

Научная статья

УДК 621.3.013.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>



А.Г. Калимов , К.Х.М. Аль Наими

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

 alexanderkalimov@gmail.com

## **ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

*Аннотация.* Ветряные турбины демонстрируют значительную изменчивость выходной мощности из-за колебаний ветровых условий, что приводит к проблемам со стабильностью производства энергии. В данном исследовании изучалась интеграция сверхпроводниковых магнитных накопителей энергии (СПИН) для решения возникающих проблем. В ходе исследования были синтезированы схемы управления и преобразования мощности для ветроэнергетических установок, включающих локальные индуктивные накопители энергии. Результаты моделирования показали, что использование СПИН значительно повысило стабильность выходной мощности при изменении условий эксплуатации ветрогенераторов. Использованный подход продемонстрировал потенциал для обеспечения стабильного производства энергии, несмотря на присущую ему зависимость от погодных условий.

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии, ветряные турбины, сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии, стабилизация мощности, преобразователи постоянного тока.

*Для цитирования:*

Калимов А.Г., Аль Наими К.Х.М. Повышение стабильности ветроэнергетических установок за счет использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>A.G. Kalimov  , Q.H.M. Al Naimi

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 alexanderkalimov@gmail.com

## IMPROVING THE STABILITY OF WIND POWER PLANTS THROUGH THE USE OF SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICES

*Abstract.* Wind turbines demonstrate significant dependence of output power on fluctuations in wind conditions, which leads to problems with the stability and quality of energy production. The study explored the integration of superconducting magnetic energy storage devices (SMES) to solve emerging problems. In the course of the study, power management and conversion schemes for wind power plants, including local inductive energy storage, were synthesized. The simulation results showed that the incorporation of SMES significantly increased the stability of the output power when the operating conditions of wind turbines changed. The used approach demonstrated the potential to ensure stable energy production, despite its inherent dependence on weather conditions.

*Keywords:* renewable energy sources, wind turbines, superconducting inductive energy storage, power stabilization, DC-DC converters.

*Citation:*

Kalimov A.G., Al Naimi Q.H.M., Improving the stability of wind power plants through the use of superconducting inductive energy storage devices, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 58–68, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>

**Введение.** В последнее время значительное внимание во всем мире уделяется использованию возобновляемых энергетических ресурсов, в том числе за счет увеличения мощности ветряных электростанций [1–3]. Несмотря на заметный прогресс в этой отрасли энергетики, в ней сохраняются чувствительные проблемы, связанные, в частности, со значительной зависимостью эффективности и надежности используемых на практике ветрогенераторов от постоянно меняющихся погодных условий. Хаотичные колебания скорости и направления ветра приводят к нестабильной работе этих установок и усложняют их интеграцию в электрические сети [4–6]. Во многих случаях решение этой проблемы требует применения специальных решений для сглаживания колебаний генерируемой мощности [7–11].

Выработка энергии ветроэнергетической установкой сопровождается колебаниями выходного напряжения из-за переменной скорости ветра. Эти колебания можно сгладить путем включения локальных накопителей энергии в схему устройства согласования ветрогенератора с нагрузкой. Одним из перспективных решений этой проблемы является применение сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН) [12–16]. В последнее время интерес к этим устройствам повышается в связи с успехами в развитии технологии производства высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Использование СПИН помогает также предотвратить скачки напряжения, вызванные внезапными изменениями нагрузки.

В случае интеграции ветряных турбин в системы переменного тока СПИН может стать эффективным инструментом для контроля выходной мощности, улучшения динамических свойств системы и повышения ее устойчивости к сбоям. Исследования показали, что электрохимические аккумуляторы для накопления энергии также могут повысить динамическую

стабильность ветроэнергетических систем, компенсируя дисбаланс мощности [17]. Однако из-за относительно высокой частоты колебаний мощности ветра использование аккумуляторов предполагает их частые зарядку и разрядку, что сокращает срок службы батареи.

