

## РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ГАШЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ

**Александр Владимирович Прокудин**, [prokudinav@susu.ru](mailto:prokudinav@susu.ru)  
**Антон Вениаминович Коржов**, [korzhovav@susu.ru](mailto:korzhovav@susu.ru)  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена работа известного тиристорного устройства гашения магнитного поля синхронного генератора. Показано, что для улучшения характеристик устройства и расширения его функциональных возможностей при известном алгоритме управления требуется увеличение числа гасящих цепей. Предложен алгоритм управления гасящими цепями, основанный на принципе двоичного кодирования десятичного значения требуемого эквивалентного сопротивления устройства. Для двух вариантов схем тиристорных устройств гашения поля получены вольтамперные характеристики устройства. Отмечены увеличение среднего значения напряжения на выводах обмотки возбуждения и повышение качества синтеза требуемой вольтамперной характеристики. Выявлены достоинства и недостатки предложенных алгоритмов и схем. Доказано, что переход на новый алгоритм управления гасящими цепями улучшает характеристики тиристорного устройства гашения магнитного поля синхронного генератора без необходимости изменений в силовой части, однако требует принятия мер по повышению надежности системы управления.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, гашение поля, тиристорное устройство, вольтамперная характеристика

**Для цитирования:** Прокудин А.В., Коржов А.В. Расширение функциональных возможностей тиристорного устройства гашения поля для интенсификации управления процессом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 48–54. DOI: 10.14529/power220105

Original article  
DOI: 10.14529/power220105

## EXPANDING THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF A THYRISTOR FIELD DAMPING DEVICE FOR INTENSIFICATION OF PROCESS CONTROL

**Aleksandr V. Prokudin**, [prokudinav@susu.ru](mailto:prokudinav@susu.ru)  
**Anton V. Korzhov**, [korzhovav@susu.ru](mailto:korzhovav@susu.ru)  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The article considers the operation of a commonly known thyristor device for dampening a synchronous generator magnetic field. Improvement in the characteristics of the device and expansion of its functionality with a known control algorithm requires an increase in the number of quenching circuits. The article proposes an algorithm for controlling damping circuits based on the principle of binary coding of the decimal value of the required equivalent resistance of the device. The current-voltage characteristics of the device have been determined for two variants of circuits of thyristor field damping devices. An increase in the average value of the voltage at the terminals of the excitation winding and an increase in the quality of synthesizing the required current-voltage characteristic were noted. The article further describes the advantages and disadvantages of the described algorithms and schemes. It has been proven that the transition to a new control algorithm for damping circuits improves the characteristics of the thyristor device for dampening the synchronous generator magnetic field without the need for changes in the power section. However, this requires measures to be taken, in order to improve the reliability of the control system.

**Keywords:** synchronous generator, field discharge, thyristor device, current-voltage characteristic

**For citation:** Prokudin A.V., Korzhov A.V. Expanding the functional capabilities of a thyristor field damping device for intensification of process control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(1):48–54. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220105

**Введение**

Возникновение повреждения в цепях или внутри обмоток статора синхронного генератора требует немедленного прекращения протекания тока через место короткого замыкания с целью снижения ущерба от аварии. Поскольку в таких случаях отсутствует коммутационная аппаратура, то единственным способом предотвращения развития аварии является быстрое прекращение выработки энергии самим генератором [1]. Это достигается быстрым снижением величины э.д.с. синхронной машины за счет ослабления магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения. Такой режим называется гашением поля генератора. Гашение поля должно осуществляться во всех режимах генератора [2].

