УДК 621.311

Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий

Б.Н.АБРАМОВИЧ, И.А.БОГДАНОВ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Абрамович Б.Н. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий / Б.Н.Абрамович, И.А.Богданов // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10

Аннотация. В соответствии с Энергетической стратегией до 2035 г. обоснована возможность повышения эффективности использования энергии вторичных энергоресурсов в виде попутного нефтяного и отработанного газов путем повышения коэффициента использования энергии первичного энергоносителя до 90-95 % посредством когенерационных установок с бинарным циклом генерации электроэнергии и тригенерационных систем с использованием энергии отработанного газа для охлаждения потока воздуха на входе газотурбинных установок. Показаны условия поддержания номинальной мощности основного генератора при вариации показателей температуры окружающей среды. Представлена эффективная топология электротехнических комплексов в многоотопливной системе электроснабжения нефтегазовых предприятий по условию надежности, позволяющая увеличить коэффициент готовности на 0,6 %, среднюю наработку на отказ на 33 %, вероятность безотказной работы на 15 % и уменьшить среднее время восстановления системы на 40 %. Рассмотрено применение параллельных активных фильтров для повышения качества электроэнергии и снижения провалов напряжения до 0,1 с при их использовании в автономных электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий. Доказана возможность обеспечения бесперебойного электроснабжения при применении тиристорных систем автоматического ввода резерва. Проведен сравнительный анализ для оценки влияния параллельных активных фильтров и тиристорных систем автоматического ввода резерва на основные показатели надежности систем электроснабжения нефтегазовых предприятий.

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения; вторичные ресурсы; тригенерационный режим; мостиковая топология систем электроснабжения; качество электроэнергии; надежность электроснабжения; параллельные активные фильтры

Введение. Производственные процессы нефтегазовых предприятий (НГП) осуществляются при высоком расходе электроэнергии, оплата за которую может составлять 0,5-0,6 от общих затрат предприятий. Потребители электроэнергии технологических установок НГП в основном относятся к первой и второй категориям по надежности электроснабжения. Установленная мощность электроприемников находится в пределах от сотен киловатт до десятков мегаватт, напряжение на вводе – 6(10) кВ [6]. В соответствии с Энергетической стратегией РФ путем использования вторичных энергоресурсов должно быть сокращено использование первичного энергоносителя при производстве электроэнергии для собственных нужд промышленных предприятий [14, 21].

В условиях НГП вторичными энергоресурсами являются попутный нефтяной и отработанный газы газотурбинных установок (ГТУ), обуславливающие значительные повышения энергоэффективности процессов добычи, транспортировки и переработки нефти и газа путем генерации электроэнергии автономными электростанциями в режимах когенерации, бинарного цикла и тригенерации, а также с помощью усовершенствования технологических и электротехнических объектов предприятий НГП.

Современные электрогенерирующие установки имеют КПД, не превышающий 42 %. Коэффициент использования потенциала первичного энергоносителя при такой работе составляет 0,4 [16]. Эффективность использования вторичных энергоресурсов может быть повышена в режиме когенерации. Однако в условиях НГП, как правило, отсутствуют значительные потребители тепловой энергии. Процесс генерации электроэнергии в бинарном режиме может протекать с коэффициентом использования вторичных энергоресурсов до 70 % [33]. В таких установках должны присутствовать основной и второстепенный, разнородные по физическим свойствам, генераторные установки, что препятствует организации их устойчивой параллельной работы [32].

Постановка проблемы. Энергоэффективность генерации электроэнергии в тригенерационном режиме достигается путем использования энергии вторичных энергоресурсов для охлаждения воздуха окружающей среды и подачи его на вход турбогенераторной установки. Это позволит при

соответствующем автоматическом управлении, снизить установленную мощность турбогенератора, обеспечив постоянство мощности на выходе генератора при вариации температуры окружающей среды от -40 до 40 °С.

