

УДК 621.311.001.57

**С.А. Ставицкий, А.А. Суворов, Р.А. Уфа, М.В. Андреев, А.С. Гусев**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия**ВСЕРЕЖИМНАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОПОВОРОТНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Внедрение в электроэнергетические системы (ЭЭС) фазоповоротного трансформатора обеспечивает более эффективное управление режимами ЭЭС путем регулирования напряжения и активной мощности. При этом квазиустановившиеся и переходные процессы в ЭЭС становятся более сложными, что является причиной применения в используемых инструментах моделирования: декомпозиции процессов ЭЭС, упрощения математических моделей элементов ЭЭС, ограничения времени моделирования. Указанные упрощения и ограничения в итоге приводят к неопределенной потере полноты и достоверности моделирования ЭЭС в целом. Представленная в статье концепция программно-технических средств моделирования фазоповоротного трансформатора в составе ЭЭС позволяет решить данную проблему. Программно-технические средства моделирования фазоповоротного трансформатора представляют собой гибридное моделирование, которое включает аналоговый, цифровой и физический виды моделирования. Аналоговый подход моделирования заключается в решении систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы, протекающие в фазоповоротном трансформаторе с помощью метода непрерывного неявного интегрирования. Цифровой подход обеспечивает управление параметрами (такими как индуктивность рассеяния, активное сопротивление и т.д) и коммутациями в модели фазоповоротного трансформатора. Физический подход представляет собой подключение и переключения в элементах ЭЭС, как в реальной ЭЭС. В статье представлена всережимная модель фазоповоротного трансформатора с тиристорной системой управления, основанная на гибридном подходе моделирования и адаптированная для использования во всережимном моделирующем комплексе реального времени ЭЭС, разработанного в Томском политехническом университете. С помощью всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС, в котором реализована Томская ЭЭС, и разработанной модели фазоповоротного трансформатора проведены экспериментальные исследования по подключению двух несинхронно работающих частей Томской энергосистемы.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, фазоповоротный трансформатор, гибридное моделирование, реальное время.

**S.A. Stavitsky, A.A. Suvorov, R.A. Ufa, M.A. Andreev, A.S. Gusev**

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

## **ALL-MODE PHASE SHIFTING TRANSFORMER MODEL IN ELECTRIC POWER SYSTEM**

The phase shifting transformer in the electric power system (EPS) provides more efficient control of EPS modes by voltage and active power flow regulation. However, nowadays quasi-steady and transient processes in the EPS become more complicated. As a result, the commonly used simulation tools apply decomposition of EPS processes to quasi-steady and transient, simplification of mathematical models of EPS elements, limitation of the simulation time interval. Mentioned simplifications and limitations in general lead to an uncertain loss of completeness of EPS modeling. The concept of software and hardware tools of phase shifting transformer simulation, presented in the article, allows to solve this problem. The software and hardware of phase shifting transformer simulation are the tools of hybrid simulation, which include analog, digital, and physical approaches of the simulation. The analog approach is the solution of the differential equations system, describing the phase shifting transformer processes by continuous implicit integration. The digital approach provides the control of the electronic switches, the phase shifting transformer parameters, such as leakage inductance, active resistance etc. The physical approach is the connection and switching in the EPS elements as in real EPS. The article presents the all-mode thyristor-controlled phase shifting transformer model, developed by hybrid simulation approach and adapted for use in the Hybrid Real Time Power System Simulator developed in Tomsk polytechnic university. The appropriate research of phase shifting transformer in the EPS was carried out by Hybrid Real Time Power System Simulator, in which the Tomsk EPS (region of Russia where there is a problem of non-synchronous operation of the northern and southern parts) is implemented. By means of the Tomsk EPS model and developed phase shifting transformer model, the purpose of which was to interconnect two asynchronously operating parts of the Tomsk EPS and experimental research were carried out.