Обмотка возбуждения обладает значительными индуктивностью и постоянной времени (3–20 с) [3, 4]. Процесс гашения поля сводится к обеспечению максимально быстрого вывода накопленной энергии из обмотки возбуждения. Для этих целей обмотка возбуждения отключается от возбудителя и подключается к электрической цепи, в которой происходит рассеивание запасенной энергии [5]. В качестве гасящего элемента в современных системах возбуждения мощных синхронных генераторов используются линейные резисторы, варисторы, а также электрическая дуга в специализированных коммутационных аппаратах – автоматах гашения поля (АГП) [5, 6]. Указанные способы гашения поля обладают рядом недостатков: работа устройства связана с зажиганием дуги, требуются выключатели с хорошей отключающей способностью, ВАХ не в полной мере обеспечивает быстрое гашение поля [7, 8].

Исследования электромагнитных процессов в цепях обмотки возбуждения показывают, что для обеспечения минимального времени выведения энергии из линейной индуктивности в течение всего процесса гашения поля требуется поддерживать на её выводах неизменное, максимально допустимое напряжение  $U_{f \max \text{ доп}}$  [9]. Ни один из применяемых способов в полной мере это не обеспечивает. Кроме этого, есть мнение экспертов, что ВАХ гасящего элемента устройства гашения поля реального синхронного генератора должна иметь более сложную форму [7, 8, 10]. С другой стороны, чтобы минимизировать время горения дуги  $t_d$  в коммутационном аппарате обмотка возбуждения должна замыкаться накоротко [11]. Вывод: для обеспечения минимального времени гашения поля и отсутствия дуги ВАХ гасящего элемента должна изменяться во времени:

$$\begin{cases} U(I) = 0, & 0 \leq t < t_d; \\ U(I) = U_{f \max \text{ доп}}, & t \geq t_d. \end{cases} \quad (1)$$

Условие  $U(I) = 0$  легко реализуется шунтированием обмотки возбуждения полупроводниковым

ключом [11]. Аналогичный результат достигается при шунтировании самого выключателя цепей возбуждения [12].

Разработанное тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора (ТУГП) обеспечивает поддержание заданной величины напряжения на выводах обмотки возбуждения за счет ступенчатого изменения величины сопротивления, подключенного к обмотке ротора [13], т. е. требуемая (выражение 1) гладкая вольт-амперная характеристика заменяется кусочно-линейной. Зависимость эквивалентного сопротивления ТУГП от тока  $R_{DE}(I)$  содержит  $N$  шт. ступеней (гасящих ступеней).

За счет переключения линейных резисторов (гасящих цепей) в составе ТУГП поддерживается среднее значение напряжения (без учета интервала блокирования зажигания дуги):

$$U(I) = U_{f \text{ ср}} = U_{f \text{ ном}} K_{\Pi} \left( 1 - \frac{K_{PU}}{2} \right), \quad (2)$$

где  $K_{PU} = U_{\max} / U_{\min}$  – коэффициент пульсаций,  $K_{\Pi} = U_{\max} / U_{f \text{ ном}}$  – кратность перенапряжений относительно номинального значения напряжения возбуждения генератора. Устройство поддерживает заданное среднее значение напряжения только в диапазоне токов  $I_{f0}(1 \dots K_{PUN})$  и  $U_{f \text{ ср}}$  всегда меньше  $U_{\max}$ .

Переход с постоянного на переключаемое сопротивление дает снижение времени гашения поля в 3,09 раза при  $N = 4$  шт. и в 3,9 раза при  $N = 10$  шт. Очевидно, что для повышения среднего значения напряжения, расширения диапазона токов, соответствующих горизонтальному участку ВАХ, и снижения времени гашения поля требуется увеличение числа гасящих ступеней  $N$ . В первоначально разработанном устройстве число формируемых гасящих ступеней равно числу гасящих цепей. Алгоритм управления ТУГП предполагает только последовательное отключение/включение гасящих резисторов при изменении тока через устройство. При числе гасящих ступеней больше 10 шт. устройство получается громоздким. Предложено только за счет изменения алгоритма управления ключами гасящих цепей увеличить число формируемых ступеней ВАХ.

