

## Повышение качества электроэнергии путем регулирования вентильных генераторов\*

М.Ю. НИКОЛАЕВ<sup>1,a</sup>, В.В. МАКАРОВ<sup>1,b</sup>, В.О. КРОПОТИН<sup>1,c</sup>,  
А.С. ГРИЦАЙ<sup>1,d</sup>, А.В. ГААК<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup> 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет

<sup>2</sup> 644050, Россия, г. Москва, Погорельский пер., 7, стр. 2, АО «Объединенная теплоэнергетическая компания»

<sup>a</sup> [munp@yandex.ru](mailto:munp@yandex.ru) <sup>b</sup> [kosmos070969@mail.ru](mailto:kosmos070969@mail.ru) <sup>c</sup> [kropotin\\_vl@mail.ru](mailto:kropotin_vl@mail.ru)

<sup>d</sup> [aleksandr.gritsay@gmail.com](mailto:aleksandr.gritsay@gmail.com) <sup>e</sup> [vti2016@gmail.com](mailto:vti2016@gmail.com)

Компрессорный цех с группой газоперекачивающих агрегатов является основным технологическим объектом компрессорной станции. На компрессорной станции может быть несколько таких цехов с различными типами агрегатов. Обычно число цехов на компрессорных станциях соответствует числу ниток магистрального газопровода, которые подходят к станции. В технологическом процессе по мере прокладки новых ниток газопровода на компрессорной станции также предусматривается строительство новых цехов. При активной добыче в течение некоторого промежутка времени месторождение газа истощается и снижается дебет его скважин, уменьшаются объемы транспортируемого по магистрали газа, что приводит к необходимости изменения режимов работы имеющихся газоперекачивающих агрегатов. Поскольку транспортировка природного газа по магистральным газопроводам приводит к снижению давления газа, на газопроводе устанавливаются высокотехнологичные турбины, поддерживающие необходимое давление. Однако для работы таких турбин требуется электроэнергия соответствующего качества. Актуальность исследований обусловлена происходящей технологической революцией, связанной с оцифровкой окружающего мира. Использование многочисленных датчиков в электротехнических системах ведет к повышению требований к качеству электроэнергии в электрической сети. Увеличение количества анализируемых данных ведет к принципиально новому развитию электроэнергетического комплекса. Предиктивная аналитика повышает время бесперебойной работы оборудования, способствует росту ресурсосберегающих технологий и минимизирует потери напряжения в сетях питания газоперекачивающих агрегатов, а также затраты на их обслуживание. Существует достаточно большое количество вариантов обеспечения надлежащего качества электроэнергии [1]. В настоящей работе предлагается схмотехническое решение, базирующееся на использовании таких элементов, как преобразователь частоты, выпрямитель, фильтр и инвертор. Также в работе исследовано влияние этих устройств и их режимов работы на перекачку газа с помощью газоперекачивающего агрегата.

**Ключевые слова:** вентильные генераторы, газоперекачивающий агрегат, компрессорный цех, стабилизация напряжения, регулирование работы, умная сеть, микрогрид, напряжение, энергосистема

---

\* Статья получена 11 мая 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В России газовая промышленность является одной из ведущих и динамично развивающихся отраслей народного хозяйства. Специфика этой отрасли заключается в том, что месторождения находятся от потребителей на достаточно больших расстояниях, и требуется обеспечить передачу газа по магистральному газопроводу (МГ). Это накладывает определенные ограничения, поскольку в виду гидравлического сопротивления магистрального трубопровода происходит уменьшение давления газа [2, 3]. Для поддержания требуемого давления в магистрали производится его компримирование в компрессорных цехах (КЦ), которые сооружаются непосредственно на трассе газопровода. По сути КЦ является изолированной микроэнергосистемой.

В процессе эксплуатации магистрального газопровода режим компримирования газа необходимо регулировать. Наиболее актуальным является сезонное регулирование. Так, например, летом при повышении температуры окружающего воздуха мощность, вырабатываемая газовой турбиной, падает, поэтому требуется понизить и мощность, потребляемую нагнетателем.

С одной стороны, для оптимизации режима работы газопровода требуется регулировка работы компрессоров для обеспечения наиболее эффективной работы с точки зрения затрат и экологических норм; с другой стороны, происходит стабилизация напряжения, вырабатываемого генератором, который использует энергию для собственных нужд газоперекачивающей станции. Вопросы управления режимами компрессоров являются актуальными и исследуются во многих странах мира, включая Россию.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлено схематическое решение системы стабилизации напряжения. При изменении режима работы турбины 1 возникает необходимость обеспечения заданного качества электрической энергии [1], используемой для работы электроприемников газоперекачивающего агрегата (ГПА) [4]. В этом случае обеспечение качества электроэнергии поддерживается стабилизацией выходного напряжения вентильного генератора 2.

Для регулирования напряжения на зажимах вентильного генератора используется система возбуждения 3. С целью поддержания необходимого напряжения на зажимах генератора в схеме используется система управления генератором 5, в которой применяются датчик напряжения 4 и система возбуждения 3. Информация о выходном уровне напряжения фиксируется датчиком и переходит в систему управления генератором для сравнения с необходимым значением уровня напряжения. Обработанный сигнал управляет системой возбуждения синхронного генератора (СГ) и поддерживает уровень напряжения в заданных пределах.

Цель исследования – уменьшение пределов допустимого отклонения напряжения с помощью стабилизации выходного напряжения и использования схематического решения на основе вентильного генератора. Объектом исследования являются компрессорные цеха, газоперекачивающие агрегаты, вентильные генераторы и комплекс стабилизирующего напряжение оборудования.

