четырехпроводная структура (рис. 1), в которой трёхфазная обмотка низкого напряжения питающего трансформатора *TV1* и распределительное устройство (РУ) трёх однофазных (по 220 В) независимых электроприёмников $Z_{нA}$, $Z_{нB}$, $Z_{нC}$ эквивалентной нагрузки каждой фазы сети, соединённых по схеме “звезда с нейтралью”, как известно, имеет недостаток, связанный с дополнительными потерями мощности и напряжения, вносимыми током нулевой последовательности (НП).

В данной статье предлагается использовать более сложную трехпроводную структуру (рис. 2), в которой трёхфазная обмотка низкого напряжения питающего трансформатора *TV2* соединяется по схеме “звезда” (без нейтрали), а трёхфазное РУ строится по схеме “треугольник”, в каждом “плече” которого три независимых электроприёмника $Z_{нAB}$, $Z_{нBC}$, $Z_{нCA}$ эквивалентной нагрузки питаются от междуфазных напряжений также по 220 В [1]. Аппараты защиты, автоматики и измерения потребляемой нагрузками электроэнергии не показаны для наглядности.

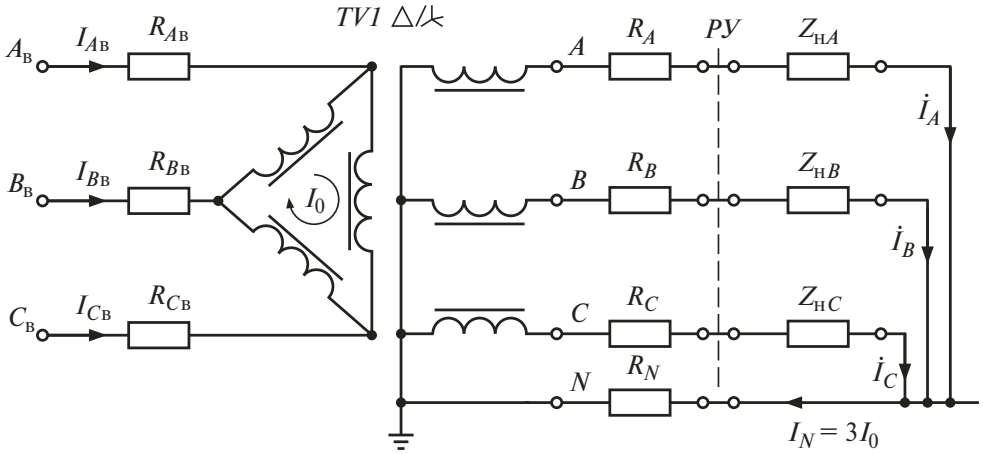


Рис. 1. Четырехпроводная структура распределительной сети коммунально-бытового назначения 0,38 кВ (напряжение на высокой стороне трансформатора — обычно 10,5 или 6,3 кВ)

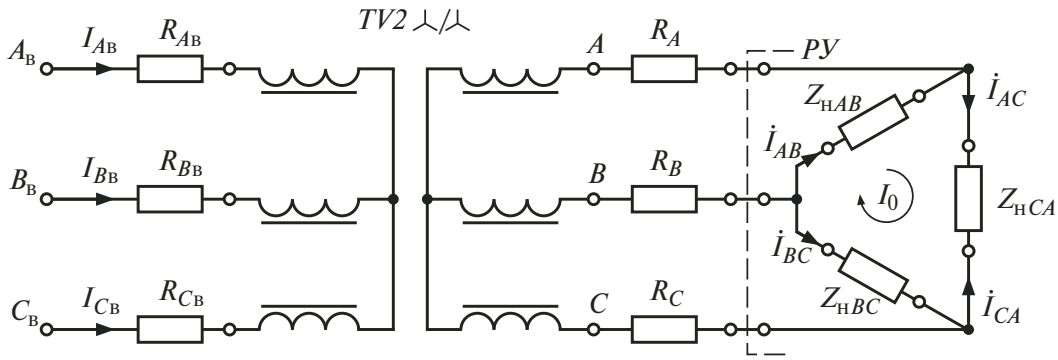


Рис. 2. Трехпроводная структура распределительной сети коммунально-бытового назначения с номинальным напряжением 0,22 кВ (напряжение на высокой стороне трансформатора уточняется при проектировании)

Возможность отказа от глухозаземлённой нейтрали в распределительной сети КБН обоснована в работе [2], что же касается промышленной сети, то и здесь были аналогичные предложения [3]. Представляет интерес сравнить обе показанные структуры сети КБН по их энергетической эффективности или по коэффициенту превышения потерь мощности $k_п$ [4, 5] при одинаковых исходных условиях — равенстве полных сопротивлений независимых электроприёмников $Z_{нA} = Z_{нAB}$, $Z_{нB} = Z_{нBC}$, $Z_{нC} = Z_{нCA}$ или равенстве независимых полных токов "лучей звезды" $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$, $\bar{I}_C$ и соответствующих им полных независимых токов "плеч треугольника" $\bar{I}_{AB}$, $\bar{I}_{BC}$, $\bar{I}_{CA}$, формируемых указанными нагрузками, чтобы соблюсти равенство по полной мощности.

Для определения коэффициента превышения потерь мощности в сети необходимо найти квадраты модулей векторов токов прямой, нулевой и обратной последовательностей [6].

Выполним эти вычисления сначала для четырехпроводной структуры сети 0,4 кВ (рис. 1). Рассмотрим представленную на рис. 3 диаграмму векторов токов "лучей звезды" $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$, $\bar{I}_C$ в декартовых координатах каждой фазы Re_A, Re_B, Re_C косоугольной трёхфазной системы координат. Переведём каждый вектор полного тока трёх электроприёмников в символическую (комплексную) форму с активной и реактивной частями по отношению к вектору своего напряжения, например, I_{Aa}, I_{Ar} по отношению к вектору напряжения фазы A, и затем известными преобразованиями координат представим их в общей системе координат комплексной плоскости, в которой действительная ось обозначена Re, мнимая ось — Jm, причём мнимая ось Jm принята за ось фазы A трёхфазной косоугольной системы координат. Тогда получим:

$$\bar{I}_A = (I_{Aa} - jI_{Ar})(e^{j90}) = I_{Ar} + jI_{Aa};$$

$$\bar{I}_B = (I_{Ba} - jI_{Br})(e^{-j30}) = \\ = 0{,}5[(\sqrt{3}I_{Ba} - I_{Br}) - j(\sqrt{3}I_{Br} + I_{Ba})];$$

$$\bar{I}_C = (I_{Ca} - jI_{Cr})(e^{-j150}) = \\ = 0{,}5[-(\sqrt{3}I_{Ca} + I_{Cr}) + j(\sqrt{3}I_{Cr} - I_{Ca})],$$

где a и r — индексы, обозначающие соответственно активные и реактивные составляющие векторов полных токов "лучей звезды".

Определим векторы тока нулевой, обратной и прямой последовательностей фазы A "звезды с нейтралью", выраженные через ортогональные составляющие токов её лучей:

$$\bar{I}_{0A} = \frac{1}{6}\{2I_{Ar} - I_{Br} - I_{Cr} + \sqrt{3}(I_{Ba} - I_{Ca}) + \\ + j[2I_{Aa} - I_{Ba} - I_{Ca} + \sqrt{3}(I_{Cr} - I_{Br})]\}; \quad (1)$$

$$\bar{I}_{2A} = \frac{1}{6}\{2I_{Ar} - I_{Br} - I_{Cr} + \sqrt{3}(I_{Ca} - I_{Ba}) + \\ + j[2I_{Aa} - I_{Ba} - I_{Ca} + \sqrt{3}(I_{Br} - I_{Cr})]\}; \quad (2)$$

$$\bar{I}_{1A} = \frac{1}{3}[I_{Ar} + I_{Br} + I_{Cr} + j(I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca})]. \quad (3)$$

Знание величин (1) – (3) даёт возможность определить значения квадратов модулей векторов симметричных составляющих токов "лучей звезды с нейтралью", т. е. значения квадратов токов трёх обмоток на низкой стороне трансформатора *TV1*, проводников фаз трёхпроводной линии 0,4 кВ и, как результат, квадрата тока нейтрального проводника I_N.

Полученные после преобразований (1) – (3) квадраты модулей векторов тока нулевой, обратной и прямой последовательно-

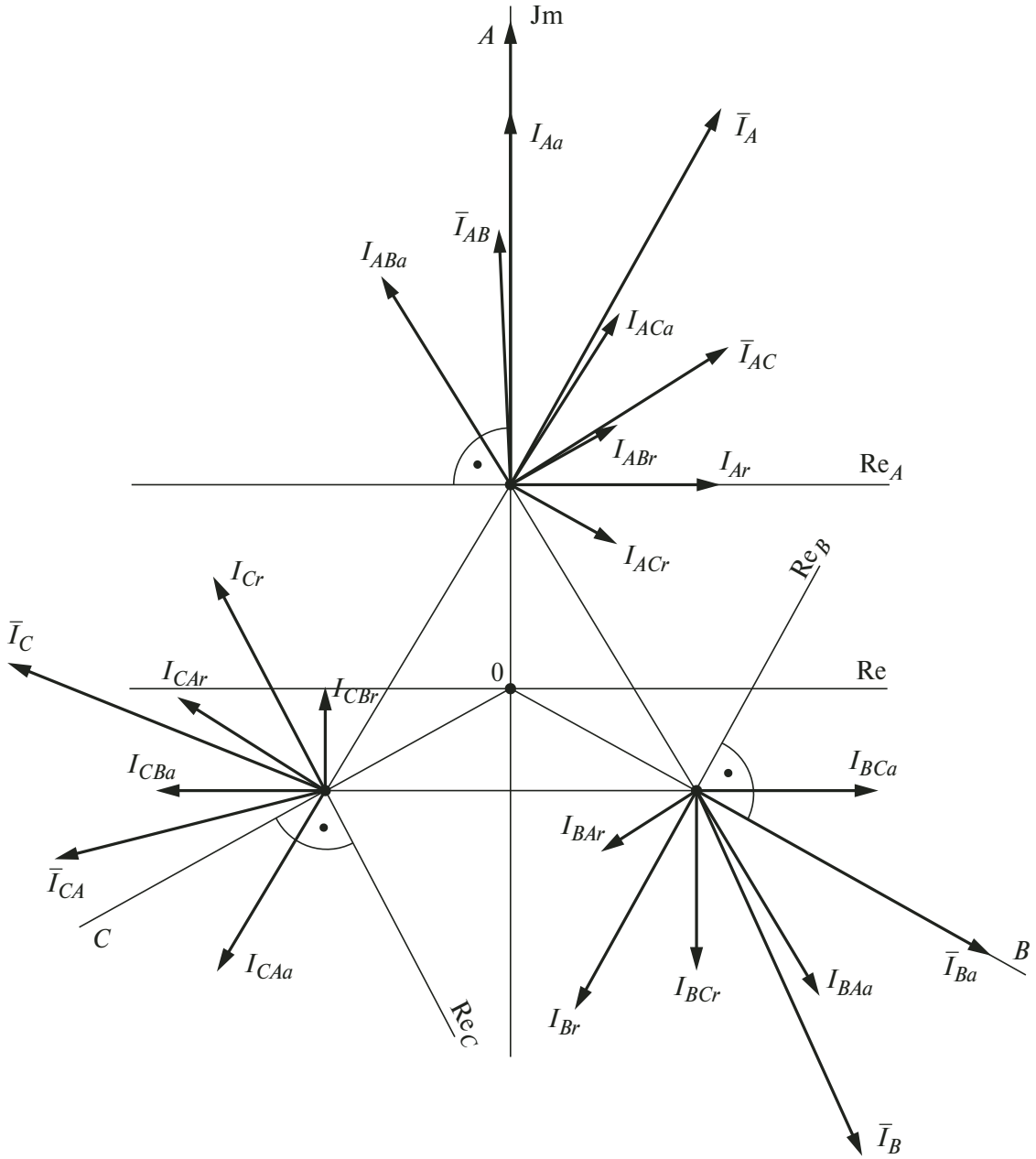


Рис. 3. Диаграмма векторов токов "плеч треугольника" $\bar{I}_{AB}$, $\bar{I}_{BC}$, $\bar{I}_{CA}$, векторов токов $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$, $\bar{I}_C$ "лучей звезды", которые соответствуют по структуре векторам токов фаз трёхпроводной линии, идущей к трансформатору, и их ортогональных составляющих, активных и реактивных, например I_{ABa}, I_{ABr}, в декартовых координатах каждой фазы: *A* — Re$_A$; *B* — Re$_B$; *C* — Re$_C$

стей "лучей звезды с нейтралью" (т. е. четырехпроводной структуры) имеют вид:

$$I_0^2 = \frac{1}{18}\{(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Aa} - I_{Ca})^2 + (I_{Ar} - I_{Cr})^2 + (I_{Br} - I_{Ar})^2 + (I_{Br} - I_{Cr})^2 + 2\sqrt{3}[I_{Ar}(I_{Ba} - I_{Ca}) + I_{Br}(I_{Ca} - I_{Aa}) + I_{Cr}(I_{Aa} - I_{Ba})]\}; \quad (4)$$

$$I_2^2 = \frac{1}{18}\{(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Aa} - I_{Ca})^2 + (I_{Ar} - I_{Cr})^2 + (I_{Br} - I_{Ar})^2 + (I_{Br} - I_{Cr})^2 - 2\sqrt{3}[I_{Ar}(I_{Ba} - I_{Ca}) + I_{Br}(I_{Ca} - I_{Aa}) + I_{Cr}(I_{Aa} - I_{Ba})]\}; \quad (5)$$

$$I_1^2 = \frac{1}{9}[(I_{Ar} + I_{Br} + I_{Cr})^2 + (I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca})^2]. \quad (6)$$

Следует обратить внимание на то, что при суммировании квадратов токов I_0^2 и I_2^2 взаимно сокращаются последние части их выражений, состоящие из взаимных произведений активных и реактивных составляющих образующих их токов, что в дальнейшем

значительно упрощает определение коэффициента превышения потерь мощности $k_{\text{п}}$ в сети.

Рассмотрим теперь трехпроводную структуру распределительной сети 0,22 кВ по рис. 2 и по аналогии с предыдущими рассуждениями и выводом выражений (1) – (6) получим в комплексной форме токи и значения их квадратичных форм для нагрузки, соединённой “треугольником”, и линии напряжением 220 В от обмотки по схеме “звезда без нейтрали” низкой стороны трансформатора *TV2* до РУ.

Также на основе рассмотрения диаграмм векторов токов “треугольника” по рис. 3 можем записать выражения для токов “плеч треугольника” *AB*, *BC*, *CA*:

$$\bar{I}_{AB} = \left(-\frac{1}{2} I_{ABa} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{ABr} \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_{ABa} + \frac{1}{2} I_{ABr} \right);$$

$$\bar{I}_{BC} = (I_{BCa} - jI_{BCr});$$

$$\bar{I}_{CA} = \left(-\frac{1}{2} I_{CAa} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{CAr} \right) - j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_{CAa} - \frac{1}{2} I_{CAr} \right),$$

где *a* и *r* — индексы, обозначающие аналогично векторам токов “звезды с нейтралью” активные и реактивные составляющие полных токов плеч треугольника.

Определим ток нулевой последовательности “треугольника”, выраженный через ортогональные составляющие его токов “плеч”:

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{CA})$$

и соответственно

$$\bar{I}_{0AB} = \frac{1}{6}\{2I_{BCa} - I_{ABa} - I_{CAa} + \\ + \sqrt{3}(I_{ABr} - I_{CAr}) + j\,[I_{ABr} + I_{CAr} - \\ - 2I_{BCr} + \sqrt{3}(I_{ABa} - I_{CAa})]\}. \qquad (7)$$

Найдем ток обратной последовательности токов “треугольника” через ортогональные составляющие его токов “плеч”:

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}[\,\bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC}(e^{\,j240}) + \bar{I}_{CA}(e^{\,j120})]$$

и соответственно

$$\bar{I}_{2AB} = \frac{1}{6}\{2I_{CAa} - I_{ABa} - I_{BCa} + \\ + \sqrt{3}(I_{ABr} - I_{BCr}) + j\,[I_{ABr} + I_{BCr} - \\ - 2I_{CAr} + \sqrt{3}(I_{ABa} - I_{BCa})]\}. \qquad (8)$$

Определим ток прямой последовательности “плеч треугольника” через ортогональные составляющие его токов “плеч”:

$$\bar{I}_{1AB} = \frac{1}{3}[\,\bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC}(e^{\,j120}) + \bar{I}_{CA}(e^{\,j240})],$$

т. е.

$$\bar{I}_{1AB} = \frac{1}{6}\{-I_{CAa} - I_{ABa} - I_{BCa} + \\ + \sqrt{3}(I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr}) + \\ + j\,[I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr} + \\ + \sqrt{3}(I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})]\}.$$

Поскольку полученный вектор тока прямой последовательности приведен к базису вектора плеча треугольника *AB*, то, не изменяя модуля, лишь повернув его на 30° по часовой стрелке, можно получить выражение, приведенное к базису “звезды”, т. е. относительно мнимой оси или оси фазы *A*:

$$\bar{I}_{1AB}(e^{-j30}) = \frac{1}{3}[I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr} + \\ + j\,(I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})], \qquad (9)$$

подтверждающее и формой, и содержанием величину вектора тока прямой последовательности в трёхфазной косоугольной системе координат, в которой ось ординат или мнимая ось являются осью фазы *A*.

Для проверки определения величин симметричных составляющих тока плеча *AB* “треугольника” (7) – (9) сложим их:

$$\bar{I}_{0AB} + \bar{I}_{2AB} + \bar{I}_{1AB} = \left(-\frac{1}{2} I_{ABa} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{ABr} \right) + \\ + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_{ABa} + \frac{1}{2} I_{ABr} \right).$$

Полученное при этом исходное значение тока плеча *AB* означает правильность приведенных выражений.

Теперь определим токи фаз трёхпроводной линии напряжением 220 В, идущей от трансформатора *TV2* к РУ с “треугольником” нагрузки. Токи линии фаз *A*, *B*, *C*, соответственно $\bar{I}_{A\text{л}}$, $\bar{I}_{B\text{л}}$, $\bar{I}_{C\text{л}}$, (индекс л означает принадлежность к трёхпроводной линии напряжением 220 В), найдём суммированием в

соответствующих узлах фаз сети токов “плеч треугольника”:

$$\bar{I}_{A\text{л}} = \bar{I}_{AB} + \bar{I}_{AC};$$
$$\bar{I}_{B\text{л}} = \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{BA};$$
$$\bar{I}_{C\text{л}} = \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB},$$

а с учётом инверсии знака вектора при инверсии индексов:

$$\bar{I}_{AC} = -\bar{I}_{CA}; \quad \bar{I}_{BA} = -\bar{I}_{AB}; \quad \bar{I}_{CB} = -\bar{I}_{BC}.$$

В результате имеем:

$$\bar{I}_{A\text{л}} = \frac{1}{2}\{I_{ACa} - I_{ABa} + \sqrt{3}(I_{ABr} + I_{CAr}) + j[I_{ABr} - I_{CAr} + \sqrt{3}(I_{ABa} + I_{CAa})]\};$$

$$\bar{I}_{B\text{л}} = \frac{1}{2}[2I_{BCa} + I_{ABa} - \sqrt{3}I_{ABr} + j(-2I_{BCr} - I_{BAr} - \sqrt{3}I_{BAa})];$$

$$\bar{I}_{C\text{л}} = \frac{1}{2}[-2I_{BCa} - I_{ACa} - \sqrt{3}I_{ACr} + j(2I_{BCr} + I_{CAr} - \sqrt{3}I_{CAa})].$$

Правильность этих выражений проверена по нулевой сумме токов фаз трёхпроводной линии.

Определим токи $\bar{I}_{1A\text{л}}$ и $\bar{I}_{2A\text{л}}$ фазы A прямой и обратной последовательностей трёхпроводной линии 220 В, выраженные через ортогональные составляющие токов плеч треугольника:

$$\bar{I}_{1A\text{л}} = \frac{\sqrt{3}}{3}[I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr} + j(I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAr})]; \quad (10)$$

$$\bar{I}_{2A\text{л}} = \frac{\sqrt{3}}{6}\{I_{ABr} - 2I_{BCr} + I_{CAr} + \sqrt{3}(I_{CAa} - I_{ABa}) + j[I_{ABa} - 2I_{BCa} + I_{CAa} + \sqrt{3}(I_{ABr} - I_{ACr})]\}. \quad (11)$$

Отметим, что увеличение данных модулей токов линии в $\sqrt{3}$ раз вызвано известной связью между симметричными фазными токами “плеч треугольника” и линейными токами трёхпроводной линии, подходящей к нему.

Знание полученных выражений (7) – (11) даёт возможность определить квадраты значений модулей векторов симметричных составляющих токов “плеч треугольника” и проводников фаз трёхпроводной линии 220 В.