**Увеличение числа гасящих ступеней**

В слаботочной электронике распространен способ регулирования сопротивления устройства за счет переключения числа последовательно включенных линейных резисторов в его составе [14]. Необходимый набор включенных резисторов определяется путем двоичного кодирования десятичного значения заданного полного эквивалентного сопротивления цепи. Предложено применить этот принцип для задания эквивалентного сопротивления  $R_{DE}$  тиристорного устройства гашения поля.

Рассматриваемая упрощенная схема ТУГП с последовательным соединением 4 шт. гасящих резисторов приведена на рис. 1 [15]. Применение такой схемы нежелательно из-за её низкой надежности.

В схеме (см. рис. 1) использованы линейные резисторы, сопротивления которых отличаются друг от друга в 2 раза. Сопротивление  $k$ -го резистора зависит от сопротивления обмотки возбуждения  $R_f$ , допустимой кратностей перенапряжений на ней  $K_n$  и начального тока  $K_C$  относительно номинальных значений генератора:

$$R_k = \frac{K_n}{K_C} R_f \cdot 2^{k-1}. \quad (3)$$

Эквивалентное сопротивление гасящей части ТУГП, выполненное с последовательным соединением гасящих резисторов, исходя из алгоритма переключения, определяется выражением

$$R_{DEi} = R_f \frac{K_n}{K_C} \sum_{k=1}^N 2^{k-1} a_k. \quad (4)$$

В выражении (4)  $a_k$  – значение (0 или 1)  $k$ -го разряда бинарного числа, соответствующего в десятичной форме сопротивлению  $i$ -й гасящей ступени.

Переход к двоичному кодированию набора включенных гасящих резисторов позволяет увеличить число формируемых гасящих ступеней в зависимости  $R_{DE}(I)$  с  $N$  до  $2N - 1$  шт. На рис. 2 для сравнения приведены зависимости  $R_{DE}(I)$ : при по-

следовательном переключении  $N = 4$  шт. гасящих резисторов при  $K_{PU} = 0,7$  (кривая 2), с двоичным кодированием набора (кривая 3) и гладкая зависимость (кривая 1), полученная из ВАХ  $U(I) = \text{const}$  (выражение (1)).

Применение алгоритма двоичного кодирования сопротивления  $R_{DE}$  существенно расширяет диапазон токов ВАХ, при которых поддерживается повышенное среднее значение напряжения на выводах обмотки возбуждения (рис. 3). По сравнению с требуемой гладкой ВАХ (рис. 3, кривая 1), в области малых токов предложенный алгоритм обеспечивает повышение среднего напряжения и ВАХ сильнее приближается к  $U(I) = \text{const}$  (выражение (1)), что увеличивает скорость снижения тока обмотки возбуждения. Однако при токах в диапазоне  $1 \dots (2^0 - 2^1)$  среднее значение напряжения при двоичном кодировании (рис. 3, кривая 3) получается меньше, чем при последовательном переключении резисторов (рис. 3, кривая 2). Таким образом, применение двоичного кодирования набора включенных гасящих резисторов позволяет увеличить скорость гашения поля в области малых токов обмотки возбуждения без увеличения числа гасящих цепей.

При параллельном соединении гасящих цепей увеличивается надежность устройства и упрощаются цепи управления тиристорами коммутаторов. Такое схемотехническое решение применяется при

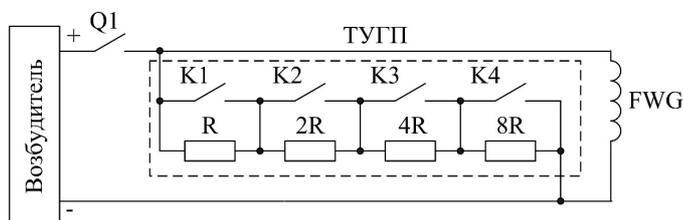


Рис. 1. Схема с последовательным соединением гасящих резисторов  
Fig. 1. Circuit with serial connection of quenching resistors