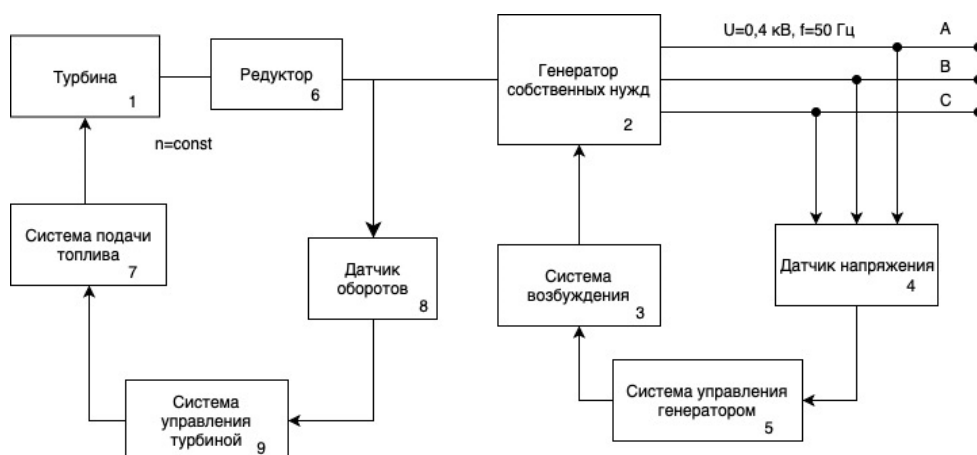


Рис. 1. Функциональная схема электрической части турбины:

1 – турбина, 2 – генератор собственных нужд, 3 – система возбуждения, 4 – датчик напряжения, 5 – система управления генератором, 6 – редуктор, 7 – система подачи топлива, 8 – датчик оборотов, 9 – система управления турбиной

Fig. 1. A functional diagram of the turbine electric part:

1 is a turbine, 2 is a house generator, 3 is an excitation system, 4 is a voltage sensing device, 5 is a generator control system, 6 is a reduction unit, 7 is a fuel feeding system, 8 is a rpm sensor, 9 is a turbine control system

## 2. ТЕОРИЯ

На практике регулирование режимов работы нагнетателя осуществляется путем изменения частоты вращения силового вала газовой турбины в диапазоне 70...105 %. При изменении частоты вращения вала также меняется значение электродвижущей силы (ЭДС) вентильного генератора, в связи с чем возникает задача обеспечения заданного качества электрической энергии [1], используемой для работы электроприемников ГПА. Подобная задача уже решалась ранее [5]. Авторами была разработана микропроцессорная система управления в сочетании со статическим компенсатором реактивной мощности для регулирования и стабилизации напряжения в электроэнергетической системе на заданном уровне. Однако такое решение имело ограничение – зависимость от типа и величины нагрузки. Поэтому для устранения этого ограничения и улучшения качества электроэнергии было проведено исследование в программном комплексе MATLAB, в котором на основе исследования было подтверждено, что стабилизация возможна путем поддержания индуктивности намагничивающего контура на постоянном уровне [6].

В [7] предлагалось другое схемотехническое решение повышения качества стабилизации в стабилизаторах напряжения. Однако использовать такое решение возможно лишь в сетях постоянного тока, что значительно сужает его область применения.

Кроме того, ранее были также предложены подходы к регулированию уровня напряжения, основанные на двухэтапной архитектуре с событийным управлением [8], с учетом характеристик инверторов и обычных устройств, таких как устройства регулирования под нагрузкой (РПН) и банки шунтирующих конденсаторов. Механизм запуска событий использовался для быстрого

го реагирования на большие отклонения уровня напряжения с целью уменьшения количества необходимых управляющих воздействий. Интеграция управления напряжением на базе инвертора в предлагаемой двухступенчатой архитектуре позволила обеспечить быстрый и непрерывный отклик на отклонения уровня напряжения. Данный метод позволил дополнительно уменьшить количество срабатываний коммутационного оборудования в процессе контроля уровня напряжения.

Для поддержания заданных параметров частоты и напряжения на зажимах вентильного генератора может быть предложена схема, которая позволяет работать ГПА с переменной частотой вращения турбины (рис. 2). На выходе СГ 1 установлен выпрямитель 2, который преобразует электрическую энергию переменного тока в постоянный ток. Для выравнивания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя применен сглаживающий фильтр 3.

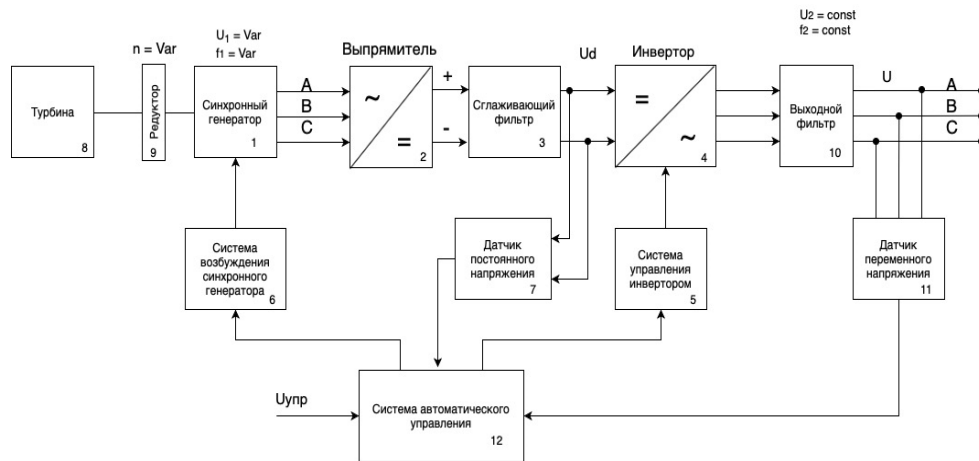


Рис. 2. Функциональная схема системы стабилизации напряжения:

