

Математическая модель турбоагрегата с учетом крутильных колебаний валопровода

А. А. Сафронов^{1,2}, Ф. В. Чмиленко³, В. Д. Рождественский², Ю. Д. Дудник¹✉

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
(ИЭЭ РАН), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉julia_dudnik-s@mail.ru

Аннотация. Рассматривается комплексная математическая модель турбоагрегата для определения опасных механических воздействий на валопровод на основе расчетов переходных процессов при авариях в электрической сети, которые характеризуются воздействием знакопеременных моментов большой амплитуды с частотами 50 и 100 Гц. Важным элементом служит модель диодного бесщеточного возбудителя, жестко присоединенного к генератору, также изменяющего электромагнитный момент под действием автоматического регулятора возбуждения. Показано, что возникающие при авариях воздействия могут представлять опасность для элементов конструкции турбоагрегата, в частности для соединения между генератором и возбудителем.

Ключевые слова: синхронный генератор, диодная бесщеточная система возбуждения, несимметричное короткое замыкание, неодновременное короткое замыкание

Для цитирования: Математическая модель турбоагрегата с учетом крутильных колебаний валопровода / А. А. Сафронов, Ф. В. Чмиленко, В. Д. Рождественский, Ю. Д. Дудник // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 108–115. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-108-115.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Mathematical Model of Turbine Unit Considering Shaft Line Torsional Vibrations

A. A. Safronov^{1,2}, F. V. Chmilenko³, V. D. Rozhdestvensky², Yu. D. Dudnik¹✉

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences
(IEE RAS), Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉julia_dudnik-s@mail.ru

Abstract. The article considers a complex mathematical model of a turbo-unit for studying transient processes in order to clarify the mechanical strength indicators of the design elements. Significant danger for the unit is posed by alternating torques with frequencies of 50 and 100 Hz, arising during short circuits in the electrical network. An important element is the model of a diode brushless exciter located on the same shaft with a generator, which is a powerful electric machine operating in a transient mode under the control of an automatic excitation regulator. It is shown that electromagnetic torques arising during short circuits can negatively affect the mechanical strength of the design elements of the turbo-unit, in particular, the connection between the generator and the exciter.

Keywords: synchronous generator, diode brushless excitation system, asymmetric short circuit, non-simultaneous short circuit

For citation: Mathematical Model of Turbine Unit Considering Shaft Line Torsional Vibrations / A. A. Safronov, F. V. Chmilenko, V. D. Rozhdestvenskij, Yu. D. Dudnik // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 108–115. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-108-115.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Генераторы большой единичной мощности характеризуются значительными номинальными токами и моментами, а также ухудшенными электромеханическими параметрами, поэтому для оценки условий работы генераторных и высоковольтных выключателей и уточнения требований к механической прочности элементов конструкции особое значение имеет выполнение расчетов процессов при возникновении коротких замыканий на выводах статорных обмоток и в сети высокого напряжения. Возникающие при несимметричных коротких замыканиях знакопеременные моменты с частотами 50 и 100 Гц могут представлять собой значительную опасность в силу приближения к собственным частотам колебаний валопровода. Электромагнитные (и, соответственно, скручивающие механические) моменты опасной амплитуды с указанными частотами могут сопровождать процессы при отключениях коротких замыканий или коммутациях в сети [1]–[6].

При разработке математической модели турбоагрегата, учитывающей крутильные колебания, весьма существен учет дополнительных факторов, к которым относится и учет электромагнитного момента, развиваемого в ходе переходного процесса возбудителем-элементом валопровода агрегата [7], [8]. Типовая схема валопровода приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

ЦВД – цилиндр высокого давления паровой турбины; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; Г – генератор; В – возбудитель;

M_3 – M_1 – вращающие моменты, развиваемые цилиндрами паровой турбины; M_e – электромаг-

нитный момент генератора; M_B – электромагнитный момент возбудителя;

J_1 – J_3 – моменты инерции цилиндров паровой турбины; J_Γ – момент инерции ротора генератора; J_B – момент инерции ротора возбудителя;

C_{32} , C_{21} , $C_{1\Gamma}$, $C_{\Gamma B}$ – жесткости участков, соединяющих элементы валопровода турбоагрегата.