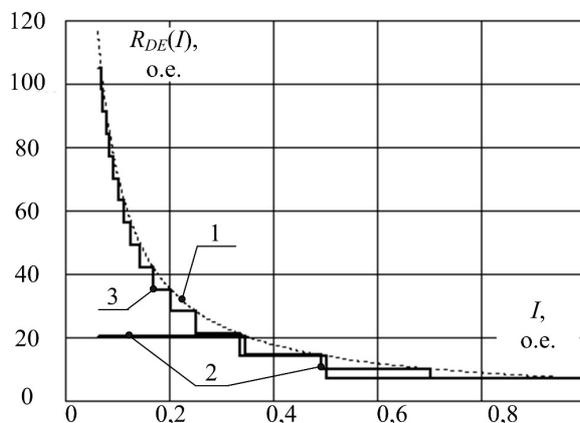


Рис. 2. Зависимости эквивалентного сопротивления ТУГП с последовательным соединением резисторов при различных алгоритмах их переключения

Fig. 2. Dependencies of the equivalent resistance of a series-coupled resistor with different switching algorithms

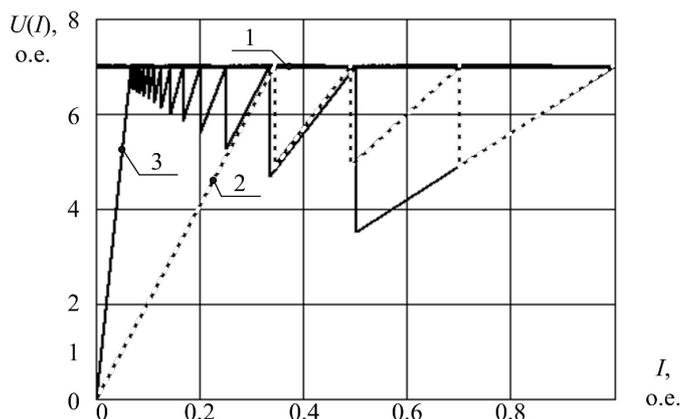


Рис. 3. Вольтамперные характеристики ТУГП при различных алгоритмах переключения гасящих цепей  
 Fig. 3. Current-voltage characteristics of the TFQD with various switching algorithms of extinguishing circuits

дальнейшем развитии идеи формирования ВАХ ТУГП [16]. Упрощенная схема устройства с параллельным соединением 4 шт. гасящих цепей приведена на рис. 4.

Эквивалентное сопротивление гасящей части устройства, выполненного по схеме с параллельным соединением (см. рис. 4) и управляемого в соответствии с рассматриваемым алгоритмом, для *i*-й ступени описывается выражениями:

$$R_{DEi} = \left[ \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{2^{k-1} R} \right]^{-1}; \tag{5}$$

$$R = R_f \frac{K_n}{K_C} \frac{2^N - 1}{2^{N-1}}.$$

В отличие от схемы с последовательным соединением, схема с параллельным соединением точнее работает в диапазоне больших токов (рис. 5),

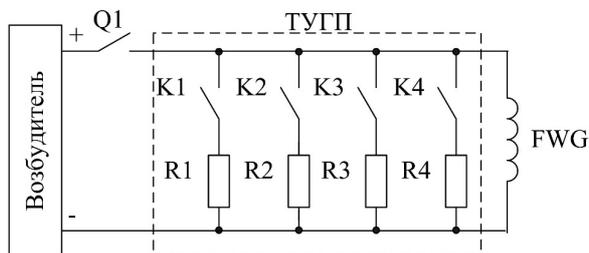


Рис. 4. Схема тиристорного устройства гашения поля с параллельным соединением гасящих цепей  
 Fig. 4. Diagram of a thyristor field quenching device with parallel connection of quenching circuits

