

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_121

## **К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РАСЧЕТАХ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**Е.К. Лоханин**

ООО «Институт «Энергосетьпроект»  
Москва, Россия

Исследуются методы математического моделирования синхронных и асинхронизированных электрических машин (АСМ) при расчетах установившихся и переходных режимов. Обозначены главные отличия синхронных машин продольно-поперечного возбуждения (СМ ППВ) от АСМ, а также основные понятия определений СМ ППВ и АСМ. Синхронные машины продольного и продольно-поперечного возбуждения (СМ ПВ и СМ ППВ) не всегда позволяют в полной мере решать возникающие проблемы обеспечения устойчивости и надежности в установившихся и переходных режимах энергосистем. Они способны работать лишь в ограниченной области потребления реактивной мощности, что связано с нарушением их устойчивой работы. Значительно лучшими техническими характеристиками наделены АСМ, особенно в режимах потребления реактивной мощности. Динамическая устойчивость АСМ мало зависит от их режима работы и существенно выше, чем у СМ ППВ и СМ ПВ. Система возбуждения АСМ позволяет обеспечить независимое регулирование электромагнитного момента и напряжение статора.

**Ключевые слова:** АРВ, асинхронизированные машины, продольно-поперечное возбуждение, синхронные машины, управляющая поперечная обмотка.

**Для цитирования:** Лоханин, Е.К. К вопросу о моделировании синхронных и асинхронизированных электрических машин при расчетах установившихся и переходных режимов энергосистем // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 121-131. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_121

## **TO THE QUESTION OF SIMULATION OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS MACHINES IN CALCULATIONS OF STEADY AND TRANSIENT MODES OF ENERGY SYSTEMS**

**E.K. Lochanin**

LLC “Institute “Energosetproekt”  
Moscow, Russia

**Abstract.** The article develops methods of mathematical modeling of synchronous and asynchronous synchronous machines (ASM) in the calculations of steady and transient modes. The work is devoted to the main differences between synchronous direct and quadrature axis machines (SM DQE) from ASM, as well as the concepts in the definition of SM DQE and ASM. Synchronous direct axis excitation machines (SM DE) and SM DQE don't always allow to fully solve the problems of stability and reliability in steady and transient modes of power systems. These machines are capable of operating only in a limited area of reactive power consumption, which is associated with a violation of their stability. ASM has significantly better technical characteristics, especially in reactive power consumption modes. ASM dynamic stability slightly depends on their mode of operation and is significantly higher than that of SM DQE and, moreover, SM DE. The ASM excitation system provides independent control of the electromagnetic torque and stator voltage.

**Key words:** AVR, asynchronous synchronous machines, longitudinal-transverse excitation, synchronous machines, control transverse winding.

**For citation:** E.K. Lokhanin, "To the question of simulation of synchronous and asynchronous synchronous machines in calculations of steady and transient modes of energy systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 121-131, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_121

## I. Введение

Систематические работы в области теории, практики, терминологии и внедрения синхронных машин продольно-поперечного возбуждения (СМ ППВ) [1-3] и асинхронизированных электрических машин (АСМ) [4] впервые были начаты в ВНИИЭ под руководством М.М. Ботвинника [5-8] в сотрудничестве с организациями ВНИИЭМ, ВЭИ и заводом изготовителем «Электросила». Для этой цели в ВНИИЭ была организована лаборатория асинхронизированных машин, ставшая научным центром применения этих машин в энергетике.

После успешной работы по созданию асинхронизированных генераторов 50 МВА для Иовской ГЭС в 1950-1960 гг. наступил перерыв до конца 1970-х гг., когда японские, затем немецкие и французские фирмы начали массовое производство и внедрение асинхронизированных генераторов мощностью от 80 до 1000 МВт. За разработку АСМ и сильного регулирования возбуждения М.М. Ботвинником совместно с группой сотрудников ВНИИЭ были получены патенты в США, Англии, Франции, Японии и авторское свидетельство в СССР. Однако в России возобновления производства АСМ так и не последовало, несмотря на выявленные в процессе эксплуатации у нас и за рубежом значительные преимущества этих машин (особенно гидрогенераторов перед СМ ППВ).

Настоящая статья является продолжением исследований [4]. Основное содержание работы связано с моделированием и программной реализацией системы регулирования АСМ, представленной в [5, 6], где используется понятие АСМ, введенное М.М. Ботвинником. Также показано противоречие трактовки асинхронизированных машин в [9, 10] фундаментальным исследованиям [5-8].