Моделирование переходных процессов генератора выполняется на базе уравнений синхронной машины с учетом быстропереходных процессов цепей статора (Парка–Горева [9]). Моделирование крутильных колебаний валопровода турбоагрегата выполнялось на основе записи системы дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безынерционными связями [1], [2],

$$\begin{cases} J_B \frac{d\omega_B}{dt} = -M_B + C_{\Gamma B}(\delta_\Gamma - \delta_B) + \\ + H_{\Gamma B}(\omega_\Gamma - \omega_B), \\ J_\Gamma \frac{d\omega_\Gamma}{dt} = -M_e + C_{1\Gamma}(\delta_1 - \delta_\Gamma) + \\ + H_{1\Gamma}(\omega_1 - \omega_\Gamma) - C_{\Gamma B}(\delta_\Gamma - \delta_B) - \\ - H_{\Gamma B}(\omega_\Gamma - \omega_B), \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 + C_{21}(\delta_2 - \delta_1) + H_{21}(\omega_2 - \omega_1) - \\ - C_{1\Gamma}(\delta_1 - \delta_\Gamma) - H_{1\Gamma}(\omega_1 - \omega_\Gamma) - \alpha_1 \omega_1, \\ \dots \\ J_n \frac{d\omega_n}{dt} = M_n - C_{n-(n-1)}(\delta_n - \delta_{n-1}) - \\ - H_{n-(n-1)}[\omega_n - \omega_{(n-1)}] - \alpha_n \omega_n, \\ \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_c, \end{cases} \quad (1)$$

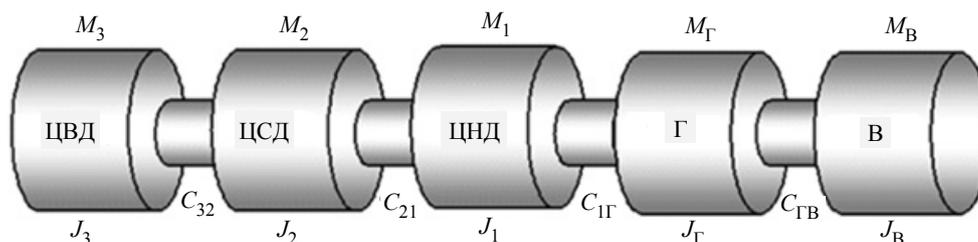


Рис. 1. Расчетная схема валопровода турбогенератора
Fig. 1. Design diagram of turbine generator shaft line

где δ_i – угол закручивания соответствующей массы, рад; ω_i – частота вращения, рад/с; ω_c – синхронная частота, рад/с; M_i – вращающий или тормозящий момент, приложенный к соответствующей массе, Н · м или В · А · с; J_i – момент инерции соответствующей массы, Н · м · с; C_{kl} – жесткость участка валопровода, Н · м · с; $k = \Gamma, 1, 2 \dots n$; $l = \text{В}, \Gamma, 1 \dots (n-1)$; H_{kl} – коэффициент демпфирования крутильных колебаний, обусловленный внутренним трением в материале валопровода, Н · м · с; α_i – коэффициент демпфирования, обусловленный отклонением частоты вращения лопаток турбины относительно парового объема, Н · м · с.

Расчеты удобно выполнять в относительных единицах, причем переход к относительным единицам, использованным при записи уравнений генератора, осуществляется на основе соотношений

$$\bar{C}_{(i+1)-i} = C_{(i+1)-i} \frac{\omega_c^2}{S_\delta};$$

$$\bar{T}j_i = J_i \frac{\omega_c^2}{S_\delta};$$

$$\bar{H}_{(i+1)-i} = H_{(i+1)-i} \frac{\omega_c^2}{S_\delta},$$

где S_δ – базисная мощность генератора, В · А.

На базе данной математической модели выполняются расчеты переходных процессов с вычислением токов и электромагнитных моментов, определяющих воздействия на роторы турбоагрегата при аварийных возмущениях, и скручивающих моментов в его элементах. Линеаризованная модель, содержащая уравнения (1), (2), позволяет определить критические частоты валопровода. Из опыта эксплуатации следует, что большинство аварийных остановок турбоагрегатов было связано с нарушениями механической прочности в зоне соединения генератора с возбудителем, который представляет собой мощную электрическую машину, расположенную на общем валопроводе [1], [8]. В связи с этим в дальнейшем рассматривается более детализированная модель бесщеточной системы возбуждения.