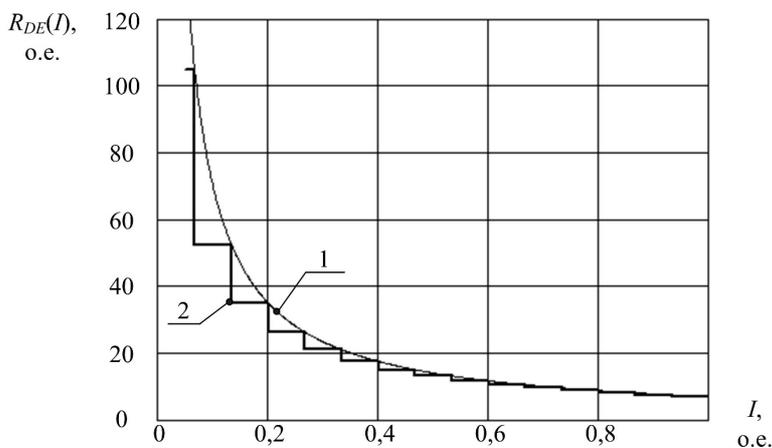


Рис. 5. Зависимость эквивалентного сопротивления ТУГП с параллельным соединением резисторов  
 Fig. 5. The dependence of the equivalent resistance of the TFQD with a parallel connection of resistors

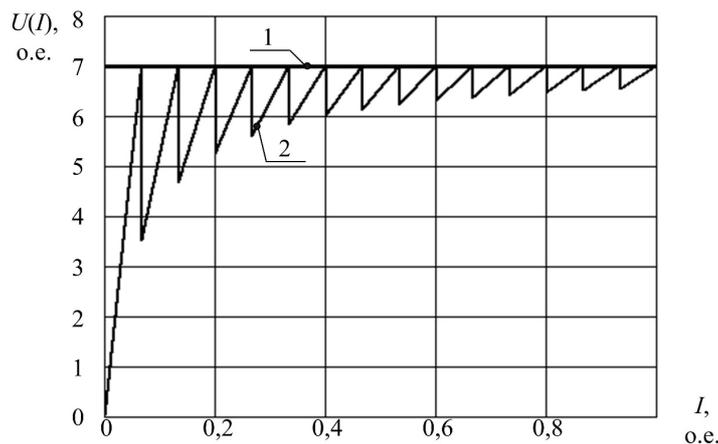


Рис. 6. Вольтамперные характеристики: 1 – требуемая ВАХ (1);  
2 – ТУГП при параллельном соединении резисторов  
Fig. 6. Current-voltage characteristics: 1 – required VAC (1);  
2 – TUG with parallel connection of resistors

зависимость эквивалентного сопротивления (рис. 5, кривая 2) лучше приближается к требуемой (рис. 5, кривая 1), что является преимуществом.

Повышение точности формирования зависимости эквивалентного сопротивления от тока через ТУГП отражается на его вольтамперной характеристике (рис. 6). За счет этого в диапазоне больших токов возбуждения наблюдается повышение среднего значения напряжения (рис. 6, кривая 2) и ВАХ приближается к требуемой (рис. 6, кривая 1). При самых больших токах «ширина» гасящей ступени по сопротивлению равна 0,5 о.е. против 7 о.е. для последовательного соединения, что объясняет более высокую степень выдерживания заданной ВАХ.

### Заключение

Рассмотрен алгоритм управления ключами гасящих цепей тиристорного устройства гашения магнитного поля синхронного генератора, построенный на принципе двоичного кодирования дискретного значения требуемого эквивалентного сопротивления. Показано, что переход от простого алгоритма последовательного переключения гасящих цепей к более сложному управлению позволяет сформировать большее число гасящих ступе-

ней без добавления дополнительных элементов в схему устройства.

Увеличение числа гасящих ступеней позволяет более точно выдержать заданную вольтамперную характеристику, повысить среднее напряжение на выводах обмотки возбуждения и снизить длительность процесса гашения поля.

Поскольку для минимизации ущерба от аварии в цепях статора генератора требуется как можно быстрее снизить ток в месте повреждения, то предпочтительнее оказывается схема с параллельным соединением гасящих цепей, обеспечивающая более высокое среднее напряжение в диапазоне больших токов. С точки зрения надежности работы и схемотехнических решений цепей управления тиристорами схема с параллельным соединением тоже имеет преимущества перед последовательным соединением гасящих резисторов.