## II. Основные особенности систем возбуждения СМ ППВ и АСМ

Основные характеристики системы возбуждения АСМ приведены в [5, 6]. Следует отметить, что одно из главных различий между АСМ и СМ ППВ заключается в питании обмоток возбуждения АСМ не постоянным, как в СМ ППВ, а переменным током, амплитуда и частота которых изменяются в соответствии с заданным законом управления.

Существуют две группы модификаций СМ ППВ: с симметричными (одинаковыми) обмотками возбуждения (СОВ) и с несимметричной системой обмоток возбуждения, получивших название управляющих поперечных обмоток (УПО). Наиболее простая модификация электромагнитного момента для СМ ППВ с СОВ на роторе представляется как:

$$M_{\Sigma} = \frac{E_q U}{x} \sin \delta + \frac{E_d U}{x} \cos \delta = \frac{E_{\Sigma} U}{x} \sin(\delta + \alpha), \quad (1)$$

где  $E_{\Sigma} = \sqrt{E_q^2 + E_d^2}$  – модуль суммарной ЭДС;  $\alpha = \arctg \frac{E_d}{E_q}$  – угол, определяющий соотношение ЭДС в обмотках ротора.

Аналогично для УПО на роторе [11] при не учете активного сопротивления статора имеем:

$$M_{\Sigma} = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{E_d U}{x_q} \cos \delta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta. \quad (2)$$

Отметим, что все СМ ППВ, рассматриваемые в [9, 10, 12], ошибочно представляются асинхронизированными с термином АСТГ. В [5, 6] для определения понятия «асинхронизированная синхронная машина» используется термин АСМ.

Рассмотрим характерные особенности систем возбуждения АСМ и АСТГ (СМ ППВ), которые состоят в следующем. Конструктивно ротор АСМ, в отличие от СМ ППВ, является многофазным. Для исследования такой многофазной системы возбуждения последняя может быть приведена к двухфазной с двумя взаимно перпендикулярными одинаковыми обмотками.

Для АСМ, характеризующейся одинаковыми симметричными обмотками возбуждения, было получено в [6], в отличие от СМ ППВ и АСТГ, выражение электромагнитного момента  $M_s$ , зависящее от скольжения ротора  $s$ , а не от угла  $\delta$ , как в СМ ППВ и АСТГ:

$$M_s = \frac{U^2 s \omega_s \mu T}{x(1 + s^2 \omega_s^2 \sigma^2 T^2)} + \frac{U}{x} A_d, \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение системы;  $\mu = 1 - \sigma$  – коэффициент магнитной связи;  $x = x_d = x_q$  – синхронное реактивное сопротивление системы;  $T = T_d = T_q$  – постоянная времени обмоток возбуждения;  $\omega_s$  – синхронная угловая скорость;  $\sigma = \frac{x'}{x}$  – коэффициент магнитного рассеяния;  $x' = x'_d = x'_q$  – переходное реактивное сопротивление системы.

Отметим, что первая составляющая в (3) определяет асинхронный момент  $M_a$ , который обеспечивается заданным скольжением  $s = s_0$ . Более того  $M_a$  в системе возбуждения фиксирует дополнительную отрицательную обратную связь по скольжению, определяя АСМ более устойчивой, чем СМ ППВ и АСТГ при нарушениях режима работа в электрической системе. Значение  $M_a$  достигает своего максимального значения при критическом скольжении  $s_{кр} = \pm 1/\omega_s \sigma T$ . При скольжении большем критического АСМ становится неустойчивой по скорости.

Вторая составляющая в (3) определяет синхронный момент  $M_c$ , который для повышения устойчивости следует сделать зависимым от скольжения путем выбора  $A_d = a_0 + a_1 s$ . Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  определяются из условия отсутствия самораскачивания.

Регулирование возбуждения в АСМ осуществляется в двух взаимно перпендикулярных осях  $d$  и  $q$ , которое оказалось возможным только с введением сильного регулирования в АРВ. Полное описание системы возбуждения и блок-схемы регуляторов АРВ асинхронизированных генераторов приведены в [5, 6].

В АСМ, в отличие от АСТГ и СМ ППВ, создается круговое вращающееся поле возбуждения, при котором магнитный поток остается неизменным и имеет одинаковое магнитное сопротивление во всех направлениях. При этом ротор АСМ должен быть неявнополюсным.