Технологические установки добычи нефти высокочувствительны к качеству электроэнергии. Провалы напряжения на 0,15 с могут привести к остановке добычных электродвигателей и нарушению технологических процессов, восстановление которых потребует 30 мин и более. Ввиду необоснованного применения упрощенной топологии распределительных устройств напряжением 6(10) кВ и 0,4 кВ в условиях НГП происходит до 10 отказов в год, что приводит к значительному экономическому ущербу. Снижение длительности перерывов электроснабжения может быть достигнуто путем введения в состав системы электроснабжения устройств быстродействующего автоматического ввода резерва и секционирования участков электрических сетей с использованием средств силовой электроники и электросетевой автоматики. Однако рекомендации по обоснованию и выбору схмотехнических решений и параметров многоуровневой системы электроснабжения с использованием указанных средств отсутствуют. Выбор топологии электротехнических комплексов с различными уровнями напряжения и многосвязными системами электроснабжения должен производиться из условий обеспечения бесперебойности электроснабжения потребителей и достижения технически и экономически обоснованных показателей надежности. Для оптимизации технологических процессов и энергосбережения широко внедряются преобразователи частоты, что усложняет задачу обеспечения качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013.

Методология. Режим тригенерации как эффективное средство поддержания мощности на выходе турбогенератора независимо от температуры окружающей среды. В статье наиболее важным рассматриваемым потребителем энергии холода является ГТУ. Согласно техническим характеристикам работы ГТУ, мощность на выходе генератора может варьироваться в зависимости от температуры воздуха окружающей среды в пределах 40 % (рис.1): при росте температуры от 15 до 40 °С выходная мощность ГТУ снижается на 25-28 % [2], а удельный расход топлива повышается до 8 %.

Применение тригенерационного режима энергоснабжения позволяет достигнуть коэффициента использования энергии первичного энергоносителя до 90-95 % и вместе с этим эффективно использовать генерируемую тепловую энергию [4, 11, 24].

Температура воздуха окружающей среды может меняться более чем на 20 % в течение дня. Для эффективной работы тригенерационной системы необходимо поддерживать постоянство температуры на входе в ГТУ путем оперативного регулирования процессами теплообмена в компрессорной воздухоочистительной установке [29]. Остаточный потенциал энергии вторичных ресурсов на выходе из ГТУ может обеспечить производственные процессы и бытовые нужды НГП высокотемпературной энергией и энергией холода. С использованием передаточной функции процесса теплообмена [3] и модели системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения [20, 31] дана оценка возможности поддержания мощности на выходе турбогенератора при изменении температуры окружающей среды T_1 от 10 до 40 °С (рис.2, а) и относительной влажности от 0 до 100 % по синусоидальной зависимости от времени. В результате проведенных исследований [9] получена зависимость температуры T_2 от времени, поступающей на вход системы воздухоподдачи турбогенератора, подтверждающая возможность поддержания температуры $T_2 = 15$ °С на входе ГТУ при вариации параметров окружающей среды в указанных выше пределах и, как следствие, возможность снижения установленной мощности на 25 %. Без охлаждения, подаваемого на вход турбогенератора, установленную мощность ГТУ следовало бы принять равной 1,25 от расчетной мощности генератора.

Рис. 1. Зависимость показателей выходной мощности (1) и удельного расхода топлива (2) от температуры окружающей среды

Рис.2. Зависимости температур воздуха окружающей среды (а) и воздуха на входе в ГТУ (б) от времени

Рис.3. Разделенная (а) и мостиковая (б) силовые структуры

G1, G2 – генераторы автономного электротехнического комплекса НГП; QF1, QF2, QF3 – секционные выключатели секций высокого напряжения, КТП Компрессорного цеха и КТП собственных нужд соответственно;
Q1-Q10 – высоковольтные выключатели 10 кВ в ЗРУ 10 кВ; T1-T6 – трансформаторы 10/0,4 кВ