Полученные квадраты модулей векторов токов нулевой, обратной и прямой последовательностей “плеч треугольника” имеют вид:

$$I_{0AB}^2 = \frac{1}{18}\{(I_{BCa} - I_{ABa})^2 + (I_{BCa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABr} - I_{CAr})^2 + (I_{BCr} - I_{ABr})^2 + (I_{BCr} - I_{CAr})^2 + 2\sqrt{3}[I_{ABa}(I_{ACr} - I_{BCr}) + I_{BCa}(I_{ABr} - I_{CAr}) + I_{CAa}(I_{BCr} - I_{ABr})]\}; \quad (12)$$

$$I_{2AB}^2 = \frac{1}{18}\{(I_{BCa} - I_{ABa})^2 + (I_{BCa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABr} - I_{CAr})^2 + (I_{BCr} - I_{ABr})^2 + (I_{BCr} - I_{CAr})^2 - 2\sqrt{3}[I_{ABa}(I_{ACr} - I_{BCr}) + I_{BCa}(I_{ABr} - I_{CAr}) + I_{CAa}(I_{BCr} - I_{ABr})]\}; \quad (13)$$

$$I_{1AB}^2 = \frac{1}{9}[(I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr})^2 + (I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})^2]. \quad (14)$$

Полученные квадраты модулей векторов токов обратной и прямой последовательностей проводников фаз трёхпроводной линии 220 В “трехпроводной” структуры распределительной сети имеют вид:

$$I_{2A\text{л}}^2 = \frac{1}{6}\{(I_{BCa} - I_{ABa})^2 + (I_{BCa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABa} - I_{CAa})^2 + (I_{ABr} - I_{CAr})^2 + (I_{BCr} - I_{ABr})^2 + (I_{BCr} - I_{CAr})^2 - 2\sqrt{3}[I_{ABa}(I_{ACr} - I_{BCr}) + I_{BCa}(I_{ABr} - I_{CAr}) + I_{CAa}(I_{BCr} - I_{ABr})]\}; \quad (15)$$

$$I_{1A\text{л}}^2 = \frac{1}{3}[(I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr})^2 + (I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})^2]. \quad (16)$$

Для повышения наглядности и некоторого упрощения получаемых результатов примем следующие обозначения:

$$M = (I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Aa} - I_{Ca})^2 + (I_{Ar} - I_{Cr})^2 + (I_{Br} - I_{Ar})^2 + (I_{Br} - I_{Cr})^2; \quad (17)$$

$$\Pi = 2\sqrt{3}[I_{Ar}(I_{Ba} - I_{Ca}) + I_{Br}(I_{Ca} - I_{Aa}) + I_{Cr}(I_{Aa} - I_{Ba})]: \quad (18)$$

$$\Phi = (I_{Ar} + I_{Br} + I_{Cr})^2 + (I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca})^2 = I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr})^2 + (I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})^2 \quad (19)$$

и запишем выражения (4) – (6) в новом базисе с учётом обозначений (17) – (19):

$$I_0^2 = \frac{1}{18}(M + П); \quad I_2^2 = \frac{1}{18}(M - П);$$
$$I_1^2 = \frac{1}{9}Ф. \qquad (20)$$

Ввиду принятого равенства исходных полных токов фаз "звезды с нейтралью" четырехпроводной структуры и "треугольника" рехпроводной структуры аналогично, согласно выражениям (12) – (14), записываются квадраты токов нулевой, обратной и прямой последовательностей "плеч треугольника":

$$I_{0AB}^2 = \frac{1}{18}(M+П); \quad I_{2AB}^2 = \frac{1}{18}(M-П);$$
$$I_{1AB}^2 = \frac{1}{9}Ф \qquad (21)$$

и квадраты токов обратной и прямой последовательностей проводников фаз трёхпроводной линии 220 В трехпроводной структуры распределительной сети согласно выражениям (15), (16):

$$I_{2Aл}^2 = \frac{1}{6}(M-П); \quad I_{1Aл}^2 = \frac{1}{3}Ф. \qquad (22)$$

Примем определение коэффициента превышения потерь мощности в распределительной сети $k_п$ как отношение мощности потерь в данной распределительной сети, вызванных токами всех последовательностей, к мощности потерь в сети, вызванных только током прямой последовательности:

$$k_п = \frac{(I_0^2 + I_2^2 + I_1^2)3R + I_0^2(9R_N)}{I_1^2(3R)} =$$
$$= 1 + \frac{(I_0^2 + I_2^2)}{I_1^2} + \frac{I_0^2}{I_1^2}\left(3\frac{R_N}{R}\right), \qquad (23)$$

где R — активное сопротивление проводников каждой фазы линии сети и соответствующих обмоток низкого напряжения трансформатора, питающего данную линию; R_N — активное сопротивление проводника нейтрального провода данной линии при использовании схемы "звезда — звезда с нейтралью".

Условимся также, что при последующих расчётах примем величину R_N с достаточной для практики точностью равной величине R. Тогда выражение (23) запишем в следующем виде:

$$k_п = 1 + \frac{(I_0^2 + I_2^2)}{I_1^2} + 3\frac{I_0^2}{I_1^2}. \qquad (24)$$

На основе выражения (24) построим аналитические математические модели, удобные для расчёта коэффициентов $k_п$ четырехпроводной и $k_{пл}$ трехпроводной структур распределительной сети.

Так, аналитическая модель для четырехпроводной структуры с учётом введённых упрощений (17), (18), (19) и замечания о взаимном сокращении величин $П$ при суммировании квадратов токов обратной и нулевой последовательностей имеет вид:

$$k_п = 1 + \frac{M}{Ф} + 1{,}5\left(\frac{M + П}{Ф}\right), \qquad (25)$$

а для трехпроводной структуры, с учётом введённых упрощений (17), (18), (19) имеет вид:

$$k_{пл} = 1 + 0{,}5\left(\frac{M - П}{Ф}\right). \qquad (26)$$

Перейдём к построению конкретных числовых моделей для расчётов по формулам (25), (26), приняв следующие применяемые на практике условия:

все эквивалентные электроприёмники имеют одинаковые коэффициенты реактивной мощности: $\operatorname{tg}\varphi_A = \operatorname{tg}\varphi_B = \operatorname{tg}\varphi_C = \operatorname{tg}\varphi_{AB} = \operatorname{tg}\varphi_{BC} = \operatorname{tg}\varphi_{CA} = \operatorname{tg}\varphi$, что на практике для бытовых потребителей относительно хорошо соблюдается [7];

относительное значение активного тока или мощности одного из трёх электроприёмников, например "луча звезды" фазы A и "плеча" AB треугольника, примем равным 1,0, а других двух — как относительные переменные величины x ("луча звезды" фазы B и "плеча" BC) и y ("луча звезды" фазы C и "плеча" CA), каждая из которых количественно меньше 1,0.

Теперь в связи с принятыми параметрическими условиями отметим появление двух важных моментов:

при условии равенства $\operatorname{tg}\varphi$ трёх эквивалентных электроприёмников в "звезде" или в "треугольнике" параметр $П$ становиться равным нулю, что легко проверяется простыми преобразованиями;

в числителе и знаменателе формул (25), (26) взаимно сокращаются множители

Коэффициенты превышения потерь мощности $k_п$ и $k_{пл}$ при различных значениях x и y

№ п/п	Относительные значения активных токов		Коэффициенты превышения потерь мощности	
	x	y	$k_п$ — формула (27)	$k_{пл}$ — формула (28)
1	1,0	0,7	1,06	1,01
2	1,0	0,5	1,20	1,04
3	1,0	0,3	1,46	1,09
4	1,0	0,0	2,25	1,25
5	0,7	0,7	1,08	1,02
6	0,7	0,5	1,20	1,04
7	0,7	0,3	1,46	1,09
8	0,7	0,0	2,73	1,27
9	0,5	0,5	1,31	1,06
10	0,5	0,3	1,60	1,12
11	0,5	0,0	2,67	1,33
12	0,3	0,3	1,96	1,19
13	0,3	0,0	3,34	1,47
14	0,0	0,0	6,00	2,00

$(1 + \mathrm{tg}^2\,\varphi)$, т. е. коэффициент $\mathrm{tg}\,\varphi$ в дальнейших численных расчётах не участвует.

Поэтому формулы (25), (26) преобразуются в простые выражения, удобные не только для численного, но и для аналитического исследования. Так, для четырехпроводной структуры сети

$$k_п = 1 + \frac{2{,}5[(1-x)^2 + (1-y)^2 + (x-y)^2]}{(1+x+y)^2}, \quad (27)$$

для трехпроводной структуры сети

$$k_{пл} = 1 + \frac{0{,}5[(1-x)^2 + (1-y)^2 + (x-y)^2]}{(1+x+y)^2}. \quad (28)$$

В таблице приведено сравнение коэффициентов $k_п$ и $k_{пл}$ для наиболее характерных сочетаний относительных значений токов в фазах трёхпроводной и четырёхпроводной сетей.

Для распределительной сети КБН характерна значительная несимметрия токов нагрузки [8, 9]. Её имитация на предложенных численных моделях укладывается в усреднённые режимы работы между показателями (1,0; $x = 0{,}7$; $y = 0{,}3$) и (1,0; $x = 0{,}5$; $y = 0{,}2$). При этом среднее значение коэффициента превышения потерь мощности для “четырехпроводной” структуры распределительной сети составит порядка 1,5; а для “трехпроводной” структуры — 1,1. Это означает, что средние значения дополнительных потерь мощности в сети составят соответственно 50 % и 10 %. И такой разбаланс вызван, прежде всего, наличием тока нулевой последовательности, что приводит к необходимости применения на высокой стороне трансформатора *TV1* обмотки со схемой соединения “треугольник”, преобразующей три независимых тока нагрузки в два независимых тока питающей линии.

Переходя к анализу потерь мощности в обмотке высокого напряжения питающих трансформаторов *TV1* и *TV2*, отметим, что все выполненные расчёты по “четырехпроводной” структуре сети опирались на то, что обмотка высокого напряжения *TV1* имеет схему соединения “треугольник”, в противном случае задача определения тока нулевой последовательности превращается в нелинейную и требует для решения более сложного математического аппарата [10].

Для “трехпроводной” структуры поиск коэффициента $k_{пл}$ для высоковольтной обмотки ничем не отличается от уже проведённого анализа, поскольку два независимых тока обмоток трансформатора *TV2* высокой стороны полностью повторяют по форме, с учётом коэффициента трансформации, два независимых тока обмоток низкой стороны, сформированных в *РУ* “треугольником” подключения нагрузок из трёх независимых токов трёх эквивалентных электроприёмников нагрузки, т. е. $k_{пл} = 1 + 0{,}5\left(\frac{M - П}{Ф}\right)$, и для нашего случая, когда равны все коэффициенты $\mathrm{tg}\,\varphi_A = \mathrm{tg}\,\varphi_B = \mathrm{tg}\,\varphi_C = \mathrm{tg}\,\varphi_{AB} = \mathrm{tg}\,\varphi_{BC} = \mathrm{tg}\,\varphi_{CA} = \mathrm{tg}\,\varphi$ и $П = 0$, получаем:

$$k_{пл} = 1 + 0{,}5\left(\frac{M}{Ф}\right). \quad (29)$$

Для четырехпроводной структуры в обмотке “треугольник” будут все симметричные составляющие и прямой, и обратной, и нулевой последовательностей (это, кстати, отмечено на рис. 1). А по выявленной выше закономерности $I_{2AB}^2 + I_{0AB}^2 = 2M$ и, следова-

тельно, для обмотки “треугольник” например *AB*, высокой стороны трансформатора *TV1*:

$$k_{\text{п}\,AB} = 1 + \left(\frac{M}{\Phi} \right). \qquad (30)$$

Таким образом, для принятых выше параметрических условий относительные дополнительные потери мощности в обмотке “треугольник” высокого напряжения *TV1* будут в 2 раза выше, чем в обмотке “звезда” высокого напряжения *TV2*. Экспериментально установить такую закономерность не удаётся [11]. У обмотки высокого напряжения “треугольник” есть ещё серьёзный недостаток: три вывода высокого напряжения заводятся в “подвал” кожуха трансформатора, значительно повышая износ масла в нижней части, где оно и так, по определению, не совсем чистое. Обмотка трансформатора “звезда” в этом отношении — наилучшая.

Выводы

1. Трехпроводная структура распределительной сети КБН имеет примерно в 5 раз меньшие относительные дополнительные потери мощности по сравнению с четырехпроводной структурой на низкой стороне питающего трансформатора и в 2 раза — на высокой стороне питающего трансформатора.

2. Основные дополнительные потери мощности в распределительной сети КБН создаются током нулевой последовательности и его производным — током нейтрального проводника сети КБН.

3. В сетях КБН желательно устранить обмотку, формируемую по схеме “треугольник” из высоковольтных сетевых трансформаторов сетей 6, 10, 35 кВ, чтобы они выполнялись по простой и надёжной схеме “звезда — звезда”;

4. Схему “треугольник” как преобразователь трёх независимых токов нагрузки в два независимых тока трёхпроводной линии распределительной сети КБН возможно использовать в РУ 0,22 кВ нагрузки.

Список литературы

1. **Надтока, И. И. Особенности применения схемы “открытый треугольник” в структуре сельской низковольтной распределительной сети** // И. И. Надтока, П. В. Осадчий, В. В. Тропин / Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2020. — Т. 63, № 5. — С. 72 – 78.
2. **Семёнова, М. Н. Обоснование перехода от глухозаземлённой нейтрали к изолированной в сетях электроустановок сельского назначения напряжением до 1000 В:** автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / М. Н. Семёнова. — Челябинск, 2011. — 24 с.
3. **Дубов, А. Л. По поводу статьи “О применении силовых трансформаторов с изолированной нейтралью на стороне 0,4 кВ”** / А. Л. Дубов, В. А. Митченко // Промышленная энергетика. — 2007. — № 6. — С. 52 – 53.
4. **Шидловский, А. К. Анализ и принципы построения пофазно-управляемых устройств коррекции режимов трехфазных сетей с нулевым проводом. Автоматические устройства для пофазной коррекции нагрузочных токов сети** / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. А. Новский // Киев: Институт электродинамики АН, Препринт — 283, 1982. — 63 с.
5. **Савиных, В. В. Геометрические и аналитические соотношения между ортогональными и симметричными составляющими тройки векторов трёхфазной системы координат** / В. В. Савиных, В. В. Тропин // Изв. вузов. Электромеханика. — 2010. — № 6. — С. 74 – 79.
6. **Надтока, И. И. Влияние взаимной корреляции фазных токов на величину потерь электроэнергии в нулевом проводе** / Надтока И. И., Троицкий А. И. // Кибернетика электрических систем: Материалы XXVII сессии семинара “Электроснабжение”. Новочеркасск, 27 – 29 сент. 2005 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: Ред. журн. “Изв. вузов. Электромеханика”, 2006, с. 29 – 33.
7. **Троицкий, А. И. Методы и средства снижения потерь электроэнергии в сельских и коммунальных распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой:** автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / А. И. Троицкий. — Ставрополь. 2007. — 34 с.
8. **Косоухов, Ф. Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками** / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов // Электротехника. — 2014. — № 6. — С. 22 – 24.
9. **Косоухов, Ф. Д. Экспериментальное исследование потерь мощности от несимметрии токов в трёхфазных трансформаторах и четырёхпроводных линиях 0,38 кВ** / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, В. Ф. Петров, Н. Ю. Криштопа // Электротехника. — 2018. — № 2. — С. 47 – 51.
10. **Богдан, А. В. Измерение сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора Y/YH-12** / А. В. Богдан, В. А. Богдан, А. Н. Соболь // Сельский механизатор. — 2018. — № 11. — С. 40, 41.
11. **Троицкий, А. И. Оценивание энергоэффективности трансформаторов по КПД и коэффициенту связи обмоток в зависимости от нагрузки** / А. И. Троицкий, С. С. Костинский, В. В. Тропин, Н. И. Цыгулёв // Известия вузов Электромеханика. — 2018. — Т. 61. — № 5. — С. 44 – 49.

References

1. **Nadtoka I. I., Osadchiy P. V., Tropin V. V. Izv. vyzov. Elektromekhanika** (Russian Electromechanics), 2020, Vol. 63, No. 5, pp. 72 – 78.
2. **Semyonova M. N. Obosnovanie perekhoda ot glukhozazemlennoi neitrali k izolirovannoi v setyakh elektroustanovok sel’skogo naznacheniya napryazheniem do 1000 V** (Justification of the transition from

a solidly grounded neutral to an isolated one in the networks of electrical installations for rural purposes with a voltage of up to 1000 V), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Chelyabinsk, 2011, 24 p.

3. **Dubov A. L., Mitchenko V. A. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2007, No. 6, pp. 52 – 53.
4. **Shidlovsky A. K., Kuznetsov V. G., Novsky V. A. Analiz i printsipy postroeniya pofazno-upravlyaemykh ustroistv korrektsii rezhimov trekhfaznykh setei s nulevym provodom. Avtomaticheskie ustroistva dlya pofaznoi korrektsii nagruzochnykh tokov seti** (Analysis and principles of construction of phase-controlled devices for correcting modes of three-phase networks with a zero wire. Automatic devices for phase-by-phase correction of network load currents), Kiev, Institute of Electrodynamics of the Academy of Sciences, Preprint, No. 283, 1982, 63 p.
5. **Savinykh V. V., Tropin V. V. Izv. vyzov. Elektromekhanika** (Russian Electromechanics), 2010, No. 6, pp. 74 – 79.
6. **Nadtoka I. I., Troitskiy A. I. Kibernetika elektricheskikh sistem: Materialy XXVII sessii seminara "Elektrosnabzhenie". Novocherkassk, 27 – 29 sentyabrya 2005** (Cybernetics of electrical systems. Materials of the XXVII session of the seminar "Power supply", Novocherkassk, 27 – 29 September 2005), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Ed. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics), 2006, p. 29 – 33.
7. **Troitsky A. I. Metody i sredstva snizheniya poter' elektroenergii v sel'skikh i kommunal'nykh raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh s nesimmetrichnoi nagruzkoi** (Methods and means of reducing electricity losses in rural and communal distribution electrical networks with asymmetric load), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Stavropol, 2007, 34 p.
8. **Kosoukhov F. D., Vasiliev N. V., Filippov A. O. Elektrotekhnika** (Electrical engineering), 2014, No. 6, pp. 22 – 24.
9. **Kosoukhov F. D., Vasiliev N. V., Petrov V. F., Krishtopa N. Yu. Elektrotekhnika** (Electrical engineering), 2018, No. 2, pp. 47 – 51.
10. **Bogdan A. V., Bogdan V. A., Sobol A. N. Sel'skii mekhanizator** (Selskiy Mechanizator), 2018, No. 11, pp. 40 – 41.
11. **Troitsky A. I., Kostinsky S. S., Tropin V. V., Tsygulev N. I. Izv. vyzov. Elektromekhanika** (Russian Electromechanics), 2018, Vol. 61, No. 5, pp. 44 – 49.

ii_nadtoka@mail.ru

Comparison of the power losses in two structures of the distribution electric network of public utilities

Nadtoka I. I., Osadchii P. V., Tropin V. V.

The methods of powering the consumers are compared by the value of additional energy losses from current asymmetry (CA), set by three equal independent total load currents both in three beams of the "star with neutral", and in three "arms of the triangle". It is shown that the relative additional power losses from CA due to the action of zero sequence currents are almost 5 times higher in the four-wire structure of the "star with neutral" distribution network than in the three-wire structure of the "star without neutral" network in which the "triangle" circuit as a converter of three independent load currents in two independent line currents is used directly in the load switchgear, and not in the high-voltage winding of the power transformer of the four-wire network structure.

Keywords: distribution network, "star with neutral", "triangle", asymmetry, excess loss factor, additional power losses.

DOI 10.34831/EP.2021.39.64.004

Концепция стабилизатора напряжения для устройств с импульсными блоками питания

Егоров М. Ю., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО "Великолукская ГСХА", г. Великие Луки

Предложена концепция стабилизатора напряжения для широко распространенных устройств и приборов с импульсными блоками питания. Обосновано, что благодаря особой принципиальной электрической схеме входного каскада питания данных устройств их можно включать как на переменное, так и на постоянное напряжение, при этом режим функционирования последующих каскадов не изменится. Разработана структурная схема стабилизатора напряжения, из которой исключен узел инвертирования постоянного напряжения (инвертор). Предложена принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения и подробно описан порядок функционирования и взаимодействия отдельных ее элементов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, отклонение напряжения, стабилизатор напряжения, импульсный блок питания, инвертор.

В настоящее время в большинстве электронных приборов и устройств применяются импульсные блоки питания (рис. 1). В частности, они содержатся в составе персональных компьютеров, мониторов, телевизоров, зарядных устройств ноутбуков, устройств с инверторным электроприводом (холодильники, кондиционеры, стиральные машины), приборов автоматики, широко применяющихся в системах газоснабжения, теплоснабжения и электроснабжения (цифровые реле, программируемые логические контроллеры) и т. д. Их главным отличием от традиционных трансформаторных блоков питания является то, что в них переменное сетевое напряжение без понижения его амплитудного значения сразу же выпрямляется и только затем подвергается дальнейшим преобразованиям, в число которых непосредственно входит и собственно сам процесс понижения напряжения для последующего питания соответствующих каскадов конкретного электронного устройства [1].

Актуальность рассматриваемой проблемы

Известно, что у ряда импульсных блоков питания относительно широкий диапазон допустимого входного напряжения [2], однако этот диапазон у подавляющего числа подобных устройств, как показывает анализ технических параметров проектируемых и выпускаемых изделий для широкого спектра применения, обычно смещен в сторону пониженных напряжений, тогда как превышение сверх номинального напряжения (согласно ГОСТ 29322–2014 "Напряжения стандартные" оно составляет 230 В) допускается совсем незначительное — чаще всего не более 10 %.