У АСТГ и СМ ППВ из-за электрической несимметрии у неявнополюсных, а у явнополюсных машин дополнительно из-за магнитной ассиметрии ротора, речи о создании кругового вращающегося поля возбуждения, которое требуется для АСМ, идти не может. Ротор АСМ может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения, не переходя при этом в асинхронный режим с потерей мощности, что имеет

место в синхронных машинах продольного возбуждения, СМППВ и АСТГ. Более того, эта машина может работать как на длинную, так и короткую электропередачу [13]. Эта машина, названная М.М. Ботвинником асинхронизированной, способна быть и двигателем, и генератором при любом знаке скольжения, а также в синхронном режиме при  $s = 0$ .

Отметим, что зависимость  $M_s$  от скольжения не распространяется на машины с разными обмотками возбуждения, где  $x_d \neq x_q$  и которые по определению в [6] не могут считаться асинхронизированными. В [10] эти машины ошибочно относятся к асинхронизированным, на том основании, что их «динамические характеристики систем возбуждения в области малых отклонений параметров режима такие же как у асинхронизированных машин с симметричными обмотками возбуждения». Однако эти характеристики несопоставимы, так как в первом случае они определяются углом  $\delta$ , а во втором – скольжением  $s$ .

При эксплуатации систем возбуждения АСМ их параметры следует выбирать так, чтобы обеспечивался требуемый диапазон рабочих скольжений. При этом асинхронный момент  $M_a$  в пределах заданного скольжения определяет саму суть системы возбуждения АСМ. При отсутствии такого момента, что характерно для СМППВ и АСТГ, понятие «асинхронизированная синхронная машина» теряет всякий смысл.

Отметим, что работа АСМ с отрицательным скольжением существенно увеличивает динамическую устойчивость АСМ. Длительность аварийного возмущения может быть большей, если в установившемся режиме эта машина работала с отрицательным скольжением. Основным требованием при расчете АСМ является получение минимального возможного значения постоянной времени обмоток возбуждения, поскольку чем меньше эта постоянная времени, тем меньше требуемое потолочное напряжение возбуждения необходимое при одних и тех же значениях скольжения.

Следует отметить, что независимость  $M_s$  от угла  $\delta$  при движении ротора не нарушается и при скольжении  $s \neq 0$ . При этом ток в обмотках ротора имеет частоту скольжения. В результате в системе возбуждения АСМ создается бегущее магнитное поле, перемещающееся относительно ротора со скоростью  $s\omega_s$ .

Таким образом, реализацию асинхронизированной машины определяют следующие факторы: наличие одинаковых симметричных обмоток; возбуждения по  $d$  и  $q$  осям; питание обмоток возбуждения не постоянным, как в СМППВ, а переменным током, амплитуда и частота, которого изменяется с заданным законом управления; наличие многофазного и шихтованного ротора; зависимость электромагнитного момента от скольжения; независимость устойчивости от угла; использование структуры АРВ сильного действия. Отмеченные факторы определяют характер изменения рабочего

поля возбуждения, скольжений  $s$  и углов  $\delta$  в уравнениях движения, основные свойства и конструктивное исполнение АСМ.

### III. К вопросу о определении СМ ППВ и АСМ

В [9] все рассматриваемые генераторы, в том числе, генераторы Бурштынской ГРЭС АСТГ-200 и их системы возбуждения, названы асинхронизированными. Они определены как «классический пример асинхронизированных машин, обладающих всеми классическими свойствами АСТГ» и использующих для этой цели преобразователь координат. Такое представление генераторов противоречит описанию асинхронизированной машины и ее системы возбуждения в [5, 6]. Как будет показано ниже, утверждение, что преобразователь координат определяет асинхронизированные машины и связан с «устранением угловых характеристик», по нашему мнению, является несостоятельным.

Наличие преобразователя координат позволяет задавать в регуляторе продольно-поперечного возбуждения [4, рис. 3] каналы регулирования и стабилизации начальными значениями коэффициентов  $K_L$ ,  $K_S$ ,  $K_\varphi$  и  $K_U$ . При этом их изменения в переходном режиме учитываются преобразователем координат, действия которого определяются следующими угловыми характеристиками, полученными из его схемы замещения.