1 – синхронный генератор, 2 – выпрямитель, 3 – сглаживающий фильтр, 4 – инвертор, 5 – система управления инвертором, 6 – система возбуждения синхронного генератора, 7 – датчик постоянного напряжения, 8 – турбина, 9 – редуктор, 10 – выходной фильтр, 11 – датчик переменного напряжения, 12 – система автоматического управления

Fig. 2. A functional diagram of the voltage stabilization system:

1 is a synchronous generator, 2 is a rectifier, 3 is a smoothing filter, 4 is an inverter, 5 is an inverter control system, 6 is a synchronous generator excitation system, 7 is a dc voltage sensor, 8 is a turbine, 9 is a reduction unit, 10 is an output filter, 11 is a ac voltage sensor, 12 is an automatic control system

Постоянное напряжение  $U_d$  с помощью инвертора 4 преобразуется в трехфазное переменное напряжение. Частота  $f_2$  и величина  $U_2$  этого напряжения задаются системой управления инвертором 5. Для обеспечения качества электрической энергии на электроприемниках ГПА необходимо поддерживать в заданных пределах значения частоты  $f_2$  и величины напряжения  $U_2$  при возможных вариациях частоты  $f_1$  и величины напряжения  $U_1$  на выходе СГ. Решение поставленной задачи осуществляет система автоматического управления, которая на основе информации о величинах постоянного напряжения  $U_d$  и переменного напряжения  $U_2$  вырабатывает управляющие

воздействия для системы возбуждения синхронного генератора 6 и системы управления инвертором 5. Частота  $f_2$  выходного напряжения в предлагаемой системе не зависит от параметров нагрузки. В работах [9–11] уже предлагалось адаптивное регулирование мощности через регулирование частоты, но в предлагаемых решениях основная проблема состоит в зависимости частоты выходного напряжения от потребляемой мощности, что не позволяет использовать эту схему в промышленных масштабах.

Номинальные данные СГ компании MarelliMotori, используемого в данном схемотехническом решении, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

### Параметры синхронного генератора

#### Synchronous generator parameters

Номинальная мощность, кВА	Напряжение $U$ , В $U$ , V	Ток $I$ , А $I$ , A	Частота $f$ , Гц $f$ , Hz	Количество оборотов $n$ , об/мин $n$ , rev/min	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	Напряжение возбуждения $U_B$ , В $U_e$ , V	Ток возбуждения $I_B$ , А $I_e$ , A	Масса $m$ , кг $m$ , kg
300	380	456	50	1500	0,8	14	3,5	1450

Также распространение получила трехфазная мостовая схема выпрямителя (схема Ларионова) [12, 13]. Она состоит из двух трехфазных однополупериодных схем выпрямления, питающихся от одного источника питания и работающих на общую нагрузку. Это решение представляет собой мостовые выпрямители, каждые пары трехфазных обмоток которого работают на общую нагрузку. Такое решение уже находило применение ранее [14]. Соединяя в себе достоинства мостового выпрямителя и трехфазного источника питания, данное решение имеет достаточно низкий уровень пульсаций, что позволяет работать без сглаживающего конденсатора [15]. Недостатками такого устройства является увеличенное количество вентиляторов, что приводит к повышенной стоимости устройства и усложнения схемотехнического решения в целом.

Частотные преобразователи – необходимый элемент в плавном регулировании скорости синхронного двигателя. Также он применяется в различных разработках и схемах управления асинхронным двигателем [16].

Для сглаживания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя устанавливают фильтр, который должен обеспечивать передачу постоянной составляющей уровня напряжения в нагрузку без потерь, а также иметь большую величину сопротивления на частотах гармонических составляющих выпрямленного напряжения. Этим требованиям вполне удовлетворяет фильтр, построенный на реактивных элементах – дросселе и конденсаторе. При инвертировании постоянного тока в переменный в преобразователях частоты используются транзисторы в переключающем режиме, а также инверторы с широтно-импульсной модуляцией [17].

Дискретный аналог непрерывной ШИМ – регулярно-дискретизированная ШИМ (скалярная ШИМ), которая легко реализуется с помощью аппаратных средств – как цифровых, так и аналоговых [18, 19]. Нередко разработ-

ки на основе ШИМ используются в регулировании асинхронных электроприводов [20, 21].

Выходное напряжение инвертора в общем случае имеет несинусоидальную форму. Она характеризуется коэффициентом гармоник по напряжению. Данные элементы позволяют контролировать и поддерживать на заданном уровне параметры частоты и напряжения системе электроснабжения цеха. В связи с большим числом элементов могут возникать гармоники разных порядков, большинство из которых будет активно подавляться при помощи ШИМ [22, 23].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

На рис. 3 показана схема электроснабжения компрессорного цеха, которая построена на основе схмотехнического решения, изображенного на рис. 2.