**Keywords:** electric power system, phase shifting transformer, hybrid simulation, real-time.

**Введение.** Внедрение в электроэнергетические системы (ЭЭС) устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems), одним из которых является фазоповоротный трансформатор (ФПТ) [1–3], позволяет повысить надежность и управляемость ЭЭС [4, 5], в частности, осуществлять автоматическое регулирование напряжений и потоков активной мощности, минимизацию потерь мощности [6–8]. ФПТ состоит из двух трансформаторов (рис. 1, *а*), один из которых включается последовательно (Т1, серийный) в каждую фазу линии, другой – параллельно (Т2, шунтовый) на междуфазное напряжение [9, 10]. Векторная диаграмма напряжений, описывающих принцип работы ФПТ, показана на рис. 1, *б*. Напряжение ФПТ ( $U'$ ) будет определяться напряжением в начале линии ( $U$ ) и напряжением последовательной обмотки Т1 ( $\Delta U$ ), которое сдвинуто по отношению к напряжению фазы на 90 эл. град (напряжение каждой фазы сдвинуто по отношению к междуфазному напряжению двух других фаз на 90°).

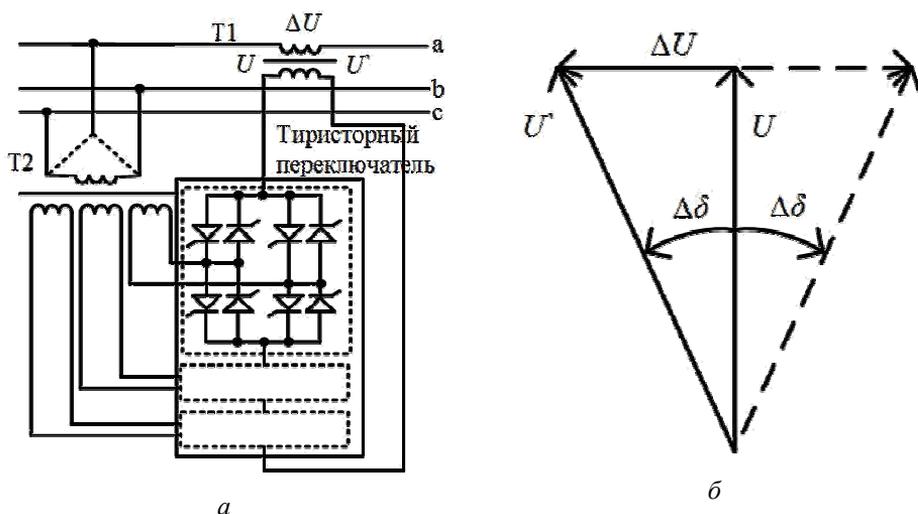


Рис. 1. Схема (а) и векторная (б) диаграмма полупроводникового ФПТ

В результате  $U'$  и угол между напряжениями по концам линии будут определяться так:

$$U' = U \pm \Delta U, \Delta = \delta' \pm \Delta \delta.$$

Регулирование  $\Delta \delta$  по величине и по знаку, которое обеспечивается с помощью блока управления тиристорным переключателем, обеспечивает изменение и регулирование передаваемой по линии мощности.

Внедрение ФПТ значительно усложняет динамические свойства ЭЭС: квазиустановившиеся и переходные нормальные и аномальные процессы в оборудовании. В результате для многих задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС оказываются неприемлемыми неизбежно применяемые в используемых средствах расчета режимов и процессов ЭЭС упрощения и ограничения, а именно глубокая декомпозиция объективно единого и непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов ЭЭС, существенные упрощения математических моделей элементов, особенно электросетевых, и соответственно ЭЭС в целом, ограничения интервала воспроизведения процессов [11–13], что приводит к неопределимой потере полноты и достоверности моделирования. Следует также отметить повышенные в этих условиях для эксплуатации требования к оперативности моделирования вплоть до осуществления его в реальном времени [14–16].

Вышеизложенное определяет актуальность создания программно-технических средств, обеспечивающих непрерывное и бездекомпозиционное, методически точное решение всережимной математической модели ФПТ в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной погрешностью, а также адекватную реализацию систем автоматического управления ФПТ и воспроизведения всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, различное управление параметрами моделируемого ФПТ и другие необходимые информационно-управляющие функции, в том числе в составе соответствующих средств моделирования ЭЭС.

