

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

---

УДК 621.311.001.57

**И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов, Р.А. Уфа,  
А.Б. Аскарлов, В.Е. Рудник, А.В. Киевец**

### **РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВЭУ 4 ТИПА В РАМКАХ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) становятся неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС). Современные ВЭУ подключаются к ЭЭС через статические преобразователи напряжения (ВЭУ 3 и 4 типов), что неизбежно оказывает влияние на ЭЭС в аварийных режимах работы. Влияние оценивается на стадии проектирования путем математического моделирования, в котором достоверность и полнота модели определяет результат. Однако детальное математическое моделирование ЭЭС с ВЭУ, подключенных через статические преобразователи напряжения (СПН), является трудоемкой задачей для существующих программно-вычислительных и программно-аппаратных комплексов (ПВК и ПАК) для расчета режимов и процессов ЭЭС. Моделирование быстродействующих полупроводниковых ключей СПН требует малого шага расчета, что значительно расходует ресурсы вычислительных процессоров, а при моделировании ветроэлектростанций, состоящих из десятков ВЭУ, делает его неосуществимым. Кроме этого, функционирование ЭЭС с ВЭУ описывается системами дифференциальных уравнений высокого порядка и большой размерности, решение которых аналитически не представляется возможным. Неизбежно используется метод численного интегрирования, имеющий свои ограничения, в результате чего достоверность полученных результатов становится неудовлетворительной. Авторами предложена идея моделирования СПН ВЭУ на физическом уровне в рамках разработанного гибридного подхода в моделировании ВЭУ и ЭЭС с ВЭУ. Разработан специализированный гибридный процессор ВЭУ, предназначенный для работы в специальном моделирующем комплексе, проведены экспериментальные исследования.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, гибридное моделирование, статический преобразователь напряжения, физическая модель, электроэнергетическая система.

### 1. Введение

Мощные ветроэнергетические установки (ВЭУ) в составе ветроэлектростанций (ВЭС) становятся неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС) во многих странах. Среди разных конструкций и типов ВЭУ наиболее применимой для работы в составе ЭЭС является ВЭУ 4 типа: ветротурбина (ВТ) с синхронным генератором, возбуждаемым постоянными магнитами (СГПМ), присоединенные через преобразователь напряжения и трансформатор к узлу ЭЭС [1].

Преобразователь представляет собой подключенные друг к другу через цепь постоянного тока (ЦПТ) статические преобразователи напряжения (СПН): со стороны СГПМ (СПН выпрямителя) и со стороны сети (СПН инвертора). В составе ЦПТ применяются конденсаторные батареи (КБ), предназначенные для аккумуляции и передачи электрической мощности с требуемым уровнем напряжения для обеспечения функций регулирования активной и реактивной мощности (рис. 1).

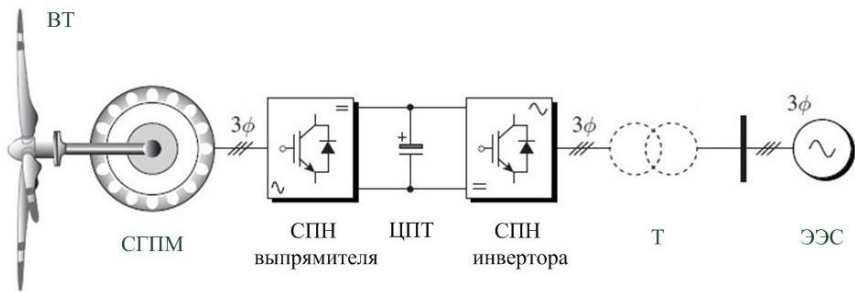


Рис. 1. Конфигурация ВЭУ 4 типа

Для решения задач проектирования и эксплуатации ЭЭС, в том числе – с ВЭУ и оценки влияния их взаимной работы, необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом, которую получают преимущественно путем математического моделирования. Применяемые для этого многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в ЭЭС (*Eurostag*, *PowerFactory*, *PSS/E*, *PSCAD/EMTDC* и др.) используют метод численного интегрирования. Поскольку совокупная математическая модель ЭЭС с ВЭУ неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений, достоверность такого моделирования ПВК оказывается неудовлетворительной [2-4] в силу ограничительных условий применимости теории методов численного интегрирования и накапливаемой методической ошибки интегрирования [5].