Недостатком тиристорных устройств гашения поля с рассмотренным алгоритмом управления являются высокие требования к надежности системы и цепей управления тиристорами – при отказе системы управления обмотка возбуждения будет расшунтирована, что приведет к повреждению ее изоляции.

### Список литературы

1. Коган Ф.Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 192 с.
2. ГОСТ 21558–2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. – Утвержден и введен Постановлением Госстандарта Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 25 июля 2002 г. № 289-ст. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
3. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 768 с.
4. Поляк Н.А. Современные крупные двухполюсные турбогенераторы. Электромагнитные характеристики. М.: Энергия, 1972. 472 с.
5. Брон О.Б. Автоматы гашения магнитного поля. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 138 с. (Библиотека по автоматике. Вып. № 34).

6. Taborda J. Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596955
7. Кукушкин Д.В. Способ гашения магнитного поля обмотки возбуждения вращающегося возбудителя // Завалишинские чтения 18, Санкт-Петербург 16–20 апреля 2018 г.: сб. докл. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. С. 133–137.
8. Богачков М.Л., Кичаев В.В., Попов Е.Н. Сравнение способов гашения поля синхронных генераторов // Помощник: Мои конспекты. URL: <https://mykonspekts.ru/2-107186.html> (дата обращения: 14.03.2022).
9. Прокудин А.В. Снижение времени аварийного гашения поля синхронных машин с системами самовозбуждения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2011. № 15 (232). С. 22–24.
10. А.с. 736337 СССР, МПК H02P 9/12, H02J 3/26. Способ симметрирования синхронного генератора в асинхронном режиме / Б.З. Грамм, Н.Н. Ефименко. № 2572831/24-07; заявл. 25.10.1977; опубл. 25.05.1980, Бюл. № 19.
11. Гольдштейн М.Е., Прокудин А.В. Снижение дуговой нагрузки на выключатели в системах самовозбуждения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2012. № 37 (296). С. 120–122.
12. Emilio Rebollo, Carlos A. Platero, David Talavera, Ricardo Granizo. Use of Discharge Resistor to Improve Transient De-Excitation in Brushless Synchronous Machines // Energies. 2019. Vol. 12, no. 13. P. 2528. DOI: 10.3390/en12132528
13. Гольдштейн М.Е., Прокудин А.В. Тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения // Электротехника. 2013. № 10. С. 41–45.
14. Shami U.T., Shami S.H. A digital logic controlled variable resistor with isolation and scalability // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2019. Vol. 99 (2). P. 467–469. DOI: 10.1007/s10470-019-01440-y
15. Патент 2282925 Российская Федерация, МПК H02P 9/14 (2006.01), H02H 7/09 (2006.01). Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / Е.Я. Крекер, М.Е. Гольдштейн, А.Н. Андреев. № 2005111665/09; заявл. 19.04.2005; опубл. 27.08.2006. М.: ФИПС, 2006. 20 с.
16. Патент 191501 Российская Федерация, МПК H02P 9/12, H02P 9/30, H02H 7/06. Устройство гашения магнитного поля синхронной машины / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн. № 2019107099; заявл. 12.03.2019; опубл. 08.08.2019. 9 с.