**1. Материалы и методы.** Основу обозначенной математической модели для различных конструктивных модификаций ФПТ с двумя трансформаторами (шунтовый и серийный) составляют нижеприведенные системы уравнений, которые могут использоваться непосредственно или являются одной из идентичных частей такого рода моделей для каждой из параллельных электромагнитных систем фазы ФПТ:

1) шунтовый трансформатор

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{штj1} - L_{штj1} \frac{di_{штj1}}{dt} - R_{штj1} \cdot i_{штj1} - W_{штj1} \frac{d\Phi_{штj}}{dt} = 0; \\ U_{штj2} + \sum_{n=2}^{N+1} \left( L_{штjn} \frac{di_{штjn}}{dt} + R_{штjn} \cdot i_{штjn} - W_{штjn} \frac{d\Phi_{штj}}{dt} \right) = 0; \\ W_{штj\mu} \cdot i_{штj\mu} = W_{штj1} \cdot i_{штj1} + \sum_{n=2}^{N+1} (W_{штjn} \cdot i_{штjn}); \\ F_{штj\mu} \equiv f(\Phi_{штj}). \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $j$  – фаза,  $j = A, B, C$ ;  $N$  – число гальванически развязанных секций шунтового трансформатора,  $N = 1, 2, 3, 4$ ;  $U_{штj1}, U_{штj2}$  – напряжение  $j$ -й фазы первичной и вторичной обмоток шунтового трансформатора;  $i_{штjk}$  – ток  $j$ -й фазы  $k$ -й обмотки шунтового трансформатора;  $W_{штjk}$  – число витков  $j$ -й фазы  $k$ -й обмотки шунтового трансформатора;  $L_{штjk}$  – индуктивность рассеивания  $j$ -й фазы  $k$ -й обмотки шунтового трансформатора;  $R_{штjk}$  – активное сопротивление  $j$ -й фазы  $k$ -й обмотки шунтового трансформатора;  $k$  – номер обмотки шунтового трансформатора,  $k = 1, 2, 3, 4, 5$ ;  $F_{штj\mu}$  – намагничивающая сила  $j$ -й фазы шунтового

трансформатора электромагнитной системы шунтового трансформатора, определяемая уравнением баланса намагничивающих сил;  $i_{ШТj\mu}$  – ток намагничивания  $j$ -й фазы шунтового трансформатора;  $\Phi_{ШТj\mu}$  – магнитный поток;

2) серийный трансформатор:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{CTm1} - L_{CTm1} \frac{di_{CTm1}}{dt} - R_{CTm1} \cdot i_{CTm1} - W_{CTm1} \frac{d\Phi_{CTmn}}{dt} = 0; \\ \left( U_{CTj2H} - U_{CTj2K} \right) + L_{CTj2} \frac{di_{CTj2}}{dt} + R_{CTj2} \cdot i_{CTj2} - W_{CTj2} \frac{d\Phi_{CTmn}}{dt} = 0; \\ W_{CTm1} \cdot i_{CTm\mu} = W_{CTm1} \cdot i_{CTm1} + W_{CTj2} \cdot i_{CTj2}; \\ F_{CTm\mu} \equiv f(\Phi_{CTmn}). \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $j, m, n$  – фазы серийного трансформатора  $j = A, B, C$ ,  $m = A, B, C$ ,  $n = A, B, C$ , при этом  $j \neq m \neq n$ ;  $U_{CTm1}$  – напряжение  $j$ -й фазы первичной обмотки серийного трансформатора;  $U_{CTjKH}$ ,  $U_{CTjKK}$  – напряжения в начале и в конце  $j$ -й фазы  $k$ -й обмотки серийного трансформатора. Остальные величины имеют аналогичное значение, как для шунтового трансформатора;

3) токоограничивающий реактор:

$$U_{Rj1} - U_{Rj2} - L_{Rj} \frac{di_{Rj}}{dt} - R_{Rj} \cdot i_{Rj} = 0, \quad (3)$$

где  $U_{Rj1}$  и  $U_{Rj2}$  – напряжения на входе и выходе  $j$ -й фазы реактора;  $i_{Rj}$  – ток  $j$ -й фазы реактора;  $L_{Rj}$  – индуктивность рассеивания обмотки  $j$ -й фазы реактора;  $R_{Rj}$  – активное сопротивление обмотки  $j$ -й фазы реактора.