При повышении входного напряжения свыше допустимой нормы в первую очередь произойдет пробой варисторов и от возникшего броска тока короткого замыкания перегорит защитный предохранитель, однако с большой вероятностью (особенно при напряжениях, которые меньше напряжения срабатывания варисторов, но близки к ним) возможно также повреждение диодного моста и

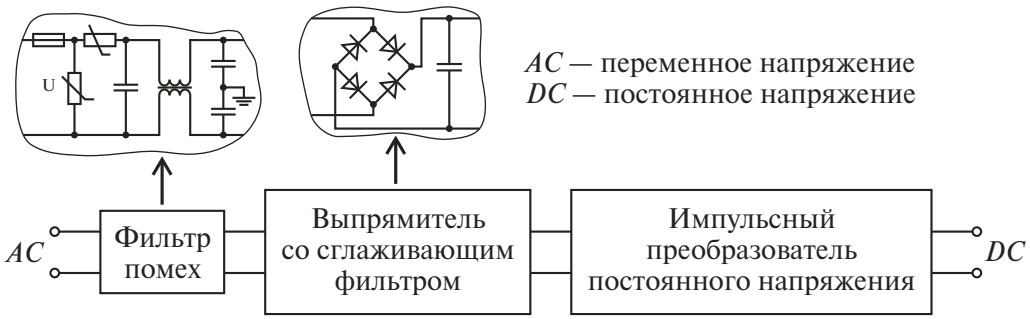


Рис. 1. Типовая структура импульсного блока питания

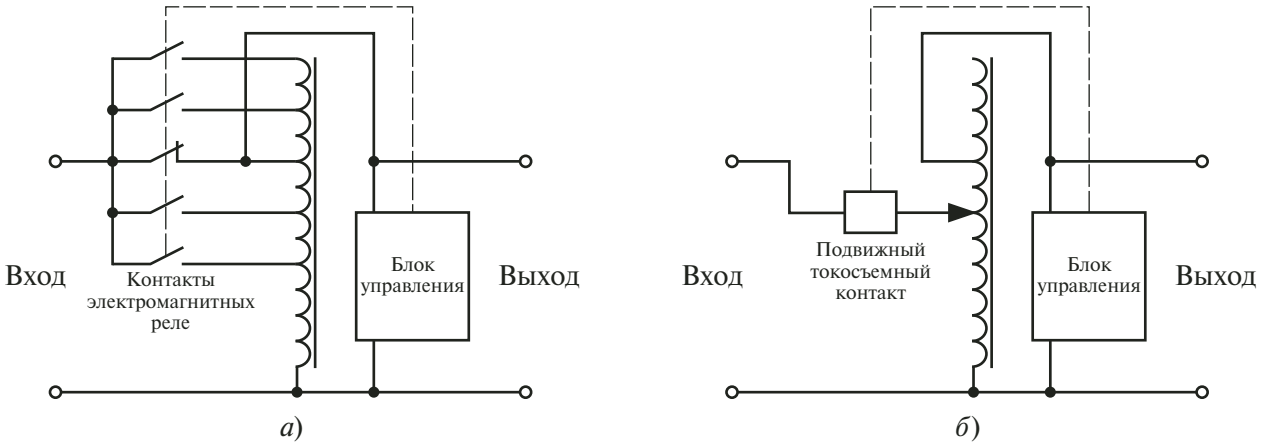


Рис. 2. Типовые структуры электронного и электромеханического стабилизаторов напряжения

электролитических конденсаторов, содержащихся в составе входной выпрямительной схемы, а также ключевых MOSFET-транзисторов вследствие пробоя полупроводниковых структур [3, 4]. При пониженном напряжении импульсный блок питания потребляет больший средний ток, чем в номинальном режиме, вследствие чего электронные компоненты, относящиеся конструктивно к его высоковольтной части (первичной стороне), находятся в напряженном токовом и тепловом режимах, что при ряде других неблагоприятных обстоятельств (повышенная температура окружающей среды, перегрузка) может привести к выходу данного блока питания из строя. Кроме того, любые резкие перепады входного напряжения будут вызывать переходные процессы в схеме импульсного блока питания, которые негативным образом могут сказываться на качестве выходного напряжения, а значит, и на функционировании получающих от него питание последующих каскадов и узлов электронной техники.

Поэтому для обеспечения нормальной работоспособности и долговечности устройств, содержащих в своем составе импульсные блоки питания, необходимо гарантировать наличие на их входе относительно стабильного напряжения, находящегося в пределах, нормируемых ГОСТ 32144–2013, и не подверженного резким колебаниям уровня. Последнее особенно актуально для электронной техники, применяемой в системах регулирования и управления комплексов электроснабжения, газоснабжения и теплоснабжения, так как любые серьезные сбои в подобных системах опасны значительным материальным ущербом и даже человеческими жертвами.

Анализ существующих разработок и исследований

Для стабилизации напряжения, подаваемого на вход электронной техники, применяют в основном следующие стабилизаторы: электронные (с симисторными или релейными коммутационными элементами), электромеханические и инверторные [5]. Электронные и электромеханические стабилизаторы напряжения характерны тем, что в них происходит преобразование переменного синусоидального напряжения только по амплитуде без изменения его на каких-либо промежуточных стадиях по частоте, форме кривой или роду (постоянное или переменное напряжение).

В электронных стабилизаторах (рис. 2, *а*) регулирование амплитуды подаваемого на них напряжения происходит путем переключения ответвлений обмотки автотрансформатора с помощью симисторов или контактов электромагнитных реле. При этом происходит ступенчатое изменение коэффициента трансформации автотрансформатора: в случае понижения уровня входного напряжения ниже установленной нормы коэффициент трансформации путем последовательных коммутаций ответвлений обмотки приводится к значению, которое меньше единицы; если же входное напряжение, наоборот, повышается, то посредством описанных выше переключений коэффициент трансформации преобразуется к значению, которое больше единицы.

В электромеханических стабилизаторах в качестве главного регулирующего узла (рис. 2, *б*) также применяется автотрансформатор, но техническая реализация процесса изменения коэффициента трансформации и, следовательно, амплитуды переменного на-

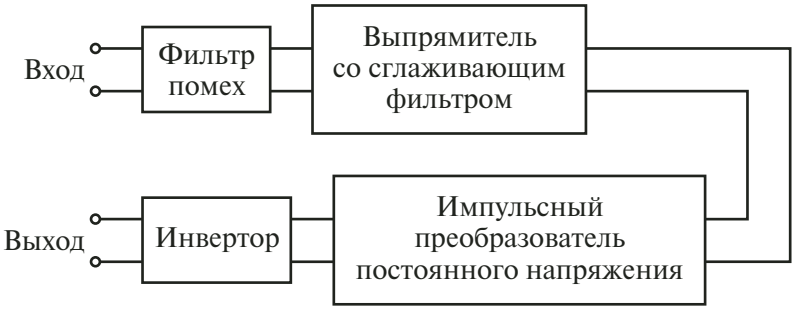


Рис. 3. Типовая структура инверторного стабилизатора напряжения

пряжения уже другая: обмотка автотрансформатора размещена на тороидальном магнитопроводе, одна из лобовых частей этой обмотки очищена от изоляции (отсутствует изоляция на верхней от поверхности магнитопровода четверти окружности провода каждого витка), а по поверхности данной лобовой части с помощью сервопривода перемещается подвижный токосъемный контакт, выполненный из графита и имеющий форму ролика или бруска. Процесс изменения коэффициента трансформации при этом получается плавным, а значение этого коэффициента будет определяться количеством витков, фактически включенных между общим зажимом обмотки и подвижным токосъёмным контактом [6].

Непосредственная работа с переменным синусоидальным напряжением частотой 50 Гц в схемах электронных и электромеханических стабилизаторов напряжения требует использования автотрансформаторов с относительно большими массогабаритными параметрами даже при малых мощностях номинальной нагрузки стабилизатора, что является недостатком. В тоже время известно, что получаемые при проектировании массогабаритные параметры трансформаторов и автотрансформаторов при одной и той же мощности нагрузки зависят в числе прочего от частоты рабочего напряжения: чем выше эта частота, тем меньше можно принимать при расчетах размеры магнитной системы, что напрямую сказывается на уменьшении массы конечного изделия.

Вследствие этого для снижения массогабаритных параметров стабилизаторов напряжения было выполнено некоторое усложнение электрической схемы, в результате чего к цепочке преобразований помимо воздействия на амплитуду исходного напряжения добавились также воздействия на его частоту, форму кривой и род — так были созданы инверторные стабилизаторы напряжения (стабилизаторы с двойным преобразованием). Характерной особенностью этих стабилизаторов (рис. 3) является то, что подаваемое на их вход переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц на самой первой стадии преобразований сначала выпрямляется и сглаживается посредством схемы на базе диодного моста и электролитического конденсатора [7], из-за чего исходная форма его кривой со всеми возможными гармоническими искажениями, актуальными для какой-либо конкретной электрической сети, полностью утрачивается. Это, с одной стороны, является положительным моментом, однако создает в дальнейшем проблему восстановления на выходе стабилизатора синусоидальной формы кривой напряжения с нормативным значением частоты колебаний.

Следует отметить, что электролитический сглаживающий конденсатор в описываемой схеме не только устраняет пульсации выпрямленного напряжения, но также выступает в качестве промежуточного накопителя электрической энергии, благодаря чему полностью исключается какое-либо влияние на параметры выходного напряжения возмущений амплитуды переменного синусоидального напряжения на входе стабилизатора, а также появляется возможность обеспечивать электроэнергией нагрузку в моменты кратковременного (до 1 с) пропадания входного питающего напряжения или его глубокого провала. Далее выпрямленное напряжение поступает на импульсный преобразователь постоянного напряжения, который выполняет необходимые процессы регулирования уровня напряжения для поддержания его на определенном строго заданном уровне. Затем стабилизированное напряжение поступает на особую электрическую схему, называемую инвертором. Он предназначен для преобразования данного постоянного напряжения в переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, т. е., по сути, происходит восстановле-

ние частоты и формы кривой исходного входного напряжения для того, чтобы выходное напряжение уже можно было подавать на электрические приборы и устройства, предназначенные в общем случае согласно данным их технических паспортов для работы от сети переменного тока.

Необходимо отметить, что не во всех случаях инвертор обеспечивает форму кривой выходного напряжения, которая практически близка к синусоидальной. Нередко на выходе инвертора напряжение может иметь либо форму прямоугольных импульсов разной полярности, либо форму ступенчатой синусоиды, при которой каждая полуволна представляется тремя, пятью или семью симметрично расположенными прямоугольными импульсами разной амплитуды и соответствующей полярности (средний импульс с наибольшей амплитудой и меньшие по амплитуде импульсы справа и слева от него) [8].

В этом случае к выходу такого инвертора нельзя подключать электрические нагрузки, которые требовательны к форме кривой питающего напряжения. К таким нагрузкам относятся: электродвигатели переменного тока (синхронные, асинхронные), силовые трансформаторы, предназначенные для работы в сетях с частотой напряжения 50 Гц, электромагнитные контакторы, реле, клапаны с обмоткой, рассчитанной на питание переменным током, а также все электротехнические установки и агрегаты, содержащие в своем составе перечисленные устройства и изделия. И даже если форма кривой напряжения близка к синусоидальной, то в ней так или иначе может наблюдаться целый спектр высших гармонических составляющих, амплитуда которых обычно минимальна только на холостом ходу инвертора и увеличивается с ростом нагрузки [9].

При практически синусоидальной форме выходного напряжения перечисленные установки и устройства подключать к выходу инвертора можно, однако магнитные поля токов от указанных выше гармонических составляющих выходного напряжения могут вызывать дополнительный нагрев магнитопроводов устройств, а в случае какого-либо нарушения в работе инверторной схемы на выходе возможно появление опасного для этих устройств постоянного напряжения, при котором индуктивная составляющая их полного сопротивления исчезает, из-за чего потребляемый ток резко возрастает (это особенно актуально для обмоток электромагнитных реле, контакторов и клапанов). В тоже время есть ряд устройств, для которых форма кривой переменного напряжения некритична. К ним, в частности, относятся импульсные блоки питания [10] и все электроприборы с их использованием, а также электронные драйверы светодиодных ламп, электронные пускорегулирующие аппараты (ПРА) люминесцентных ламп и все прочие электрические нагрузки с чисто активным характером полного сопротивления (лампы накаливания, электрообогреватели, электроплиты).

В настоящее время проводятся исследования по совершенствованию отдельных элементов и узлов инверторных стабилизаторов напряжения. Изучаются вопросы повышения устойчивости функционирования импульсных преобразователей постоянного напряжения [11], увеличения точности поддержания выходного напряжения инверторных схем при изменении характера и значения их нагрузки [12], улучшения формы кривой переменного напряжения на выходе инверторов за счет применения новых схем фильтров и алгоритмов управления полупроводниковыми ключами, разрабатываются более эффективные в плане снижения потерь в ключевых транзисторах схемные решения для импульсных преобразователей постоянного напряжения [9].

Концепция стабилизатора напряжения для импульсных блоков питания

Характерной и общей особенностью всех импульсных блоков питания, электронных драйверов и ПРА является то, что в их входных цепях установлены выпрямляющие схемы, которые преобразуют переменное сетевое напряжение в постоянное. Именно этим фактом объясняется нетребовательность перечисленных устройств к форме кривой переменного напряжения [10]. Также приведенное обстоятельство позволяет сделать очень важный вывод, а именно: на вход указанных устройств можно вместо переменного напряжения подавать постоянное напряжение, при этом режим работы последующих каскадов и узлов этих устройств никоим образом не изменится.

Следует отметить, что полученный вывод перекликается с результатами работы научного коллектива кафедры “Электроснабжение промышленных предприятий” Национального исследовательского университета “МЭИ”, в которых предложена концепция по использованию постоянного тока для систем электро-

снабжения жилищно-коммунального хозяйства [13, 14]. В частности, исследователями отмечаются следующие преимущества подобного технического решения. Система электроснабжения постоянного тока легко может быть объединена без каких-либо сложных устройств с накопителями электроэнергии различного типа (ионисторами, электрохимическими аккумуляторами, солнечными панелями), не создает электромагнитных помех в установившемся режиме работы и позволяет при переходе на нее с системы переменного тока уменьшить потери электрической энергии в элементах системы ориентировочно на 20 %. На основе проведенных исследований разработан проект системы светодиодного освещения на постоянном токе [15], создана лабораторная модель системы электроснабжения постоянного тока, включающая в себя основные и типичные для жилищно-коммунального хозяйства нагрузки, разработан специализированный источник бесперебойного питания для сетей постоянного тока на базе суперконденсаторов (ионисторов) [16].

Сформулированный выше вывод имеет определяющее значение для построения концепции стабилизатора напряжения, предназначенного для устройств с импульсными блоками питания и иных электронных приборов, обладающих схожей структурой входных каскадов, так как позволяет исключить инверторную схему и, следовательно, упростить в целом конструкцию стабилизатора напряжения, увеличить его надежность и время наработки на отказ, повысить коэффициент полезного действия за счет уменьшения потерь электроэнергии на нагрев силовых транзисторов инвертора.

Подобный стабилизатор напряжения (без инверторной схемы) в отличие от классических стабилизаторов, имеющих на выходе переменное синусоидальное напряжение, будет пригоден только для ограниченного набора видов электрических нагрузок, к которым помимо устройств с выпрямительными каскадами во входных цепях питания можно отнести все нагрузки с чисто активным характером полного сопротивления. Подключение к такому стабилизатору нагрузок с активно-индуктивным характером полного сопротивления, рассчитанных на питание переменным током, недопустимо. Указанное обстоятельство требует создания для данного стабилизатора дополнительного модуля (электрической схемы) с целью определения характера сопротивления подключаемой к его выходу нагрузки.

Принцип действия указанного модуля может базироваться на том, что характер изменения потребляемого нагрузкой тока в период переходного процесса после подачи на нее тестового прямоугольного импульса постоянного напряжения небольшой амплитуды будет значительно отличаться: у нагрузок с активным характером полного сопротивления или имеющих во входной цепи питания выпрямитель с емкостной нагрузкой в ответ на ступенчатый импульс напряжения будет резкий скачок тока, тогда как в случае активно-индуктивных нагрузок (трансформаторов, электродвигателей) будет наблюдаться плавный рост тестового тока по экспоненциальному закону. Модуль должен иметь в своем составе коммутационное устройство, которое будет подавать напряжение на выход стабилизатора, если характер нагрузки соответствует требованиям, и не допускать его подачу в противном случае.

Таким образом, в структуру предлагаемого стабилизатора напряжения для устройств с импульсными блоками питания должны входить нижеперечисленные узлы и модули: входной фильтр помех, выпрямительная схема, блок повышения напряжения, импульсный регулятор напряжения, выходной фильтр помех и контрольный модуль определения характера полного сопротивления нагрузки стабилизатора. Назначение этих узлов и модулей (кроме последнего, назначение которого было описано выше) следующее: входной фильтр помех предназначен для защиты схемы стабилизатора от воздействия высших гармонических составляющих сетевого напряжения; выпрямительная схема преобразует входное переменное напряжение в постоянное; блок повышения напряжения необходим для создания оперативного запаса, позволяющего выполнять регулирование напряжения при его снижении на входе стабилизатора ниже заданной нормы; импульсный регулятор напряжения производит непосредственно автоматическое поддержание напряжения на выходе стабилизатора на заданном уровне; выходной фильтр помех предназначен для обоюдной защиты стабилизатора и нагрузки от взаимного проникновения высокочастотных помех, порождаемых как функционированием нагрузки, так и работой импульсного регулятора напряжения стабилизатора.

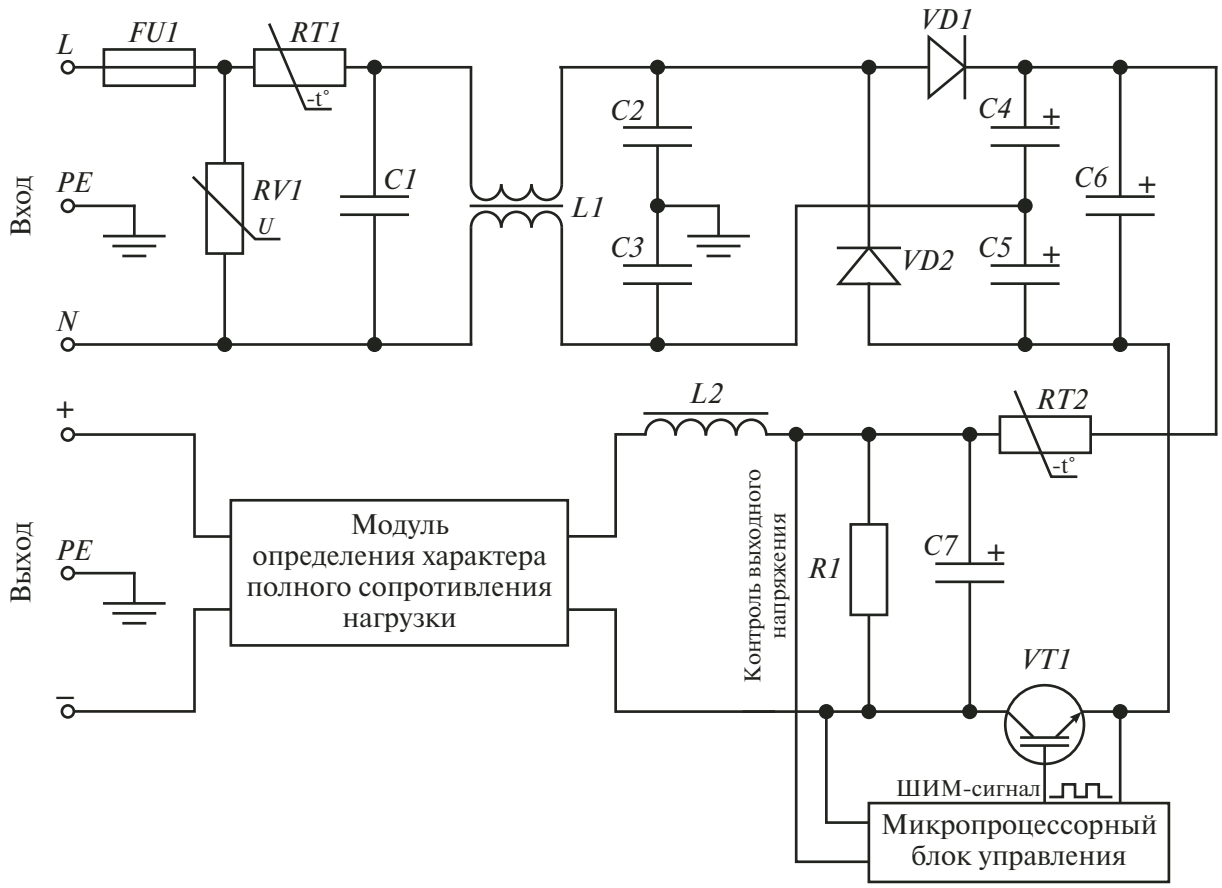


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения для устройств с импульсными блоками питания

Принцип действия предлагаемого стабилизатора напряжения

Согласно описанной выше структуре разработана принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения, которая показана на рис. 4.

Рассмотрим порядок ее функционирования. Переменное сетевое напряжение поступает на стандартную для большинства устройств питания и импульсных электронных схем цепь, содержащую предохранитель *FU1*, варистор *RV1*, термистор *RT1* и входной фильтр помех, состоящий из конденсаторов *C1*, *C2*, *C3* и дифференциального дросселя *L1*. Предохранитель *FU1* защищает сеть от повреждений внутри стабилизатора, которые могут сопровождаться перегрузками и короткими замыканиями, а также в ряде случаев способен защитить элементы самого стабилизатора от коротких замыканий и перегрузок на его выходе при отказе электронных защит (на схеме не показаны). Варистор *RV1* выполняет защиту от перенапряжений, а термистор *RT1* ограничивает в самый первый момент после включения стабилизатора в сеть бросок зарядного тока электролитических конденсаторов, расположенных в последующих каскадах.

Далее указанное напряжение поступает на выпрямитель, построенный на полупроводниковых диодах *VD1*, *VD2* и электролитических конденсаторах *C4*, *C5*, *C6* и выполненный по схеме удвоения напряжения, т. е. в данном случае блок повышения напряжения и выпрямительный блок совмещены в одной схеме. Конденсатор *C6* обеспечивает дополнительное сглаживание выпрямленного напряжения и является еще одним добавочным накопителем энергии.