СПИН в системе управления энергопотреблением ветряных турбин запасает энергию в периоды профицита мощности, расходует ее в периоды низкой выработки и, в конечном счете, стабилизирует мощность при интеграции с электрической сетью. Характерной особенностью СПИН является то, что для его корректной работы требуется вход постоянного тока, в то время как с выхода генератора ветряной турбины подается переменное напряжение. Это обстоятельство требует установки соответствующей системы преобразования энергии. Усовершенствованные алгоритмы управления и механизмы обратной связи повышают эксплуатационные характеристики, обеспечивая стабильную и быстро реагирующую функциональность в условиях колебаний нагрузок и помех в электросети.

Основной целью данной статьи являются разработка и исследование алгоритма работы преобразователя энергии для ветроэнергетической установки средней мощности при включении в его структуру СПИН.

### Моделирование преобразователя энергии ветроэнергетической установки

Моделирование ветрогенераторов, системы преобразования и передачи энергии потребителю, а также их интеграция со СПИН имеют решающее значение для понимания их поведения, оптимизации производительности и обеспечения стабильности электросети. В данной работе представлена методология моделирования таких систем. Все результаты расчетов, приведенные в статье, выполнены для ветроэнергетической установки средней мощности. В качестве объекта исследований была выбрана ветряная турбина модели GEV MP C 275/32 с максимальной выходной мощностью 225 кВт производства компании “VERGANT”. Основные параметры ветрогенератора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ветрогенератора GEV MP C 275/32

Table 1

Parameters of the wind generator GEV MP C 275/32

Тип генератора	Синхронный, на постоянных магнитах
Фазное сопротивление статора	0,18 Ом
Потокоцепление, создаваемое магнитами	0,779 Вб
Индуктивность	0,001 Гн
Диаметр ротора	3,2 м
Номинальная механическая выходная мощность	225 кВт
Напряжение	400 В
Базовая скорость ветра	12 м/с

Режимы работы системы управления мощностью ветрогенератора анализировались с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink, способного выполнять динамическое моделирование энергосистем. Первоначально синтезировали принципиальную схему системы управления мощностью, показанную на рис. 1, и разработали методологию управления системой, с тем чтобы найти оптимальный режим работы ветрогенератора при различных скоростях ветра, а также в условиях резкого изменения нагрузки.

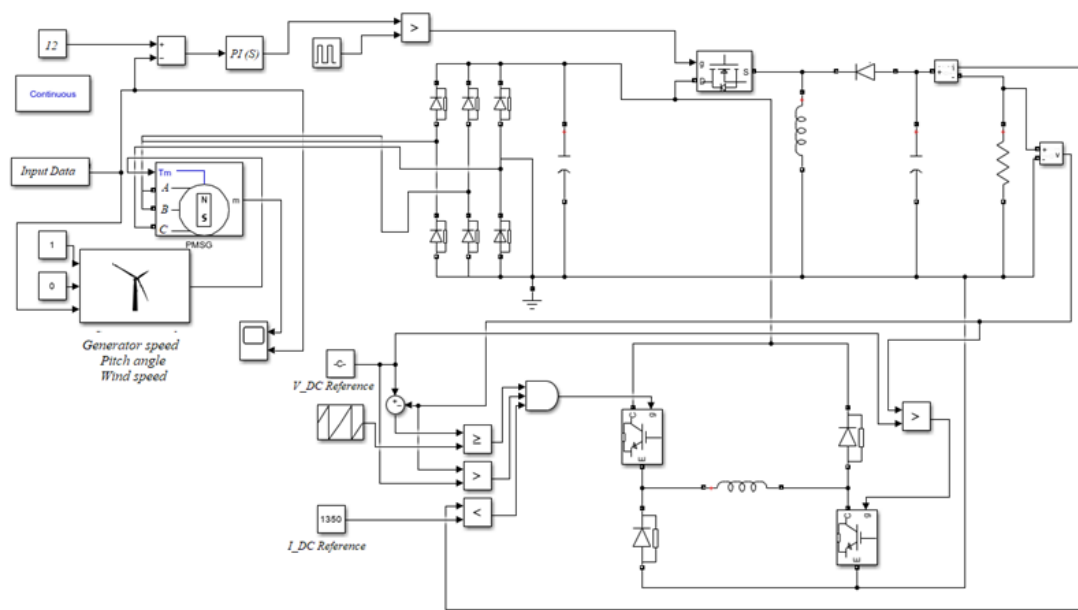


Рис. 1. Модель системы управления мощностью ветрогенератора

Fig. 1. Model of the power regulation system of the wind generator

Приведенная схема содержит структурные элементы, которые можно сгруппировать в следующие блоки:

- ветряная турбина с генератором и блоком регулировки скорости вращения ротора;
- выпрямитель;
- преобразователь постоянного тока DC-DC;
- система накопления энергии на основе СПИН.
- инверторный преобразователь DC-AC.

После выбора общей структуры блок-схемы управления мощностью необходимо выбрать компоненты для ее реализации.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется с помощью трехфазного неуправляемого выпрямителя, выполненного по полномостовой схеме. Установка проста в реализации и не требует дополнительных систем управления или обратной связи. Она состоит из шести диодов и конденсатора.

Преобразователь постоянного тока (DC-DC конвертер) позволяет повышать или понижать коэффициент передачи по напряжению для стабилизации условий работы нагрузки. Особенностью данного устройства является использование МОП-транзисторов (MOSFET), которые представляют собой устройства с регулируемым напряжением и способностью работать с минимальными потерями энергии. Технология управления затвором МОП-транзистора позволяет системе стабилизировать выходное напряжение путем увеличения напряжения в режиме усиления преобразователя или уменьшения напряжения в режиме понижения напряжения. Управление осуществляется путем подачи пилообразного сигнала на затвор МОП-транзистора. Основные характеристики этого сигнала задаются автоматически с помощью схемы управления, как это показано на рис. 2.

Приведенное ниже уравнение описывает зависимость выходного напряжения преобразователя от параметров используемого рабочего цикла сигнала управления:

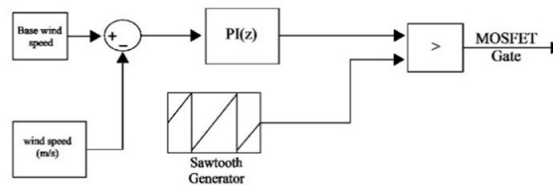


Рис. 2. Схема управления МОП-транзистором  
Fig. 2. Control scheme of the MOSFET transistor

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} \cdot V_{in}.$$

В зависимости от величины коэффициента заполнения  $D$  рабочего цикла преобразователь может работать в режиме понижения (если  $D < 0,5$ ) или в режиме повышения (если  $D > 0,5$ ).

Принципы работы системы управления мощностью при подключении индуктивных магнитных накопителей энергии для ветряных турбин предусматривают использование сверхпроводниковой катушки и силовых электронных устройств. Эти устройства, как правило, представляют собой биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) или транзисторы других типов и используются для управления основными режимами работы накопителя: зарядка, разрядка и ожидание системы. На рис. 3 представлена принципиальная схема включения СПИН в систему регулирования мощности, которая включает в себя сверхпроводниковую катушку, диоды и силовые электронные компоненты.

Для запуска режима накопления энергии СПИН на затворы БТИЗ1 и БТИЗ2 подается положительное напряжение. В результате БТИЗ переходят в режим зарядки, что обеспечивает поступление энергии в катушку. Эта накопленная энергия затем высвобождается в режиме разрядки СПИН, когда на катоды диодов D1 и D2 подаются положительные напряжения, превышающие их пороговое значение включения. В этом режиме БТИЗ1 и БТИЗ2 отключены, что позволяет накопленной предварительно энергии поступать через диоды в нагрузку.

Режим ожидания активируется при достижении напряжением на шине контрольного значения или при достижении максимально возможной запасенной энергии СПИН. Это состояние достигается путем активации БТИЗ1 и деактивации БТИЗ2, что создает замкнутый контур с БТИЗ1 и D1 для обеспечения протекания постоянного тока внутри СПИН.