При использовании подобной математической модели ФПТ, а также аналогичных математических моделей других элементов совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, удовлетворительное решение которой численными методами оказывается маловероятным, и указанные ранее упрощения и ограничения становятся неизбежными. Кроме

того, независимо от этого всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение которой отнесено в теории методов дискретизации дифференциальных уравнений к категории фундаментальных проблем.

Альтернативным направлением решения указанной проблемы является комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, концепция которого включает в себя аналоговый, цифровой и физический виды моделирования. Аналоговый подход представляет собой решение системы дифференциальных уравнений, которые описывают модель ФПТ, методом непрерывного неявного интегрирования. Цифровой подход – управление параметрами ФПТ через компьютерные средства. Физический подход – соединения и коммутации в элементах ЭЭС, как в реальных ЭЭС. Более подробное описание данной концепции приведено в [17, 18].

Структурная схема ФПТ, соответствующая обозначенной концепции, изображена на рис. 2.

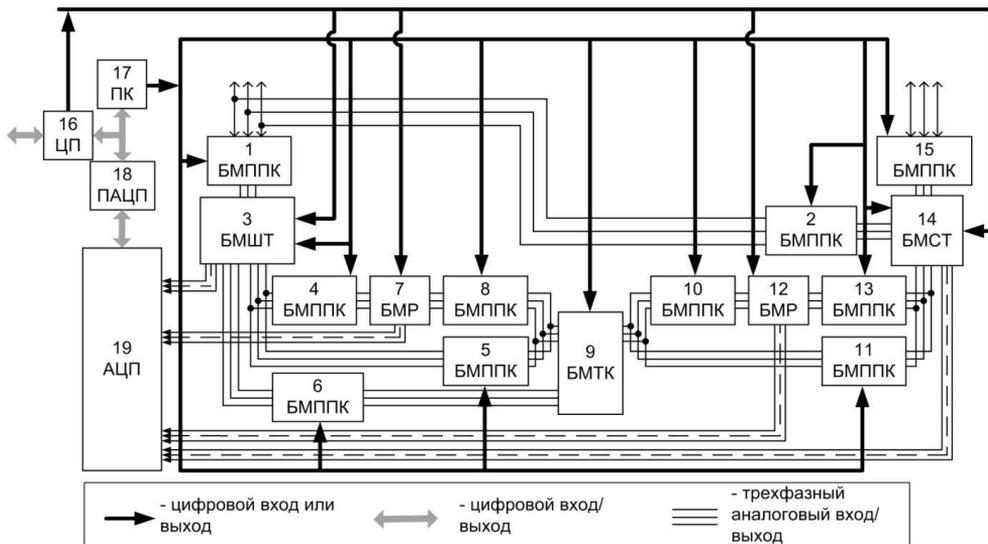


Рис. 2. Структурная схема всережимной модели ФПТ

Входом модели ФПТ служат блоки моделирования продольно-поперечных коммутаций (БМППК) 1 и 2, осуществляющие различного рода продольные и/или поперечные коммутации, например, короткие замыкания, обрывы фаз. Аналогичные блоки установлены под номерами

ми 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13 и 15, БМППК под номером 15 является выходом модели ФПТ. Управление коммутациями производится через цифровые каналы от процессора коммутаций (ПК). ПК также управляет блоком моделирования тиристорного коммутатора (БМТК), который представляет собой набор ключей, каждый из которых замещает действие тиристора.

Решение дифференциальных уравнений, описывающих функционирование ФПТ, осуществляется в отдельных блоках моделирования шунтового трансформатора (БМШТ), серийного трансформатора (БМСТ). В случае необходимости в модели ФПТ могут быть подключены блоки моделирования токоограничивающих реакторов (БМР).

Результаты решения систем дифференциальных уравнений в БМШТ, БМСТ и БМР передаются в АЦП, после которого оцифрованные сигналы попадают в процессор АЦП (ПАЦП), связанный с ПК и центральным процессором (ЦП). ЦП осуществляет связь с компьютером, а также задает параметры реакторов, шунтового и серийного трансформаторов, например, активное сопротивление или индуктивность рассеивания.