На выходе выпрямителя при входном переменном напряжении с действующим значением 230 В получается постоянное напряжение около 651 В. Подобное решение позволяет гарантировать соответствие норме (ГОСТ 32144–2013 [17]) напряжения на выходе стабилизатора даже при снижении входного напряжения на 55 % номинального значения (что соответствует примерно 104 В).

Указанное выпрямленное и сглаженное напряжение поступает на импульсную преобразовательную схему, главными элементами которой являются *IGBT*-транзистор *VT1* и электролитический конденсатор *C7*. Принцип

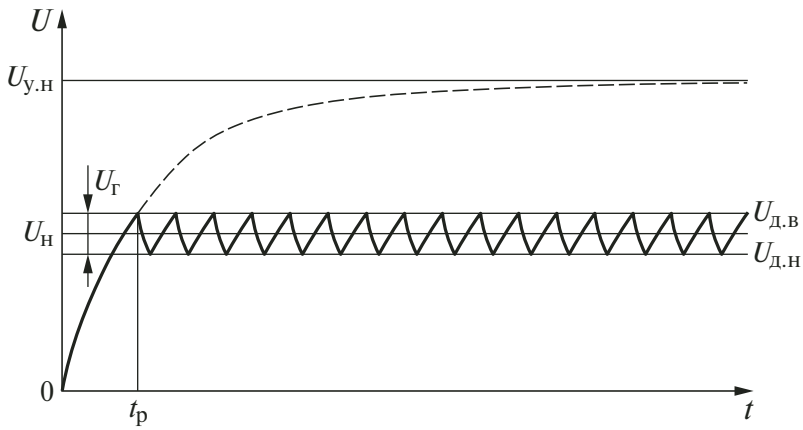


Рис. 5. Временна́я диаграмма напряжения на выходе стабилизатора:

$U_н$ — номинальный уровень напряжения на выходе стабилизатора (требуемый уровень), В; $U_{у.н}$ — уровень напряжения на выходе удвоителя напряжения, В; $U_{д.в}$ — допустимый верхний уровень напряжения на выходе стабилизатора, В; $U_{д.н}$ — допустимый нижний уровень напряжения на выходе стабилизатора, В; $U_г = (U_{д.в} - U_{д.н})$ — величина гистерезиса (показана в увеличенном размере для наглядности), В; $t_р$ — момент выхода стабилизатора на рабочий режим, с

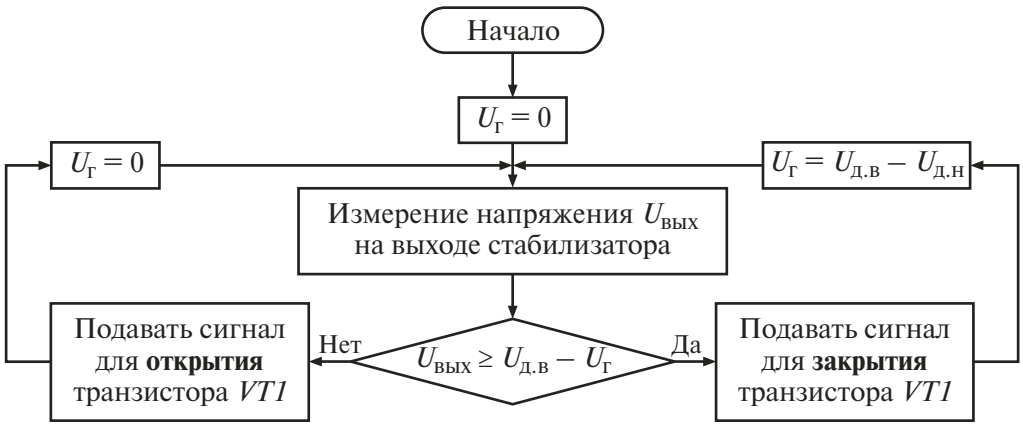


Рис. 6. Блок-схема алгоритма регулирования напряжения

ее действия заключается в следующем: транзистор *VT1* управляется подаваемым на его затвор сигналом с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), формирующимся микропроцессорным блоком управления; в самый первый момент после включения стабилизатора в сеть транзистор *VT1* открывается, в результате чего напряжение с выпрямительной схемы поступает на конденсатор *C7*, который начинает заряжаться по экспоненциальному закону (рис. 5). По мере заряда конденсатора *C7* зарядный ток уменьшается, а напряжение на его обкладках растет. В момент достижения заданного уровня напряжения на зажимах конденсатора *C7* с учетом небольшой добавки, обусловленной необходимостью введения гистерезиса (для исключения состояния неопределенности), транзистор *VT1* закрывается и начинается разряд конденсатора на нагрузку стабилизатора, по мере чего напряжение на его обкладках уменьшается по экспоненциальному закону. Разряд конденсатора происходит до тех пор, пока напряжение на его зажимах не станет меньше заданного уровня на величину гистерезисной добавки. Затем транзистор *VT1* снова открывается, происходит повторный заряд конденсатора и далее процессы повторяются по описанному порядку. Скважность ШИМ-сигнала будет изменяться в зависимости от значения нагрузки на выходе стабилизатора и сетевого напряжения на его входе.

Соответствующий описанным выше процессам алгоритм функционирования микропроцессорного блока управления рассматриваемого стабилизатора напряжения представлен на рис. 6.

Термистор *RT2* обеспечивает ограничение зарядного тока конденсатора *C7* в момент первого после включения стабилизатора в сеть открытия транзистора *VT1*: в холодном состоянии термистор имеет сопротивление в

несколько единиц или десятков Ом и достаточно способен ограничивать ток, а по мере прохождения по нему тока разогревается, в результате чего его сопротивление падает до десятых долей Ома и далее он уже практически не препятствует протеканию тока. Резистор *R1* создает минимальную нагрузку для стабилизатора на случай холостого хода, а также гарантирует разряд выходного конденсатора *C7* при отключении стабилизатора от сети. Дроссель *L2* сглаживает относительно небольшие пульсации тока нагрузки, обусловленные пульсациями напряжения после конденсатора *C7*.

Следует отметить, что при увеличении частоты ШИМ-сигнала, уменьшении значения гистерезисной добавки, повышении точности фиксации выходного напряжения микропроцессорным блоком управления можно свести пульсации выходного напряжения до пренебрежимо малых. Ввиду того, что напряжение на конденсаторе *C7* согласно второму закону коммутации не может измениться скачком, исключаются резкие колебания выходного напряжения при любых сколь угодно быстрых изменениях уровня входного сетевого напряжения. Что касается выбора значения напряжения на выходе стабилизатора, то для питания устройств с импульсными блоками питания целесообразно принять уровень в 325,3 В, так как именно такое напряжение получается уже внутри самих устройств при выпрямлении переменного сетевого напряжения, а для устройств с чисто активным характером полного сопротивления (нагревательные приборы) следует выбирать уровень в 230 В, чтобы тепловое действие этого постоянного напряжения было эквивалентно тому, которое получается от переменного синусоидального напряжения с действующим значением 230 В и амплитудным значением 325,3 В.

Выводы

1. В большинстве современных электронных устройств различного назначения используются импульсные блоки питания. Повышенное напряжение может привести к выходу их из строя, а пониженное провоцирует возникновение тяжелого теплового режима, потенциально опасного повреждением отдельных полупроводниковых элементов при неблагоприятных условиях окружающей среды.

2. Схемотехника входных каскадов импульсных блоков питания позволяет подавать на них как переменное синусоидальное напряжение, так и постоянное, причем режим функционирования получающих от них электропитание устройств никоим образом не изменяется.

3. При разработке стабилизаторов напряжения для устройств с импульсными блоками питания можно исключить из их состава выходную инверторную схему, что позволит повысить КПД и надежность данных стабилизаторов.

4. В качестве номинального выходного уровня напряжения стабилизатора следует выбирать 325,3 В, а для защиты от ошибочного подключения к подобному стабилизатору нагрузки с активно-индуктивным характером полного сопротивления нужно предусмотреть контрольный модуль, который перед подачей питающего напряжения на выход будет предварительно определять характер сопротивления нагрузки стабилизатора.

Список литературы

1. **Switched Mode Power Supplies** [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https: //www.sciencedirect.com/topics/engineering/switched-mode-power-supplies. — Дата доступа: 21.02.2021.
2. **Эргашев, К. Р. У. Импульсный источник питания для светодиодных осветителей** / К. Р. У. Эргашев, А. А. У. Абдуллаев // Universum: технические науки. — 2020. — № 12 – 5 (81). — С. 14 – 16.
3. **Хоровиц, П. Искусство схемотехники** / П. Хоровиц, У. Хилл. — М.: Мир, 2009. — 704 с.
4. **Белоус, А. И. Основы силовой электроники** / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. А. Ефименко, В. А. Пилипенко. — М.: Техносфера, 2019. — 424 с.
5. **Егоров, М. Ю. Обоснование оптимального стабилизатора напряжения для широкого спектра применений** / М. Ю. Егоров // Промышленная энергетика. — 2017. — № 2. — С. 48 – 50.
6. **Коблев, Б. А. Стабилизаторы напряжения переменного тока** / Б. А. Коблев, Н. Н. Курзин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2017. — № 130. — С. 469 – 479.
7. **Раймонд, М. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению** / М. Раймонд. — М.: Додека XXI век, 2019. — 272 с.
8. **Онищенко, Г. Б. Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения** / Г. Б. Онищенко, О. М. Соснин. — М.: ИНФРА-М, 2018. — 122 с.
9. **Пустоветов, М. Ю. Компьютерное моделирование системы электроснабжения, содержащей преобразователь частоты и синус-фильтр.** В кн.: Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения, Махачкала, 25 – 26 декабря 2019 года: материалы V Всероссийской научно-технической конференции / М. Ю. Пустоветов. — Махачкала: Информационно-Полиграфический Центр ДГТУ, 2019. — С. 178 – 183.

10. **Юрков, Н. К. Особенности, устройство и принцип работы импульсных источников (блоков) питания** / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Современные информационные технологии. — 2019. — № 30. — С. 132 – 137.
11. **Коршунов, А. И. Два подхода к анализу устойчивости стабилизаторов напряжения постоянного тока с переменной структурой силовой части** / А. И. Коршунов // Практическая силовая электроника. — 2017. — № 2 (66). — С. 12 – 19.
12. **Regulation of the Output Voltage of an Inverter in Case of Load Variation** [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https: //www.researchgate.net/publication/325172532_Regulation_of_the_Output_Voltage_of_an_Inverter_in_Case_of_Load_Variation — Дата доступа: 21.02.2021.
13. **Цырук, С. А. О целесообразности перевода систем электроснабжения объектов ЖКХ на питание постоянным током.** В кн.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов, Тольятти, 12 – 14 апреля 2016 года: сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов / С. А. Цырук, К. О. Князев, Д. А. Кривошта. — Тольятти: Издательство Тольяттинского государственного университета, 2016. — С. 263 – 266.
14. **Цырук, С. А. Система электроснабжения объектов ЖКХ на постоянном токе.** В кн.: Научный потенциал вуза — производству и образованию, Армавир, 01 – 02 декабря 2017 года: сборник статей по материалам XIII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского государственного технологического университета / С. А. Цырук, С. А. Янченко, М. А. Слепцов. — Армавир: Издательство Армавирского государственного педагогического университета, 2018. — С. 45 – 48.
15. **Цырук, С. А. Энергосберегающие источники света и инновационный подход к построению систем искусственного освещения объектов ЖКХ.** В кн.: Наука. Технология. Производство — 2019: Моделирование и автоматизация технологических процессов и производств, энергообеспечение промышленных предприятий, Салават, 10 – 12 сентября 2019 года: Материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию образования Республики Башкортостан / С. А. Цырук, И. Д. Лисицын. — Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019. — С. 196 – 202.
16. **Цырук, С. А. Источник бесперебойного питания на базе суперконденсаторов для электрических сетей постоянного тока** / С. А. Цырук, В. В. Фомин, Е. Н. Рыжкова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — № 22. — С. 102 – 114.
17. **ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.** — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.

References

1. **Switched Mode Power Supplies**, [Electronic resource]. — URL: https: //www.sciencedirect.com/topics/engineering/switched-mode-power-supplies (accessed 21.02.2021).
2. **Ergashev K. R. U., Abdullaev A. A. U. Universum: tekhnicheskie nauki** (Universum: technical sciences), 2020, No. 12 – 5 (81), pp. 14 – 16.
3. **Horowitz P., Hill W. Iskusstvo skhemotekhniki** (The art of circuitry), Moscow, Mir, 2009, 704 p.
4. **Belous A. I., Solodukha V. A., Efimenko S. A., Pilipenko V. A. Osnovy silovoi elektroniki** (Fundamentals of power electronics), Moscow, Technosphere, 2019, 424 p.
5. **Egorov M. Yu. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2017, No. 2, pp. 48 – 50.
6. **Koblev B. A., Kurzin N. N. Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta** (Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University), 2017, No. 130, pp. 469 – 479.
7. **Raymond M. Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu** (Switching power supplies. Theoretical foundations of design and guidelines for practical application). Moscow, Dodeka XXI century, 2019, 272 p.
8. **Onishchenko G. B., Sosnin O. M. Silovaya elektronika. Silovye poluprovodnikovye preobrazovateli dlya elektroprivoda i elektrosnabzheniya** (Power electronics. Power semiconductor converters for electric drive and power supply), Moscow, INFRA-M, 2018, 122 p.
9. **Pustovetov M. Yu. Sovremennye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniya, Makhachkala, 25 – 26 dekabrya 2019 goda, Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii** (Modern problems of the electric power industry and ways to solve them, Makhachkala, December 25 – 26, 2019, Materials of the V All-Russian scientific and technical conference), Makhachkala, Information and Printing Center of DSTU, 2019, pp. 178 – 183.
10. **Yurkov N. K., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. Sovremennye informatsionnye tekhnologii** (Modern Information Technologies), 2019, No. 30, pp. 132 – 137.
11. **Korshunov A. I. Prakticheskaya silovaya elektronika** (Practical power electronics), 2017, No. 2 (66), pp. 12 – 19.
12. **Regulation of the Output Voltage of an Inverter in Case of Load Variation**, [Electronic resource]. — URL: https: //www.researchgate.net/publication/325172532_Regulation_of_the_Output_Voltage_of_an_Inverter_in_Case_of_Load_Variation (accessed 21.02.2021).
13. **Tsyruk S. A., Knyazev K. O., Krivoshta D. A. Energoeffektivnost' i energobezopasnost' proizvodstvennykh protsessov, Tol'yatti, 12 – 14 aprelya 2016 goda, Sbornik trudov IV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov** (Energy efficiency and energy security of production processes, Togliatti, April 12 – 14, 2016, Collection of works of the IV All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students), Togliatti, Publ. Togliatti State University, 2016, pp. 263 – 266.
14. **Tsyruk S. A., Yanchenko S. A., Sleptsov M. A. Nauchnyi potentsial vuza — proizvodstvu i obrazovaniyu, Armavir, 01 – 02 dekabrya 2017 goda, Sbornik statei po materialam XIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi**

100-letiyu Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta (Scientific potential of the university — production and education, Armavir, December 01 – 02, 2017, Collection of articles based on the materials of the XIII All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Kuban State Technological University), Armavir, Publ. Armavir State Pedagogical University, 2018, pp. 45 – 48.

15. **Tsyruk S. A., Lisitsyn I. D. Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo — 2019: Modelirovanie i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv, energoobespechenie promyshlennykh predpriyatii, Salavat, 10 – 12 sentyabrya 2019 goda: Materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu obrazovaniya Respubliki Bashkortostan** (Science. Technology. Production — 2019: Modeling and automation of technological processes and production, power supply of industrial enterprises, Salavat, September 10 – 12, 2019, Materials of the All-Russian scientific and methodological conference dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Republic of Bashkortostan), Ufa, Ufa State Petroleum Technical University, 2019, pp. 196 – 202.
16. **Tsyruk S. A., Fomin V. V., Ryzhkova E. N. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya** (International scientific journal Alternative energy and ecology), 2015, No. 22, pp. 102 – 114.
17. **GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya, 2014-07-01** (State Standard 32144 – 2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, 2014-07-01), Moscow, Standartinform, 2014, 16 p.

egorov.maksim@internet.ru

Voltage regulator concept for devices with static power supply units

Egorov M. Yu.

A concept of a voltage stabilizer for widespread devices with static power supply units is proposed. It has been substantiated that due to a special schematic electrical scheme of the front end of the power supply of these devices, they can be switched on both to alternating and direct voltage, while the mode of operation of the subsequent cascade will not change. A block diagram of the voltage stabilizer has been developed, from which the DC voltage inverter unit (inverter) is excluded. A schematic diagram of the voltage stabilizer is proposed and the procedure of functioning and interaction of the individual elements is described in detail.

Keywords: quality of electricity, voltage deviation, voltage stabilizer, static power supply unit, inverter.

DOI 10.34831/EP.2021.71.99.005

Режимы работы белых и красных зеркальных инфракрасных излучателей при питании током сложной формы

Птицына Е. В., доктор техн. наук, Птицын Д. В., ассистент
Омский государственный технический университет

Кувалдин А. Б., канд. техн. наук
НИУ "МЭИ", Москва

Повысить энергоэффективность установок с зеркальными инфракрасными излучателями можно при совершенствовании электрического режима — при питании током сложной формы. Рассмотрены теоретические предпосылки применения токов сложной формы (ТСФ), качественно оценен диапазон эффективно воздействующих частот на процессы в инфракрасных излучателях. Выполнен анализ индивидуальных характеристик установок при питании ТСФ и спектров пропускания обрабатываемых изделий. Доказана целесообразность регулирования формы и амплитуды питающего напряжения (тока) для красных и белых зеркальных инфракрасных излучателей и обрабатываемых изделий. Результаты исследований позволяют сформулировать рекомендации по выбору эффективных режимов, необходимых для разработки системы автоматического управления технологической нагрузкой.

Ключевые слова: установки с белыми и красными зеркальными инфракрасными излучателями, ток сложной формы, энергоэффективный режим.

Электротехнологические установки с инфракрасными излучателями находят применение в промышленности и сельском хозяйстве, в частности, для термообработки сварных швов, пайки металлических изделий, изготовления стекла, термоформования пластмасс, сушки различных материалов (древесины, текстиля, бумаги и др.) и лакокрасочных покрытий, дезинсекции зерновых культур, а также в медицине (физиотерапия), быту (для нагрева, кипячения и поддержки температуры пищи) и локального обогрева людей и животных в помещениях и на открытом пространстве [1 – 4].

По результатам обзора литературы установлено, что интенсивность излучения повышается и спектр частот изменяется при протекании через излучающий элемент переменного тока высокой частоты за счет силового воздействия электромагнитного поля на заряженные частицы (электроны и ионы) материала. Например, в работе [5] установлено влияние частоты тока на излучение дугового газового разряда. В работах [6, 7] доказано повышение КПД индукционных ультрафиолетовых ламп в зависимости от рабочей частоты и других параметров. В [8] установлено влияние волновых процессов разного рода на поведение заряженных частиц, при этом основным параметром волнового процесса является частота. В [9] исследованы процессы в безэлектродных высокочастотных источниках излучения и показано, что при изменении частоты возбуждения индукционного разряда спектр излучения (длины волн) сдвигается от 320 – 650 нм до 430 – 800 нм.

В работах авторов данной статьи приведены результаты экспериментальных исследований по применению тока сложной формы (ТСФ) для питания установок с оптическими излучателями, работающими в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Показаны повышение энергетической эффективности установок с темными и светлыми излучателями по сравнению с питанием током промышленной частоты и возможность управления гармоническим составом излучения [10 – 12].

Энергоэффективность установок с инфракрасными излучателями зависит также от оптических свойств нагреваемых изделий, которые уже изучены и приводятся в справочниках. Однако в литературе отсутствует информация о методиках исследования поглощающей способности обрабатываемых изделий в функции электрических режимов работы установок с излучателями [13, 14].

В данной работе объектом исследования являются режимы работы установок с белыми и красными зеркальными инфракрасными излучателями (далее — белые и красные излучатели) и двумя различными типами обрабатываемых изделий при питании ТСФ.

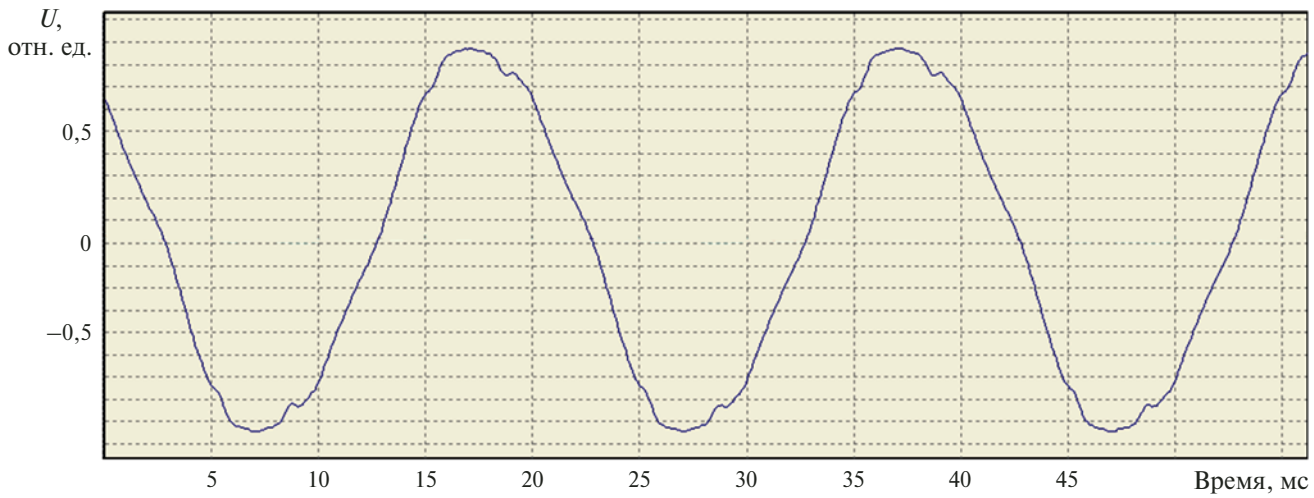


Рис. 1. Форма кривой напряжения при минимальном токе подмагничивания дросселя

Целью исследований является определение характеристик установок с белыми и красными излучателями и характеристик обрабатываемых изделий при использовании ТСФ (изменении гармонического состава питающего напряжения) для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы и систем автоматического управления такими установками.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

разработка методики исследований на физических моделях установок с белыми и красными излучателями при различных электрических режимах;

определение эффективности режимов работы излучателей по результатам исследований энергетических показателей и спектров излучения;

разработка методики исследований оптических характеристик обрабатываемых изделий с использованием физических моделей установок с белыми и красными излучателями при различных электрических режимах.