По продольной оси:

$$\begin{aligned} K_L(\varphi_U) &= K_{L0}\sin\varphi_U; & K_S(\varphi_U) &= K_{S0}\sin\varphi_U; \\ K_\varphi(\varphi_U) &= K_{\varphi 0}\sin\varphi_U; & K_U(\varphi_U) &= K_{U0}\cos\varphi_U; \\ I_0 &= I_{q0}; & I &= I_q. \end{aligned} \quad (4)$$

На поперечной оси угловые характеристики имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_L(\varphi_U) &= K_{L0}\cos\varphi_U; & K_S(\varphi_U) &= K_{S0}\cos\varphi_U; \\ K_\varphi(\varphi_U) &= K_{\varphi 0}\cos\varphi_U; & K_U(\varphi_U) &= -K_{U0}\sin\varphi_U; \\ I_0 &= I_{d0}; & I &= I_d. \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varphi_U$  – угол между системами координат  $(x, y)$  и  $(d, q)$ .

Таким образом, ни о каком «устранении угловых характеристик» речи быть не может.

Как показали в [1, 3] расчеты установившихся и переходных режимов, два генератора ППВ Бурштынской ГРЭС характеризуются устойчивостью по углу  $\delta$ , свойственной синхронным, а не асинхронизированным машинам. Аналогичные машины представляются синхронными и за рубежом [14, 15].

В отличие от асинхронизированных машин, система АРВ АСТГ этих генераторов из-за наличия угла сдвига между продольной осью ротора и

вектором напряжения опорного узла исключает работу со скольжением в установившемся режиме. В [9, 10] определение АСМ, принятое в [5], полностью игнорируется: «машину с характеристикой синхронного момента, определяемой по скольжению, будем сокращенно называть АСМ (асинхронизированная синхронная машина), где термин АСМ указывает на возможность работы со скольжением в установившемся режиме».

В [9, 10], на наш взгляд, необоснованно и независимо от конструкции ротора, используется такое же название «асинхронизированная» с термином АСТГ применительно к электрическим машинам продольно-поперечного возбуждения, использующих в системе возбуждения преобразователь координат. Также в [9, 10] не учитывались уравнения электромагнитного момента АСМ (3). На производстве АСМ, несмотря на возрастающее их внедрение за рубежом, это сказывается крайне негативно.

Конструкция асинхронизированных машин и режим их работы имеют много общего с асинхронными машинами. В этом и состоит смысл введения названия «асинхронизированная синхронная машина» для машины АСМ, принципиально отличной от СМ ППВ и АСТГ. Отметим, что в [5] название «асинхронизированная» введено на том основании, что устойчивость такой машины определяется скольжением  $s$  аналогично асинхронной машине, а не углом  $\delta$ , как в СМ ППВ и АСТГ.

Преобразователь координат был впервые применен в АРВ СМ ППВ [7, 8], не называя при этом эти машины асинхронизированными.

Таким образом, преимуществами АСМ и их систем возбуждения перед СМ ППВ и АСТГ являются:

- простота при синхронизации АСМ независимо от их мощности, так как результирующее поле возбуждения всегда синхронно с частотой сети;
- возможность АСМ оставаться в синхронизме и отдавать требуемую мощность при любом положении ротора, который может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения;
- отсутствие дорогостоящих средств компенсации реактивных сопротивлений длинных линий электропередач при применении в качестве генераторов на этих линиях АСМ;
- способность быть и двигателем, и генератором при любом знаке скольжения  $s$ , а также в синхронном режиме при  $s = 0$ ;
- обеспечение работы со скольжением в установившемся режиме;
- повышение пределов по статической и динамической устойчивости.

#### IV. Выводы

1. Применение асинхронизированных электрических машин (АСМ) расширяет возможности строительства длинных линий электропередачи пе-

ременного тока без применения дорогостоящих средств компенсации их реактивных сопротивлений. При этом эффект от использования АСМ будет тем большим, чем мощнее и протяженнее электропередача.

2. В АСМ, характеризующейся одинаковыми симметричными обмотками возбуждения, создается круговое вращающееся поле, при котором электромагнитный момент зависит не от угла  $\delta$ , как в СМ ППВ и АСТГ, а от скольжения  $s$ . При этом ротор может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения, не переходя при этом в асинхронный режим с потерей мощности, что имеет место в СМ ППВ и АСТГ.

3. Питание обмоток возбуждения в АСМ осуществляется не постоянным как в СМ ППВ и АСТГ, а переменным током, амплитуда и частота которого меняется по заданному закону управления. При эксплуатации АСМ параметры систем возбуждения следует выбирать, обеспечивая требуемый и допустимый диапазон изменений рабочего скольжения.