Схема управления рабочим состоянием СПИН, представленная на рис. 3, принимает сигнал обратной связи, который содержит информацию об измеренном токе в СПИН и напряжении на нагрузке, и на основе этой информации управляет рабочим состоянием сверхпроводниковой катушки.

На основе этой схемы управления сигнал, подаваемый на затворы МОП-транзисторов, определяет, следует ли открыть или закрыть затворы. Для изучения различных режимов работы СПИН были использованы также данные об изменении скорости ветра. На рис. 4 показано, как скорость ветра изменяется с течением времени. Здесь важно заметить, что оптимальная скорость ветра, которая принималась в расчет при проектировании ветряной турбины, равна 12 м/с.

### Результаты моделирования режимов работы ветрогенератора

Разработанная математическая модель системы управления мощностью ветроэнергетической установки была использована для изучения ее реакции на изменения скорости ветра и нагрузки. Внимание в первую очередь обращалось на то, каким образом СПИН влияет на стабилизацию выходной мощности.

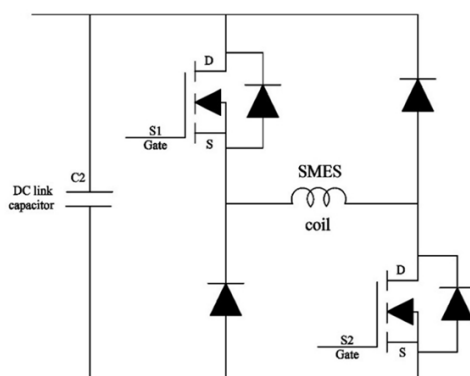


Рис. 3. Включение СПИН в схему управления мощностью

Fig. 3. Control scheme of the power regulation with the SMES

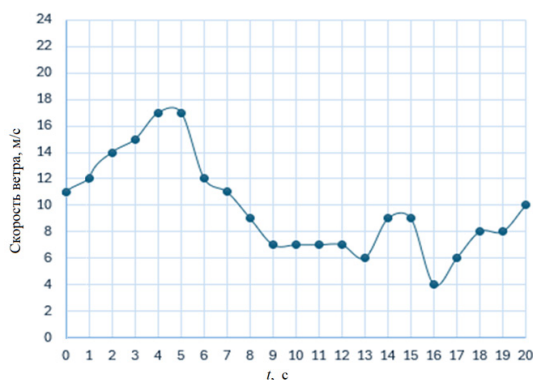


Рис. 4. Изменение скорости ветра в период контроля

Fig. 4. Wind speed variation during the monitoring period

В работе рассматривается процесс включения ветроэнергетической установки в сеть и ее дальнейшей работы при изменяющейся скорости ветра. Продолжительность моделирования составила 20 секунд в непрерывном режиме. Было проведено сравнение режимов работы системы управления мощностью ветрогенератора при подключенном индуктивном накопителе энергии, а также при его отсутствии.

Выходные зависимости тока и напряжения на выходе системы регулирования мощности представлены на рис. 5 и 6. Зелеными линиями показано поведение выходных данных системы в условиях работы подключенного индуктивного накопителя, а красными линиями – аналогичные зависимости для системы без использования СПИН.

Осцилляции тока и напряжения, наблюдаемые на графиках в первые две секунды после начала моделирования, объясняются тем, что ветряная турбина в момент времени  $t = 0$  включается и начинает набирать обороты. Дальнейшие изменения этих величин происходят в относительно небольших диапазонах и представляют собой реакцию системы на изменяющуюся скорость ветра.

#### Обсуждение результатов моделирования

Результаты исследования показывают, что в процессе запуска ветряной турбины с преобразователем мощности, использующей локальную систему накопления энергии, наблюдаются

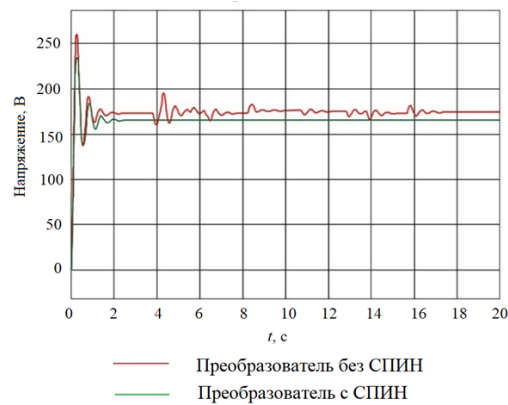


Рис. 5. Напряжение на выходе преобразователя мощности  
 Fig. 5. Voltage at the output of the power converter