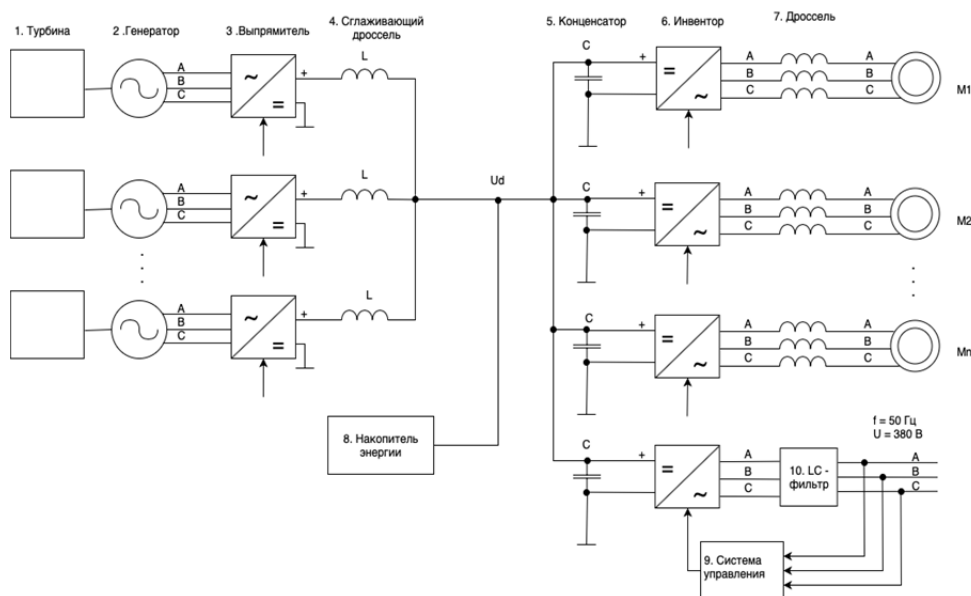


Рис. 3. Система электроснабжения на базе генераторов собственных нужд ГПА с объединенным звеном постоянного тока:

1 – турбина, 2 – генератор, 3 – выпрямитель, 4 – сглаживающий дроссель, 5 – конденсатор, 6 – инвертор, 7 – дроссель, 8 – накопитель электроэнергии, 9 – система управления, 10 – фильтр

Fig. 3. A power supply system based on GPU house generators with a unified dc link:

1 is a turbine, 2 is a generator, 3 is a rectifier, 4 is a smoothing-inductor, 5 is a capacitor, 6 is an inverter, 7 is a choke, 8 is an energy storage, 9 is a control system, 10 is a filter

Потоки электрической энергии, вырабатываемой генераторами 2 отдельных ГПА, суммируются на шине постоянного тока. К этой же шине подключен накопитель энергии 8, обеспечивающий требуемое качество электрической энергии в системе электроснабжения при существенных колебаниях нагрузки. К шинам постоянного тока подключены инверторы 6, управляющие работой электродвигателей 11, например, аппарат воздушного охлаждения газа (АВО). Электродвигатели подключены к инверторам через дроссели 7, что позволяет получить следующие результаты:

– подавление высокочастотных гармоник в токе двигателя, что позволяет формировать синусоидальный ток в обмотках двигателя с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ);

– ограничение амплитуды тока короткого замыкания происходит за счет присутствия индуктивностей в контуре, а при достижении током КЗ порога срабатывания защиты преобразователя частоты (ПЧ) двигатель обесточивается;

– снижение скорости нарастания аварийных токов короткого замыкания и задерживание момента достижения максимума тока обеспечивает необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ;

– осуществляется компенсация емкостных токов длинных кабельных линий, что препятствует ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков.

Электрическая схема КЦ с ГПА, имеющими на валу синхронный генератор, приведенная на рис. 4, является одной из перспективных, так как суммарная мощность вспомогательного электрооборудования одного ГПА во много раз меньше мощности газовой турбины.

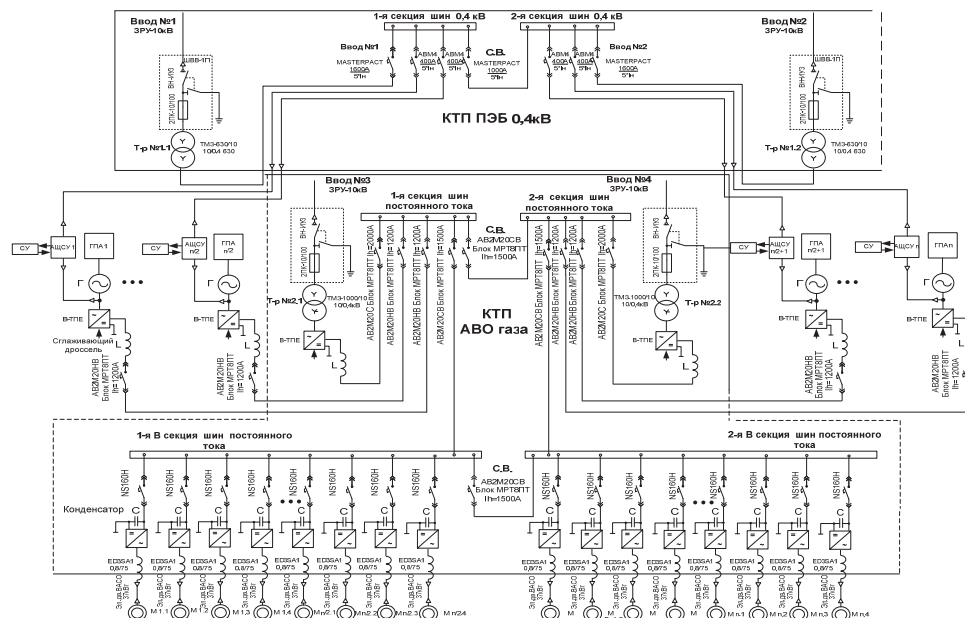


Рис. 4. Электрическая схема КЦ, оборудованного газотурбинными ГПА с генераторами на валу