4. Работа АСМ с отрицательным скольжением значительно увеличивает электродинамическую устойчивость энергосистемы. Длительность допустимого аварийного возмущения может быть существенно большей, если машина до аварии работала с отрицательным скольжением.

5. Искаженные отождествления асинхронизированных машин с термином АСТГ определяют не АСМ, а СМ ППВ. Это не может способствовать промышленному производству действительных АСМ, которые, как показали наши исследования, обладают значительно большей устойчивостью при нарушениях режимов энергосистемы, чем СМ ППВ и АСТГ.

### **V. Заключение**

Рассмотренные модели электрических машин с продольно-поперечным регулированием возбуждения реализованы в программных режимных комплексах ДИС КУ и ДАКАР. Они широко внедрялись и внедряются в энергосистемах России и ближнем зарубежье, и в дальнейшем будут способствовать внедрению асинхронизированных машин, где их динамическая устойчивость мало зависит от их режима работы и существенно выше, чем у СМ ППВ и АСТГ.

© Лоханин Е.К., 2022

*Поступила в редакцию 06.05.2022  
Received 06.05.2022*

### **Библиографический список**

- [1] Гараев Ю.Н., Лоханин Е.К., Россковский Е.Л. Особенности моделирования синхронных машин продольно-поперечного возбуждения // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2015. № 1 (72). С. 44-64.

- [2] Лоханин Е.К. Методы моделирования, расчета и анализа стационарных и переходных режимов в энергосистемах. М.: Знак, 2014. – 456 с.
- [3] Лоханин Е.К., Гараев Ю.Н., Россовский Е.Л. Моделирование синхронных машин продольно-поперечного возбуждения без учета их системы регулирования // Энергетик. 2015. № 7. С. 21-25.
- [4] Лоханин Е.К., Гараев Ю.Н., Россовский Е.Л., Глаголев В.А. Представление систем управления возбуждением асинхронизированных машин для расчета режимов работы энергосистем // Электротехника. 2019. № 1. С. 59-69.
- [5] Блоцкий Н.Н., Ботвинник М.М. Асинхронизированные синхронные машины // Труды ВНИИЭ. 1959. № 9.
- [6] Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 70 с.
- [7] Ботвинник М.М., Фези-Жилинская М.С. Регулирование возбуждения синхронных машин в продольной и поперечной осях ротора // Труды ЦНИЭЛ. 1957. Вып. 6.
- [8] Ботвинник М.М., Городский Д.А., Карполь Э.М., Сазонова Э.К. Экспериментальное исследование работы синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением // Вестник электропромышленности. 1957, № 2.
- [9] Шакарян Ю.Г. [и др.]. Разработка и перспективы применения новых типов турбогенераторов с векторной системой управления возбуждением // Электротехника. 2010. № 2. С. 4а-9.
- [10] Довганюк И.Я., Лабунец И.А., Плотникова Т.В., Сокур П.В., Шакарян Ю.Г. Концепция построения системы управления возбуждением асинхронизированных турбогенераторов // Электротехника. 2010. № 2. С. 30-35.
- [11] Каспаров Э.А. Новые режимные возможности синхронных машин в энергосистемах. М.: Спутник+, 2011. – 339 с.
- [12] Лабунец И.А. [и др.] Методические указания по применению асинхронизированных турбогенераторов на реконструируемых, расширяемых и вновь строящихся тепловых электростанциях различных типов. М.: ВНИИЭ РАО «ЕЭС России», 1996.
- [13] Кошчев Л.А. Об использовании асинхронизированных синхронных генераторов на мощных электростанциях, удаленных от центра потребления // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 2 (75). С. 91-101.
- [14] Malik O.P. et al. Dual-exitiated synchronous machines – characteristics and application in the large power system // J. Inst. Eng. (India) Elec. Eng. Div. 1975. № 1.
- [15] Andrew Y., Vitaly Y. Pulse controlled thyristor excitation regulator for a two – axis synchronous machine // IEEE Con/Rec. 9<sup>th</sup> Annual IEEE Ind APPL. Soc. 1974. Part 1.