Для оценки энергетической эффективности установок использовались значения коэффициента мощности установки и индивидуальные значения коэффициента мощности излучателя.

Экспериментальные исследования

Представленные в работе исследования выполнены для двух электрических режимов: обычного режима с питанием током частотой 50 Гц и нового режима с питанием ТСФ без постоянной составляющей. В обычном режиме питание нагрузки осуществлялось от однофазного трансформатора 220/110 В с переключением ступеней напряжения без возбуждения $A\text{-}X_1$, $A\text{-}X_3$. В новом режиме питание реализовано через однофазный трансформатор и дроссель, работающий в режиме насыщения и использованный для регулирования формы кривой, т. е. гармонического состава питающего напряжения (тока). Он позволяет изменять спектр тока (напряжения) с содержанием четных и нечетных гармонических составляющих с частотами $10^2 \div 10^3$ Гц [12]. Форма кривой напряжения при минимальном подмагничивании дросселя насыщения показана на рис. 1.

Эксперименты выполнены на физических моделях установок с белым и красным излучателями (колба R127, цоколь E27, мощность — 250 Вт, диаметр колбы — 130 мм, высота колбы — 195 мм):

1) типа ИКЗ 220-250 R127 E27;

2) типа ИКЗК 220-250 R127 E27.

В качестве обрабатываемых изделий (поверхностей) выбраны прозрачные изделия, позволяющие по спектральным характеристикам количественно оценить энергетические параметры (радиационные, колориметрические) при распространении электромагнитной волны от излучателя:

1) изделие типа 1 — плоская поверхность 250 × 250 мм (матовая) ТУ 5921-002-96646333-2007;

2) изделие типа 2 — плоская поверхность 250 × 250 мм (матовая) ТУ 5921-002-09438560-2014 (производитель — ООО “Мир зеркал”, 603163, г. Н. Новгород, Казанское ш., д. 5).

Используемые приборы: оптоволоконный спектрометр типа AvaSpec-ULS 2048-USB2, в комплекте — программное обеспечение AvaSoft-ALL [10]; и для измерения электри-

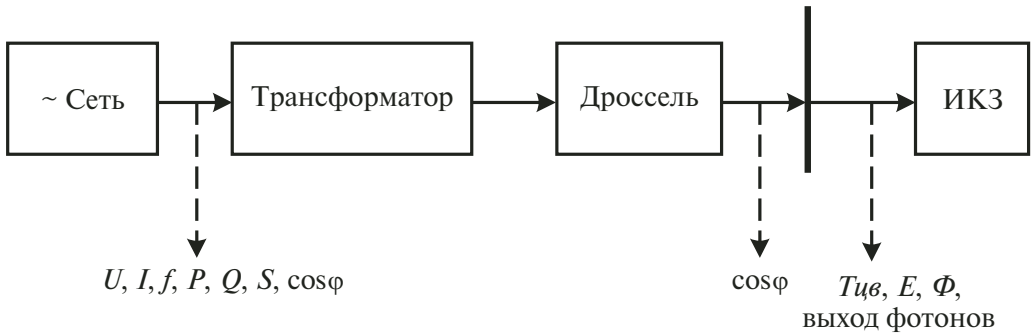


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки с белым и красным излучателями

ческих параметров — анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060.

Функциональная схема лабораторной установки для проведения экспериментов в обычном (ток 50 Гц) и новом (с питанием ТСФ) режимах представлена на рис. 2. В обычном режиме дроссель насыщения из схемы исключали.

В работе выполнены две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов включала исследования спектров излучения, а также энергетических и технологических характеристик на физической модели установок с белым и красным излучателями при различных электрических режимах (обычном — ток 50 Гц и новом — ТСФ), представленных в табл. 1 – 4.

Из табл. 1 видно, что эффективность установки с белым излучателем при питании ТСФ возросла: коэффициент мощности увеличился с 0,72 до 0,95. Индивидуальные показатели работы были одинаковыми в сравниваемых режимах, а индивидуальное значение коэффициента мощности белого излучателя составило 0,986 (табл. 2).

Согласно данным табл. 3 эффективность установки с красным излучателем возросла при питании ТСФ: коэффициент мощности увеличился с 0,670 до 0,967. Индивидуальное значение коэффициента мощности красного излучателя в сравниваемых режимах одинаково и составило 0,990 (табл. 4).

Спектры излучения для установки с красным излучателем при работе в обычном и новом режимах приведены на рис. 3 и рис. 4.

В спектрах показан характер изменения интенсивности излучения, *I*, отн. ед. от длины волны, нм. На основе спектров излучения получены цветовые диаграммы для сравниваемых режимов и колориметрические параметры, а также исследованы фотометрические и радиометрические параметры излучателей и обрабатываемых изделий.

Анализ спектров излучения показал, что при регулировании частоты интенсивность

Таблица 1

Электрические режимы работы установки с белым излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			cos φ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ · А		
Обычный	0,0975	0,0938	0,1350	0,72	115
Новый	0,096	0,031	0,1010	0,95	115

Таблица 2

Индивидуальные показатели работы установки с белым излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			cos φ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ · А		
Обычный Новый	0,082	0,011	0,0836	0,986	115

Таблица 3

Электрические режимы работы установки с красным излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			cos φ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ · А		
Обычный	0,105	0,116	0,156	0,670	115
Новый	0,101	0,026	0,1044	0,967	115

Таблица 4

Индивидуальные показатели работы установки с красным излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			cos φ	*U* в узле питания, В
	P, кВт	*Q*, квар	*S*, кВ · А		
Обычный Новый	0,086	0,0122	0,0868	0,990	115

сплошного спектра излучения изменялась для белого и красного излучателей. Так, максимум интенсивности сплошного спектра излучения для белого излучателя наблюдался при длине волны 700 нм, а красного — при 720 нм.

На основе спектров излучения для белого и красного излучателей по цветовым диаграммам исследовали изменение фотометрических параметров (светового потока *Ф*, лм; освещенности *E*, лк), радиометрических параметров (выхода фотонов, μMol, плотности потока электромагнитного излучения, мкВт/см^2 и др.) и колориметрических параметров (цветовой температуры $T_ц$, К).

Для установки с белым излучателем при цветовой температуре $T_ц = 2021{,}0$ К световой поток и освещенность в обычном режиме составили 176,9 лм и 14,077 лк, а в новом режиме — 287,8 лм и 22,9 лк. Выход фотонов с поверхности диффузора в сравниваемых режимах был равен $3{,}766\ e^{-5}$ и $5{,}960\ e^{-5}$ μMol.

Для установки с красным излучателем при цветовой температуре $T_ц = 2797{,}0$ К световой поток и освещенность в обычном режиме составили 995,0 лм и 79,225 лк. Максимум интенсивности наблюдался при 720 нм и в обычном режиме составил 38 000 отн. ед. Выход фотонов с поверхности диффузора в обычном режиме был равен $1{,}111\ e^{-3}$. В новом режиме при регулировании спектра интенсивность излучения в красном излучателе возросла до 50 000 отн. ед. при 720 нм, цвето-

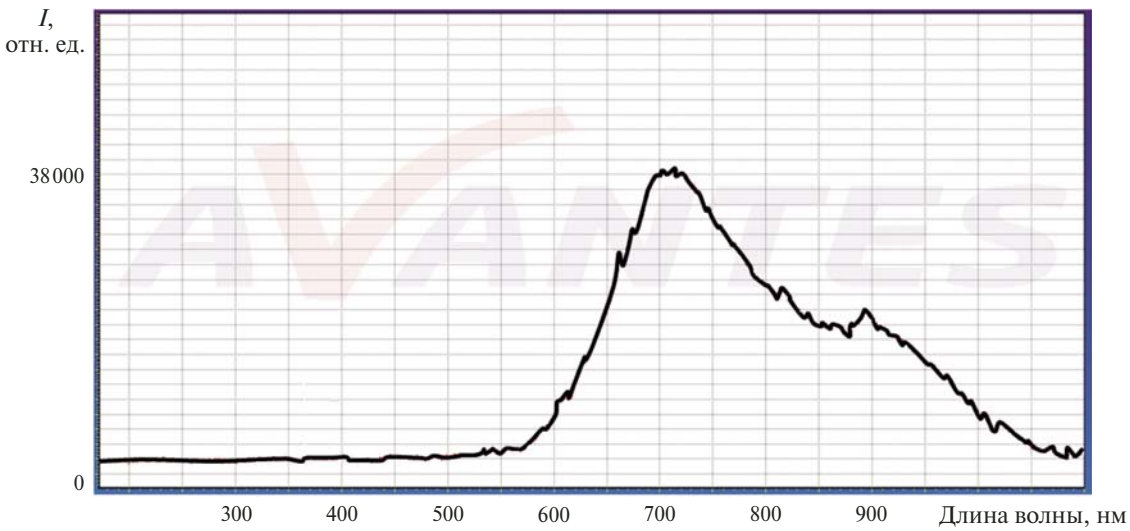


Рис. 3. Спектр излучения красного излучателя в обычном режиме: интенсивность излучения на длине волны 720 нм равна 38 000 отн. ед.; интенсивность излучения спектра — 1924,3 мкВт/см^2, мощность излучения — 229,87 мкВт

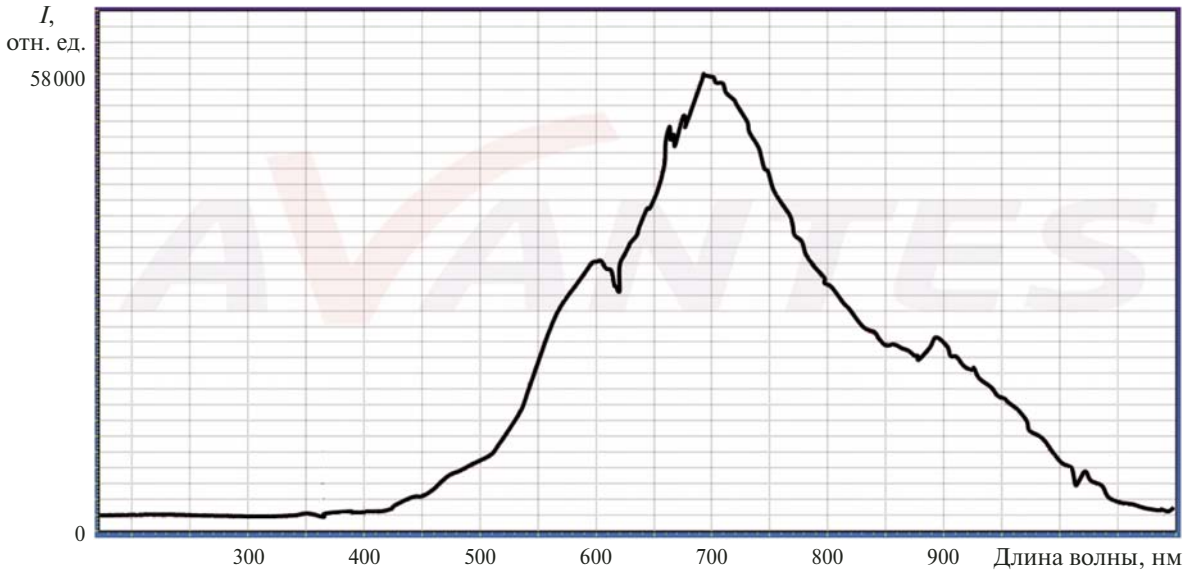


Рис. 4. Спектр излучения красного излучателя в новом режиме: увеличение излучения на длине волны 720 нм до 58 000 отн. ед.; интенсивность излучения спектра — 2803,7 мкВт/см^2, мощность излучения — 334,92 мкВт

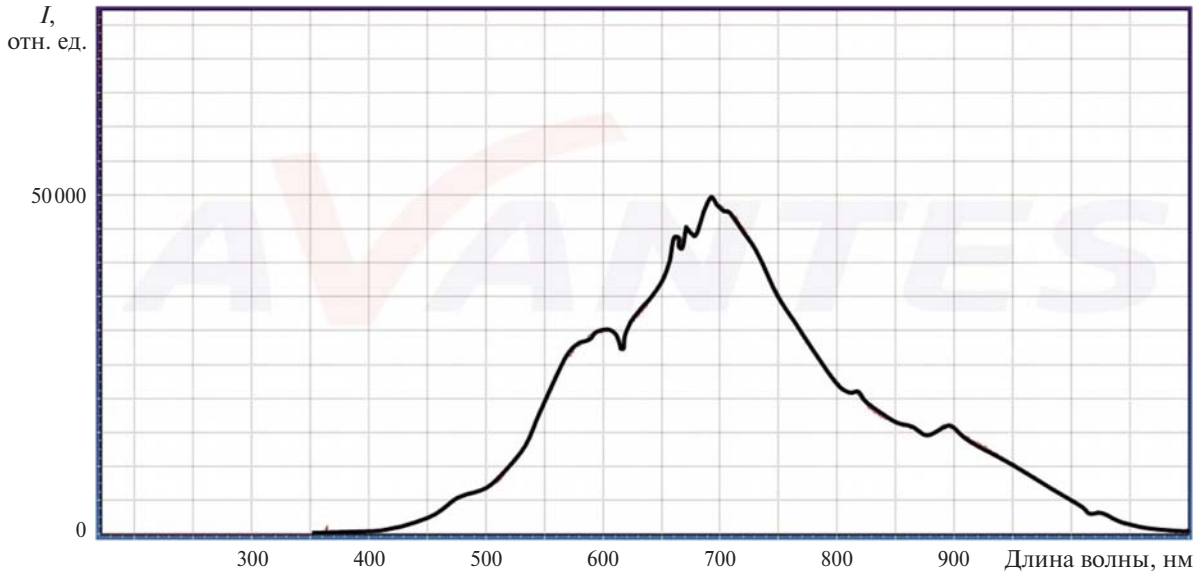


Рис. 5. Спектр пропускания обрабатываемого изделия типа 1 при питании установки с белым излучателем ТСФ

вая температура $T_ц = 2677{,}0$ K, световой поток и освещенность были равны 1259,5 лм и 100,0 лк. Выход фотонов с поверхности диффузора составил 1,281 e^{-3} μMol. Дальнейшее регулирование спектра увеличило интенсивность излучения до 58 000 отн. ед. при 720 нм, цветовая температура составила $T_ц = 2585{,}0$ K, световой поток и освещенность были равны 1733,9 лм и 137,0 лк. Выход фотонов с поверхности диффузора был равен 1,455 e^{-3} μMol.

Вторая серия экспериментов включала исследования спектров пропускания обрабатываемых изделий с плоскими матовыми поверхностями типа 1 и типа 2 при различных электрических режимах работы установки с белым и красным излучателями. Установлено, что при этом интенсивность спектров пропускания для исследуемых типов изделий 1 и 2 различна.

В качестве примера на рис. 5 и рис. 6 приведены спектры пропускания изделий типа 1 и типа 2 для белого излучателя при работе в новом режиме (ТСФ).

Для исследуемых типов изделий максимальная интенсивность в спектре при длине волны 700 нм соответственно составила 50 000 и 45 000 отн. ед. в новом режиме при использовании белого излучателя с питанием ТСФ.

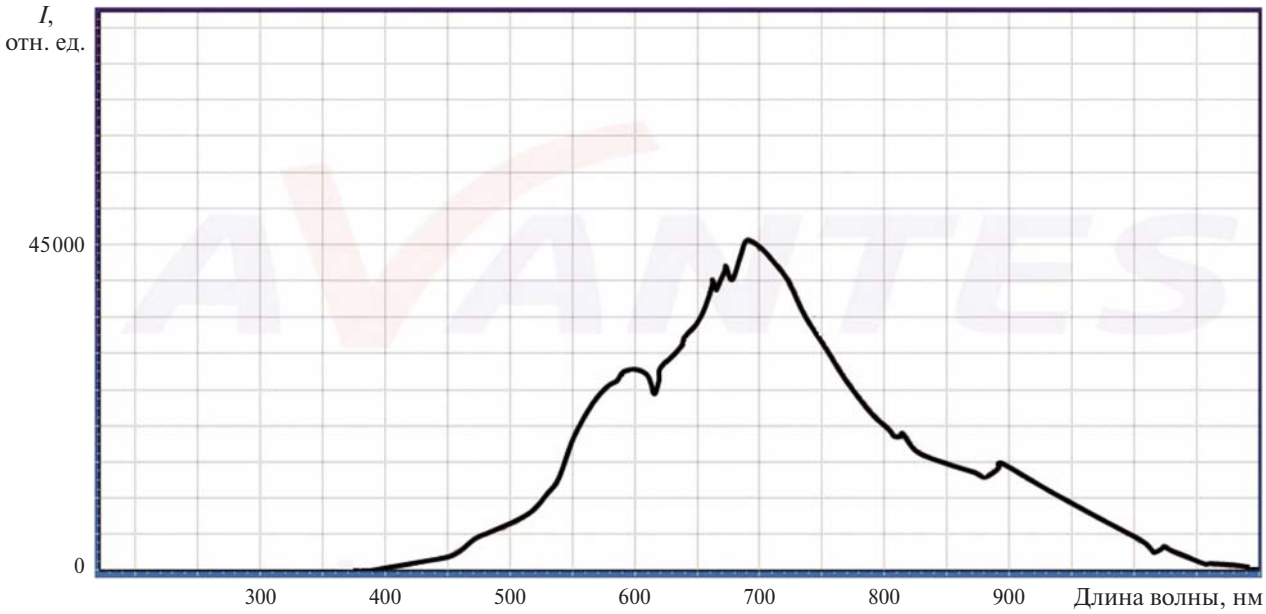


Рис. 6. Спектр пропускания обрабатываемого изделия типа 2 при питании установки с белым излучателем ТСФ

Однако если сравнивать работу в обычном и новом режимах, то интенсивность в спектре при длине волны 700 нм не изменялась и составила для изделия типа 1 — 50 000 отн. ед., а для изделия типа 2 — 45 000 отн. ед.

Таким образом, для обеспечения требуемых технологических и энергетических показателей работы установки и обрабатываемых изделий необходимо регулировать частоту и амплитуду питающего напряжения (тока) переключением ступени без возбуждения (ПБВ) силового трансформатора на более низкую (или РПН). Экспериментально установлено, что при переключении ступеней ПБВ (или РПН) трансформатора и снижении индуктивности его обмоток значение коэффициента мощности в сети установки возрастает (см. табл. 1, 3).

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями доказано, что применение тока сложной формы для питания установок с белым и красным зеркальными инфракрасными излучателями позволяет получить положительные электрические и технологические эффекты. За счет регулирования спектра питающего напряжения (тока) можно изменять значение интенсивности и частотную характеристику излучения для излучателей со сплошным спектром.

2. Проведена оценка влияния режима работы излучателя на оптические характеристики двух типов обрабатываемых изделий.

3. Установлено, что для достижения заданных технологических параметров возможна работа установок с красным и белым зеркальными излучателями на более низкой ступени ПБВ (РПН) силового трансформатора при использовании дросселя насыщения для регулирования формы кривой питающего напряжения (тока). При этом повышаются (или сохраняются) значения коэффициента мощности установки в сети и индивидуальных коэффициентов мощности излучателей.