Разработанная подобным образом модель ФПТ адаптирована для использования во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [19, 20]. ВМК РВ ЭЭС представляет собой параллельную, многопроцессорную, программно-техническую систему реального времени гибридного типа, объединяющую в себе адаптируемую совокупность моделей всех элементов ЭЭС и информационно-управляющую систему.

**2. Результаты исследований и обсуждение.** Для проверки адекватности разработанной модели ФПТ в ВМК РВ ЭЭС была реализована модель Томской ЭЭС (рис. 3).

На сегодняшний день Томская ЭЭС состоит из несинхронно работающих северной и южной частей, эксплуатационный раздел между которыми проходит по транзиту 220 кВ между подстанциями (ПС) Томская (ОЭС Сибири) – Нижневартовская ГРЭС (ОЭС Урала) протяженностью 797,3 км. Поэтому проведение эксплуатационных переключений на транзите практически всегда приводит к временному отключению части потребителей, значительному недоотпуску нефти и газа. При сравнительно небольшом недоотпуске электроэнергии этим

потребителям (в основном предприятиям нефтегазового комплекса) в режимах оперативных переключений, недоотпуск нефти и газа достигает весьма заметных размеров из-за длительного восстановления технологического процесса [21].

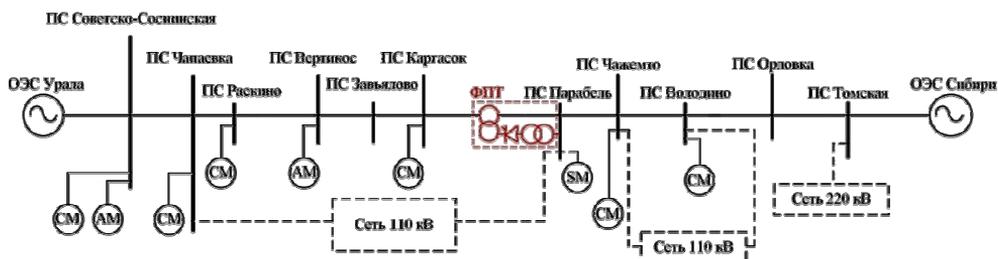


Рис. 3. Место установки ФПТ в Томской энергосистеме:  
СМ – синхронная машина; АМ – асинхронная машина

Обозначенные ранее свойства и возможности ФПТ позволяют рассматривать его для решения данной проблемы и объединения несинхронно работающих частей Томской ЭЭС.

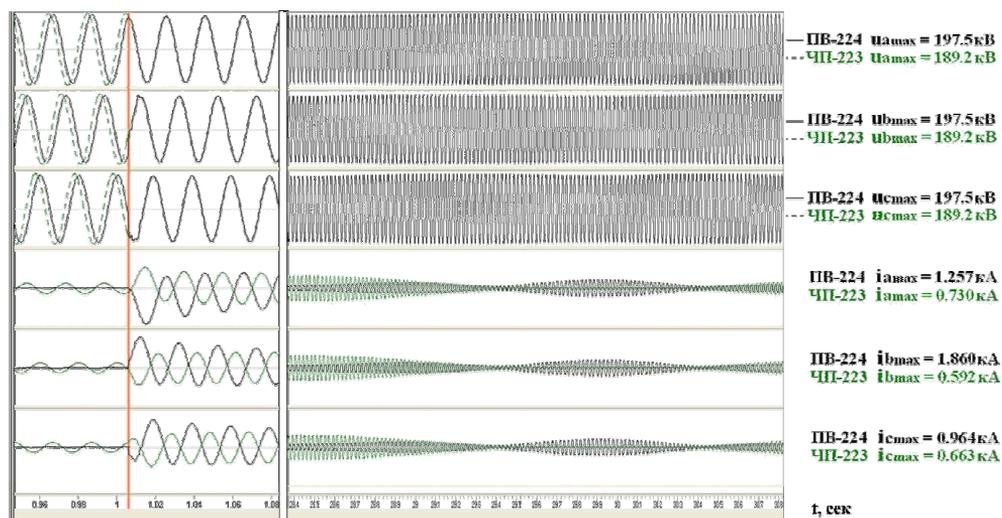


Рис. 4. Включение несинхронно работающих частей ЭЭС на параллельную работу без фазоворотного трансформатора