#### References

1. Kogan F.L. *Anormal'nyye rezhimy moshchnykh turbogeneratorov* [Abnormal modes of powerful turbogenerators]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1987. 192p. (In Russ.)
2. GOST 21558–2000. *Sistemy vzbuzhdeniya turbogeneratorov, gidrogeneratorov i sinkhronnykh kompensatorov. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 21558–2000. Excitation systems for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous compensators. General specifications]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ.; 2003. (In Russ.)
3. Baumshteyn I.A., Bazhanov S.A., editors. *Spravochnik po elektricheskim ustanovkam vysokogo napryazheniya* [High Voltage Electrical Installation Handbook]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1989. 768 p. (In Russ.)
4. Polyak N.A. *Sovremennyye krupnyye dvukhpolyusnyye turbogeneratory. Elektromagnitnyye kharakteristiki* [Modern large two-pole turbogenerators. Electromagnetic characteristics]. Moscow: Energiya Publ.; 1972. 472 p. (In Russ.)
5. Bron O.B. *Avtomaty gasheniya magnitnogo polya* [Automatic Magnetic Field Quenching]. *Biblioteka po av-tomatike. Vyp. 34* [Library for Automatics. Iss. 34]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat Publ.; 1961. 138 p. (In Russ.)
6. Taborda J. Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*; 2008. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596955
7. Kukushkin D.V. [The method of damping the magnetic field of the excitation winding of a rotating exciter]. In: *Zavalishinskiye chteniya 18, Sankt-Peterburg 16–20 aprelya 2018 g.: sb. dokl.* [Zavalishin Readings 18, St. Petersburg April 16–20 2018: collection of reports]. St. Petersburg; 2018. P. 133–137. (In Russ.)
8. Bogachkov M.L., Kichayev V.V., Popov E.N. [Comparison of methods for damping the field of synchronous generators]. *Pomoshchnichesk: Moi konspekty*. Available at: <https://mykonspekts.ru/2-107186.html> (accessed 14.03.2022). (In Russ.)
9. Prokudin A.V. Reduction of time of emergency field suppression of synchronous machines with the self-excitation systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2011;15(232):22–24. (In Russ.)
10. Gramm B.Z., Efimenko N.N. *Sposob simmetrirovaniya sinkhronnogo generatora v asinkhronnom rezhime* [Method for balancing a synchronous generator in asynchronous mode]. Patent USSR, no. 736337, 1977.

11. Goldshteyn M.E., Prokudin A.V. Decrease of arc load on circuit breakers in self-excitation systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2012;37(296):120–122. (In Russ.)
12. Emilio Rebollo, Carlos A. Platero, David Talavera, Ricardo Granizo. Use of Discharge Resistor to Improve Transient De-Excitation in Brushless Synchronous Machines. *Energies*. 2019;12(13):2528. DOI: 10.3390/en12132528
13. Gol'Dshtein M.E., Prokudin A.V. A thyristor field-suppression device for a synchronous generator with a self-excitation system. *Russian Electrical Engineering*. 2013;84(10):572–576. DOI: 10.3103/s1068371213100040
14. Shami U.T., Shami S.H. A digital logic controlled variable resistor with isolation and scalability. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2019;99(2):467–469. DOI: 10.1007/s10470-019-01440-y
15. Kreker E.Ya., Gol'dshteyn M.E., Andreev A.N. *Sposob i ustroystvo gasheniya magnitnogo polya obmotki vzbuzhdeniya sinkhronnoy mashiny (varianty)* [Method and device for suppressing the magnetic field of the excitation winding of a synchronous machine (versions)]. Patent RF, no. 2282925, 2005.
16. Gol'dshtein M.E., Prokudin A.V. *Ustroystvo gasheniya magnitnogo polya sinkhronnoy mashiny* [Device for damping the magnetic field of a synchronous machine]. Patent RF, no. 191501, 2019.

#### ***Информация об авторах***

**Прокудин Александр Владимирович**, ведущий инженер, старший преподаватель кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; prokudinav@susu.ru.

**Коржов Антон Вениаминович**, д-р техн. наук, доц., проректор по научной работе, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korzhovav@susu.ru.

#### ***Information about the authors***

**Aleksandr V. Prokudin**, Leading engineer, Senior lecturer of the Department “Power Stations, Networks and Power Supply Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; prokudinav@susu.ru.

**Anton V. Korzhov**, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Vice-Rector for Scientific Work, Prof. of the Department “Power Stations, Networks and Power Supply Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korzhovav@susu.ru.

*Статья поступила в редакцию 28.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 14.03.2022.*

*The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 14.03.2022.*