Помимо этого, расчеты в ПВК выполняются на персональных компьютерах, и вычислительные ресурсы процессора заняты, в том числе, другими программами и службами, вследствие чего моделирование даже небольших детальных трехфазных ЭЭС ограничивается вычислительной способностью процессора. При моделировании работы быстродействующих полупроводниковых ключей СПН ВЭУ требуются большие вычислительные ресурсы и моделирование с малым шагом интегрирования, что приводит к невозможности применения таких ПВК для детального моделирования ЭЭС с ВЭУ. Частично эту проблему решает применение многопроцессорных программно-управляемых комплексов (ПАК) реального времени (*RTDS*, *eMEGASIM*, *HYPERSIM*, и др.), которые делят вычислительные ресурсы между своими процессорами. Вместе с тем, все ПАК используют также метод численного интегрирования и имеют собственные ограничения, связанные со временем обмена информацией между процессорами, декомпозицией, статическим представлением сетевых элементов, применением метода симметричных составляющих и т.д. [6].

В ПВК и ПАК также не учитываются или учитываются упрощенно модели воспроизведения коммутационных процессов, в частности, функционирование силовых полупроводниковых ключей СПН, коммутации линейных выключателей и разнообразные короткие замыкания (КЗ) [7]. С применением современных быстродействующих устройств СПН актуализируется необходимость их детального моделирования, а для возможности достоверной оценки взаимного влияния ВЭУ на процессы и режимы в ЭЭС необходимо моделировать большие ЭЭС с ВЭУ. При эквивалентировании схем ЭЭС утрачивается влияние отдельных элементов или их небольших групп на режим ЭЭС [8], а динамика протекания процессов, особенно переходных, для больших и для маленьких ЭЭС значительно различается [9].

В научно-исследовательской лаборатории моделирования электроэнергетических систем Томского политехнического университета создан всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), лишенный выше обозначенных проблем моделирования больших ЭЭС, наследуемых ПВК и ПАК [10-11]. Авторами разработан инструмент, представляющий собой специализированный гибридный процессор (СПП) ВЭУ 4 типа, предназначенный для работы в данном комплексе.

## **II. Идея и реализация гибридного подхода в моделировании ВЭУ и ЭЭС с ВЭУ**

Реализация гибридного подхода в моделировании ВЭУ 4 в ЭЭС представляет собой синтез цифровой, аналоговой и физической моделей, воспроизводящих то или иное оборудование ВЭУ 4 типа и моделируемую

ЭЭС. Синтез моделей происходит в разработанном СГП, представляющим собой многопроцессорные параллельные цифроаналоговые структуры, построенные на базе интегральных микросхем, операционных усилителей, цифроаналоговых управляемых ключей, микропроцессоров и других активных и пассивных элементов электроники (рис. 2).

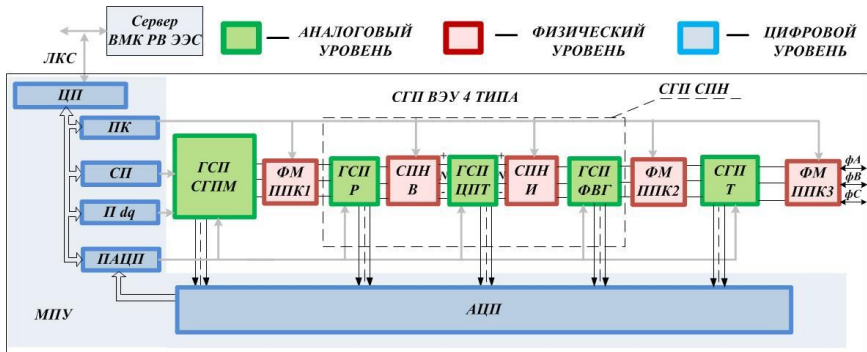


Рис. 2. Структурная схема СГП ВЭУ 4 типа:

ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор математической модели СГПМ, МПУ – микропроцессорный узел, обеспечивающий все информационно-управляющие функции СГП ВЭУ 4 типа и состоящий из периферийных микропроцессоров: СП – сопроцессор математической модели ветра, его аэродинамического преобразования и управления углом поворота лопастей ВТ, и реализующий алгоритмы релейной защиты и автоматики; ПК – процессор коммутации, обеспечивающий управление ЦУАК физических моделей; П  $dq$  – процессор  $d, q$ , обеспечивает координатное преобразование  $d, q \rightleftharpoons A, B, C$ ; ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования (АЦП), обеспечивает посредством АЦП оцифровку результатов моделирования, а также всевозможные функциональные преобразования информации; ЦП – центральный процессор, осуществляет информационно-управляющее взаимодействие по локальной компьютерной сети (ЛКС) между сервером ВМК РВ ЭЭС и периферийными процессорами, а также обеспечивает ввод данных в цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) ГСП и предварительную функциональную обработку результатов моделирования при необходимости; ГСП Р – гибридный сопроцессор реактора; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора присоединения.

Цифровой уровень обеспечивает реализацию алгоритмов управления путем применения цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации на основе современных интегральных устройств микроэлектроники и микропроцессоров. Для ВЭУ 4 типа в СГП на цифровом уровне обеспечивается реализация законов управления углом поворо-

та лопастей ВТ, реализация алгоритмов управления СПН и других информационно управляющих воздействий.

Аналоговый уровень представлен специализированными гибридными параллельными цифро-аналоговыми структурами, согласованным в них математических моделей оборудования ВЭУ (СГПМ, реактор, трансформатор, фильтр высших гармоник). В основе аналогового решения математических моделей, представленных системами дифференциальных уравнений, описывающих весь непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов – использование способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени;

Физический уровень означает реализацию в СГП коммутационных переключений, т.е., работу линейных выключателей, а также работу быстродействующих полупроводниковых ключей СПН ВЭУ 4 типа. Физическое моделирование обеспечивается применением цифрууправляемых физических моделей на базе интегральных униполярных цифрууправляемых аналоговых ключей (ЦУАК), позволяющих адекватно воспроизводить спектр всевозможных коммутационных процессов оборудования ВЭУ 4 типа.

Тем самым, при использовании гибридного подхода в моделировании исключаются проблемы, присущие существующим ПВК и ПАК:

- аналоговый уровень позволяет избежать декомпозицию процессов и режимов в ВЭУ и ЭЭС, использовать полные всережимные математические модели (также исключается неизвестная методическая ошибка численного интегрирования дифференциальных уравнений и ограничение интервала моделирования);
- физический уровень позволяет воспроизводить коммутационные процессы более детально и достоверно и не оказывать влияние на быстродействие моделирования;
- цифровой уровень позволяет осуществлять работу алгоритмов управления, и не ограничивать информационно-управляющие функции и возможности.

### **III. Гибридная модель СПН**

В силу своих преимуществ конфигурация трехуровневого СПН с фиксированной нейтралью является наиболее применимой в ВЭУ 4 типа с СГПМ [12-13]. Физическая модель разработанного СПН (выпрямителя и инвертора) представлена на рис. 3.

В СПН быстродействующие полностью управляемые полупроводниковые  $i$ -ые ключи (транзисторы) реализованы согласно схеме замещения (рис. 4).

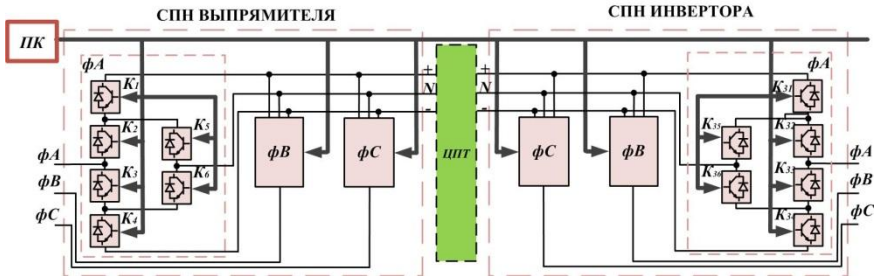


Рис. 3. Структурная схема цифруправляемой физической модели СПН:  
ПК – процессор коммутации, ЦПТ – цепь постоянного тока