Для нормальной схемы Томской энергосистемы в эксплуатационном разделе на ПС «Парабель» угол между векторами напряжений разных систем шин составляет  $43,2^\circ$ . Осциллограммы подключения на параллельную работу южной и северной частей Томской энергосисте-

мы без ФПТ представлены на рис. 2. Напряжения и токи измеряются на ПС «Парабель». Линия ПВ-224 (ПС «Каргасок» – ПС «Парабель») изначально отключена со стороны ПС Парабель; линия ЧП-223 (ПС «Чажемто» – ПС «Парабель») включена с обеих сторон. На рис. 4 видно, что при включении южной и северной частей Томской энергосистемы на параллельную работу наступают асинхронные качания тока, которые не затухают с течением временем и могут служить причиной перехода системы в асинхронный режим.

Согласно проведенным исследованиям было установлено, что величина угла ФПТ, при котором колебания тока затухают и наступает процесс синхронизации между южной и северной частями Томской энергосистемы, не должна превышать  $21,6^\circ$ . Соответствующая осциллограмма данного процесса представлена на рис. 5.

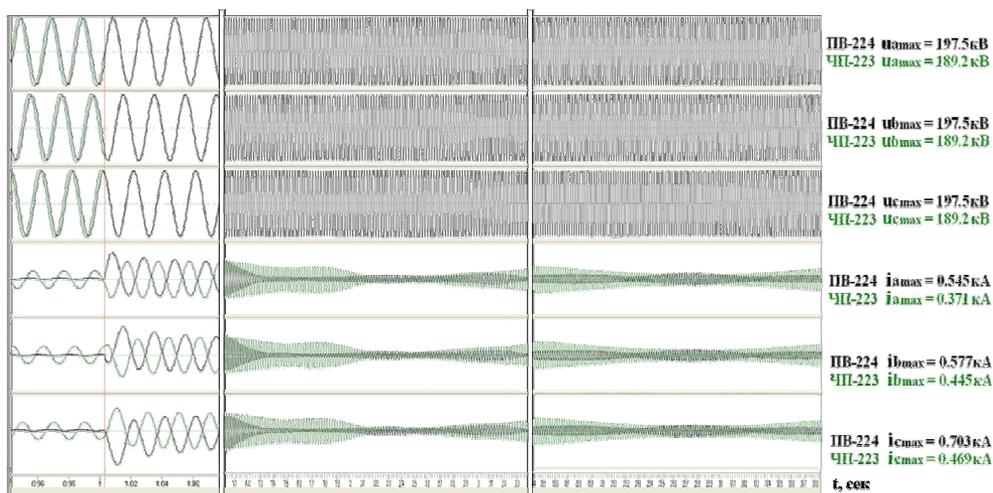


Рис. 5. Включение несинхронно работающих частей ЭЭС на параллельную работу с помощью ФПТ

**Выводы.** Предложенный гибридный подход моделирования ФПТ позволяет решать свойственную цифровым методам моделирования проблему получения полной и достоверной информации о процессах в ФПТ и ЭЭС в целом.

С помощью разработанной всережимной модели ФПТ, добавленной в модель ВМК РВ ЭЭС Томской энергосистемы, получены результаты уменьшения угла между векторами напряжений и объединения несинхронно работающих частей Томской энергосистемы. Получен

критический угол ( $21,6^\circ$ ), при котором наступает процесс ресинхронизации. Совокупность представленных результатов разработки программно-технических средств всережимного моделирования ФПТ и выполненные экспериментальные исследования на примере реально проектируемой системы электроснабжения подтверждают достижения поставленной цели, заключающейся в создании средств, обеспечивающих бездекомпозиционное, непрерывное, методически точное решение в реальном времени всережимной математической модели ФПТ.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант №МК-2150.2019.9.*