Моделирование бесщеточной системы возбуждения. Успехи в развитии синхронных машин во многом обусловлены прогрессом в создании и совершенствовании их систем возбуждения. Тем не менее, несмотря на существенные успехи в области развития таких систем [10]–[12], внедрение современных синхронных генераторов со-

провождалось ухудшением их электромеханических параметров и снижением показателей устойчивости. Развитие электромашиностроения в 50–70-х гг. прошлого столетия характеризовалось быстрым ростом единичных мощностей турбогенераторов, достигших значений 800...1500 МВт. При таких мощностях потребовался пересмотр подхода к построению системы возбуждения, поскольку традиционное решение в виде контактных колец и щеток не справлялось с подачей возросших токов возбуждения. Это привело к быстрому развитию бесщеточных систем возбуждения. Использование обращенного синхронного генератора (как правило, повышенной номинальной частоты) и вращающегося неуправляемого (диодного) выпрямительного блока позволило создать эффективные возбудительные системы. Однако особенно важна была проблема повышения показателей быстродействия диодной бесщеточной системы возбуждения, что способствовало бы достижению высоких уровней демпфирования электромеханических колебаний, обеспечиваемых автоматическим регулятором сильного действия (системным стабилизатором). Большая по значению постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя (может превышать 0.5 с) снижает эффективность как форсирования возбуждения генератора на начальных этапах процесса, вызванного конечным возмущением, так и использования сильного регулирования возбуждения для демпфирования колебаний, и повышения пределов устойчивости. За счет повышения частоты тока синхронного возбудителя удается добиться снижения постоянной времени до уровня 0.1...0.15 с, что позволяет повысить эффективность такой системы, приблизив ее к показателям тиристорных систем возбуждения, в состав которых входит контактно-щеточный аппарат.

Техническое решение, связанное с использованием добавочного сопротивления в цепи обмотки возбуждения возбудителя переменного тока для снижения постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя, неэффективно из-за заметных дополнительных потерь. Для повышения эффективности диодной бесщеточной системы возбуждения применяются большие кратности потолочных значений выходного напряжения тиристорного выпрямителя в цепи регулирования возбуждения возбудителя, а также повышение частоты тока возбудителя и использование дополнительных жестких отрицательных обратных связей.

Обобщенная структурная схема диодной бесщеточной системы возбуждения представлена на рис. 2, где использованы следующие обозначения: U_C – напряжение приемной электрической системы большой мощности; X_l – индуктивное сопротивление линии электропередачи; Т – повышающий трансформатор; U_T – выходное напряжение повышающего трансформатора; СГ – синхронный генератор; ТСН – трансформатор собственных нужд электрической станции; ВТ – выпрямительный трансформатор; НВ – неуправляемый выпрямитель; СВ – синхронный возбудитель; УВ – управляемый (тиристорный) выпрямитель; АРВ–СД – автоматический регулятор возбуждения сильного действия.

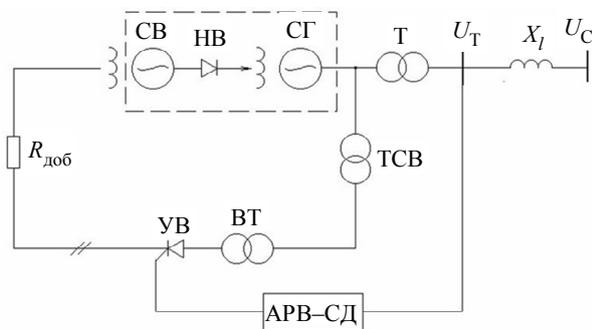


Рис. 2. Структурная схема диодной бесщеточной системы возбуждения турбогенератора
 Fig. 2. Block diagram of diode brushless excitation system of turbo generator

Синхронный возбудитель (СВ) выполнен обращенным, и напряжение его вращающейся силовой (якорной) обмотки приложено к неуправляемому диодному выпрямителю (НВ), выходное напряжение которого обеспечивает протекание тока возбуждения синхронного генератора (СГ). Такая схема исключает необходимость использования контактно-щеточного аппарата и повышает общие показатели надежности системы. Выходной управляющий сигнал автоматического регулятора возбуждения (АРВ–СД) управляет тиристорным преобразователем (УВ), выходное напряжение которого приложено к обмотке возбуждения вспомогательного генератора СВ (в ряде случаев через добавочное активное сопротивление $R_{доб}$, снижающее эквивалентную постоянную времени обмотки возбуждения возбудителя). Как отмечалось, это техническое решение приводит к повышенным потерям и требует дополнительного обоснования как мероприятия обеспечения приемлемых показателей качества переходных процессов.

