

## Бесперебойное электроснабжение нагрузок и другие преимущества асинхронизированной электромашинной вставки в ЭЭС

А. Г. Воронцов

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

✉ [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

**Аннотация.** Построены математические и компьютерные модели асинхронизированной электромеханической вставки в систему электроснабжения мегаполиса. Рассмотрена работа двух асинхронизированных генераторов-двигателей, размещенных на общем валу, транзисторных активных преобразователей частоты в системах возбуждения и пуска агрегата, а также устройств регулирования. Для электроэнергетической системы выполнен анализ основных режимов работы установки с машинами мощностью по 200 МВт. Проанализированы режимы пуска агрегата, синхронизации его с двумя линиями электропередачи, наброса мощности на агрегат, передачи электроэнергии из одной сети в другую через общий вал машин, реверс активной мощности. Рассмотрены некоторые аварийные режимы работы системы. Предложено использовать кинетическую энергию электромашинного агрегата для бесперебойного электроснабжения нагрузок при аварийном отключении одного из двух источников электроэнергии ЭЭС.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, асинхронизированная машина, генератор-двигатель, преобразователь частоты, регулирование мощности, регулирование напряжения, аварийный режим, модель

**Для цитирования:** Воронцов А. Г. Бесперебойное электроснабжение нагрузок и другие преимущества асинхронизированной электромашинной вставки в ЭЭС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 4. С. 61–71. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-61-71.

Original article

## Uninterrupted Electricity Supply to Loads and Other Advantages of Asynchronized Electromachine Insert into an Energy System

A. G. Vorontsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, SPC «SES», Saint Petersburg, Russia

✉ [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

**Abstract.** Mathematical and computer models of an asynchronized electromechanical insert in the power supply system of a metropolis are constructed. The work of two asynchronized generator-motors located on a common shaft, transistor active frequency converters in the excitation and start-up systems of the unit, as well as control devices is considered. For the electric power system, an analysis was made of the main operating modes of the plant with machines with a capacity of 200 MW. The modes of starting the unit, synchronizing it with two power lines, transferring power to the unit, transferring electricity from one network to another through a common shaft of machines, and reversing active power are analyzed. Some emergency operating modes of the system are considered. It is proposed to use the kinetic energy of an electric machine unit for uninterrupted power supply to loads in case of an emergency shutdown of one of the two sources of electricity in the power system.

**Keywords:** electric power system, asynchronized machine, generator-motor, frequency converter, power regulation, voltage regulation, emergency mode, model

**For citation:** Vorontsov A. G. Uninterrupted Electricity Supply to Loads and Other Advantages of Asynchronized Electromachine Insert into an Energy System // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 61–71. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-61-71.

**Введение.** Электроснабжение крупных мегаполисов и других ответственных потребителей выполняют по категориям повышенной надежности, обычно от двух источников энергии. По 1-й категории надежности перерыв питания допускается на время автоматического переключения коммутационных аппаратов. По правилам устройства электроустановок версии 7 (ПУЭ 7) длительность перерыва питания допускается до 0.5–0.7 с. В ряде случаев для резервирования и повышения надежности систем используется третий источник электроэнергии (ПУЭ 7).

Повышение надежности электроснабжения при одновременном повышении качества электроэнергии электроэнергетических систем (ЭЭС) возможно в результате применения асинхронизированных машин, предложенных М. М. Ботвинником в 1955–1960 гг. Исследования асинхронизированных генераторов-двигателей (АГД) были продолжены Ю. Г. Шакаряном, И. А. Лабунцом, затем П. В. Сокуром и другими специалистами. В настоящее время АГД применяются в гидроаккумулирующих электростанциях [1], [2], в ветроэлектрических установках. В России АГД применяются в качестве генераторов на Каширской ГРЭС, на ТЭЦ 21, ТЭЦ-22, ТЭЦ-27 (генераторы от 110 до 320 МВт), в качестве компенсаторов они используются на подстанции Бескудниково (АСК-100, Мосэнерго) [3]–[7]. Есть примеры использования АГД в других областях техники. В России основной поставщик оборудования для энергетики – АО «Силовые машины».

Работы по асинхронизированным электромашиным преобразователям частоты (АСЭМПЧ) были начаты во ВНИИЭ под руководством Ю. Г. Шакаряна [8]. В настоящее время планируется поставка АСЭМПЧ на строящуюся подстанцию Саларьево для электроснабжения пригорода Москвы. Разрабатываемый АСЭМПЧ содержит два АГД на общем валу мощностью по 200 МВт. Допустима перегрузка до 300 МВт, ограниченная по времени. Через АСЭМПЧ (через общий вал машин) осуществляется механическая связь двух линий электропередачи (ЛЭП<sub>1</sub> и ЛЭП<sub>2</sub>) с напряжением по 220 кВ. Обеспечивается требование по электроснабжению ответственной нагрузки от двух источников при отсутствии их гальванической связи. При этом структура системы позволяет достаточно быстро подключать нагрузку к одному или другому источнику без помощи коммутационной аппаратуры.