### **Библиографический список**

1. Analytical Approach to Grid Operation with Phase Shifting Transformers / J. Verboomen, D. Van Hertem, P.H. Schavemaker, W. Kling, R. Belmans // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23. – № 1. – P. 41–46.
2. Enhancing the utilization of the matlala and glencowie 22 kV radial feeders by interconnecting them using a phase shifting transformer / M. Duduzile, M. Nhlanhla, S. Silence, J-H.C. Pretorius // 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – 2012. – P. 1–5.
3. Fangang M., Zhongcheng M., Lie G. A 12-pulse Rectifier Based on Power Electronic Phase-shifting Transformer // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). – 2018. – P. 1–4.
4. Prechanon K. Improvement of transient stability of power system by thyristor controlled phase shifter transformer // American Journal of Applied Sciences. – 2010. – Vol. 7. – № 11. – P. 1495–1499.
5. Badran I., Mahmood A.L., Lazim M.T. Harmonics phase shifter for a three-phase system with voltage control by integral-cycle triggering mode of thyristors // Applied Sci. – 2008. – Vol. 5. – P. 1580–1587.
6. Patel B., Smith H. Application of phase shifting transformers for Daniel-McKnight 500 kV interconnection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1986. – Vol. PWRD-1. – № 3. – P. 167–173.
7. C57.135 – IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformer. – May, 2002.

8. Kling W. Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity // CIGRE Session. – 2004. – P. 2–207.

9. Добрусин Л. Тенденции применения фазопоротных трансформаторов // Силовая электроника. – 2012. – № 5. – С. 60–66.

10. Modeling and control of thyristor controlled phase shifting transformer / X. Yang, H. Chen, X. Zhao, Zh. Wang, X. Wu, Yu. Song, J. Ding // IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, 2015. – P. 1–6.

11. Babuska I, Prager M, Vitasek E. Numerical processes in differential equations. – Praha: Interscience Publishers, 1967. – P. 1–70.

12. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential Algebraic Problems. – Germany, Berlin: Springer, 1996. – P. 36–60.

13. Hamming R. Numerical Methods for Scientists and Engineers. – New York, NY, USA: Dover, 1962. – P. 423–478.

14. Chen Y, Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for de-tailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of powersystems // IET Gener. Transmiss. Distrib. – 2013. – Vol. 7. – № 5. – P. 451–463.

15. Shuet D. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models // IEEE Trans. Power Del. – 2018. – Vol. 33. – № 1. – P. 130–140.

16. Geographically distributed real-time digital simulations using Linear prediction / R. Liu, M. Mohanpurkar, M. Panwar, R. Hovsopian, A. Srivastava, S. Suryanarayanan // Int. J. Elect. Power Energy Syst. – 2017. – Vol. 84. – P. 308–317.

17. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems / M.V. Andreev, A.S. Gusev, N.Yu. Ruban, A.A. Suvorov, R.A. Ufa, A.B. Askarov, J. Bemš, T. Králík // IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – Vol. 34. – № 2. – P. 1404–1415.

18. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control / M. Andreev, Y. Borovikov, A. Gusev [et al.] // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2018. – Vol. 12, № 1. – P. 133–141.

19. Концепция и базовая структура всерезжимного моделирующего комплекса / М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, А.А. Суворов, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа // Газовая промышленность. – 2017. – № 5(752). – С. 18–27.

20. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем / М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, А.А. Суворов, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа // Газовая промышленность. – 2017. – № 6(753). – С. 94–104.

21. Маркман Г.З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. – 184 с.

### References

1. Verboomen J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W., Belmans R. Analytical Approach to Grid Operation with Phase Shifting Transformers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 41-46.

2. Duduzile M., Nhlanhla M., Silence S., Pretorius J-H.C. Enhancing the utilization of the matlala and glencowie 22 kV radial feeders by interconnecting them using a phase shifting transformer. *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012, pp. 1-5.

3. Fangang M., Zhongcheng M., Lie G. A 12-pulse Rectifier Based on Power Electronic Phase-shifting Transformer. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2018, pp. 1-4.

4. Prechanon K. Improvement of transient stability of power system by thyristor controlled phase shifter transformer. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7, no. 11, pp. 1495-1499.

5. Badran I., Mahmood A.L., Lazim M.T. Harmonics phase shifter for a three-phase system with voltage control by integral-cycle triggering mode of thyristors. *Applied Sci*, 2008, vol. 5, pp. 1580-1587.