Fig. 4. An electric circuit of a CS equipped with gas turbine GPU generators on the shaft

Поэтому колебания нагрузки генератора мало влияют на ее режим работы, который по условиям эксплуатации поддерживается близким к номинальному. Благодаря этому уменьшается удельный расход топлива ГПА.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя вышеперечисленные устройства и схемотехнические решения, можно добиться минимальных отклонений значений частоты и уровня напряжения. Предложенное решение позволяет обеспечить постоянный уро-





Окончание табл. 2

End of Tab. 2

Показатели Indicators	Год выпуска проекта Project released year					Итого, руб. Total cost, RUB
	2018 год 2018 year	2019 год 2019 year	2020 год 2020 year	2021 год 2021 year	2022 год 2022 year	
Капиталовложения, всего, тыс. руб., без НДС Total investment with- out tax, thousand RUB	11000,00	11000,00	11000,00	11000,00	11000,00	55000,00
Капиталовложения (оборудование), тыс. руб., без НДС Capital investment, thousand RUB	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	44000,00
Капиталовложения (ПИР, СМР, ПНР), тыс. руб., без НДС Capital investment without tax, thousand RUB	2200,00	2200,00	2200,00	2200,00	2200,00	11000,00
Денежный поток, тыс. руб. Cash flow, thousand RUB	399456,00	6270,00	6270,00	6270,00	6270,00	424536,00
Коэффициент дискон- тирования Discount coefficient	0,88	0,78	0,69	0,61	0,54	X

Исходя из представленных данных табл. 2 можно заметить, что проект обеспечит положительный доход уже через 6–7 лет после внедрения, а окупаемость займет менее 10 лет. Эти экономические показатели подтверждают целесообразность представленного решения.

## ВЫВОДЫ

Проблема стабилизации частоты и уровня напряжения решается уже на протяжении многих лет различными способами. Предложенное схмотехническое решение позволяет поддерживать требуемый уровень напряжения в изолированных энергосистемах независимо от типа величины нагрузки. Кроме того, в предложенной схеме стабилизации частоты и напряжения наблюдается существенный плюс в виде задержки нарастания токов короткого замыкания, в связи с чем у электронной защиты есть гораздо больше времени на срабатывание.

Таким образом, даже при повышении температуры окружающего воздуха, при падении мощности в КЦ будет сохраняться нужный режим работы газоперекачивающего оборудования, позволяя поддерживать нужное давление в магистральных газопроводах.

Также универсальность схемы позволит применять ее не только в описанном технологическом процессе, но и в других промышленных технологических процессах, где нагрузка может изменяться.

Благодаря улучшению качества электроэнергии оборудование не будет выходить из строя, что не позволит допустить нарушение работы ГПА, выбросы газа в воздух и т. д. Как было указано выше, универсальность схемы позволит применять ее и в других областях, таких как нефтяная промышленность. При постоянстве заданного качества электроэнергии поломки бурильных скважин будут происходить реже, что, соответственно, не будет приводить к экологическим катастрофам.

Не стоит ограничиваться перекачкой газа и добычей нефти, так как все области промышленности базируются на электроэнергии, и поддержание ее на должном уровне приведет к сохранению окружающей среды и эффективному использованию природных ресурсов.

Учитывая все плюсы и минусы данной схемы, рекомендуется рассмотреть ее как одну из внедряемых технологий в систему «Умная сеть».

В конце стоит подвести итоги.

1. Внедрение устройств, чьей задачей является стабилизация и регулирование частоты и напряжения вентильного генератора, позволяет повысить качество электроэнергии, что приведет к более надежной работе нагнетателей и соответственно к более успешной перекачке газа. Капитальные затраты в этом случае будут выше, но минимальные эксплуатационные затраты компенсируют это.

2. Оптимизация методов стабилизации напряжения приведет к экономии в процессе эксплуатации оборудования.

3. Схема имеет проблему с появлением гармоник, которая еще находится в процессе экономического решения.

Следует отметить, что проблема подавления высших гармоник решена в данной схеме посредством нивелирования нежелательных для эксплуатации гармоник кратных трем.

4. Автоматизация регулирования частоты вращения синхронного генератора является передовой разработкой на этапе переработки существующей системы управления в систему «Умной сети».

Учитывая свойства, полученные при создании данной схемы, и особенности работы данной схемы под различной нагрузкой, рекомендуется ее применение в различных областях промышленности начиная от газоперекачивающих механизмов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова, С.Н. Петин // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 961–968.

3. Крамской А.А., Филиппов А.В. Попутный газ последних ступеней сепарации. Компримирование низконапорного ПНГ // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 3. – С. 78–83.