## References

- [1] U.N. Garaev, E.K. Lochanin and E.L. Rossovsky, "Features of modeling of synchronous direct and quadrature axis machines", *Izvestiya NTC Edinoj Energeticheskoy Sistemy [STC of Unified Power System Proceedings]*, no. 1 (72), pp. 44-64, 2015 (in Russian).
- [2] E.K. Lochanin, *Metody modelirovaniya, rascheta i analiza stacionarnykh i perekhodnykh rezhimov v energosistemakh [Methods of modeling, calculation and analysis of stationary and transient modes in power systems]*. Moscow: Znack, 2014 (in Russian).
- [3] E.K. Lochanin, U.N. Garaev, and E.L. Rossovsky, "Modelirovanie sinhronnykh mashin prodol'no-poperechnogo vzbuzhdeniya bez ucheta ih sistemy regulirovaniya [Modeling of synchronous direct and quadrature axis machines without taking into account their control system]", *Energetik*, no. 7, pp. 21-25, 2015 (in Russian).
- [4] E.K. Lokhanin, Yu.N. Garaev, E.L. Rossovsky and V.A. Glagolev, "About simulation of synchronous and asynchronous synchronous machines for calculations of operating modes of power systems", *Elektrotehnika*, no. 1, pp. 59-69, 2019.
- [5] N.N. Blotsky and M.M. Botvinnik, "Asinhronizirovannyye sinhronnyye mashiny [Asynchronized synchronous machines]", *Trudy VNIIE [Proceedings of VNIIEF]*, no. 9, 1959 (in Russian).
- [6] M.M. Botvinnik, *Asinhronizirovannaya sinhronnaya mashina [Asynchronized synchronous machine]*. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1960 (in Russian).
- [7] M.M. Botvinnik M.M. and N.S. Fezi-Zhilinskaya, "Regulirovanie vzbuzhdeniya sinhronnykh mashin v prodol'noy i poperechnoy osyakh rotora [Regulation of excitation of synchronous machines in the longitudinal and transverse axes of the rotor]", *Trudy CNIEL [Proceedings of CSREL]*, no. 6, 1957 (in Russian).
- [8] M.M. Botvinnik, D.A. Gorodsky, E.M. Karpol' and E.K. Sazonova, "Eksperimental'noe issledovanie raboty sinhronnoy mashiny s prodol'no-poperechnym vzbuzhdeniem [Experimental study of the operation of a synchronous machine with longitudinal-transverse excitation]", *Vestnik elektropromyshlennosti [Bulletin of the electrical industry]*, no. 2, 1957 (in Russian).
- [9] Yu.G. Shakaryan et al., "Razrabotka i perspektivy primeneniya novykh tipov turbogeneratorov s vektornoj sistemoy upravleniya vzbuzhdeniem [Development and prospects for the use of new types of turbogenerators with a vector excitation control system]", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 4a-9, 2010 (in Russian).
- [10] I.Ya. Dovganyuk, L.A. Labunec, T.V. Plotnikova, P.V. Sokur and Yu.G. Shakaryan, "Konceptiya postroeniya sistemy upravleniya vzbuzhdeniem asinhronizirovannykh turbogeneratorov [The concept of building a control system for the excitation of asynchronized turbogenerators]", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 30-35, 2010 (in Russian).
- [11] E.A. Kasparov, *Novyye rezhimnye vozmozhnosti sinhronnykh mashin v energosistemakh [New operating possibilities of synchronous machines in power systems]*. Moscow: Sputnik +, 2011 (in Russian).
- [12] I.A. Labunets et al., *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu asinhronizirovannykh turbogeneratorov na rekonstruirovannykh, rasshiraemykh i vnov' stroyashchih teplykh elektrostanciyah razlichnykh tipov [Guidelines for the use of asynchronized turbogenerators at reconstructed, expanded and newly built thermal power plants of various types]*. Moscow: VNIIE RAO "UES of Russia", 1996 (in Russian).

- [13] L.A. Koshcheev, "Utilization of asynchronized synchronous generators for electrical energy transmission from a distant power plant", *Izvestiya STC of the Unified Energy System*, no. 2 (75), pp. 91-101, 2016 (in Russian).
- [14] O.P. Malik et al. "Dual-excited synchronous machines – characteristics and application in the large power system", *J. Inst. Eng. (India) Elec. Eng. Div.*, no. 1, 1975.
- [15] Y. Andrew and Y. Vitaly, "Pulse controlled thyristor excitation regulator for a two – axis synchronous machine", *IEEE Con/Rec. 9<sup>th</sup> Annual IEEE Ind APPL. Soc.*, part 1, 1974.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Лоханин Евгений Константинович**, доктор технических наук, начальник лаборатории ООО «Институт «Энергосетьпроект», г. Москва, Российская Федерация.

**Evgeniy K. Lochanin**, D. Sci. (Eng.), head of the laboratory of the LLC "Institute "Energosetproekt", Moscow, Russian Federation.