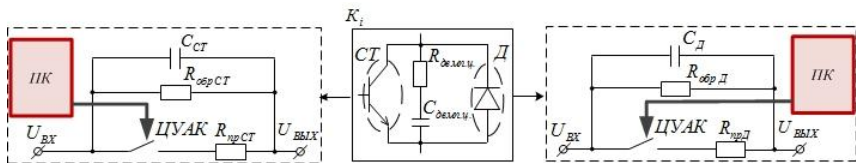


Рис. 4. Структурная схема цифруправляемой физической модели ППК

Униполярный ЦУАК моделирует  $i$ -ый силовой ключ, представляющий силовой управляемый транзистор и обратный диод с сопротивлением  $R_{\text{дем.п.ц}}$  и емкостью  $C_{\text{дем.п.ц}}$  защитного (демпферного) контура и параметрами их схем замещения. Поскольку униполярный ЦУАК является по отношению к реальным транзистору и диоду практически идеальным элементом, ЦУАК имитирующий обратный диод и ЦУАК имитирующий силовой транзистор дополняются прямыми  $R_{\text{пр.д}}$ ,  $R_{\text{пр.ст}}$  и обратными  $R_{\text{обр.д}}$ ,  $R_{\text{обр.ст}}$  сопротивлениями и емкостями  $C_{\text{ст}}$ ,  $C_{\text{д}}$  в соответствующем масштабе, воспроизводящими реальную емкость р-п перехода диода и емкость  $n$ -р- $n$  перехода транзистора в соответствии с их паспортными характеристиками. Таким образом, дополняющие сопротивления и емкость приближают коммутационный процесс переключения силовых полупроводниковых ключей к реальному.

При этом математическая модель системы автоматического управления (САУ) СПН выпрямителя обеспечивает работу в режиме максимальной мощности ВЭУ (*maximum power point tracking – MPPT*), формируя соответствующий сигнал для широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а также контролирует уровень заряда КБ и напряжение в нейтральной точке. А САУ СПН инвертора обеспечивает управление напряжением ЦПТ и реактивной мощностью, осуществляя также контроль гене-

рируемой ВЭУ активной мощности и трехфазного напряжения и его фазу в узле подключения, обеспечивая синхронизацию с ЭЭС [12-14].

#### IV. Экспериментальные исследования СГП ВЭУ 4 типа

Для подтверждения достоверности воспроизведения процессов в СГП ВЭУ 4 типа проведен комплекс экспериментальных исследований работы ВЭУ 4 типа при  $P_{\text{номВЭУ}} = 5 \text{ МВт}$  на нагрузку  $S_{\text{номН}} = 4 \text{ МВА}$  и ЭЭС (рис. 5).

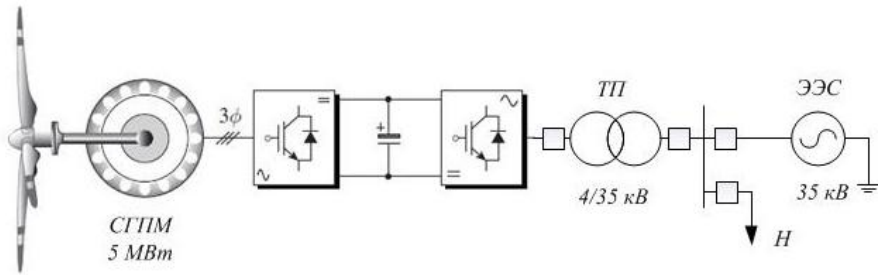


Рис. 5. Схема экспериментальных исследований ВЭУ 4 типа

Получены осциллограммы токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС, а также осциллограммы токов и напряжений на входе и выходе СПН, отражающие характер тока и напряжения на выходе СГПМ до выпрямления и характер тока и напряжения после преобразования инвертором в нормальном квазиустановившемся режиме (рис. 6 и 7).