Обоснование эффективной топологии электротехнических комплексов в многосвязной системе электроснабжения НГП по условию надежности. В системах электроснабжения НГП применяется топология распределения электроэнергии с использованием одинарной и разделенной сборных шин [13]. С учетом результатов сбора данных на объектах нефтегазодобывающего управления (НГДУ) наработка на отказ такой топологии может быть оценена в 15000-16000 ч, а время восстановления – 16 ч и более [22, 26]. Для выбора более оптимальной топологии была проведена сравнительная оценка надежности разделенной и мостиковой силовых структур (рис.3) [28].

Использование мостиковой структуры повышает надежность резервирования питания низковольтной нагрузки в случае отказа секционного выключателя на стороне 10 кВ или недостаточного быстродействия релейной защиты. В традиционных структурах (рис.3, а) не всегда предусматривается автоматическое секционирование особо ответственных потребителей низкого напряжения.

Для сравнительной оценки показателей надежности топологии системы электроснабжения КС было смоделировано влияние отдельных составляющих компонентов на результирующие показатели надежности структуры, использован логико-вероятностный метод и построена схема функциональной целостности (СФЦ). Логико-вероятностный метод – метод расчета надежности сложных технических систем, при котором их структурная модель описывается средствами математической логики, а количественная оценка надежности производится с помощью теории вероятностей. Для входа в программу моделирования составлялись СФЦ в соответствии с реальной топологией структуры электротехнического комплекса НГП. Показатели надежности структур с восстанавливаемыми элементами определялись в предположении об экспоненциальном распределении времени наработки на отказ и восстановления системы с использованием ПК АРБИТР [15]. Схема функциональной целостности с указанием параметров составляющих компонентов, представленных в таблице, структуры с одинарной разделенной системой сборных шин показана на рис.4, а, мостиковой структуры на рис.4, б.

Состав элементов СЭС и параметры их надежности

Номер элемента	Тип элемента	$T_{ос}$, год	$T_{вс}$, ч
1, 5	Генераторы	0,214	0,5
2, 6-12	Выключатели	45,5	11
3, 4	Секции сборных шин	33	7
13-18	Трансформаторы	71,4	70
19-24	Автоматические выключатели	20	4
25	Секционные выключатели 10 кВ	45,5	11
27, 28	Секционные выключатели 0,4 кВ	20	4

На рис.4, а и б стрелками обозначены связи элементов, соответствующие логическому «ИЛИ» с указанием направления потока электроэнергии. Элементом 26 обозначена функция системы, заключающаяся в одновременном электроснабжении всех электроприемников НПП, которая имеет связи с остальными элементами, соответствующими логическому «И».

При применении мостиковой структуры коэффициент готовности системы ($K_{гс}$) увеличивается на 0,6 % (с 0,9989 до 0,9995), среднее время восстановления системы ($T_{вс}$) уменьшается на 40 % (с 15,5 до 9,41 ч), средняя наработка на отказ ($T_{ос}$) увеличивается на 33 % (с 15170 (1,732 г.) до 20250 (2,312 г.) ч), вероятность безотказной работы ($P_{вс}$) увеличивается на 15 % (с 0,5612 до 0,6488). Полученные результаты позволили рекомендовать к применению в автономных ЭТК НПП топологии с мостиковыми структурами на стороне 6(10) и 0,4 кВ.

Теперь при аварийном останове электростанции технологическое оборудование без перерыва в электроснабжении продолжило работу, а оставшая нагрузка ступенчато переведена на оставшийся в работе агрегат по напряжению 0,4 кВ с кратковременной потерей питания.