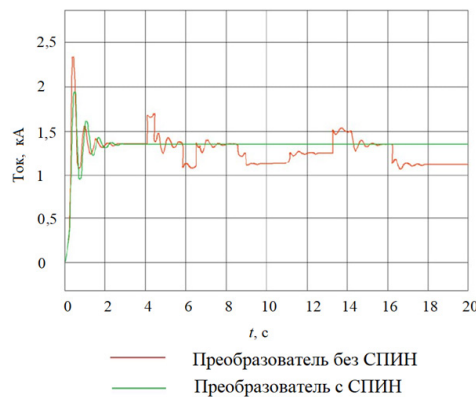


Рис. 6. Ток на выходе преобразователя мощности  
 Fig. 6. Current at the output of the power converter

кратковременные колебания выходных сигналов после выхода турбины на рабочий режим. Эти колебания в основном обусловлены нестабильностью скорости и направления ветра. Кроме того, осцилляции могут быть вызваны инерцией лопастей ротора, которые требуют времени для достижения стабильной скорости вращения. Ветряные турбины изначально настраиваются таким образом, чтобы обеспечить оптимальное поглощение энергии, что может привести к нестабильности выходной мощности. Постепенное ускорение скорости вращения ротора вызывает кратковременные изменения электромагнитного потока, влияющие на стабильность напряжения и тока [17].

Для решения этой проблемы можно применить методы плавного пуска, которые помогут смягчить последствия. Эти методы предполагают использование локальных накопителей энергии, что позволяет минимизировать резкие воздействия на систему. Внедрение управляемого процесса инициализации позволяет снизить значительные колебания напряжения и тока, в том числе в процессе включения ветряного генератора. Результаты показали улучшенную стабильность выходных данных в установившемся режиме. Система СПИН значительно улучшила выходные сигналы напряжения, тока и мощности, несмотря на значительные колебания скорости ветра.

При отсутствии накопителя энергии наблюдаются резкие скачки выходного тока (и, как следствие, мощности) ветрогенератора. Это объясняется тем, что такая система регулирования выходной мощности имеет относительно узкий диапазон регулирования и вызывает срывы выходной мощности, если колебания входной мощности выходят за границы этого диапазона. Применение СПИН существенно расширяет диапазон регулирования и предотвращает скачки тока либо значительно уменьшает их амплитуду, как это видно на приведенных диаграммах.