Список литературы

1. **Волф, У. Справочник по инфракрасной технике.** В 4-х томах / У. Волф, Г. Цисис. — М.: Мир. 1995 – 1999.
2. http: //www.cniitmash.ru — Оффициальный сайт АО “НПО ЦНИИТМмаш” (Дата обращения 15.05.2020 г.)
3. **Wang, D. Medium pressure UV combined with chlorine advanced oxidation for trichloroethylene destruction in a model water** / D. Wang, James R. Bolton, R. Hofmann // Water Research. 2012. Vol. 46. P. 4677.
4. **Sampathkumar, P. A trial of pulsed xenon ultraviolet disinfection to reduce Clostridioides difficile infection** / P. Sampathkumar, C. Folkert, J. E. Barth, L. Nation, M. Benz, A. Hesse, C. L. Mielke, K. W. Zareleta // American Journal of Infection Control (AJIC). 2019. Vol. 47. P. 406 – 408.
5. **Финкельбург, В. Электрические дуги и термическая плазма** [Текст] / В. Филькенбург, Г. Меккер. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
6. **Popov, O. A. Ferrite — Free high power electrodeless fluorescent lamp operated at a freguency of**

160-L000 kHz / O. A. Popov, R. T. Chandler // Plasma Sources Science and Technology. 2002. Vol. 11. P. 218 – 227.
7. **Svitnev, S. A. Plasma parameters spatial distribution of low pressure ferrite-free inductive discharge** / S. A. Svitnev, O. A. Popov // Light and Engineering 2011. — 1. — P. 79 – 82.
8. **Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны** / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков — М.: Наука, 1994.
9. **Ирхин И. В. Разработка безэлектродных высокочастотных источников излучения на основе серных ламп:** автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.27.02 / Рязанский гос. радиотехн. ун-т. — Рязань, 2017. — 19 с.
10. **Ptitsyna, E. Improving efficiency of light and dark infrared radiators and low pressure gas discharge radiators with complex waveform current supply** / E. Ptitsyna, A. Kuvaldin, D. Ptitsyn // International Conference on Heating by Electromagnetic Sources. Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Elecromagnetic Processing. — Padua: Italy, 2016. — P. 475 – 482.
11. **Ptitsyna, E. Процессы в темных излучателях при питании током сложной формы** / E. Ptitsyna, A. Kuvaldin, D. Ptitsyn // Electrotechnologies for material processing: XVIII International UIE-Conqress. — Hannover (Germany), June 6 – 9, 2017. — P. 497 – 502.
12. **Птицына, Е. В. Исследование режимов работы установок с темными и светлыми излучателями при питании током сложной формы** / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин // Промышленная энергетика. — 2019. — № 12. — С. 50 – 56.
13. **http: www.avantes.ru** — официальный сайт ООО “ЛОКАМЕД” официального дистрибьютера голландского холдинга AVANTES B.V. в России (Дата последнего обращения 10.08.19 г.)
14. **Кириченко, Н. А. Принципы оптики** / Н. А. Кириченко. — М.: МФТИ, 2016.

References

1. **Wolf W., Cisis G. Spravochnik po infrakrasnoi tekhnike** (Handbook of infrared technology), Moscow, Mir, 1995 – 1999.
2. **Offitsial’nyi sait AO “NPO TsNIITMmash”** (Official site of AO “NPO TsNIITMmash”), [Electronic resource]. — URL: http: // www.cniitmash.ru (accessed 15.05.2020).
3. **Wang D., Bolton James R., Hofmann R. Medium pressure UV combined with chlorine advanced oxidation for trichloroethylene destruction in a model water** // Water Research, 2012, Vol. 46, p. 4677.
4. **Sampathkumar P., Folkert C., Barth J. E., Nation L., Benz M., Hesse A., Mielke C. L., Zareleta K. W. A trial of pulsed xenon ultraviolet disinfection to reduce Clostridioides difficile infection**, American Journal of Infection Control (AJIC), 2019, Vol. 47, pp. 406 – 408.
5. **Finkelburg V., Mecker G. Elektricheskie dugi i termicheskaya plazma** (Electric arcs and thermal plasma), Moscow, Publ. Foreign literature, 1961.
6. **Popov O. A., Chandler R. T. Ferrite — Free high power electrodeless fluorescent lamp operated at a freguency of 160 – L000 kHz**, Plasma Sources Science and Technology, 2002, Vol. 11, pp. 218 – 227.
7. **Svitnev S. A., Popov O. A. Plasma parameters spatial distribution of low pressure ferrite-free inductive discharge**, Light and Engineering, 2011, No. 1, pp. 79 – 82.
8. **Gurevich A. G., Melkov G. A. Magnitnye kolebaniya i volny** (Magnetic oscillations and waves), Moscow, Nauka, 1994.
9. **Irkhin I. V. Razrabotka bezelektrodnykh vysokochastotnykh istochnikov izlucheniya na osnove sernykh lamp** (Development of electrodeless high-frequency radiation sources based on sulfur lamps), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., 05.27.02, Ryazan State radio engineering university, Ryazan, 2017, 19 p.
10. **Ptitsyna E., Kuvaldin A., Ptitsyn D. Improving efficiency of light and dark infrared radiators and low pressure gas discharge radiators with complex waveform current supply**, International Conference on Heating by Electromagnetic Sources. Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Elecromagnetic Processing, Padua, Italy, 2016, pp. 475 – 482.
11. **Ptitsyna E., Kuvaldin A., Ptitsyn D. Processes in dark emitters when fed with a current of complex shape**, Electrotechnologies for material processing XVIII International UIE-Conqress, Hannover (Germany), June 6 – 9, 2017, pp. 497 – 502.
12. **Ptitsyna E. V., Ptitsyn D. V., Kuvaldin A. B. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2019, No. 12, pp. 50 – 56.
13. **Ofitsial’nyi sait OOO “LOKAMED” ofitsial’nogo distrib’yutera gollandskogo kholdinga AVANTES B.V. v Rossii** (The official website of LOCAMED LLC, the official distributor of the Dutch holding AVANTES B. V. in Russia), [Electronic resource]. — URL: http: www.avantes.ru (accessed 10.08.2019).
14. **Kirichenko N. A. Printsipy optiki** (Principles of optics), Moscow, MFTI, 2016.

evptitsyna@yandex.ru

Modes of operation of white and red mirror infrared emitters when powered by a current of complex shape

Ptitsyna E. V., Ptitsyn D. V., Kuvaldin A. B.

The energy efficiency of the units with mirror infrared emitters can be increased by improving the electrical regime, i.e., when powered by a current of a complex shape. The theoretical prerequisites for using complex shaped currents (CSC) are considered, the range of frequencies effectively influencing the processes in infrared emitters is qualitatively assessed. The analysis of the individual characteristics of the units powered by CSC and the transmission spectra of the irradiated articles is carried out. The expediency of regulating the shape and amplitude of the supply voltage (current) for red and white mirror infrared emitters and irradiated articles has been proven. The results obtained make it possible to formulate recommendations for the selection of effective modes necessary for the development of an automated process load control system.

Keywords: units with white and red mirror infrared emitters, complex current, energy efficient mode.

DOI 10.34831/EP.2021.13.66.006

Энергетический анализ эффективности когенерации

Буланин В. А. канд. техн. наук
ООО “Инновационные технологии — Энергетика”, г. Белгород

Об иррациональности сложившейся структуры энергоснабжения городов свидетельствуют следующие факты: выработка электроэнергии на конденсационных электростанциях сопровождается технологическими потерями энергии в окружающую среду, в то время как на подогрев воды для отопления и горячего водоснабжения расходуется дефицитный природный газ. Показано преимущество комбинированного производства энергии на ТЭЦ.

Ключевые слова: электроэнергия, тепловая энергия, конденсационная электростанция, теплоэлектроцентраль, комбинированное производство энергии, когенерация.

Энергетика в последние годы развивалась по пути усложнения и повышения единичной мощности генерирующих мощностей и их концентрации на крупных электростанциях, что привело к увеличению дальности транспорта энергии до потребителя, снижению надежности и экономичности энергоснабжения потребителей. Но наиболее существенным недостатком такой концепции является **невозможность достижения коэффициента полезного использования (КПИ) теплоты сгорания топлива, как правило, выше 40 %**.

На конденсационных электростанциях (КЭС) **только 30 – 35 %** теплоты сгорания топлива преобразуется в электрическую энергию, остальная же часть (технологические потери **65 – 70 %**) “обогревает” окружающую среду. В тоже время на подогрев воды до 70 – 130 °С в отопительных котельных для теплоснабжения коммунально-бытовых и промышленных потребителей расходуется дефицитный природный газ с высоким энергетическим потенциалом (температура горения — более 2000 °С) в количествах, соизмеримых с технологическими потерями на КЭС.

В противоположность этому на ранее построенных в центрах крупных промышленных комплексов немногочисленных теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) **КПИ топлива достигает 70 – 80 %** за счет теплофикации, т. е. использования теплоты отработавшего в турбинах пара/газа для теплоснабжения потребителей (вместо “обогрева” окружающей среды).

На рис. 1 показано сравнение схем энергетических балансов раздельной и комбинированной выработки теплоты и электроэнергии: *а* — КЭС и котельной с одной стороны и ТЭЦ — с другой; *б* — в виде диаграммы.

При замещении отпускаемой из котельной теплоты $Q^{\text{отп}}$ теплотой из отбора турбины ТЭЦ для теплоснабжения потребителей обозначенные на рис. 1, *б* потери *1′* и *2′* (при раздельном способе) уменьшаются соответственно до *1* и *2* (при комбинированном способе производства), благодаря чему достигается ***экономия топлива***

$$\Delta B = B_{\text{КЭС}} + B_{\text{кот}} - B_{\text{ТЭЦ}},$$

где $B_{\text{КЭС}}$, $B_{\text{кот}}$, $B_{\text{ТЭЦ}}$ — расход топлива соответственно на конденсационной электростанции, в котельной и теплоэлектроцентрали при равенстве полезной энергии в сопоставляемых вариантах.

Обзор методов оценки изменений в тепловой схеме паротурбинной установки

Повышение экономичности энергоустановки при отпуске тепловой энергии потребителям из отбора турбины вместо отпуска его из котельной является очевидным фактом, не вызывающим сомнений. Однако получаемая экономия оценивается с разной степенью точности.

Еще профессором “Императорского Московского технического училища” (ныне МГТУ им. Н. Э. Баумана) В. И. Гриневецким в 1906 – 1907 гг. был предложен метод теплового расчета энергоустановки, в основе которого в уравнении материального баланса турбины с отбором пара $D_{\text{т}} = D_{\text{к}} + yD_{\text{отб}}$ предусмотрен так называемый коэффициент отбора или коэффициент недовыработки:

$$y = \frac{i_{\text{отб}} - i_{\text{к}}}{i_0 - i_{\text{к}}},$$

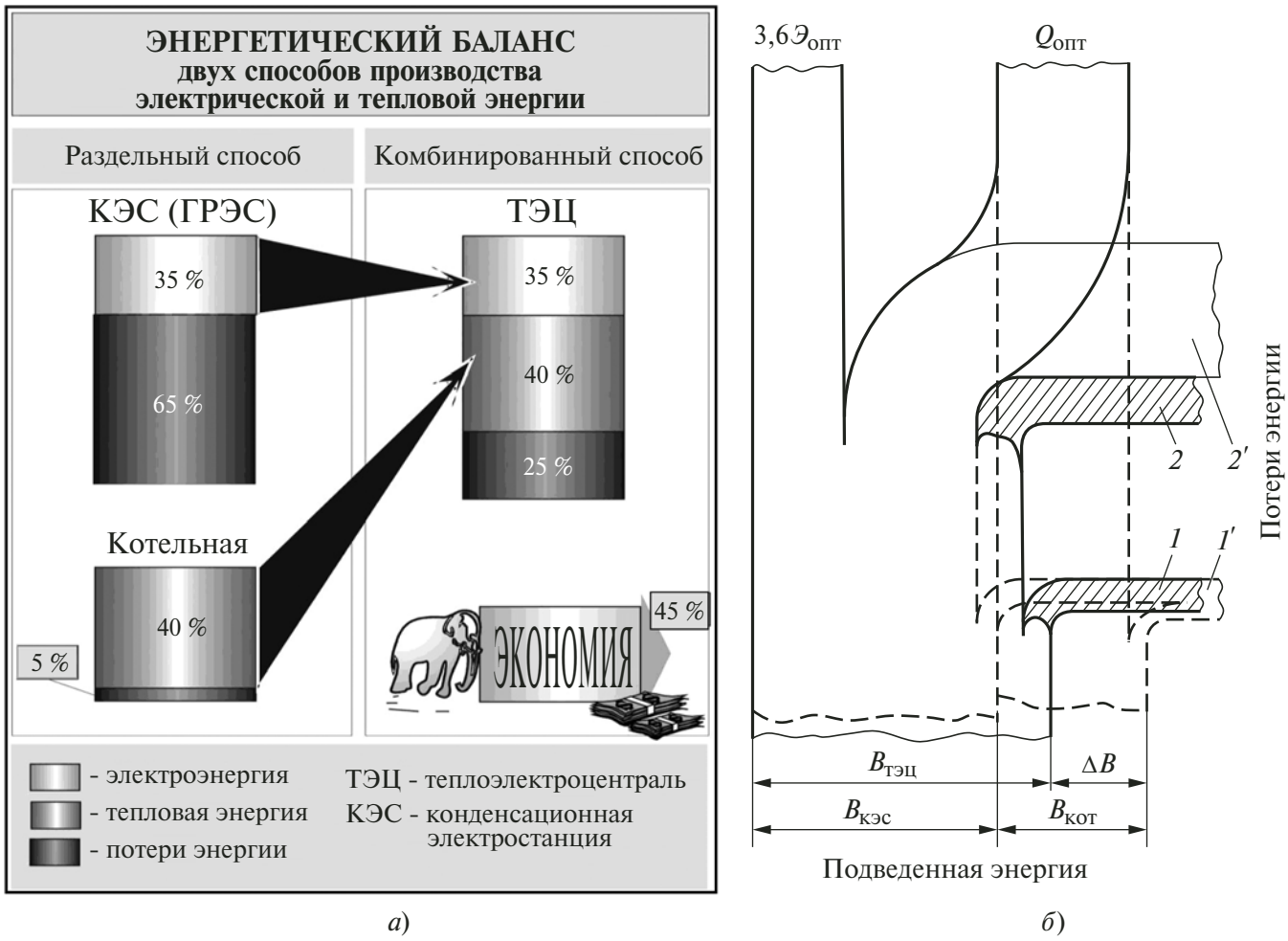


Рис. 1. Сопоставление энергобалансов раздельной и комбинированной выработки теплоты и электроэнергии: 3,6 — физический эквивалент, ГДж/(МВт · ч)

где $D_т$ — расход пара на турбину при работе с отбором; $D_к$ — расход пара на турбину при чисто конденсационном режиме; $D_{отб}$ — расход отбираемого пара; i_0, $i_{отб}$, $i_к$ — энтальпия пара соответственно перед турбиной, в отборе и перед конденсатором.

Однако коэффициенту недовыработки y присущ ряд недостатков: не учитывается влияние регенеративного подогрева воды на экономичность турбины; не учитывается дополнительный эффект от подогрева воды, возвращаемой от потребителя, и добавки воды, восполняющей потери в схеме регенерации турбины; не учитывается влияние промежуточного перегрева пара и др.

Коэффициент недовыработки широко использовался в практических целях в течение более 40 лет [1]. В последние годы в проектной и эксплуатационной практике этот коэффициент уже практически не применяется, но, несмотря на это, он продолжает находить место в учебниках для ВУЗов без указания на его недостатки [2, 3].

В 1929 г. в [4] была предложена приближенная эмпирическая формула так называемого **коэффициента ценности теплоты**:

$$\xi = (1 - \lambda)(1 + k\lambda),$$

где $\lambda = (i_0 - i_{отб})/(i_0 - i_к)$ — отношение теплопадения, использованного паром данного отбора, к полному использованному (внутреннему) теплопадению турбины; k — эмпирический коэффициент, зависящий от начальных параметров рассматриваемой установки и особенностей ее схемы.

Точность вычисления значения ξ при соответственно подобранных значениях коэффициента k оказалась достаточной для прикидочных расчетов схем турбоустановок без промежуточного перегрева пара.

Для более точных расчетов приходилось в каждом конкретном случае находить значение ξ “эмпирически” [5]. Очевидно поэтому

Я. М. Рубинштейн и М. И. Щепетильников пошли по пути разработки аналитического метода определения коэффициента ценности теплоты ξ, согласно которому предварительно находят коэффициент изменения мощности

$$e = \frac{\Delta N}{Q},$$

где ΔN — изменение электрической мощности; Q — количество подводимой извне теплоты.

При разработке этого метода была сделана предпосылка (допущение), что при небольшом значении количества теплоты, подводимой извне к той или иной ступени подогрева питательной воды ($Q \ll Q_0$), изменение экономичности установки не должно зависеть от способа определения, т. е. относительное уменьшение общего расхода теплоты в первом случае (ΔQ_0) и относительный прирост мощности во втором случае (ΔN) должны быть одинаковы:

$$\frac{\Delta Q_0}{Q_0} = -\frac{\Delta N}{N} \text{ и, следовательно, } \frac{\Delta N}{\Delta Q_0} = \frac{N}{Q_0} = \eta, \quad (1)$$

где η — внутренний (абсолютный) КПД установки.

Расчеты сравнительной эффективности обычно проводятся при выборе способа удовлетворения одной и той же потребности, т. е. сравниваемые варианты должны приводиться к одинаковому эффекту, в энергетике — к одинаковому количеству теплоты и электроэнергии, отпускаемых потребителю [6]. Если рассматривать условие (1) с этой позиции, то оно действительно для случая отпуска только электроэнергии, а для сравнения вариантов удовлетворения потребителя одновременно теплотой и электроэнергией оно неприемлемо. На самом деле, при отпуске потребителю теплоты, например паром, поступающим в конденсатор (вместо отпуска теплоты из котельной), имеет место большая экономия теплоты ΔQ_0 при неизменной мощности установки, т. е. $\Delta N = 0$, а отношение $\Delta N/\Delta Q_0 = 0 \neq \eta$. Поэтому коэффициент ценности теплоты ξ, вычисленный по методу [5], применим лишь в случае, когда речь идет только о структурных изменениях рассматриваемой схемы, при которых отсутствует подвод (или отвод) теплоты извне.

Для анализа и оптимизации тепловой схемы предназначен и метод эквивалентных теплопадений (и вытекающий из него коэффициент полезного действия отбора турбины [7]). Метод предполагает, что расчет исходной тепловой схемы выполнен заранее. Для сравнения эффективности вариантов раздельной и комбинированной выработки теплоты и электроэнергии этот метод также неприменим, поскольку КПД отборов турбины вычисляется при постоянном расходе теплоты на нее и не приводится к условию постоянного производственного эффекта (одинаковое количество отпускаемых в сравниваемых вариантах теплоты и электроэнергии).

Таким образом, вышеперечисленные методы оказались применимыми только для анализа небольших структурных изменений в пределах конденсационной паротурбинной установки и неприемлемыми для оценки эффективности теплофикации.

Для приближенной оценки эффективности теплофикации в [8] дано следующее выражение коэффициента ценности теплоты:

$$\xi = 1 - \Delta Q, \quad (2)$$

где $\Delta Q = (b^{\text{К}} - b^{\text{Т}})\omega = \Delta b\omega$ — снижение затрат (экономия теплоты в турбоагрегате на единицу отпущенной теплоты); $b^{\text{К}}$ и $b^{\text{Т}}$ — удельные расходы теплоты на конденсационный и теплофикационный киловатт-час вырабатываемой электроэнергии; Δb — удельные потери теплоты в конденсаторе турбины; ω — удельная теплофикационная выработка электроэнергии на единицу отпущенной за пределы турбоустановки теплоты.

В работе [9], посвященной оптимизации режимов работы ТЭЦ, удельная экономия расхода теплоты за счет комбинированного производства энергии на каждую единицу теплоты, отпускаемой из отбора турбины, представлена в виде комплекса $m_{\text{т}}\Delta q_{\text{к}}$, который по своему физическому смыслу идентичен величине $\Delta Q = \omega\Delta b$ из выражения (2), поскольку $m_{\text{т}}$ — относительный прирост теплофикационной мощности при увеличении тепловой нагрузки, а $\Delta q_{\text{к}}$ — относительный прирост потерь теплоты в конденсаторе (при замещении теплофикационной мощности конденсационной).

Однако в упомянутых работах нет вывода аналитических выражений экономии теплоты, получаемой при теплофикации на паротурбинных ТЭЦ, которые основывались бы на параметрах турбинной установки и соответствовали бы физической сути протекающих в ней процессов. Такое выражение представлено в [10], однако и оно рекомендуется толь-

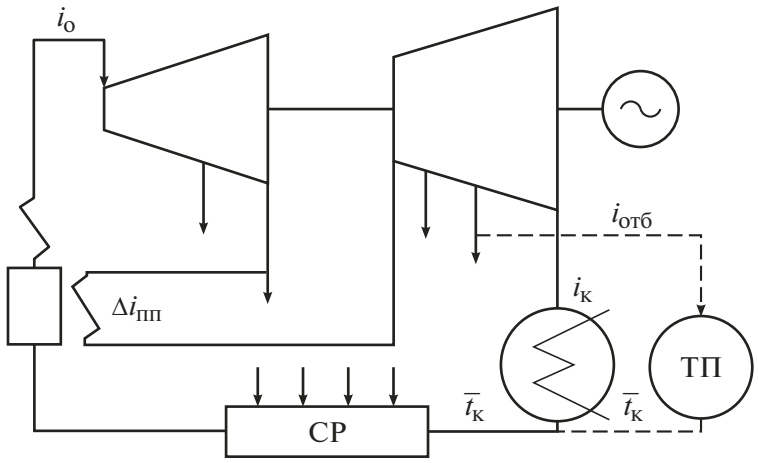


Рис. 2. Тепловая схема энергоблока:

СР — система регенеративного подогрева питательной воды; *ТП* — тепловой потребитель; i_0, $i_{отб}$, $i_к$ — энтальпия пара соответственно перед турбиной, в отборе и на входе в конденсатор; $\Delta i_{пп}$ — приращение энтальпии пара в промежуточном пароперегревателе; $\bar{t}_к$ — энтальпия конденсата, поступающего из конденсатора и от потребителя теплоты

ко для предварительной оценки эффективности теплофикации, поскольку включает в себя энтальпию пара в так называемом условном регенеративном отборе и имеет ряд других условностей.

Разновидности перечисленных методов оценки эффективности теплофикации с присущими им недостатками встречаются и у других авторов [11, 12].

Метод оценки эффективности использования теплоты отработавшего в турбине пара для теплоснабжения

Разработанный автором метод [13, 14] позволяет быстро и с достаточной точностью проводить анализ энергобаланса турбоустановки: он учитывает как первичные, так и вторичные изменения в режиме ее работы.