Обеспечение качества электроэнергии и бесперебойности электроснабжения в ЭТК НПП. Параллельный активный фильтр как средство повышения качества электрической энергии на шинах электрических комплексов НПП. Помимо длительных провалов напряжения из-за остановов генераторов необходимо исключить влияние краткосрочных провалов и искажений напряжений, связанных в нефтегазовой промышленности, как правило, с резким увеличением нагрузки при пусках мощных синхронных электродвигателей буровых или насосных установок систем поддержания давления углеродного сырья, а также в аварийных режимах, в особенности при возникновении коротких замыканий [17, 18].

На рис.5, а представлена структура системы автономного электроснабжения на основе источников распределенной генерации, в которую интегрирован параллельный активный фильтр (ПАФ), реализующий несколько функций по качественному и бесперебойному электроснабжению наиболее ответственных технологических потребителей минерально-сырьевого комплекса.

Наиболее ответственные технологические потребители получают питание от двух автономных источников Г1 и Г2, электротехнический комплекс каждого из которых оснащен силовыми

Рис.4. СФЦ и параметры компонентов структуры с разделенными секциями сборных шин (а) и мостиковой структуры (б)

Рис.5. Структура системы автономного электроснабжения на основе источников распределенной генерации с ПАФ (а) и структура ПАФ (б)

преобразователями СП1 и СП2 с выпрямителями и инверторами рис.5, а. Источники Г1 и Г2 подключаются к двум секциям шин, питающих ответственных потребителей через автоматические выключатели QF1 и QF2. Обе секции шин соединяются между собой секционным выключателем QF3, который в обычном режиме разомкнут. В случае отказа, возникающем в каком-либо из двух источников, срабатывает секционный выключатель QF3. При этом вся ответственная нагрузка подключается к одному автономному источнику, что обуславливает возникновение существенных отклонений напряжения на шинах (уровень отклонения может не соответствовать нормам ГОСТ 32144-2013). В условиях автономных энергосистем ограниченной мощности любой сброс или наброс нагрузки оказывает существенное влияние на режим напряжения. Известны исследования [1, 23], в которых показано, что среди технологических потребителей минерально-сырьевого комплекса существует нагрузка крайне чувствительная к провалам и отклонениям напряжения. Исходя из указанных причин, структура, представленная на рис.5, а, содержит ПАФ, который реализует следующие функции: подавление высших гармоник тока и напряжения, компенсация провалов и отклонений напряжения, бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей на время безаварийного завершения технологического процесса. Структура ПАФ в этом случае имеет вид, представленный на рис.5, б. Работа активного фильтра описывается следующими основными уравнениями:

$$U_k = kI_c; \quad k_{тр} = \frac{U_k}{U_{C\phi}}; \quad U_{инв} = L_\phi \frac{dI_\phi}{dt} + U_{C\phi}; \quad U_{инв} = k_i U_{dc},$$

где U_k – компенсационное напряжение; k – коэффициент, зависящий от мощности выходного трансформатора; I_c – ток компенсируемой цепи; $k_{тр}$ – коэффициент трансформации выходного трансформатора; $U_{C\phi}$ – напряжение на емкости выходного пассивного фильтра; L_ϕ , C_ϕ – параметры пассивного фильтра на выходе инвертора; dI_ϕ – приращение тока пассивного фильтра на выходе инвертора; k_i – функция состояния силовых ключей инвертора; $U_{инв}$ – напряжение на выходе инвертора; U_{dc} – напряжение на накопительном конденсаторе инвертора.

При срабатывании автоматического выключателя QF3 одновременно включаются выключатели QF4 и QF5 и ПАФ, посредством вольтодобавочного трансформатора Т, осуществляет поддержание напряжения на шинах в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013, а также исходя из уровня устойчивости отдельных видов электрооборудования к провалам и отклонениям напряжения. Накопительный конденсатор ПАФ заряжает двумя способами: при непосредственной компенсации высших гармоник тока и напряжения [25, 30], а также с помощью звеньев постоянного тока электротехнических комплексов источников Г1 и Г2 при включении автоматических выключателей QF6 и QF7. Принцип совмещения звеньев постоянного тока активных фильтров с другими элементами при их незначительном удалении друг от друга также описан и обоснован [25, 34]. Учитывая достаточно высокую стоимость активного фильтра, целесообразно его использование в первую очередь как многофункционального устройства, особенно в условиях автономных энергосистем распределенной генерации.