Результаты расчетов переходных процессов генератора ТВВ–800 при коротких замыканиях (КЗ). Расчеты переходных процессов при коротких замыканиях рассчитывались в простейшей схеме электропередачи, содержащей генератор, линию электропередачи и приемную систему большой мощности. В качестве основного расчетного возмущения рассмотрены внезапные короткие замыкания на зажимах обмотки статора генератора и на выводах высокого напряжения (ВН) повышающего трансформатора. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где $I_{уд}$ – ударный ток короткого замыкания.

Табл. 1. Значения токов и электромагнитных моментов при аварийных возмущениях
 Tab. 1. Currents and electromagnetic torques values in emergency disturbances

Вид аварии	$I_{уд}$, о. е.	M_e , о. е.
Трехфазное КЗ на выводах генератора	8.55	4.49
Трехфазное КЗ в сети высокого напряжения	5.38	2.81
Переход двухфазного в трехфазное КЗ на выводах генератора	9.41	5.86
Переход двухфазного в трехфазное КЗ в сети ВН	5.75	3.59
Двухфазное КЗ на нейтраль в сети ВН	4.63	3.27

Применительно к достигаемым величинам ударных токов КЗ и воздействующих на валопровод электромагнитных моментов наиболее опасны КЗ на зажимах статорной обмотки генератора, особенно в случае сложных аварий, характеризующихся переходом двухфазного КЗ в трехфазное.

Характер изменения электромагнитного момента генератора при двухфазном на землю КЗ на стороне высокого напряжения иллюстрируется рис. 3. Видно, что кривая содержит составляющие основной и двойной частоты. Как показано далее, данное возмущение представляет опасность для механического соединения генератора с возбудителем.

Результаты расчета скручивающих моментов в сечении «генератор-возбудитель» представлены в табл. 2. Поскольку точные параметры валопровода не были известны, то значение жесткости данного соединения было принято в соответствии с рекомендациями [1] для генераторов подобной мощности, оснащенных бесщеточной системой возбуждения (принимались параметры возбудителя БВД–3800).

Результаты расчетов скручивающих моментов показывают, что возможно нежелательное возрастание их значений в случаях, когда возникающий при коротком замыкании электромагнитный момент

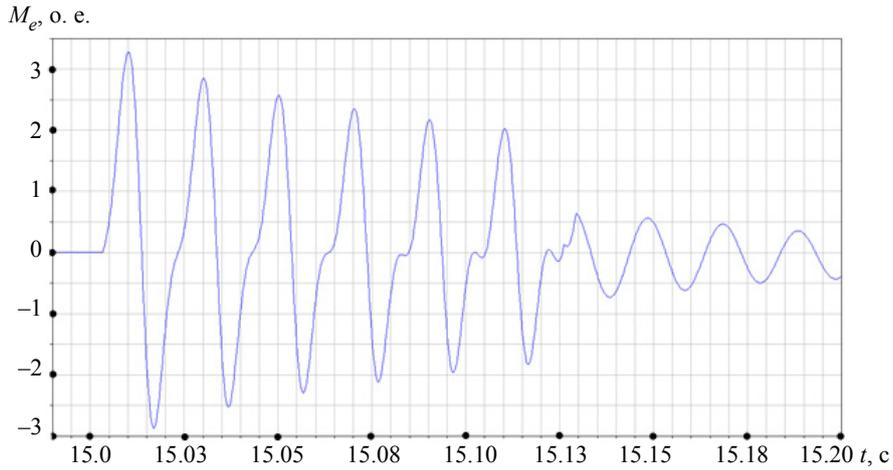


Рис. 3. Электромагнитный момент генератора при двухфазном коротком замыкании на землю на выводах высокого напряжения повышающего трансформатора

Fig. 3. Generator electromagnetic torque at two-phase earth fault at high voltage terminals of step-up transformer