4. Makarov V.V., Kuznetsova O.P., Nikolaev M.Yu. The effect of electric exposure on the gas cleaning systems filter efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12. – 2017. – Vol. 168, N 12. – P. 1–6. – DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012005.
5. Zbudskiy E.I., Balandina G.I. Automatic control system for power grid voltage stabilization // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 511–516.
6. Падалко Д.А. Стабилизация параметров напряжения асинхронного генератора, возбуждаемого инвертором напряжения // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 3 (35). – С. 9–16.
7. Колесников К.А. Методы повышения качества стабилизации в стабилизаторах напряжения в цепи постоянного тока // Молодежь: наука и творчество. – Ставрополь, 2017. – С. 316–319.
8. An event-trigger two-stage architecture for voltage control in distribution systems / C. Liu, X. Ma, M. Zhou, J. Wu, C. Long // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol. 95. – P. 577–584.
9. Lucas A., Chondrogiannis S. Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2016. – Vol. 80. – P. 26–36.
10. Jamroen C., Namproom P., Dechanupaprittha S. TS-Fuzzy based adaptive PEVs charging control for smart grid frequency stabilization under islanding condition // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 86. – P. 124–127.
11. High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting / N.A. Wahab, M.K.M. Salleh, N. Othman, M.F.A. Khalid, N.M. Hidayat // 2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon). – Kota Kinabalu, Malaysia, 2016. – P. 123–127. – DOI: 10.1109/IEACON.2016.8067367.
12. Анализ режимов работы однофазного активного выпрямителя тока с широтно-импульсной модуляцией по прямоугольно-ступенчатому закону / О. Краснов, Б. Любарский, В. Божко, О. Петренко, О. Дубинина, Р. Нурiev // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2018. – Т. 3, № 9 (93). – С. 50–57.
13. Щербаков А.В., Стальков П.М. Разработка высоковольтного стенда для импульсных испытаний энергоёмких резисторов // Вестник МЭИ. – 2017. – № 2. – С. 88–95.
14. Брованов С.В., Харитонов С.А. Статические преобразователи электрической энергии на основе многоуровневых инверторов напряжения и выпрямителей с корректорами входного тока // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 2 (17). – С. 119–130.
15. Nidhal A., Dhia C., Lassad S. Modelling of conducted EMI generated by a three-phase PWM rectifier // 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). – Hammamet, Tunisia, 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/GECS.2017.8066163.
16. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С. Принцип построения отказоустойчивой системы управления асинхронным приводом // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 105–109.
17. Горбунов Р.Л., Посконный Г.И. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 76–86.
18. Маклаков А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92–100.
19. Nikolayev M.U., Nikolayeva E.V., Lyashkov A.A. Data measuring channels calibration procedure // 2016 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2016. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819052.
20. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного привода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 87–95.
21. Баховцев И.А. Интегральные характеристики входного тока двухуровневых инверторов напряжения с ШИМ // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 111–118.

22. Герасимов В.А. Реализация цифрового ШИМ повышенной разрешающей способности с высокой несущей частотой на ПЛИС // Пром-Инжиниринг: труды III международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2017. – С. 302–307.

23. Approximate discrete-time modeling of DC-DC converters with consideration of the effects of pulse-width modulation / X. Li, X. Ruan, Q. Jin, M. Sha, C.K. Tse // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, N 8. – P. 7071–7082. – DOI: 10.1109/TPEL.2017.2752419.

24. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologie // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 59. – P. 710–725.

25. Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» / В.И. Потапов, А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Г.Э. Сеницин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 8. – С. 44–51.

26. Smart Grid: assessment of the past and present in developed and developing countries / M.A. Ponce-Jara, E. Ruiz, R. Gil, E. Sancristóbal, C. Pérez-Molina, M. Castro // Energy Strategy Reviews. – 2017. – Vol. 18. – P. 38–52.

27. Климов П.Л., Разуменко Е.А. Обзор управления умной сетью // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей 16 международной научно-практической конференции. – Пенза, 2018. – Ч. 1. – С. 81–83.

28. Цветков В.А. Smart Grid – Умная электрическая сеть // Science Time. – 2017. – Т. 40, № 4. – С. 218–220.

29. Пишеничников С.О. Технологии умных сетей Smart Grid для решения проблем современной энергетики // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск, 2017. – Т. 2. – С. 315–321.

30. Манусов В.З., Хасанзода Н., Ахъёев Д.С. Создание интегрированной системы электропитания острова Русский и управление ее режимами // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 142–145.

*Николаев Михаил Юрьевич*, кандидат технических наук, доцент Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – индукционно-импульсные волновые технологии. Имеет более 20 научных публикаций, соавтор одного патента. E-mail: mupr@yandex.ru

*Макаров Владимир Вячеславович*, кандидат технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий и компьютерных систем Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – газовая динамика. Имеет более 80 научных публикаций. E-mail: kosmos070969@mail.ru

*Кропотин Владимир Олегович*, студент факультета элитного образования и магистратуры Омского государственного технического университета. Основное направление исследований – моделирование нагрева сухих трансформаторов и повышение пропускной способности ЛЭП с учетом температуры. Имеет более 20 научных публикаций. E-mail: kropotin\_vl@mail.ru

*Грицай Александр Сергеевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматизация бизнес-процессов энергосбытовых компаний, разработка и внедрение систем коммерческого учета электрической энергии, оптимизация электроэнергетических систем, включающих возобновляемые источники энергии. Имеет более 60 научных публикаций. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

*Гаак Антон Викторович*, советник генерального директора АО ОТЭК, исполнительный директор ООО «НИАР-Генерация» госкорпорации РОСАТОМ. Основное направление научных исследований – автоматизация бизнес-процессов энергетических предприятий, оптимизация теплоэнергетических процессов. Имеет более 10 научных публикаций. E-mail: vti2016@gmail.com

*Nikolaev Mikhail Yuryevich*, PhD (Eng.), an associate professor of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is induction-pulse wave technology. He is the author of more than 20 publications, including co-author of 1 patent. E-mail: munnp@yandex.ru