При включении автоматических выключателей QF5, QF8 и отключении выключателя QF4, ПАФ выполняет функцию компенсации высших гармоник тока и напряжения. При отключении выключателя QF8 и включении QF4 и QF9, ПАФ реализует функцию источника бесперебойного питания или динамического компенсатора отклонений и провалов напряжения на время безаварийного завершения технологического процесса или перехода электроснабжения с одного автономного источника на другой.

В соответствии с рис.5, а построена имитационная модель в среде MATLAB Simulink [7, 8, 10]. По результатам моделирования получена осциллограмма напряжения на шинах ответственных потребителей при вводе в работу второго источника из-за отказа исходного источника, когда активный фильтр реализует функцию динамического компенсатора провалов и отклонений напряжения (рис.6).

Результаты имитационного моделирования показали возможность ПАФ компенсировать кратковременные отклонения напряжения, возникающие при секционировании источников питания в аварийных режимах [30]. При переходе отклонения напряжения в провал при неудачном или длительном секционировании необходимо применить устройства динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН), в составе которых имеются вольтодобавочные трансформаторы, способные компенсировать провалы напряжения заданной глубины и длительности, в отличие от ПАФ, основное назначение которых – компенсация высших гармоник тока и напряжения [19]. Таким образом, в зависимости от уровня качества электроэнергии и режима секционирования источников питания в аварийных режимах предложенная структура системы автономного электроснабжения на основе источников распределенной генерации может содержать в своем составе ПАФ или ДКИН [1]. При этом по результатам исследований установлено, что при применении ПАФ в режиме ДКИН возможны бестоковые паузы до 0,1 с.

При всех своих достоинствах ДКИН не позволяют полностью исключить бестоковые паузы из-за фиксированного времени поддержания заданного уровня напряжения в линии, на которое рассчитаны определенные модификации ДКИН. При истечении данного времени требуется перезаряд накопительных элементов ДКИН, что влечет за собой провалы напряжения при неудачном секционировании источников. Ограничение перерывов электроснабжения в сетях 6(10) кВ и исключение бестоковой паузы может осуществляться с помощью тиристорных быстродействующих устройств автоматического ввода резерва (ТАВР), в которых секционный выключатель для ускорения действия ввода резерва шунтируется встречно-параллельно включенными тиристорами, что позволяет исключить бестоковую паузу.

ТАВР состоит из двух основных частей: тиристорного коммутатора и модуля управления. Тиристорный коммутатор включается параллельно секционному выключателю и за счет быстрого действия способствует ускоренному объединению секций шин. Модуль управления выявляет аварийные ситуации в работе распределительного устройства и формирует команды на управление тиристорного коммутатора вводными и секционными выключателями.

Принципиальные особенности ТАВР: время определения неисправного ввода – 0,034 с после отключения ввода; практически синхронное переключение электродвигателей неисправной секции сборных шин на исправную секцию с углом фазового рассогласования менее 19° эл.; провал напряжения на неисправной секции сборных шин до 0,85 от номинального; отсутствие переходного процесса у переключаемых электродвигателей; сохранение поля возбуждения у синхронных электродвигателей.

Рис.6. Осциллограмма напряжения на шинах ответственных потребителей

Рис.7. СФЦ мостиковой структуры с применением ПАФ и ТАВР

В настоящее время не существует других устройств подобного типа, способных провести переключение электродвигателей с неисправной секции сборных шин на исправную с подобными ТАВР параметрами [5, 12, 27].