6. Patel B., Smith H. Application of phase shifting transformers for Daniel-McKnight 500 kV interconnection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1986, vol. PWRD-1, no. 3, pp. 167-173.

7. C57.135 - IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformer, May, 2002.

8. Kling W. Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity. *CIGRE Session*, 2004, pp. 2-207.

9. Dobrusin L. Tendentsii primeneniia fazopovorotnykh transformatorov [Trends in the use of phase-shifting transformers]. *Silovaia elektronika*, 2012, no. 5, pp. 60-66.

10. Yang X., Chen H., Zhao X., Wang Zh., Wu X., Song Yu., Ding J. Modeling and control of thyristor controlled phase shifting transformer. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*, 2015. – P. 1–6.
11. Babuska I, Prager M, Vitasek E. Numerical processes in differential equations. Praha: Interscience Publishers, 1967, pp. 1-70.
12. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential Algebraic Problems. Germany, Berlin: Springer, 1996, pp. 36-60.
13. Hamming R. Numerical Methods for Scientists and Engineers. New York, NY, USA: Dover, 1962, pp. 423-478.
14. Chen Y, Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of powersystems. *IET Gener. Transmiss. Distrib*, 2013, vol. 7, no. 5, pp. 451-463.
15. Shuet D. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models. *IEEE Trans. Power Del*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 130-140.
16. Liu R., Mohanpurkar M., Panwar M., Hovsopian R., Srivastava A., Suryanarayanan S. Geographically distributed real-time digital simulations using Linear prediction. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, 2017, vol. 84, pp. 308-317.
17. Andreev M.V., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Suvorov A.A., Ufa R.A., Askarov A.B., Bemš J., Králík T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 1404-1415.
18. Andreev M., Borovikov Y., Gusev A. et al. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 133-141.
19. Andreev M.V., Borovikov Iu.S., Gusev A.S., Sulaimanov A.O., Suvorov A.A., Ruban N.Iu., Ufa R.A. Kontseptsiia i bazovaia struktura vserezhimnogo modeliruiushchego kompleksa [The concept and basic structure of hybrid real time simulator]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2017, no. 5(752), pp. 18-27.
20. Andreev M.V., Borovikov Iu.S., Gusev A.S., Sulaimanov A.O., Suvorov A.A., Ruban N.Iu., Ufa R.A. Prakticheskoe primenenie vserezhimnogo modeliruiushchego kompleksa elektroenergeticheskikh sistem [Practical application of the hybrid real time simulator of electric power systems]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2017, no. 6(753), pp. 94-104.

21. Markman G.Z. *Energoeffektivnost' preobrazovaniia i transportirovki elektricheskoi energii [Energy Efficiency Conversion and Transportation of Electric Energy]*. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2008. 184 p.

### **Сведения об авторах**

**Ставицкий Сергей Александрович** (Томск, Россия) – аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: sas4@tpu.ru).

**Суворов Алексей Александрович** (Томск, Россия) – кандидат технических наук отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: suvorovaa@tpu.ru).

**Уфа Руслан Александрович** (Томск, Россия) – кандидат технических наук отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: hecn@tpu.ru).

**Андреев Михаил Владимирович** (Томск, Россия) – кандидат технических наук отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: andreevmv@tpu.ru).

**Гусев Александр Сергеевич** (Томск, Россия) – доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, e-mail: gusev\_as@tpu.ru).

### **About the authors**

**Stavitsky Sergey Aleksandrovich** (Tomsk, Russian Federation) is a Graduate Student Division for Power and Electrical Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: sas4@tpu.ru).

**Suvorov Aleksey Aleksandrovich** (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D in Technical Sciences Division for Power and Electrical Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: suvorovaa@tpu.ru).

**Ufa Ruslan Aleksandrovich** (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D in Technical Sciences Division for Power and Electrical Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: hecn@tpu.ru).

**Andreev Mikhail Vladimirovich** (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D in Technical Sciences Division for Power and Electrical Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: andreevmv@tpu.ru).

**Gusev Aleksandr Sergeevich** (Tomsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences Division for Power and Electrical Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: gusev\_as@tpu.ru).

Получено 30.10.2019