### Заключение

СПИН, основанные на использовании высокотемпературных материалов второго поколения, представляют собой перспективную технологию, которая может быть использована для оптимизации работы энергосистем как в качестве самостоятельного устройства, так и в комбинации с другими технологиями, обладающими высокой энергетической эффективностью. Одной из перспективных областей применения СПИН является их интеграция в систему регулирования мощности ветроэнергетических установок. Результаты моделирования, полученные при исследовании режимов работы таких систем с использованием разработанной авторами математической модели для программы MATLAB Simulink, показали положительное влияние СПИН на выходные сигналы тока, напряжения и мощности. Осцилляции этих характеристик существенно снижаются при резком изменении нагрузки и при хаотичном изменении скорости ветра.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Киселёв Г.Ю., Скороходов В.И., Боева Л.В., Киселёв Б.Ю. Перспективы использования ветроэнергетики в России // Журнал научных и прикладных исследований. 2016. Т. 1, № 11 (46). С. 80–82.
- [2] Гусева Е.В., Шалимов А.Ю., Богомолов А.Ю., Михненко А.В., Дыгаль А.В. Развитие ветроэнергетики в России и Крыму // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5, № 2. С. 51–55.
- [3] Yunyun Xie, Qiuwei Wu, Ke Wang. Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 124 (2021) 10661. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106361
- [4] Денисенко А.И., Смоловик С.В., Чудный В.С. Динамическое поддержание частоты в энергосистеме за счет асинхронизированного синхронного ветрогенератора // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2022. Т. 87, № 2. С. 5–10.
- [5] Bouendeu J.J., Tella K.F.A., Medjo N.B.A., Tchinda R. Contribution to the improvement of the performances of PV/wind microgrids integrating a hybrid SMES/battery energy storage unit, Journal of Energy Storage, 85 (2024) 111011. DOI: 10.1016/j.est.2024.111011
- [6] Sonia A.K. Dahiya, Improving dynamic stability of wind integrated system by incorporating magnetic energy storage, Energy Storage, 5 (7) (2023) e459. DOI: 10.1002/est2.459
- [7] Ebrahimi S.Y., Dehkordi G.H.R. Application of superconducting magnetic energy storage to compensate the pitch system delay in output power smoothing of wind turbines, IET Renewable Power Generation, 19 (1) (2025) e70107. DOI: 10.1049/rpg2.70107
- [8] Nemdili S., Ngaru I.C., Kerfa M. Solar-wind hybrid power generation system optimization using superconducting magnetic energy storage (SMES), Engineering, Technology & Applied Science Research, 12 (6) (2022) 9515–9522. DOI: 10.48084/etasr.5236
- [9] Salama H.S., Bakeer A., Magdy G., Vokony I. Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system, Journal of Energy Storage, 44 (B) (2021) 103466. DOI: 10.1016/j.est.2021.103466

- [10] **Komijani A., Kheradmandi M., Sedighizadeh M.** Improving Fault Ride-Through in meshed microgrids with wind and PV by Virtual Synchronous Generator with SFCL and SMES, *Journal of Energy Storage*, 50 (2022) 103952. DOI: 10.1016/j.est.2021.103952
- [11] **Salama H.S., Vokony I.** Voltage and frequency control of balanced/unbalanced distribution system using the SMES system in the presence of wind energy, *Electricity*, 2 (2) (2021) 205–224. DOI: 10.3390/electricity2020013
- [12] **Yuan Weijia.** Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage, London: Springer, 2011. DOI: 10.17863/CAM.13986
- [13] **Калимов А.Г., Баган С., Говор В.М.** Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии // *Глобальная энергия*. 2022. Т. 28, № 3. С. 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301
- [14] **Morandi A., Fabbri M., Gholizad B., Grilli F., Sirois F., Zermeño V.M.R.** Design and comparison of a 1-MW/5-s HTS SMES with toroidal and solenoidal geometry, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4) (2016) 5700606. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535271
- [15] **Скидан А.А., Смирнов В.В., Третьяченко В.Н.** Перспективы применения сверхпроводящих индуктивных накопителей для повышения надежности электроснабжения // *Энергетические установки и технологии*. 2022. Т. 8, № 2. С. 35–39.
- [16] **Смоленцев Н.И.** Сверхпроводящие накопители энергии в современной энергетике, монография. Миасс: ЭТФ ЮУрГУ, 2015.
- [17] **Sagiraju D.K.V., Obulesu Y.P., Choppavarapu S.B.** Dynamic performance improvement of standalone battery integrated PMSG wind energy system using proportional resonant controller, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (4) (2017) 1353–1365. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.03.010

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КАЛИМОВ Александр Гелиевич** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2978-1894>

**АЛЬ НАИМИ Кусай Халед Махмуд** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: qusainaimi95@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5223-872X>

## REFERENCES

- [1] **G.Iu. Kiselev, V.I. Skorokhodov, L.V. Boeva, B.Iu. Kiselev,** Perspektivy ispol'zovaniia vetroenergetiki v Rossii [Prospects for wind energy use in Russia], *Zhurnal nauchnykh i prikladnykh issledovaniy* [Journal of Scientific and Applied Research], 1 (11 (46)) (2016) 80–82.
- [2] **Ye.V. Guseva, A.Yu. Shalimov, A.Yu. Bogomolov, A.V. Mikhnenko, A.V. Dygal,** Development of the wind power engineering in Russia and Crimea, *Power plants and technologies*, 5 (2) (2019) 51–55.
- [3] **Yunyun Xie, Qiuwei Wu, Ke Wang,** Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124 (2021) 10661. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106361