Моделирование и расчет надежности в СФЦ системы электроснабжения с применением ПАФ и ТАВР в ПК АРБИТР. Выполнена оценка надежности мостиковой структуры автономных электротехнических комплексов НГП с включением в их состав ПАФ и ТАВР логико-вероятностным методом. Схема структурно-функциональной целостности автономных электротехнических комплексов с ПАФ и ТАВР приведена на рис.7.

В схеме ПАФ и ТАВР обозначены как элементы 29 и 30 соответственно. По результатам логико-вероятностного моделирования с использованием ПК АРБИТР получены следующие показатели надежности системы электроснабжения: $K_{гс} = 0,9995$; $T_{вс} = 9,41$ ч; $T_{ос} = 20250$ ч (2,31 г.); $P_{вс}$ за год – 0,6488. В результате сравнительного анализа установлено, что внедрение в систему электроснабжения ПАФ и ТАВР не приводит к значительному изменению показателей надежности автономного электротехнического комплекса НГП.

Обсуждение. Проведенные исследования показали возможность эффективного использования первичного энергоносителя путем использования вторичных энергоресурсов, что соответствует современным энергетическим задачам. Этого можно достигнуть путем применения тригенерационного режима с циклом охлаждения турбогенератора для поддержания номинального режима работы в условиях эксплуатации при высоких температурах окружающей среды и расположении свыше 1000 м над уровнем моря. При этом возможно применение когенерационного режима работы с бинарным циклом, однако данный метод имеет ряд недостатков, среди которых – необходимость создания системы синхронизации разнородных генераторов основной и вспомогательной электроустановки.

Для повышения надежности и обеспечения бесперебойности объектов нефтегазовой промышленности, относящихся к 1-2 категориям надежности, согласно исследованиям, целесообразным считается применение мостиковой структуры электроснабжения с внедрением многофункционального активного фильтра, с возможностью функционирования в режимах динамической компенсации провалов и искажений напряжений, а также компенсации гармоник тока совместно с ТАВР, обеспечивающего бесперебойное подключение питания между секциями шин.

Результаты проведенных исследований на примере конкретной структуры системы электроснабжения показали возможность использования активного фильтра в качестве многофункционального устройства управления показателями качества электроэнергии и режимом энергообеспечения. Во многих отечественных и зарубежных научных публикациях активные фильтры рассматриваются в основном, как устройство повышения качества электроэнергии. В рамках систем комбинированного электроснабжения, функционирующих на основе параллельной работы централизованных и автономных источников, активные фильтры должны рассматриваться именно как многофункциональные устройства.

Закключение. Обоснована возможность повышения эффективности использования энергии вторичных энергоресурсов в виде попутного нефтяного и отработанного газов посредством когенерационных установок с бинарным циклом генерации электроэнергии и тригенерационных систем с использованием энергии отработанного газа для охлаждения потока воздуха на входе ГТУ. Доказана возможность стабилизации температуры на входе тригенерационной системы на уровне 15 °С независимо от параметров окружающей среды, что позволяет уменьшить установленную мощность турбогенераторной установки до 25 % при использовании их на энергетических объектах НГП практически во всех климатических зонах РФ.

Доказано, что в многосвязных системах электроснабжения НГП условию повышения надежности на стороне 6(10) кВ целесообразно применять мостиковые схемы коммутации оборудования. Мостиковые структуры повышают коэффициент готовности на 0,6 %, среднюю наработку на отказ на 33 %, вероятность безотказной работы на 15 %, снижают среднее время восстановления на 40 %.