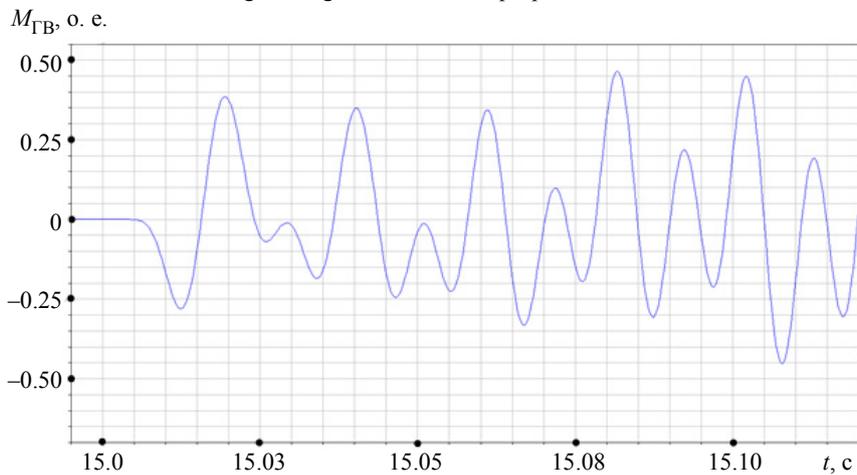


Рис. 4. Изменение скручивающего момента в сечении генератор-возбудитель при двухфазном коротком замыкании на выводах генератора, переходящем в трехфазное спустя 30 эл. град.

Fig. 4. Change of torsional moment in generator-exciter cross-section at two-phase short circuit at generator terminals changing to three-phase one after 30 e degrees

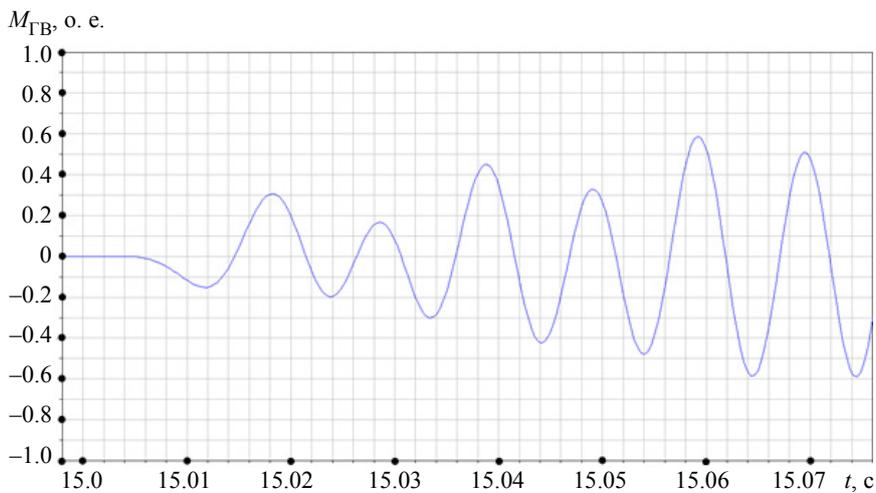


Рис. 5. Скручивающий момент в сечении «генератор-возбудитель» при двухфазном КЗ на нейтраль на выводах высокого напряжения повышающего трансформатора

Fig. 5. Change of torque in generator-exciter section at two-phase short circuit to ground at high voltage terminals of step-up transformer

генератора содержит составляющую 100 Гц. Максимальное значение достигается при двухфазном на землю коротком замыкании на стороне высокого напряжения повышающего трансформатора.

Табл. 2. Скручивающие моменты в сечении генератор-возбудитель ($M_{ГВ}$) при различных коротких замыканиях

Tab. 2. Torsional moments in section generator-exciter ($M_{ГВ}$) at various short circuits

Вид аварии	$M_{ГВ}$, о. е.
Трехфазное КЗ на выводах генератора	0.425
Трехфазное КЗ в сети высокого напряжения	0.211
Переход двухфазного в трехфазное КЗ на выводах генератора	0.466
Переход двухфазного в трехфазное КЗ в сети высокого напряжения	0.303
Двухфазное КЗ на нейтраль в сети ВН	0.595

Изменение скручивающего момента в сечении «генератор-возбудитель» при двухфазном коротком замыкании, переходящем в трехфазное на выводах генератора, представлено на рис. 4.

Изменение скручивающего момента в сечении «генератор-возбудитель» при двухфазном коротком замыкании на выводах высокого напряжения трансформатора представлено на рис. 5.

Выводы и заключение. В статье рассмотрена комплексная математическая модель турбоагрега-

та с учетом крутильных колебаний валопровода для выявления опасных механических воздействий при аварийных возмущениях в электрической сети. Модель дополнена уравнениями переходных процессов диодного бесщеточного возбудителя, что позволяет более точно определять значения скручивающих моментов в сечении «генератор-возбудитель».