Если при неизменном расходе подведенной энергии на турбину (рис. 2) отпустить из ее отбора тепловому потребителю *ТП* 1 кг пара, а конденсат возвратить в конденсатор турбины, то произойдет уменьшение выработки электроэнергии на $i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп}$ и сокращение затрат теплоты на выработку электроэнергии на $i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i_{пп}$.

Потребитель, получая тепловую энергию от турбины в количестве $Q_{т.э} = i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i_{пп}$, отказывается от получения такого же количества энергии от котельной.

Сокращение потерь энергии в окружающую среду через конденсатор с охлаждающей водой составляет $i_к - \bar{t}_к$.

Для восстановления выработки электроэнергии до исходного уровня увеличим расход подведенной энергии на турбоустановку на

$$\Delta Q = (i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп})/\eta.$$

Снижение расхода энергии на производство тепловой энергии составит:

$$Q = Q_{т.э} - \Delta Q = \\ = (i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп}) - (i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп})/\eta,$$

где $i_{отб}$ — энтальпия отбираемого пара; $i_к$ и $\bar{t}_к$ — энтальпия соответственно пара и конденсата в конденсаторе; $\Delta i'_{пп}$ — приращение энтальпии пара в промперегревателе (величина со знаком $'$ учитывается только при отборе пара потребителю до промперегрева); η — КПД паротурбинной установки.

Разделив полученное выражение на количество отпущенной тепловой энергии $Q_{т.э} = i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп}$, найдем удельную экономию подведенной энергии в долях отпущенной теплоты, которая по физическому смыслу является ***коэффициентом относительной эффективности использования теплоты*** отбора турбины:

$$K'_{о.эф} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_{т.э}} = 1 - \frac{(i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп})}{(i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп})\eta}.$$

Коэффициент $K'_{о.эф}$ — это экономия подведенной энергии (в долях отпускаемой теплоты), получаемая при комбинированной выработке теплоты и электроэнергии за счет сокращения потерь энергии через конденса-

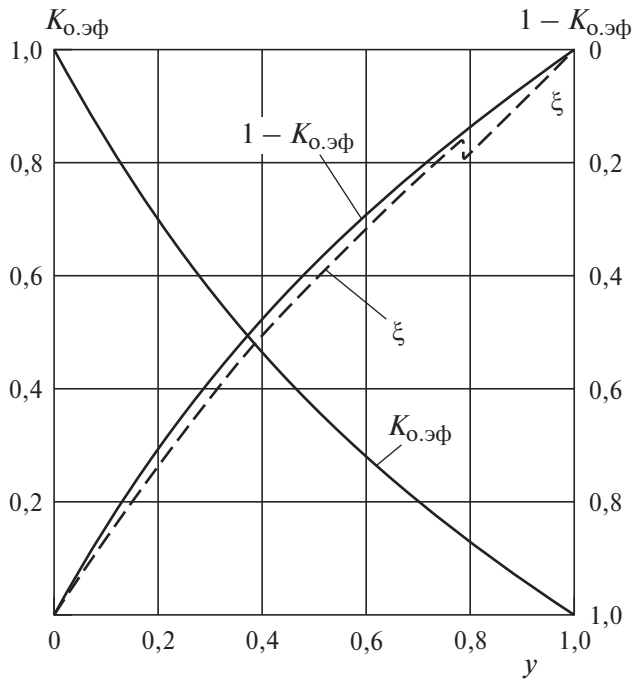


Рис. 3. Коэффициент относительной эффективности использования теплоты любого отбора турбины

тор с охлаждающей водой. Разность $1 - K'_{о.эф}$ — это дополнительный расход энергии на турбоагрегат в долях отпускаемой теплоты:

$$1 - K'_{о.эф} = \frac{\Delta Q}{Q_{т.э}} = \frac{i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп}}{(i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп})}.$$

При $i_{отб} = i_к$ обычно имеем: $K'_{о.эф} = 0{,}10...0{,}12$ и $1 - K'_{о.эф} = 0{,}88...0{,}90$.

Как было обусловлено выше, конденсат от потребителя с температурой $t_к$ возвращается в конденсатор турбины. Следовательно, значение $K'_{о.эф}$ учитывает регенеративный подогрев конденсата от температуры $t_к$ до температуры насыщения $t_{отб}$, соответствующей давлению пара в отборе, из которого отпускается пар потребителю. Однако на практике конденсат, как правило, возвращается от потребителя, например, из сетевого подогревателя, с температурой насыщения $t_{отб}$. Поэтому теплота отбора турбины будет использоваться для теплофикации с меньшей эффективностью: $K_{о.эф} < K'_{о.эф}$.

Если конденсат возвращается от потребителя в точку отбора пара, то для условия $i_{отб} = i_0$, очевидно, $1 - K_{о.эф} = 1$ или $K_{о.эф} = 0$. Найдем множитель M, учитывающий влияние изменения точки возврата конденсата от потребителя (для отбора с энтальпией $i_{отб} = i_0$):

$$M = \frac{1 - K_{о.эф}}{1 - K'_{о.эф}} = \frac{1}{1 - K'_{о.эф}} = \frac{(i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i_{пп})\eta}{i_0 - i_к + \Delta i_{пп}}.$$

Для любого отбора получим:

$$1 - K_{о.эф} = M(1 - K'_{о.эф}) =$$
$$= \frac{(i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i_{пп})\eta}{i_0 - i_к + \Delta i_{пп}} \cdot \frac{i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп}}{(i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп})\eta}.$$

Сокращая числитель и знаменатель на величину η, получаем:

$$1 - K_{о.эф} = \frac{i_0 - \bar{t}_к + \Delta i_{пп}}{i_{отб} - \bar{t}_к + \Delta i'_{пп}} \cdot \frac{i_{отб} - i_к + \Delta i'_{пп}}{i_0 - i_к + \Delta i_{пп}}.$$

Приводя полученное выражение к общему знаменателю, выводим в общем виде формулу коэффициента относительной эффектив-



Рис. 4. Белгородская ТЭЦ 60 МВт



Рис. 5. ГТУ-ТЭЦ “ЛУЧ” 60 МВт

ности теплоты отбора турбины для теплофикации: $K_{\text{о.эф}} = \frac{i_{\text{к}} - \bar{t}_{\text{к}}}{i_0 - i_{\text{к}} + \Delta i_{\text{пп}}} \cdot \frac{i_0 - \bar{t}_{\text{отб}} + \Delta i_{\text{пп}} - \Delta i'_{\text{пп}}}{i_0 - \bar{t}_{\text{к}} + \Delta i'_{\text{пп}}}$.

С достаточной для технических расчетов точностью этот коэффициент может также приниматься по его графической зависимости от известного коэффициента недовыработки $K_{\text{о.эф}} = f(y)$ — рис. 3.

Для оценки полученных результатов на рисунке также показана зависимость коэффициента ценности теплоты $\xi = f(y)$ [5], полученная по более сложной и менее точной методике, в частности неправильно учитывающей приращение энтальпии пара в промежуточном пароперегревателе (неправомерное смещение кривой $\xi = f(y)$ выше точки промперегрева).

Коэффициент относительной эффективности использования теплоты любого отбора турбины для теплоснабжения, означающий экономию подведенной к турбине энергии в долях отпускаемой потребителю теплоты, не зависит от КПД турбины и доли пара на регенерацию, а **является только функцией теплоперепадов в соответствующих отсеках турбины**.

Примеры внедрения когенерации в г. Белгороде

Согласно “Концепции энергоснабжения г. Белгорода на перспективу до 2015 года” [15] построены две газотурбинные ТЭЦ: Белгородская ТЭЦ 2×30 МВт (рис. 4) и ГТУ-ТЭЦ “ЛУЧ” 2×30 МВт (рис. 5).

Выводы

1. Основным приоритетом в системах централизованного теплоснабжения является комбинированное производство электрической и тепловой энергии на ТЭЦ, позволяющее иметь экономию более 40 % от расходуемого количества топлива при раздельном способе их производства.

2. Разработанный метод оценки эффективности использования теплоты отработавшего в турбине пара для теплоснабжения позволяет быстро и с достаточной точностью проводить анализ энергобаланса турбоустановки: он учитывает как первичные, так и вторичные изменения в режиме ее работы.

3. Разработанный коэффициент относительной эффективности использования теплоты пара любого отбора турбины при комбинированном производстве (означающий экономию подведенной к турбине энергии в долях отпускаемой потребителю теплоты) является только функцией теплоперепадов в соответствующих отсеках турбины и не зависит от КПД турбины в отличие от известных более сложных и менее точных методов оценки ценности теплоты. На его основе разработаны методы расчета экономии топлива, получаемой при переходе от раздельного к комбинированному способу производства энергии и рационализации тепловых схем электростанций.

Список литературы

1. **Комаров, А. М. Карманный справочник теплотехника электростанций** / А. М. Комаров, В. В. Лукницкий. — М.-Л.: ГОНТИ, Редакция энергетической литературы. — 1939. — 208 с.
2. **Белинский, С. Я. Энергетические установки электростанций.** Учебник для вузов / С. Я. Белинский, Ю. М. Липов. — М.: Энергия, 1974. — 304 с.
3. **Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции:** Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В. Я. Рыжкин. — М.-Л.: Энергия, 1987. — 400 с.
4. **Рубинштейн, Я. М. Исследование регенеративного процесса в паротурбинных установках, ч. I, II** / Я. М. Рубинштейн // Изв. ВТИ, 1929, № 1, с. 26 – 46; 1929, № 9, с. 3 – 38.
5. **Рубинштейн, Я. М. Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС** / Я. М. Рубинштейн, М. И. Щепетильников. — М.: Энергоиздат, 1982. — 272 с.
6. **Прузнер, С. Л. Экономика энергетики СССР** / С. Л. Прузнер, А. Н. Златопольский, А. М. Некрасов. — М.: Высшая школа, 1979. — 471 с.
7. **Рыжкин, В. Я. Анализ тепловых схем мощных конденсационных блоков** / В. Я. Рыжкин, А. М. Кузнецов. — М.: Энергия, 1972. — 272 с.
8. **Горшков, А. С. Технико-экономические показатели тепловых электростанций** / А. С. Горшков. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
9. **Рузанков, В. Н. Оптимизация режимов работы мощных отопительных ТЭЦ.** Автореферат кандидатской диссертации. — М.: ВТИ, 1973. — 21 с.
10. **Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети** / Е. Я. Соколов. — М.: Энергия, 1978. — 376 с.
11. **Баринберг, Г. Д. Влияние параметров свежего пара, промежуточного перегрева и единичной мощности на экономичность теплофикационных турбин** / Г. Д. Баринберг, Е. И. Бененсон. В сб.: Опыт создания турбин и дизелей. Свердловск, Ср.-Уральск. кн. изд-во, 196.
12. **Бененсон, Е. И. Теплофикационные паровые турбины** / Е. И. Бененсон, Л. С. Иоффе. — М.: Энергия, 1976. — 264 с.
13. **Буланин, В. А. Алгоритм оценки влияния отбора тепла от турбоагрегата на его экономичность.** — Респ. н.т.к. по электроавтоматизации и автоматическому управлению и регулированию производственных процессов (тезисы докладов), Ташкент, 1975.
14. **Буланин, В. А. Метод анализа энергобаланса паротурбинной установки** / В. А. Буланин, Е. Д. Родим-

кин // Электрические станции, 1978, № 11. — С. 27 – 31.
15. **Буланин, В. А. Актуальное интервью. Зерно рациональности** / В. А. Буланин // Наша Газета (ОАО “Белгородэнерго”), № 15(69), август 2002 г.

References

1. **Komarov A. M., Luknitsky V. V. Karmannyi spravochnik teplotekhnika elektrostantsii** (Pocket reference book of heat engineering power plants), Moscow-Leningrad, GONTI, Energy Literature Editorial Office, 1939, 208 p.
2. **Belinsky S. Ya., Lipov Yu. M. Energeticheskie ustanovki elektrostantsii** (Power plants of power plants), Moscow, Energiya, 1974, 304 p.
3. **Ryzhkin V. Ya. Teplovye elektricheskie stantsii. Uchebnik dlya teploenergeticheskikh spetsetsial’nostei vuzov** (Thermal power plants. Textbook for thermal power engineering specialties of universities), Moscow-Leningrad, Energiya, 1987, 400 p.
4. **Rubinstein Ya. M. Izv. VTI** (Izv. VTI), 1929, No. 1, pp. 26 – 46; 1929, No. 9, pp. 3 – 38.
5. **Rubinstein Ya. M., Shchepetil’nikov M. I. Issledovanie real’nykh teplovykh skhem TES i AES** (Investigation of real thermal circuits of TPP and NPP), Moscow, Energoizdat, 1982, 272 p.
6. **Pruzner S. L., Zlatopolsky A. N., Nekrasov A. M. Ekonomika energetiki SSSR** (Energy Economics of the USSR), Moscow, Higher school, 1979, 471 p.
7. **Ryzhkin V. Ya., Kuznetsov A. M. Analiz teplovykh skhem moshchnykh kondensatsionnykh blokov** (Analysis of thermal circuits of powerful condensation units), Moscow, Energy, 1972, 272 p.
8. **Gorshkov A. S. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsii** (Technical and economic indicators of thermal power plants), Moscow, Energoatomizdat, 1984, 240 p.
9. **Ruzankov V. N. Optimizatsiya rezhimov raboty moshchnykh otopitel’nykh TETs** (Optimization of the operating modes of powerful heating TETs), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, VTI, 1973, 21 p.
10. **Sokolov E. Ya. Teplofikatsiya i teplovye seti** (Heating and heating networks), Moscow, Energiya, 1978, 376 p.
11. **Barinberg G. D., Benenson E. I. Vliyanie parametrov svezhego para, promezhutochnogo peregreva i edinichnoi moshchnosti na ekonomichnost’ teplofikatsionnykh turbin** (Influence of parameters of fresh steam, intermediate overheating and unit power on the efficiency of heating turbines), In collection: Experience in creating turbines and diesel engines, Sverdlovsk, Sr.-Uralsk.
12. **Benenson E. I., Ioffe L. S. Teplofikatsionnye parovye turbiny** (Heating steam turbines), Moscow, Energiya, 1976, 264 p.
13. **Bulanin V. A. Algoritm otsenki vliyaniya otbora tepla ot turboagregata na ego ekonomichnost’** (Algorithm for assessing the effect of heat extraction from a turbine unit on its efficiency), Resp. n.t.k. on electrical automation and automatic control and regulation of production processes (abstracts), Tashkent, 1975.
14. **Bulanin V. A., Rodimkin E. D. Elektricheskie stantsii** (Electrical stations), 1978, No. 11, pp. 27 – 31.
15. **Bulanin V. A. Aktual’noe interv’yu. Zerno ratsional’nosti** (Topical interview. The grain of rationality), Nasha Gazeta OAO “Belgorodenergo”, No. 15 (69), August, 2002.

v_bulanin@mail.ru

Energy analysis of the cogeneration efficiency

Bulanin V. A.

The irrationality of the existing structure of energy supply to cities is evidenced by the following facts: electricity generation at condensing power plants is accompanied by technological energy losses into the environment, while sought-after natural gas is used for heating and hot water supply. The advantage of combined energy production at CHP is shown.

Keywords: electricity, thermal energy, condensing power plant, combined heat and power plant, combined energy production, cogeneration.



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

DOI 10.34831/EP.2021.17.37.007

Практический опыт исследования структуры электрических потерь

Щемелева Ю. Б., канд. техн. наук
Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике

Щемелев А. Н.
Геленджикские электрические сети, г. Геленджик

Давыдов С. К.
Армавирский механико-технологический институт (филиал) КубГТУ, г. Армавир

Приведен анализ структуры потерь на примере электросетевой компании “Геленджикэлектросеть”. Выявленная структура потерь позволяет наметить мероприятия, позволяющие в целом привести потери электросетевой компании к нормируемому показателю. Показано, что в уменьшении потерь заинтересованы все стороны рынка электроэнергии.

Ключевые слова: потери электрической энергии, электросетевая компания, структура потерь, коммерческие потери.

Рынок электроэнергии в России развивается бурными темпами. При этом стоимость ее для конечного потребителя постоянно корректируется, исходя из реальной экономической обстановки. В мае 2020 г. президент России В. Путин поручил Правительству актуализировать порядок расчета тарифов на электроэнергию на следующий год, учитывая расходы в связи с пандемией коронавируса. Глава государства также заявил о необходимости минимизировать тарифную нагрузку на потребителей электроэнергии [1].

Задачам качественного расчета и оптимизации уровня потерь электроэнергии уделяется самое пристальное внимание, о чем свидетельствует наличие целого ряда нормативно-правовых документов.

Обзор нормативной документации

Стоимость электрической энергии ограничивается в соответствии с Федеральным законом “Об электроэнергетике”. Государственное регулирование цен (тарифов) на услуги по передаче электрической энергии, оказываемые сетевыми организациями, осуществляется на основе долгосрочных параметров регулирования деятельности таких организаций или на основе заключаемых в порядке, установленном Правительством Российской Федерации, соглашений об условиях осуществления регулируемых видов деятельности [2].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 размер фактических потерь электрической энергии в сетях определяется как разница между ее объемом, переданным в электрическую сеть из других сетей или от производителей электрической энергии, и объемом, который поставлен по договорам энергоснабжения — купли-продажи (поставки) электрической энергии (мощности) — и потреблен энергопринимающими устройствами, присоединенными к данной электрической сети, а также объемом электрической энергии, которая передана в электрические сети других сетевых организаций [3].

Сетевые организации обязаны оплачивать стоимость электрической энергии в объеме фактических потерь, возникших в принадлежащих им объектах сетевого хозяйства.

Потребители услуг обязаны оплачивать в составе тарифа за услуги по передаче электрической энергии нормативные потери, воз-

никающие при ее передаче по сети. Потребители оплачивают потери электрической энергии сверх норматива в случае, если будет доказано, что потери возникли по вине самих потребителей услуг [3].

Нормативы потерь электрической энергии при ее передаче по единой национальной (общероссийской) электрической сети утверждаются ежегодно федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке и реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере топливно-энергетического комплекса [4].

Нормативы потерь электрической энергии в электрических сетях устанавливаются в отношении совокупности линий электропередачи и иных объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих соответствующей сетевой организации — собственнику или иному законному владельцу объектов электросетевого хозяйства, входящих в единую национальную (общероссийскую) электрическую сеть, который ограничен в соответствии с Федеральным законом “Об электроэнергетике” в осуществлении своих прав в части права заключения договоров об оказании услуг по передаче электрической энергии с использованием указанных объектов — с учетом дифференциации по уровням напряжения сетей при установлении тарифов на услуги по передаче электрической энергии [3].

В данной работе поставлена задача: определить структуру потерь электрической энергии конкретного электросетевого предприятия с целью уточнения составляющих норматива потерь. Для этого проведен анализ основных показателей деятельности АО “Геленджикэлектросеть” за период с 2014 по 2020 г. Все приведенные данные были получены электросетевой организацией в процессе ее основной деятельности. Они находятся в свободном доступе и не являются коммерческой тайной.

Неравномерность потерь

Потери электрической энергии (в зависимости от их физической природы и специфики методов определения количественных значений) принято разделять на коммерческие и технологические. Коммерческие потери обусловливаются хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков данным об оплате электроэнергии потребителями и другими причинами в сфере организации контроля за потреблением энергии. Они не имеют самостоятельного математического описания и, как следствие, не могут быть рассчитаны автономно. Их значение определяют как разницу между фактическими и технологическими потерями. В свою очередь, технологические потери складываются из технических потерь (обусловлены физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло в элементах сетей; их значение можно получить расчетным путем на основе законов электротехники), расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций (регистрируется счетчиками, установленными на трансформаторах СН подстанций) и потерь электроэнергии, обусловленных погрешностями ее измерений (недоучет электроэнергии, метрологические потери; в расчет включают все приборы учета отпуска электроэнергии из сети, в том числе и приборы учета расхода электроэнергии на СН подстанций) [5].

Электросетевые компании рассчитывают норматив потерь своих электрических сетей в зависимости от планового объема отпуска электроэнергии в сеть потребителей. Например, на 2020 г. в АО “Геленджикэлектросеть” был утверждён годовой норматив технологических потерь на уровне 12,5 %. Изучение реальных данных показало, что даже в разрезе месяца фактические потери распределяются неравномерно. Это обусловлено особенностями зоны обслуживания компании: из 11 населенных пунктов (городских и сельских) не все газифицированы, есть и климатические особенности, а следовательно, различия в отопительных сезонах, неравномерность потребления электроэнергии конечными потребителями [1, 6 – 8]. Поэтому значения технологических потерь электроэнергии по месяцам неодинаковы, но суммарно в год они соответствуют среднему нормативно установленному уровню. Распределение технологических потерь в течение календарного года представлено на рис. 1.

Потери электроэнергии (технологические и коммерческие) в электрических сетях неизбежны, поэтому важно, чтобы они не превышали экономически обоснованного уровня — норматива потерь. Превышение норм технологического расхода свидетельствует о наличии ошибок в планировании и системных проблемах в учете электроэнергии. Чтобы исправить ситуацию необходимо своевремен-

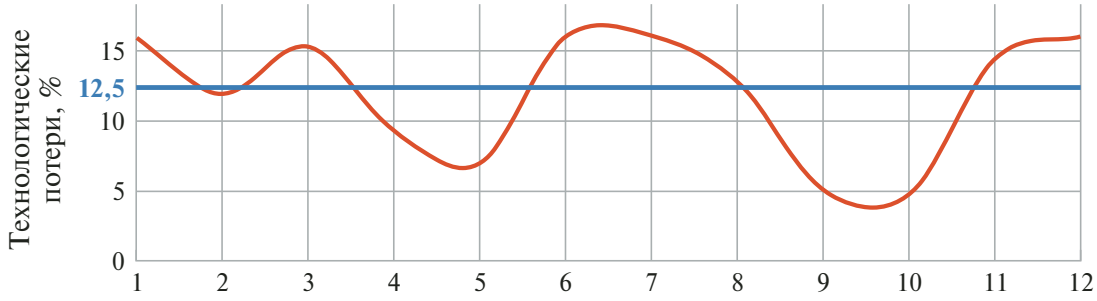


Рис. 1. Кривая изменения технологических потерь электроэнергии за 2020 г.