- [4] **A.I. Denisenko, S.V. Smolovik, V.S. Chudny**, Energy system dynamic frequency support by DFIG-based wind generator, *Izvestiya Ntc Edinoj Energeticheskoy Sistemi (STC of Unified Power System Proceedings)*, 2 (87) (2022) 5–10.
- [5] **J.J. Bouendeu, K.F.A. Tella, N.B.A. Medjo, R. Tchinda**, Contribution to the improvement of the performances of PV/wind microgrids integrating a hybrid SMES/battery energy storage unit, *Journal of Energy Storage*, 85 (2024) 111011. DOI: 10.1016/j.est.2024.111011
- [6] **Sonia, A.K. Dahiya**, Improving dynamic stability of wind integrated system by incorporating magnetic energy storage, *Energy Storage*, 5 (7) (2023) e459. DOI: 10.1002/est2.459
- [7] **S.Y. Ebrahimi, G.H.R. Dehkordi**, Application of superconducting magnetic energy storage to compensate the pitch system delay in output power smoothing of wind turbines, *IET Renewable Power Generation*, 19 (1) (2025) e70107. DOI: 10.1049/rpg2.70107
- [8] **S. Nemdili, I.C. Ngaru, M. Kerfa**, Solar-wind hybrid power generation system optimization using superconducting magnetic energy storage (SMES), *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12 (6) (2022) 9515–9522. DOI: 10.48084/etasr.5236
- [9] **H.S. Salama, A. Bakeer, G. Magdy, I. Vokony**, Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system, *Journal of Energy Storage*, 44 (B) (2021) 103466. DOI: 10.1016/j.est.2021.103466
- [10] **A. Komijani, M. Kheradmandi, M. Sedighizadeh**, Improving Fault Ride-Through in meshed microgrids with wind and PV by Virtual Synchronous Generator with SFCL and SMES, *Journal of Energy Storage*, 50 (2022) 103952. DOI: 10.1016/j.est.2021.103952
- [11] **H.S. Salama, I. Vokony**, Voltage and frequency control of balanced/unbalanced distribution system using the SMES system in the presence of wind energy, *Electricity*, 2 (2) (2021) 205–224. DOI: 10.3390/electricity2020013
- [12] **Yuan Weijia**, *Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage*, London: Springer, 2011. DOI: 10.17863/CAM.13986
- [13] **A.G. Kalimov, S. Bagan, V.M. Govor**, Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301
- [14] **A. Morandi, M. Fabbri, B. Gholizad, F. Grilli, F. Sirois, V.M.R. Zermeño**, Design and comparison of a 1-MW/5-s HTS SMES with toroidal and solenoidal geometry, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4) (2016) 5700606. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535271
- [15] **A.A. Skidan, V.V. Smirnov, V.N. Tretyachenko**, The prospects of using superconducting magnetic energy storage to improve the reliability of power supply, *Power plants and technologies*, 8 (2) (2022) 35–39.
- [16] **N.I. Smolentsev**, *Sverkhprovodiashchie nakopiteli energii v sovremennoi energetike [Superconducting energy storage devices in modern energy sector]*, monograph, Miass: ETF IuUrGU, 2015.
- [17] **D.K.V. Sagiraju, Y.P. Obulesu, S.B.Choppavarapu**, Dynamic performance improvement of standalone battery integrated PMSG wind energy system using proportional resonant controller, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (4) (2017) 1353–1365. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.03.010

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander G. KALIMOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
 E-mail: alexanderkalimov@gmail.com  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2978-1894>

**Qusai Khaled Mahmoud AL NAIMI** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: [qusainaimi95@gmail.com](mailto:qusainaimi95@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5223-872X>

**Поступила: 04.11.2025; Одобрена: 27.11.2025; Принята: 30.11.2025.**

**Submitted: 04.11.2025; Approved: 27.11.2025; Accepted: 30.11.2025.**