На основе выполненных расчетов переходных процессов в первом приближении определены частоты знакопеременных моментов, представляющие опасность для агрегата. Показано, что возникающие при несимметричных коротких замыканиях электромагнитные моменты могут провоцировать возникновение колебаний большой амплитуды в сечении «генератор-возбудитель», которые характеризуются отрицательным демпфированием. Следует отметить, что максимальные по значению скручивающие моменты могут возникать не только при воздействии пиковых значений ударных электромагнитных моментов генератора.

Определение условий появления максимальных значений скручивающих моментов и определение влияния параметров элементов валопровода, в частности жесткости сечения «генератор-возбудитель», представляют направления дальнейших исследований.

Список литературы

1. Беляев А. Н., Смоловик С. В. Крутильные колебания валопроводов турбоагрегатов. СПб.: Политехпресс, 2024. 295 с.
2. Грабовский В. П. Крутильные колебания и повреждаемость валов роторов турбогенераторов, оснащенных автоматическими регуляторами возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. № 1. С. 77–84. doi: 10.17213/0136-3360-2020-1-77-84.
3. Беляев А. Н. Снижение скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной // Изв. РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 124–132.
4. Учет аномальных режимов при конструировании и эксплуатации мощных турбогенераторов / И. А. Глебов, Я. Б. Данилевич, Л. Г. Мамиконянц, Г. М. Хуторецкий // Электричество. 1983. № 11. С. 13–17.
5. Effect of clearing short circuits and automatic reclosing on torsional stress and life expenditure of turbine-generator shafts / A. Abolins, D. Lambrecht, J. S. Joyce, L. T. Rosenberg // IEEE Transactions on Power Apparatus and Syst. 1976. Vol. 95, no. 1. P. 14–25. doi: 10.1109/T-PAS.1976.32073.
6. Canay I. M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of synchronous machine. Part II: Application to an arbitrary network // IEEE Trans. Power App. Syst. 1982. Vol. PAS-101, no. 10. P. 3639–3647. doi: 10.1109/TPAS.1982.317049.
7. Беляев А. Н., Смоловик С. В. Подавление слабодемпфированных крутильных колебаний в автономных энергосистемах // Электрические станции. 2017. № 12. С. 26–33.
8. Пташкин А. В., Шевченко В. М., Щербак С. Ф. Предотвращение резонанса крутильных колебаний в узле сочленения валов турбогенератора и вспомогательного генератора независимой тиристорной системы возбуждения // Вопр. устойчивости и надежности энергосистемы СССР: Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. Душанбе, 1989. С. 156–157.
9. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 170 с.
10. Юрганов А. А., Кожевников В. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996. 138 с.
11. Бесщеточные системы возбуждения мощных синхронных машин: Сб. науч. тр. / Отв. ред. В. Ф. Федоров, В. К. Воробей. Л.: ВНИИэлектромаш, 1986. 171 с.
12. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. И. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.

Информация об авторах

Сафронов Алексей Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. отделением плазменных устройств и технологий, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191181, Россия; профессор кафедры автоматизированного электропривода и электротехники СПбГУПТИД, ул. Ивана Черных, д. 4, Б-429, Санкт-Петербург, 198095, Россия.

E-mail: 9932553@mail.ru

Чмиленко Федор Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: tchfv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6223-9250>

Рождественский Всеволод Дмитриевич – аспирант, магистр техники и технологий, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия.

E-mail: vsevolod.rozhdestvensky@mail.ru

Дудник Юлия Дмитриевна – научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191181, Россия.

E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0640-9419>

Вклад авторов:

Сафронов А. А. – доработка модели для переменных температур; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Чмиленко Ф. В. – научное руководство; введение понятия эквивалентной скорости; проведение вычислительных экспериментов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Рождественский В. Д. – концепция исследования; постановка задачи; написание исходного текста; итоговые выводы.

Дудник Ю. Д. – идея научного исследования; разработка алгоритма; итоговые выводы; анализ результатов; иллюстрирование и инфографика; доработка исходного текста; перевод.

References

1. Beljaev A. N., Smolovik S. V. Krutil'nye kolebanija valoprovodov turboagregatov. SPb.: POLITEH-PRESS, 2024. 295 s. (In Russ.).