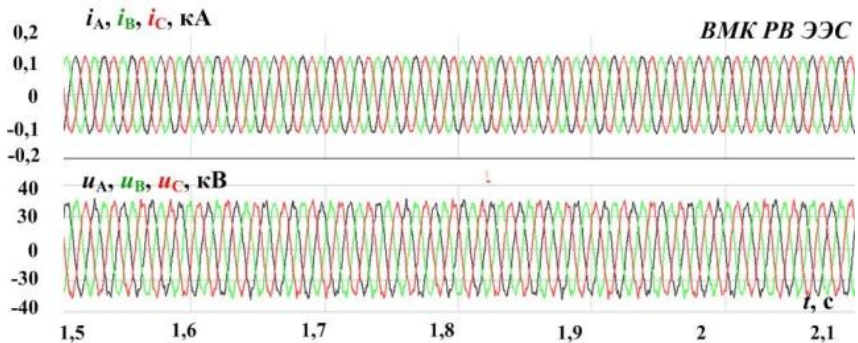


Рис. 6. Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ в ЭЭС

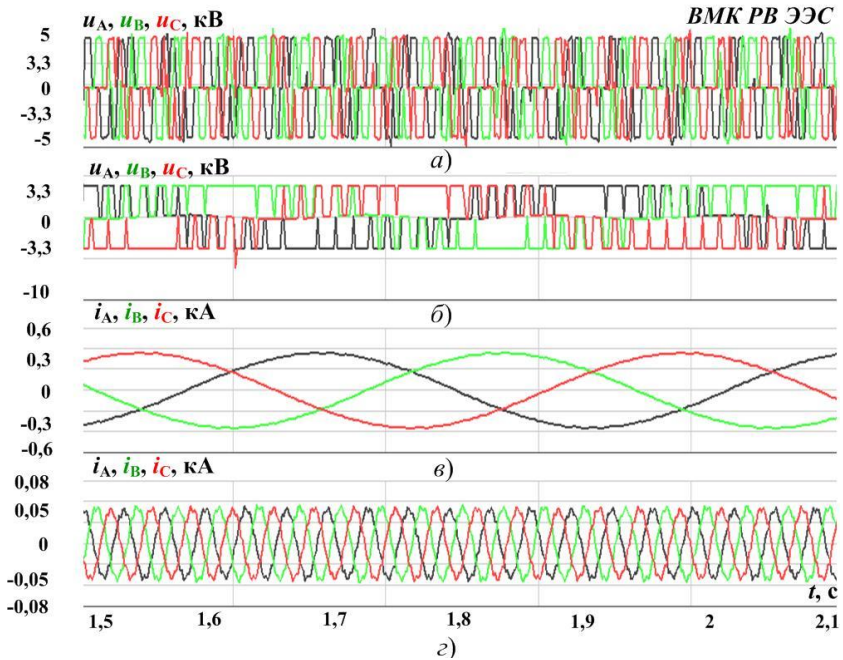


Рис. 7. Осциллограммы фазных токов и напряжений  
СПН выпрямителя и СПН инвертора:  
напряжение выходе инвертора (а); напряжение на выходе СГПМ (б);  
ток на выходе СГПМ (в); ток на выходе инвертора (г)

Осциллограммы фазных напряжений и токов иллюстрируют работу СПН, преобразующих ток и напряжение разных по частоте значений в ток и напряжение частотой  $f = 50$  Гц. Осциллограммы (рис. 9, а и г) сняты непосредственно на выходе инвертора и близки к синусоидальным с некоторой гармонической составляющей, обусловленной работой силовых полупроводниковых ключей.

Осциллограммы токов и напряжений, в узле подключения ВЭУ к ЭЭС, а также осциллограммы токов и напряжений на входе и выходе СПН инвертора в режиме однофазного КЗ представлены на рис. 8 и 9.



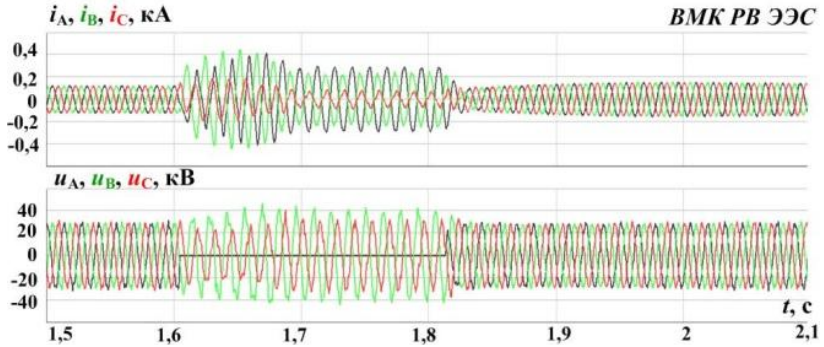


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов и напряжений в узле подключения ВЭУ к ЭЭС при однофазном КЗ