Показана возможность использования ПАФ в качестве технического средства повышения качества электроэнергии по уровню высших гармоник в системе автономного электроснабжения на основе источников распределенной генерации. Также ПАФ могут применяться для компенсации небольших отклонений напряжения, возникающих при резервировании источников электроснабжения, длительностью до 0,1 с. Ограничение перерывов электроснабжения в сетях 6(10) кВ и исключение бестоковой паузы может осуществляться с помощью ТАВР, в которых секционный выключатель шунтируется встречно-параллельно включенными тиристорами для ускорения действия ввода резерва и минимизации бестоковой паузы. В результате сравнительного анализа установлено, что внедрение в систему электроснабжения ПАФ и ТАВР не приводит к снижению показателей надежности автономного электротехнического комплекса НГП по сравнению с традиционными топологиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
2. Алексиков А.И. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб: Университет ИТМО, 2015. Т. 1. С. 19-25.
3. Алимов С.В. Передаточные функции процесса теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла / С.В.Алимов, Л.А.Мигачева, А.Р.Титов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2012. № 4 (36). С. 198-205.
4. Анисимов С.Н. Повышение производительности ГТУ при высоких температурах наружного воздуха / С.Н.Анисимов, Д.Е.Круговых, Д.С.Молодкин // Турбины и дизели. 2013. № 6 (51). С. 34-41.
5. Аптекарь Д.И. Управление аварийной ситуацией для снижения потерь при добыче нефти / Д.И.Аптекарь, Э.Х.Муратбаев // Нефтяное хозяйство. 2010. № 5. С. 124-126.
6. Вероятностные характеристики энергопотребления нефтегазодобывающих предприятий / Д.А.Устинов, Ю.В.Коновалов, И.Г.Плотников, А.В.Турышева // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Естественные и инженерные науки. 2011. № 4 (135). С. 90-94.
7. Герман-Галкин С. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink. Урок 19. Переходные процессы в параллельном активном фильтре // Силовая электроника. 2015. Т. 2. № 53. С. 90-95.
8. Герман-Галкин С. Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink. Урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром // Силовая электроника. 2013. Т. 1. № 40. С. 80-86.
9. Маларев В.И. Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии / В.И.Маларев, И.А.Богданов, А.В.Турышева // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 21-27. DOI: 10.34831/EP.2020.66.67.001
10. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н.Портнягин, М.С.Ершов, П.Ю.Барбасов, М.Ю.Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 1. С. 61-66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66
11. Моренов В.А. Повышение эффективности энергоснабжения объектов нефтегазопромыслов с использованием попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. 22 с.
12. Муратбаев Э.Х. Обоснование структуры и параметров многоуровневой системы электроснабжения объектов нефтедобычи с секционированием участков электрической сети: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2009. 21 с.
13. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности / И.В.Белюсенко, Г.Р.Шварц, С.Н.Великий и др. М.: Недра, 2007. 478 с.
14. Пашкевич Н.В. Россия на мировых рынках минерального сырья: запасы, добыча, экспорт / Н.В.Пашкевич, Л.И.Исеева, А.А.Федченко // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 60-64.
15. Петров С.П. Применение логико-вероятностного метода моделирования для расчета надежности систем электроснабжения / С.П.Петров, С.В.Бабуринов, Д.А.Устинов // Наука и техника в газовой промышленности. 2011. № 3 (47). С. 47-51.
16. Полищук В.В. Когенерационная установка с бинарным циклом для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий / В.В.Полищук, В.А.Моренов, А.Н.Касьянова // Естественные и технические науки. 2015. № 5 (83). С. 102-105.