2. Grabovskij V. P. Krutil'nye kolebanija i povrezhdaemost' valov rotorov turbogeneratorov, osnashennyh avtomaticheskimi reguljatorami возбуждения // Izv. vuzov. Jelektromehaniika. 2020. № 1. S. 77–84. doi: 10.17213/0136-3360-2020-1-77-84. (In Russ.).

3. Beljaev A. N. Snizhenie skrudivajushhih momentov v sisteme gazoturbinного привода generatorov avtonomnoj // Izv. RAN. Jenergetika. 2010. № 2. S. 124–132. (In Russ.).

4. Uchet anormal'nyh rezhimov pri konstruirovanii i jekspluatacii moshhnyh turbogeneratorov / I. A. Glebov, Ja. B. Danilevich, L. G. Mamikonjanc, G. M. Hutoreckij // Jelektrichestvo. 1983. № 11. С. 13–17. (In Russ.).

5. Effect of clearing short circuits and automatic reclosing on torsional stress and life expenditure of turbine-generator shafts / A. Abolins, D. Lambrecht, J. S. Joyce, L. T. Rosenberg // IEEE Transactions on Power Apparatus and Syst. 1976. Vol. 95, no. 1. P. 14–25. doi: 10.1109/T-PAS.1976.32073.

6. Canay I. M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of synchronous machine. Part II: Application to an arbitrary network // IEEE Trans. Power App. Syst. 1982. Vol. PAS-101, no. 10. P. 3639–3647. doi: 10.1109/TPAS.1982.317049.

7. Beljaev A. N., Smolovik S. V. Podavlenie slabodempirovannyh krutil'nyh kolebanij v avtonomnyh jenergo-sistemah // Jelektricheskie stancii. 2017. № 12. S. 26–33. (In Russ.).

8. Ptashkin A. V., Shevchenko V. M., Shherbak S. F. Predotvrashhenie rezonansa krutil'nyh kolebanij v uzle sochlenenija valov turbogeneratora i vspomogatel'nogo generatora nezavisimoj tiristornoj sistemy возбуждения // Vopr. ustojchivosti i nadezhnosti jenergosistemy SSSR: Tezisy dokl. Vsesojuzn. nauch.-tehn. soveshh. Dushanbe, 1989. S. 156–157. (In Russ.).

9. Vazhnov A. I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. L.: Jenergija, 1980. 170 s. (In Russ.).

10. Jurganov A. A., Kozhevnikov V. A. Regulirovanie возбуждения синхронных generatorov. SPb.: Nauka, 1996. 138 s. (In Russ.).

11. Besshetochnye sistemy vozbuzhdenija moshhnyh sinhronnyh mashin: Sb. nauch. tr. / Otv. red. V. F. Fedorov, V. K. Vorobej. L.: VNIJjelektromash, 1986. 171 s. (In Russ.).

12. Dombrovskij V. V., Hutoreckij G. I. Osnovy proektirovanija jelektricheskikh mashin peremennogo toka. L.: Jenergija, 1974. 504 s. (In Russ.).

Information about the authors

Alexey A. Safronov – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Plasma Devices and Technologies, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (IEE RAS), Dvortzovaya emb., 18, St. Petersburg, 191181, Russia; Professor of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4, Ivan Chernykh St., B-429, St. Petersburg, 198095, Russia.
E-mail: 9932553@mail.ru

Fedor V. Chmilenko – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: tchfv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6223-9250>

Vsevolod D. Rozhdestvensky – postgraduate student, master of engineering and technology, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Bolshaya Morskaya St., 18, St. Petersburg, 199186, Russia.
E-mail: vsevolod.rozhdestvensky@mail.ru

Yulia D. Dudnik – Research scientist, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (IEE RAS), Dvortzovaya emb., 18, St. Petersburg, 191181, Russia.
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0640-9419>

Author contribution statement:

Safronov A. A. – model for variable temperatures revision; methodology development; writing the source text; final conclusions.

Chmilenko F. V. – scientific guidance; equivalent speed concept introduction; conducting computational experiments; writing the source text; final conclusions.

Rozhdestvensky V. D. – research concept; problem statement; writing the source text; final conclusions.

Dudnik Yu. D. – scientific research idea; algorithm development; final conclusions – analysis of the results; illustration and infographics; source text revision; translation.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025; принята к публикации после рецензирования 05.04.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 28.01.2025; accepted 05.04.2025; published online 26.05.2025.