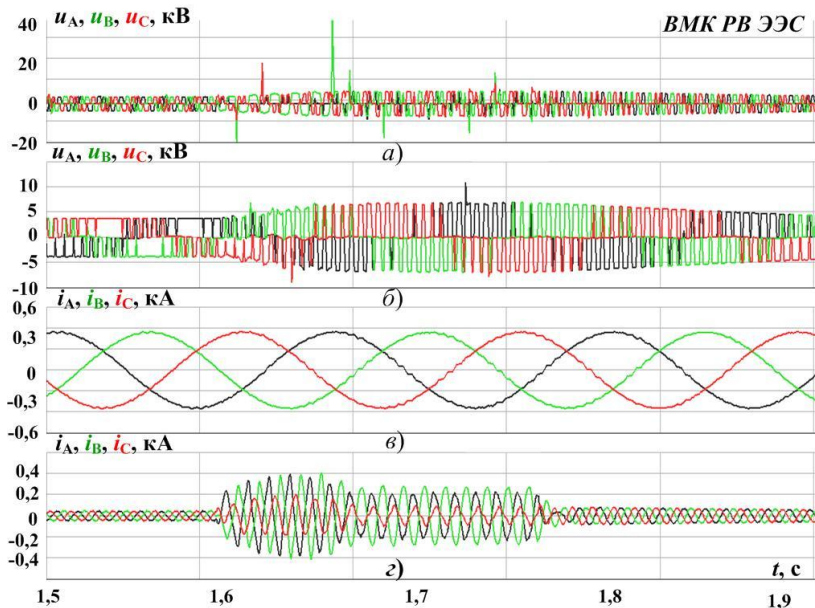


Рис. 9. Осциллограммы фазных токов и напряжений СПН выпрямителя и СПН инвертора при однофазном КЗ: напряжение на выходе инвертора (а); напряжение на выходе СПИМ (б); ток на выходе СПИМ (в); ток на выходе инвертора (г)

### У. Заключение

В соответствии с гибридным подходом разработана физическая модель СПН ВЭУ 4 типа, позволяющая воспроизводить весь непрерывный спектр нормальных и аномальных переходных процессов в ВЭУ 4 типа и ЭЭС с ВЭУ. Коммутационные процессы СПН моделируются на физическом уровне посредством ЦУАК. Проведены экспериментальные исследования разработанного образца. Осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования, соответствуют теоретическим. Гибридный подход в силу своих преимуществ может быть использован при моделировании ЭЭС с ВЭУ любой размерности, что является актуальным для современной электроэнергетики.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10006) «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации».*

© Разживин И.А., 2020

© Суворов А.А., 2020

© Уфа Р.А., 2020

© Рубан Н.Ю., 2020

© Аскаров А.Б. 2020

© Киевец А.В. 2020

© Рудник В.Е. 2020

### Библиографический список

- [1] Ackermann T. Wind power in power systems. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012. – 1049 p.
- [2] Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Высш. Школа, 2001. – 382 с.
- [3] Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008. – P. 31-40.
- [4] Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.П. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения // Известия Вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 92-95.
- [5] Хеминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1968. – 400 с.
- [6] Suvorov A., Gusev A., Ruban N., Andreev M., Askarov A., Ufa R., Razzhivin I., Kievets A., Bay J. Potential application of HRTSim for comprehensive simulation of large-scale power systems with distributed generation // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. № 20 (5). [Электронный ресурс]. URL:

- <https://www.degruyter.com/view/j/ijeeps.2019.20.issue-5/issue-files/ijeeps.2019.20.issue-5.xml> (дата обращения 29.02.2020).
- [7] Martinez-Velasco J.A. Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications. John Wiley & Sons Ltd., 2015. – 648 p.
- [8] Muljadi E., Zhang Y.C., Gevorgian V., Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sept. 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA. Pp. 1–5.
- [9] Carreras B.A., Newman D.E., Dobson I. Does size matter? // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2014. № 24 (2). [Электронный ресурс]. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4868393> (дата обращения 29.02.2020).
- [10] Andreev M., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bems J., Kralik T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. № 34 (2). Pp. 1404-1415.
- [11] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). С. 18-27.
- [12] Yaramasu V., Wu B. Model predictive control of wind energy conversion systems. Wiley-IEEE Press, 2016. – 512 p.
- [13] Yazdani A., Iravani R. A neutral-point clamped converter system for direct-drive variable-speed wind power unit // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. № 21 (2). Pp. 596-607.
- [14] Femia N., Granozio D., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. № 43 (3). Pp. 934-950.