17. Проблемы компенсации высших гармоник тока и напряжения в условиях распределенной генерации / Ю.А.Сычев, П.А.Кузнецов, Р.Ю.Зимин, Я.А.Соловьева // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 216-228.
18. Розанов Ю.К. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя / Ю.К.Розанов, М.Г.Лепанов, М.Г.Киселев // Электротехника. 2014. № 8. С. 51-59.
19. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб: Политехника, 2012. 248 с.
20. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018616011 РФ. Имитационная модель системы тригенерации с бинарным циклом для повышения эффективности использования первичного энергоносителя / Б.Н.Абрамович, И.А.Богданов, В.И.Маларев. Заяв. 26.03.2018. Оpubл. 21.05.2018.
21. Тенденции развития энергетических систем газораспределительных станций / В.К.Аверьянов, О.А.Давыдов, А.Н.Блинов, С.М.Анисимов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 122-130. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-16-2-122-130
22. Токарев И.С. Обеспечение устойчивости работы автономных систем электроснабжения газокomppressorных станций / И.С.Токарев, Ю.В.Хрущев // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: Сб. науч. трудов VII Международной научной конференции молодых ученых, 09-12 июня, 2015, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2015. С. 177-181.
23. Федоров А.В. Применение ИБП в энергетических установках технологических объектов нефтегазовой отрасли / А.В.Федоров, А.Н.Махалин, С.В.Бабуринов // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 2 (58). С. 69-73.
24. Фирсова Е.В. Тригенерационные источники энергии малой и средней мощности / Е.В.Фирсова, Н.Д.Чичирова, В.Ю.Соколов // Промышленная энергетика. 2017. № 4. С. 17-24.
25. Хабибуллин М.М. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока / М.М.Хабибуллин, В.Н.Мещеряков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 7. С. 26-33.
26. Хрущев Ю.В. Разработка технических решений для повышения устойчивости и надежности работы электростанции собственных нужд головной газокomppressorной станции «Сахалин» / Ю.В.Хрущев, И.С.Токарев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 3. С. 77-82.
27. Baburin S.V. Dependence of power supply systems reliability on the type of redundancy / S.V.Baburin, V.O.Zyrin, M.S.Kovalchuk // International Scientific Electric Power Conference 2019 (ISEPC 2019), 23-24 May, 2019, St. Petersburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643. № 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012134/
28. Costabeber A. Selective compensation of reactive, unbalance, and distortion power in smart grids by synergistic control of distributed switching power interfaces / A.Costabeber, P.Tenti, T.Caldognetto, E.Verri Liberado // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2013), 2-6 September, 2013, Lille, France. IEEE, 2013. Vol. 1. P. 1-9.
29. Lokurlu A. Solar Trigeneration: Electricity, Cooling and Steam from the Sun / A.Lokurlu, K.Saidi // Towards 100 % Renewable Energy. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham, 2017. P. 87-94. DOI: 10.1007/978-3-319-45659-1_8
30. Sychev Y. The assessment of the series active filter efficiency in power supply systems of oil production enterprises / Y.Sychev, R.Zimin, M.Aladin // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019), 19-20 November, 2019, St. Petersburg, Russian Federation. E3S Web of Conferences, 2019. Vol. 140. № 04003. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004003
31. The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel / B.N.Abramovich, I.A.Bogdanov, A.V.Kopteva, V.I.Malarev // International Scientific Electric Power Conference 2019 (ISEPC 2019), 23-24 May, 2019, St. Petersburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643. № 012092. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012092
32. Tokarev I.S. Solutions to Improving the Self-Contained Power Supply to the Gas Industry Facilities when Operating Gas Turbine Power Plants in the Binary Cycle and Trigeneration Modes / I.S.Tokarev, I.A.Bogdanov, V.A.Serikov // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 6-9 October, 2020, Vladivostok, Russian Federation. IEEE, 2020. № 20256187. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271596
33. Turyshcheva A.V. Improving energy performance of the oil and gas industry by applying technologies for the use of associated petroleum gas / A.V.Turyshcheva, Y.V.Gulkov, A.V.Krivenko // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. CRC Press, 2019. P. 442-447. DOI: 10.1201/9781003014577-56
34. Veprikov A.A. Problems of operating industrial DC power sources in parallel connection / A.A.Veprikov, A.A.Glukhov // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 27-30 January, 2020, St. Petersburg and Moscow, Russian Federation. IEEE, 2020. № 19472016. P. 1339-1343. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038928

Авторы: **Б.Н.Абрамович**, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **И.А.Богданов**, аспирант, s175106@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8847-3352> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021.

Статья принята к публикации 26.05.2021.