*Makarov Vladimir Vyacheslavovich*, PhD (Eng.), an associate professor, dean at the information technology and computer systems department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is gas dynamics. He is the author of more than 80 publications. E-mail: kosmos070969@mail.ru

*Kropotin Vladimir Olegovich*, student at the elite education and magistracy department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is modeling the heating of dry transformers and increasing the transmission capacity of power lines taking into account temperature. He is the author of more than 20 publications. E-mail: kropotin\_vl@mail.ru

*Gritsay Alexander Sergeevich*, PhD (Eng.), an associate professor at the informatics and computer engineering department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is the automation of business processes of energy retail companies, the development and implementation of systems for commercial accounting of electric energy, the optimization of electric power systems, including renewable energy sources. He is the author of more than 60 publications. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

*Gaak Anton Viktorovich*, deputy general director of OTEC JSC – executive director of NIAR-Generation LLC, ROSATOM state corporation. The main direction of scientific research is automation of business processes of energy enterprises, optimization of heat and power processes. He is the author of more than 10 publications. E-mail: vti2016@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176

### ***Improvement of electric energy quality by regulating valve generators***\*

*M.Yu. NIKOLAEV<sup>1,a</sup>, V.V. MAKAROV<sup>1,b</sup>, V.O. KROPOTIN<sup>1,c</sup>,  
A.S. GRITSAY<sup>1,d</sup>, A.V. GAAK<sup>2,e</sup>*

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

<sup>2</sup> United Heat Power Company JSC, 7 Pogorelsky Pereulok, Stroenie 2, Moscow, Russian Federation

<sup>a</sup> munnp@yandex.ru   <sup>b</sup> kosmos070969@mail.ru   <sup>c</sup> kropotin\_vl@mail.ru

<sup>d</sup> aleksandr.gritsay@gmail.com   <sup>e</sup> vti2016@gmail.com

#### **Abstract**

The relevance of the research is due to the ongoing technological revolution related to the digitization of the surrounding world. The use of numerous sensors in electrical systems leads to increased requirements for the quality of electricity in the electrical network. An increase in the number of analyzed data leads to a fundamentally new development of the electric power complex; predictive analytics increases the uptime of equipment, contributes to the growth of resource-saving technologies and minimizes voltage losses in the power supply networks of gas compressor units, as well as greatly reduces the cost of their maintenance. One of the ways to improve the quality and stabilize voltage in electrical networks is to use valve generators as an element of the “Smart Grid”.

The purpose of the research is to reduce the limits of voltage tolerance by stabilizing the output voltage using a circuit solution based on valve generators. The object of the research is compressor workshops, gas pumping units, valve generators and a set of voltage-stabilizing equipment.

---

\* Received 11 May 2019.

The object of research is valve generators of gas pumping units installed in compressor workshops which serve to reduce the pressure of gas pumped through the main gas pipelines.

Research methods are based on an assessment of the effectiveness of technological solutions, including a systems analysis of the results of voltage stabilization of valve generators.

As a result of the research, a voltage stabilization scheme in networks using valve generators was developed, which allows achieving minimum voltage losses and frequency deviations, regardless of the type of load. The scheme has been successfully implemented in the compressor shop of the operating enterprise. The resulting scheme is recommended for application in the developed system “Smart Grid”.

**Keywords:** gas pumping unit, compressors, generators, voltage stabilization, operation regulation, smart grid, microgrid, voltage, energy system

## REFERENCES

1. GOST 32144–2013. *Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
2. Klimenko A.V., Agababov B.C., Borisova P.N., Petin S.N. Termodinamicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya detander-generatornykh agregatov na stantsiyakh tekhnologicheskogo umen'sheniya davleniya transportiruemogo prirodnogo gaza [Thermodynamic efficiency of expander-generator units at the plants for technological decompression of transported natural gas]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2017, vol. 24, no. 6, pp. 961–968. (In Russian).
3. Kramskoy A.A., Filippov A.V. Poputnyi gaz poslednikh stupenei separatsii. Komprimirovanie nizkonapornogo PNG [Associated gas of last separation stages. Compression of low-pressure associated oil gas]. *Territoriya Neftegaz – Oil and Gas Territory*, 2016, no. 3, pp. 78–83.
4. Makarov V.V., Kuznetsova O.P., Nikolaev M.Yu. The effect of electric exposure on the gas cleaning systems filter efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12*, 2017, vol. 168, no. 12, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012005.
5. Zabudskiy E.I., Balandina G.I. Automatic control system for power grid voltage stabilization. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 511–516.
6. Padalko D.A. Stabilizatsiya parametrov napryazheniya asinkhronnogo generatora, vzbuzhdaemogo invertorom napryazheniya [Stabilization of voltage parameters of induction generator excited by a voltage inverter]. *Problemy regional'noi energetiki – Problems of the Regional Energetics*, 2017, no. 3 (35), pp. 9–16.
7. Kolesnikov K.A. Metody povysheniya kachestva stabilizatsii v stabilizatorakh napryazheniya v tsepi postoyannogo toka [Method for improving the quality of stabilization in voltage stabilizers in a DC circuit]. *Molodezh': nauka i tvorchestvo* [Science and creativity], Stavropol', 2017, pp. 316–319.
8. Liu C., Ma X., Zhou M., Wu J., Long C. An event-trigger two-stage architecture for voltage control in distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, vol. 95, pp. 577–584.
9. Lucas A., Chondrogiannis S. Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, vol. 80, pp. 26–36.
10. Jamroen C., Namproom P., Dechanupaprittha S. TS-Fuzzy based adaptive PEVs charging control for smart grid frequency stabilization under islanding condition. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 86, pp. 124–127.
11. Wahab N.A., Salleh M.K.M., Othman N., Khalid M.F.A., Hidayat N.M. High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting. *2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2016, pp. 123–127. DOI: 10.1109/IEACon.2016.8067367.
12. Krasnov O., Liubarskiy B., Bozhko V., Petrenko O., Dubinina O., Nuriiev R. Analiz rezhimov raboty odnofaznogo aktivnogo vypryamitelya toka s shirotno-impul'snoi modulyatsiei po pryamougol'no-stupenchatomu zakonu [Analysis of operating modes of single-phase current-source rectifier with rectangular-stepped pulse-width modulation]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 3, no. 9 (93), pp. 50–57.