**I.A. Razzhivin, N.Yu. Ruban, A.A. Suvorov, R.A. Ufa,  
A.B. Askarov, V.E. Rudnik, A.V. Kievets**

## **DEVELOPMENT OF PHYSICAL MODEL OF TYPE 4 WIND TURBINE STATIC VOLTAGE CONVERTER WITHIN HYBRID APPROACH**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russia

**Abstract.** The main driver in the development of renewable energy in most countries were the need for energy security, limited hydrocarbon and uranium resources, as well as the provisions of the Kyoto Protocol. Wind energy is developing most actively among all types of renewable energy sources. Wind turbines (WT) are becoming an integral part of electric power systems (EPS). Modern WT are connected to the EPS through static voltage converters (WT of 3 and 4 types), which inevitably affects the EPS in emergency operation. Influence is primarily evaluated at the design stage by mathemati-

cal modeling in which the reliability and completeness of the model determines the result. However, a detailed mathematical modeling of EPS with WT connected through static volt-age converters (SVC) is a laborious task for existing hardware and software simulation tools (HSS) for calculation the modes and processes of EPS. Modeling high-speed semiconductor switches of SVC requires a small calculation step, which significantly consumes the resources of computing processors, and when modeling wind farms consisting of several WT, it makes it not feasible. In addition, the EPS operation with WT is described by systems of differential equations of high order and large dimension, the solution of which is analytically impossible. The method of numerical integration, which has its limitations, is inevitably used, as a result of which the reliability of the results becomes unsatisfactory. The authors proposed the idea of modeling the SVC of WT at the physical level as part of the developed hybrid approach in modeling WT and EPS with WT. A specialized hybrid WT processor has been developed, designed to operate in a special modeling complex, and experimental studies have been carried out.

**Keywords:** electric power system, hybrid modeling, physical model, static volt-age converter, wind turbine.

### References

- [1] T. Ackermann, *Wind power in power systems*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012.
- [2] V.M. Verzhbitsky, *Chislennyye metody (matematicheskij analiz i obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya) [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]*. Moscow: Higher School, 2001 (in Russian).
- [3] J.C. Butcher, *Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, pp. 31-40.
- [4] A.S. Gusev, S.V. Svechkarev and I.P. Plodistiy, "Osnovnyye aspekty problemy modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem, perspektivy i sredstva ih resheniya [The main aspects of the problem of modeling electric power systems, prospects and means of solving them]", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, no. 3, pp. 92-95, 2006 (in Russian).
- [5] R.W. Hamming, *Numerical methods for scientists and engineers*. New York, San Francisco, Toronto, London: Mc Graw-Hill Book Company, 1962.
- [6] A. Suvorov, A. Gusev, N. Ruban, M. Andreev, A. Askarov, R. Ufa, I. Razzhivin, A. Kievets and J. Bay, "Potential application of HRTSim for comprehensive simulation of large-scale power systems with distributed generation", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 20, is. 5, 2019. [Abstract]. Available at: <https://www.degruyter.com/view/j/ijeeps.2019.20.issue-5/issue-files/ijeeps.2019.20.issue-5.xml>.
- [7] J.A. Martinez-Velasco. *Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2015.
- [8] E. Muljadi, Y.C. Zhang, V. Gevorgian and D. Kosterev, "Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant", in proc. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sept. 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA, pp. 1-5.

- 
- [9] B.A. Carreras, D.E. Newman and I. Dobson, “Does size matter?”, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. vol. 24, is. 2, 2014. [Online]. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4868393>.
- [10] M. Andreev, A. Gusev, N. Ruban, A. Suvorov, R. Ufa, A. Askarov, J. Bems and T. Kralik, “Hybrid real-time simulator of large-scale power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, is. 2, pp. 1404-1415, March 2019.
- [11] M.V. Andreyev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, “Concept and basic structure of the all-mode modeling complex”, *Gas industry*, no. 5 (752), pp. 18-27, 2017.
- [12] V. Yaramasu and B. Wu, *Model predictive control of wind energy conversion systems*. Wiley-IEEE Press, 2016.
- [13] A. Yazdani and R. Iravani, “A neutral-point clamped converter system for direct-drive variable-speed wind power unit”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, is. 2, pp. 596-607, June 2006.
- [14] N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, “Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, is. 3, pp. 934-950, July 2007.