но устанавливать причины возникновения проблем и выбирать способы их устранения.

Структура потерь на примере АО "Геленджикэлектросеть"

Для отображения потерь и расчета их фактического значения используем существующую классификацию:

1) технологические потери как сумма технических потерь, метрологических потерь и расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций;

2) коммерческие потери.

Расчет технических потерь электросетевого комплекса был осуществлен на базе программного обеспечения "РАП стандарт". Как показано на рис. 2, суммарная доля технологических потерь составляет более 80 % от всего объема потерь: потери в сети 6/10 кВ (27,15 %), потери в сети 0,4 кВ (49,68 %), потери на собственные нужды подстанций (4,38 %). Для ее уменьшения АО "Геленджикэлектросеть" на постоянной основе проводит работы по следующим направлениям:

1) оптимизация схемы и режима работы электросети;

2) оптимизация нагрузки трансформаторов (проведение замеров нагрузок по трансформаторным подстанциям, выявление загруженных или недозагруженных силовых трансформаторов, отключение в межсезонье резервных трансформаторов и т. п.);

3) модернизация устаревающего оборудования и строительство новых энергообъектов в соответствии с инвест-программой.

В общей доле потерь коммерческие потери составляют менее 20 %, но для сетевой компании в денежном эквиваленте они довольно значительны. Поэтому основная деятельность персонала отдела транспорта электроэнергии АО "Геленджикэлектросеть" направлена на реализацию мероприятий по уменьшению коммерческой составляющей потерь.

Под коммерческой составляющей подразумевается сальдо между абсолютными (фактическими) и технологическими потерями. В идеале такая разница должна стремиться к нулю, что на практике неосуществимо. Причиной возникновения коммерческих потерь могут быть недоучеты, вызванные сбоем в работе приборов учета потребителей, ошибки в расчетах, а также незаконное сверхнормативное (в том числе безучетное) потребление электроэнергии, что, как правило, свойственно бытовым потребителям (реже — юридическим лицам). Как показала практика АО "Геленджикэлектросеть", пик безучетного потребления приходится на холодное время года в населенных пунктах, где имеются проблемы с газоснабжением, а также на летний период (курортный сезон). Благодаря разъяснительной и профилактической работе количество нарушений, связанных с безучетным потреблением электроэнергии, год от года снижается (см. рис. 3).

Практический опыт показывает, что потребителями применяются четыре основных способа незаконного потребления электроэнергии (занижения показаний прибора учета) [6]:

1) механический способ — вмешательство в работу прибора учета (притормаживание вращения диска электросчетчика, срыв пломб, разбалансировка механизма);

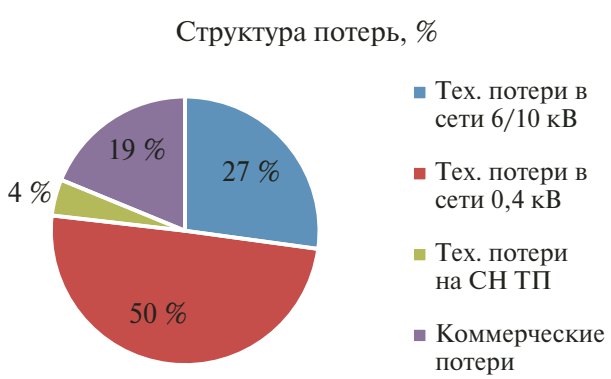


Рис. 2. Структура потерь



Рис. 3. Количество актов неучтенного потребления АО "Геленджикэлектросеть" за период с 2014 по 2019 г.

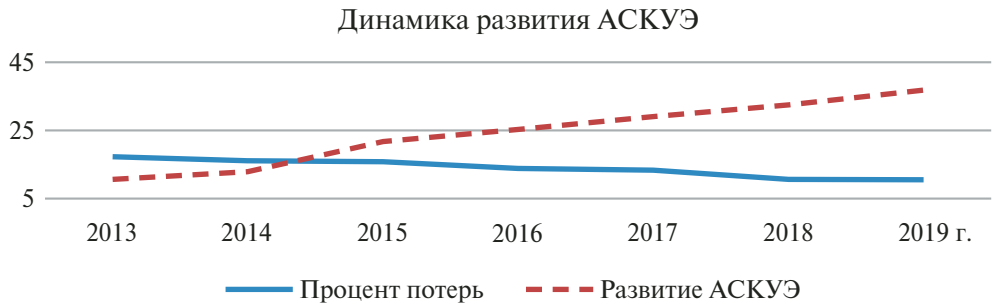


Рис. 4. Динамика развития АСКУЭ в АО "Геленджикэлектросеть" за период с 2013 по 2019 г. (под развитием АСКУЭ подразумевается количество включенных в систему приборов коммерческого учета)

2) электрический способ — незаконное подключение к воздушной линии путем "наброса", инвертирование фазы тока нагрузки, использование специальных приборов для полной или частичной компенсации фактического потребления, шунтирование токовой цепи прибора учета или переключение фазы и нуля;

3) магнитный способ — к корпусу индукционного прибора учета подносится неодимовый магнит, искажающий магнитное поле и препятствующий достоверной работе прибора учета;

4) программный способ — вмешательство в работу программного обеспечения электронных приборов учета.

Следует отметить, что современные приборы учета "обмануть" вышеописанными способами, как правило, не удается или же подобные попытки вмешательства фиксируются самим прибором учета и заносятся в журнал событий в долговременную память. В дальнейшем эта информация может служить доказательством незаконного потребления и основанием для взыскания с потребителя соответствующей компенсации. Поэтому ежедневная работа персонала отдела транспорта электроэнергии должна быть направлена на мероприятия по выявлению очагов коммерческих потерь. К основным мероприятиям можно отнести:

1) проведение плановых периодических контрольных съемов показаний с расчетных приборов учета (направлено на выявление фактических расходов потребителей);

2) проведение технических инструментальных проверок (направлено на выявление недоучетов и своевременное устранение нарушений в учете);

3) установка знаков визуального контроля и индикаторов магнитного поля на приборах учета потребителей;

4) проведение адресных рейдовых мероприятий, направленных на устранение очагов потерь у потребителей, выявленных путем анализа электропотребления за отдельные периоды;

5) автоматизация сбора и обработки показаний приборов учета (развитие системы АСКУЭ, анализ данных журналов событий и профилей потребления с приборов учета);

6) установка "интеллектуальных" счетчиков и выносных пунктов учета на границе балансовой принадлежности.

Меры по снижению потерь

Чтобы наиболее эффективно применять меры по снижению потерь, необходимо знать, где и по каким причинам они возни-

кают. В связи с этим основной задачей расчета и анализа потерь является определение их детальной структуры, выявление конкретных очагов потерь и оценка возможностей их снижения до экономически приемлемых значений. Один из методов такой диагностики потерь — анализ небалансов электроэнергии на объектах (подстанциях, питающих фидерах и т. п.) и в целом по сетям.

Как показала практика, наиболее эффективным, но затратным способом снижения коммерческих потерь является развертывание системы дистанционного опроса на базе современных приборов учета, в том числе и сплитового исполнения. Если проанализировать динамику изменения фактических потерь и количество включенных в систему приборов учета, можно выявить обратно пропорциональную связь. Для примера на рис. 4 показана динамика развития АСКУЭ в АО "Геленджикэлектросеть".

Что касается технологических потерь, их значение учитывается в тарифе на электроэнергию. В случае с коммерческой составляющей потерь за всякое превышение показателя сверх нормируемого значения платить приходится электросетевой компании. Это является ее прямыми убытками.

Выводы

1. Выявлена структура потерь (в процентном соотношении) на основе реальных данных электросетевой компании. На основе анализа сделан вывод, что в борьбе с потерями должны быть заинтересованы все стороны розничного рынка электроэнергии.

2. Полученные данные уже используются для разъяснительной работы при общении с потребителями.

Список литературы

1. **Щемелев, А. Н. Проблемы использования электронных счетчиков электроэнергии в условиях повышенных температур (тезисы)** / А. Н. Щемелев, Ю. Б. Давыденко; В сб. материалов II международной научной заочной конференции "Актуальные вопросы современной техники и технологии" (2 октября 2010 г.) — Липецк: Издательский центр "Де-факто", 2010. — С. 221 – 222. https: //elibrary.ru/ item.asp?id=36697370
2. **Федеральный закон "Об электроэнергетике"** от 26.03.2003 № 35-ФЗ.
3. **Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 (ред. от 30.01.2021) "Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг"**.
4. **Министерство энергетики Российской Федерации. Приказ от 2 июля 2019 года № 651 "Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по единой национальной (общероссийской) электрической сети на 2020 год"**.
5. **Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 "Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям"**.
6. **Щемелев, А. Н. Проблема безучетного потребления электроэнергии: правовые аспекты** / А. Н. Щемелев, С. К. Давыдов, Ю. Б. Щемелева; В сб. "Прикладные вопросы точных наук". Материалы III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей, посвящённой 60-летию со дня образования Армавирского механико-технологического института (2019г.) — Армавир: Издательство Армавирского государственного педагогического университета. — 2019, — С. 216 – 218. https: //elibrary.ru/item.asp?id=41310162
7. **Пучкова, Т. В. К вопросу о статистическом учете в электроэнергетике** / Т. В. Пучкова, А. Ю. Божко, Ю. Б. Щемелева; Материалы III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей, посвящённой 60-летию со дня образования Армавирского механико-технологического института. 2019. — Армавир: Издательство Армавирского государственного педагогического университета. — 2019. — С. 214 – 216. https: //elibrary.ru/item.asp?id=41310131
8. **Щемелев, А. Н. Unaccounted for Energy: First-hand experience (К вопросу о безучетном потреблении электроэнергии)** / А. Н. Щемелев, Ю. Б. Щемелева; Сб. трудов Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon — 2019. Есть изд-во? https: //ieeexplore.ieee.org/document/8934301
9. **Коротун, В. Потери электроэнергии в электрических сетях** / В. Коротун. (электронный ресурс) https: //yandex.ru/turbo/asutpp.ru/s/poteri-jelektrojenergii-v-jelektricheskih-setjah.html (дата обращения 01.09.2020)
10. **Малафеев, А. В. Способ учета вклада потребителей сетевой организации в потери мощности для оценки нормативных потерь** / А. В. Малафеев, О. Е. Шепилова; В сб.: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. — С. 179 – 182.
11. **Омельченко, Д. П. Снижение потерь электроэнергии — борьба с хищениями и техническими потерями** / Д. П. Омельченко, В. Д. Овчаренко // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт". — 2016. — № 4. — С. 40 – 43.
12. **Казыбекова, Б. А. Технические и коммерческие потери энергии в системе электроснабжения и использование технических средств для выявления источников потерь** / Б. А. Казыбекова, Б. Б. Сулай-

манов // Известия ВУЗов (Кыргызстан). — 2011. — № 4. — С. 17 – 18.
13. **Ахметзянова, А. А. Роль технологических потерь в стратегии управления потерями распределительной сетевой компании** / А. А. Ахметзянова; В сб. Тинчуринские чтения. Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции: Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции: В 3-х томах. Под общей редакцией Э. Ю. Абдуллазянова. — Том 1. — 2018. — С. 20 – 22.
14. **Конюхова, Е. А. Определение потерь мощности по потерям напряжения в электрических сетях промпредприятий** / Е. А. Конюхова. 2003. Сер. Вып. 8 Библиотечка электротехника — приложение к журналу "Энергетик".
15. **Фролов, В. Я. О повышении точности определения нормативных потерь электроэнергии и структуры фактических потерь** / В. Я. Фролов, А. В. Коротков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 41 – 44.
16. **Путин поручил пересчитать тарифы на электроэнергию с учетом расходов из-за коронавируса.** Федеральное агентство новостей. 23.05.2020. (электронный ресурс) https: //riafan.ru/1279018-putin-poruchil-pereschitat-tarify-na-elektroenergiyu-s-uchetom-raskhodov-iz-za-koronavirus

References

1. **Schemelev A. N., Davydenko Yu. B. Sb. materialov II mezhdunarodnoi nauchnoi zaochnoi konferentsii "Aktual'nye voprosy sovremennoi tekhniki i tekhnologii" 2 oktyabrya 2010** (Materials of the II International Scientific Correspondence Conference "Topical Issues of Modern Engineering and Technology", October 2, 2010), Lipetsk, Publ. Center "De facto", 2010, pp. 221 – 222, [Electronic resource]. — URL: https: // elibrary.ru/item.asp?id= 36697370.
2. **Federal'nyi zakon "Ob elektroenergetike" ot 26.03.2003 No. 35-FZ** (Federal Law "On the Electric Power Industry", 26.03.2003 No. 35-FZ).
3. **Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.12.2004 № 861 (red. ot 30.01.2021) "Ob utverzhdenii Pravil nediskriminatsionnogo dostupa k uslugam po peredache elektricheskoi energii i okazaniya etikh uslug"** (Decree of the Government of the Russian Federation of December 27, 2004 № 861 (January 30, 2021) "On approval of the Rules for non-discriminatory access to services for the transmission of electrical energy and the provision of these services").
4. **Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii. PRIKAZ ot 2 iyulya 2019 goda № 651 "Ob utverzhdenii normativov poter' elektricheskoi energii pri ee peredache po edinoi natsional'noi (obshcherossiiskoi) elektricheskoi seti na 2020 god"** (Ministry of Energy of the Russian Federation. ORDER of July 2, 2019 № 651 "On approval of standards for losses of electrical energy during its transmission through the unified national (all-Russian) electrical network for 2020").
5. **Prikaz Ministerstva energetiki Rossiiskoi Federatsii ot 30 dekabrya 2008 g. № 326 "Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam"** (Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of December 30, 2008 № 326 "On the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on approval of standards for technological losses of electricity during its transmission through electric networks").
6. **Schemelev A. N., Davydov S. K., Schemeleva Yu. B. Sb. "Prikladnye voprosy tochnykh nauk". Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, prepodavatelei, posvyashchennoi 60-letiyu so dnya obrazovaniya Armavirskogo mekhaniko-tekhnologicheskogo instituta 2019** (Proceedings "Applied questions of exact sciences". Materials of the III International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Teachers, dedicated to the 60th anniversary of the establishment of the Armavir Mechanics and Technology Institute (2019)), Armavir, Publ. Armavir State Pedagogical University, 2019, pp. 216 – 218, [Electronic resource]. — URL: https: // elibrary.ru/ item.asp?id =41310162.
7. **Puchkova T. V., Bozhko A. Yu., Schemeleva Yu. B. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, prepodavatelei, posvyashchennoi 60-letiyu so dnya obrazovaniya Armavirskogo mekhaniko-tekhnologicheskogo institute 2019** (Materials of the III International scientific-practical conference of students, graduate students, teachers, dedicated to the 60th anniversary of the establishment of the Armavir Mechanics and Technology Institute 2019), Armavir, Publ. Armavir State Pedagogical University, 201, pp. 214 – 216, [Electronic resource]. — URL: https: // elibrary.ru/ item.asp?id=41310131.
8. **Schemelev A. N., Schemeleva Yu. B. Sb. trudov Mezhdunarodnoi mul'tidistsiplinarnoi konferentsii po promyshlennomu inzhiniringu i sovremennym tekhnologiyam FarEastCon — 2019** (Proceedings of the International Multidisciplinary Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies FarEastCon — 2019), [Electronic resource]. — URL: https: //ieeexplore.ieee.org/ document/8934301.
9. **Korotun V. Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh** (Losses of electricity in electrical networks), [Electronic resource]. — URL: https: //yandex.ru/ turbo/asutpp.ru/s/poteri-jelektrojenergii-v-jelektricheskih-setjah.html (accessed 01. 09.2020).
10. **Malafeev A. V., Shepilova O. E. V sb. Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii** (Collection Problems and prospects for the development of electric power and electrical engineering. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference), Kazan, Kazan State Energy University, 2019, pp. 179 – 182.
11. **Omelchenko D. P., Ovcharenko V. D. Nauchnyi vestnik Gosudarstvennogo avtonomnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Nevinnomysskii gosudarstvennyi gumanitarno-tekhnicheskii institute"** (Scientific Bulletin of the State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Nevinnomyssk State Humanitarian and Technical Institute"), 2016, No. 4, pp. 40 – 43.

12. **Kazybekova B. A., Sulaimanov B. B. Izvestiya VUZov Kyrgyzstana** (Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Kyrgyzstana), 2011, No. 4, pp. 17 – 18.
13. **Akhmetzyanova A. A. V sb. Tinchurinskie chteniya. Tezisy dokladov XIII molodezhnoi nauchnoi konferentsii, Tezisy dokladov XIII molodezhnoi nauchnoi konferentsii** (Proceedings Tinchurin Readings. Abstracts of the XIII Youth Scientific Conference, Abstracts of the XIII Youth Scientific Conference), Vol. 1, 2018, pp. 20 – 22.
14. **Konyukhova E. A. Opredelenie poter' moshchnosti po poteryam napryazheniya v elektricheskikh setyakh prompredpriyatii** (Determination of power losses by voltage losses in electrical networks of industrial enterprises), 2003, Series Issue 8, Library of electrical engineering "Energetik".
15. **Frolov V. Ya., Korotkov A. V. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta** (St. Petersburg State Polytechnical University Journal), 2012, No. 1 (142), pp. 41 – 44.
16. **Putin poruchil pereschitat' tarify na elektroenergiyu s uchetom raskhodov iz-za koronavirusa. Federal'noe agentstvo novostei 23.05.2020** (Putin instructed to recalculate electricity tariffs, taking into account the costs due to the coronavirus, Federal News Agency, 23.05.2020), [Electronic resource]. — URL: https://riafan.ru/1279018-putin-poruchil-pereschitat-tarify-na-elektroenergiyu-s-uchetom-raskhodov-iz-za-koronavirus.

Pre-di@yandex.ru

Practical experience in studying the structure of electrical losses

Shchemeleva Yu. B., Shchemelev A. N., Davydov S. K.

The structure of losses is analyzed on an example of the power grid company "Gelendzhikelectroset". The revealed structure of losses makes it possible to outline the measures that allow to bring the losses of the power grid company to the rated level. It is shown that all participants of the electricity market are interested in reduction of the losses.

Keywords: losses of electric energy, electric grid company, structure of losses, commercial losses.

CONTENTS

SAVING ENERGY RESOURCES

Semutnikova E. G., Gasho E. G., Loktionov O. A. Energy-ecological modernization of the industrial sector of Moscow: linking of the energy saving and implementation of the best available technologies 2

PROJECTS AND RESEARCH

Kuvshinov A. A., Vakhnina V. V., Chernenko A. N., Pudovinnikov R. N. Reactive load of a synchronous generator at saturation of the magnetic system of a block transformer under the effect of quasi-constant currents 11

Nadtoka I. I., Osadchii P. V., Tropin V. V. Comparison of the power losses in two structures of the distribution electric network of public utilities 20

Egorov M. Yu. Voltage regulator concept for devices with static power supply units 29

Ptitsyna E. V., Ptitsyn D. V., Kuvaldin A. B. Modes of operation of white and red mirror infrared emitters when powered by a current of complex shape 39

Bulanin V. A. Energy analysis of the cogeneration efficiency 46

OPERATION, INSTALLATION AND ADJUSTMENT

Shchemeleva Yu. B., Shchemelev A. N., Davydov S. K. Practical experience in studying the structure of electrical losses 53

Gamazin S. I. (obituary) . . . . . 3-d page of the cover

Продолжается подписка на наш журнал на 2021 г.
Оформить подписку можно через редакцию!
Возможна подписка на электронную версию журнала.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. Н. Абрамович, Ю. В. Балабан-Irменин, М. Я. Басалыгин, М. Г. Баширов, И. В. Белоусенко, В. В. Вахнина, В. А. Вострасаблина, А. В. Волков, Е. Г. Гашо, В. И. Гнатюк, И. Д. Грачев, Н. Ф. Джагаров (Болгария), **В. В. Ивакин** (научный редактор), **Е. Н. Касьянова** (ответственный секретарь), **В. С. Копырин, Ю. В. Матюнина, С. А. Михайлов, Л. А. Новелла** (зам. гл. редактора), **Г. Б. Онищенко, Я. Пихоцки** (Польша), **С. К. Попов** (зам. гл. редактора по теплоэнергетике), **Е. Н. Рыжкова** (зам. гл. редактора по электроэнергетике), **Л. Е. Федоров**, **Э. Харцвельд** (Германия), **К. Ф. Шарафеддин** (Ливан), **А. В. Щербаков**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале “Промышленная энергетика”, допускаются только с разрешения редакции

Адрес редакции: 115280, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корпус 1.
Телефоны: (495) 234-74-49, 234-74-18.
Http://www.promen.energy-journals.ru E-mail: prom_energy@rambler.ru, prom-energe@yandex.ru

Сдано в набор 11.03.2021. Подписано в печать 29.03.2021. Дата выхода в свет 20.04.2021. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 7,0. Тираж 2500 экз. Заказ ПЭ04/21. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ “Энергопрогресс”: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8

Оригинал-макет выполнен в издательстве “ФОЛИУМ”
127411, Москва, Дмитровское ш., 157, тел.: (499) 258-08-28. E-mail: info@folium.ru

Типография издательского дома “ФОЛИУМ”