13. Shcherbakov A.V., Stal'kov P.M. Razrabotka vysokovol'nogo stenda dlya impul'snykh ispytaniy energoemkikh rezistorov [Development of a high-voltage bench for impulse tests of high-energy resistors]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2017, no. 2, pp. 88–95.

14. Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Statische preobrazovateli elektricheskoi energii na osnove mnogourovnevnykh inverterov napryazheniya i vypryamitelei s korrektorami vkhodnogo toka [Static electric energy converters based on multilevel voltage inverters and rectifiers with input current correctors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 2 (17), pp. 119–130.

15. Nidhal A., Dhia C., Lassad S.. Modelling of conducted EMI generated by a three-phase PWM rectifier. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/GECS.2017.8066163.

16. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S. Printsip postroeniya otkazoustoichivoi sistemy upravleniya asinkhronnym privodom [The method of building a fault-tolerant asynchronous drive control system]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 105–109.

17. Gorbunov R.L., Poskonny G.I. Issledovanie trekhfaznogo shirotno-impul'snogo preobrazovatelya peremennogo napryazheniya dlya povysheniya energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigatelei [Investigation of three-phase AC voltage converter, used for increasing energy efficiency of induction motors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 76–86.

18. Maklakov A.S. Gibridnyi algoritm modulyatsii na osnove prostranstvenno-vektornoi ShIM i ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Hybrid modulation based on SHEPWM and SVPWM]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 92–100.

19. Nikolayev M.U., Nikolayeva E.V., Lyashkov A.A. Data measuring channels calibration procedure. *2016 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819052.

20. Pustovetov M.Yu. Opyt razrabotki sinus-fil'tra dlya silovoi skhemy chastotno-reguliruемого asinkhronnogo privoda [Experience in developing sine-wave filter for power circuit of VVVF-drive with induction motor]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 87–95.

21. Bakhovtsev I.A. Integral'nye kharakteristiki vkhodnogo toka dvukhurovnevnykh inverterov napryazheniya s ShIM [Input current integral characteristics of two-level voltage source inverters with PWM]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 111–118.

22. Gerasimov V.A. [FPGA-based implementation of high resolution, high carrier frequency pulse-width modulator]. *Prom-Inzhiniring: trudy III mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [The 3rd International Conference on Industrial Engineering 2017]*. Chelyabinsk, 2017, pp. 302–307. (In Russian).

23. Li X., Ruan X., Jin Q., Sha M., Tse C.K. Approximate discrete-time modeling of DC-DC converters with consideration of the effects of pulse-width modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 8, pp. 7071–7082. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2752419.

24. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologie. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 59, pp. 710–725.

25. Potapov V.I., Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Sinitin G.E. Ispol'zovanie neuronnoi seti dlya postroeniya kratkosrochnogo prognoza elektropotrebleniya OOO "Omskaya energosbytovaya kompaniya" [Using neural network for building short term forecast of electricity load of LLC Omsk energy retail company]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 44–51.

26. Ponce-Jara M.A., Ruiz E., Gil R., Sancristóbal E., Pérez-Molina C., Castro M. Smart Grid: assessment of the past and present in developed and developing countries. *Energy Strategy Reviews*, 2017, vol. 18, pp. 38–52.

27. Klimov P.L., Razumets E.A. [Smart network management]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei 16 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Fundamental and applied research: current issues, developments and innovations]*, Penza, 2018, pt. 1, pp. 81–83. (In Russian).

28. Tsvetkov V.A. Smart Grid – Umnaya elektricheskaya set' [Smart Grid]. *Science Time*, 2017, vol. 40, no. 4, pp. 218–220. (In Russian).

29. Pshenichnikov S.O. [Smart grid systems to solve the problems of modern energy]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of All-Russia scientific and practical conference with international participation "Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia"], Irkutsk, 2017, vol. 2, pp. 315–321. (In Russian).

30. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Ahyoev J.S. Sozdanie integrirovannoi sistemy elektroobrazovaniya ostrova Russkii i upravlenie ee rezhimami [Creation of an integrated system of power supply for the Russian Island and management of its regimes]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2017, no. 1–2, pp. 142–145.

Для цитирования:

Повышение качества электроэнергии путем регулирования вентильных генераторов / М.Ю. Николаев, В.В. Макаров, В.О. Кропотин, А.С. Грицай, А.В. Гаак // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 161–176. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176.

For citation:

Nikolaev M.Yu., Makarov V.V., Kropotin V.O., Gritsay A.S., Gaak A.V. Povyshenie kachestva elektroenergii putem regulirovaniya ventil'nykh generatorov [Improvement of electric energy quality by regulating valve generators]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 161–176. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176.