**Схемы и задачи АСЭМПЧ.** Упрощенная схема ЭЭС с АСЭМПЧ представлена на рис. 1. Участки ЭЭС напряжением 220 кВ при частоте 50 Гц (ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub>) получают питание от двух источников электроэнергии (ИЭ<sub>1</sub> и ИЭ<sub>2</sub>). На участках ЭЭС имеются нагрузки – потребители электроэнергии (Н<sub>1</sub> и Н<sub>2</sub>). В общем случае уровни, фазы и частоты напряжений источников различны. При выравнивании напряжений, фаз и частот участков ЭЭС они могут быть объединены коммутационным аппаратом Q<sub>0</sub> (включение аппарата предусматривается при отключении одного

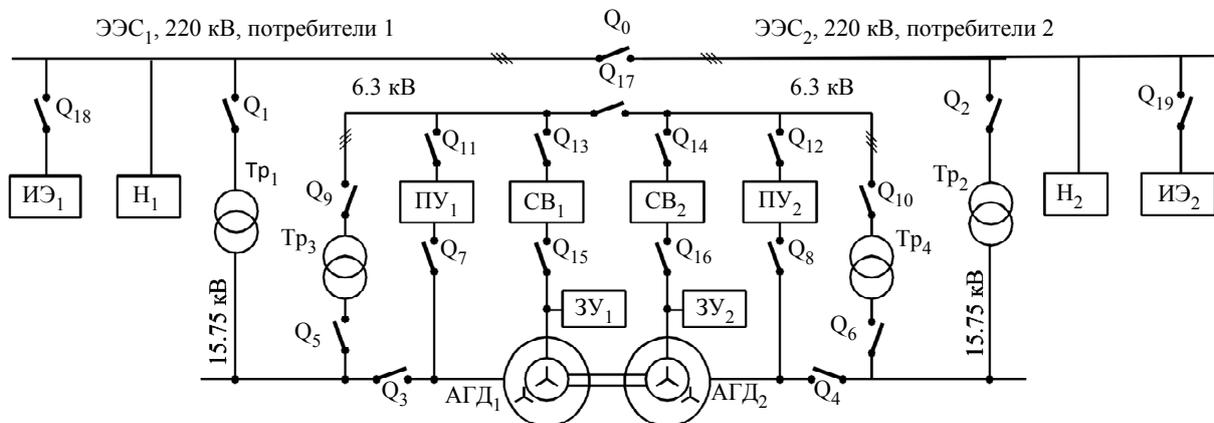


Рис. 1. Схема ЭЭС с АСЭМПЧ  
Fig. 1. Diagram of mains supply with asynchronized electromachine insert

из источников электроэнергии). Основной элемент АСЭМПЧ – это электромашинный агрегат, содержащий АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub>, размещенные на общем валу. Активная мощность обмотки статора каждого АГД – 200 МВт, полная мощность – 235 МВА. Статоры АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub> подключены к ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> через трансформаторы Тр<sub>1</sub> и Тр<sub>2</sub>. Номинальные напряжения обмоток статоров АГД – 15.75 кВ, мощность каждого трансформатора 250 МВА.

К сетям 15.75 кВ подключены трансформаторы Тр<sub>3</sub> и Тр<sub>4</sub> мощностью по 8 МВА, которые питают две сети собственных нужд с номинальным напряжением 6.3 кВ. Сети 6.3 кВ могут быть объединены коммутационным аппаратом Q<sub>17</sub> (при исключении блокировками гальванической связи ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> через трансформаторы). От сетей 6.3 кВ через трансформаторы получают питание системы возбуждения АГД – СВ<sub>1</sub> и СВ<sub>2</sub>. Эти СВ представляют собой активные транзисторные ПЧ, которые питают обмотки роторов АГД трехфазными системами токов низких частот, обеспечивая работу машин с малыми скольжениями положительного или отрицательного знака. К сетям 6.3 кВ подключаются два пусковых устройства – ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub>, используемые не только для разгона электромашинного агрегата, но и для его торможения с рекуперацией кинетической энергии агрегата в ЭЭС. В связи с этим ПУ активны.

ПУ и СВ выполняются высоковольтными и на большие токи. Поэтому, а также для взаимного резервирования устройств, в АСЭМПЧ используется параллельное включение ПЧ – три ПЧ в каждом ПУ и два ПЧ в каждой СВ. В одном из вариантов системы все ПЧ выполняются трехуровневыми с трехобмоточными трансформаторами со стороны сети. В другом варианте систе-

мы ПЧ в ПУ выполняются модульными многоуровневыми (ММПЧ) без трансформаторов. Используемая для анализа системы схема замещения АГД, а также структуры силовых схем ПЧ представлены на рис. 2. На этом же рисунке представлена схема защитных устройств ЗУ<sub>1</sub> и ЗУ<sub>2</sub>, которые защищают СВ от сверхтоков, возникающих в роторе при коротких замыканиях (КЗ) обмотки статора. ЗУ используются также для обеспечения работы установки при потере возбуждения одним АГД (при авариях трехфазная обмотка ротора через ЗУ замыкается на малые активные сопротивления).

В схеме на рис. 2 АВ – активный выпрямитель, АИ – автономный инвертор напряжения,  $L_\mu$ ,  $R_\mu$  – индуктивность и активное сопротивление контура намагничивания асинхронной машины.

В нормальных режимах работы системы рис. 1 коммутационный аппарат Q<sub>0</sub> разомкнут, а ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> связаны друг с другом через общий вал двух АГД, т. е. гальваническая связь участков ЭЭС отсутствует. Это позволяет ограничить токи КЗ сетей 220 кВ. Система управления (СУ) каждого АГД стабилизирует напряжение статора путем регулирования реактивной мощности. При этом через общий вал АГД в заданном направлении передается заданная активная мощность между ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub>. Это позволяет обеспечить питание нагрузок сетей 220 кВ при исчезновении напряжения одного источника.

Другая задача АСЭМПЧ – подавление колебаний в ЭЭС. Возможно также безударное соединение ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> аппаратом Q<sub>0</sub> при предварительном выравнивании параметров сетей регуляторами АСЭМПЧ. Можно также использовать электромашинный агрегат в качестве накопителя кинетической энергии. Однако это связано с уве-

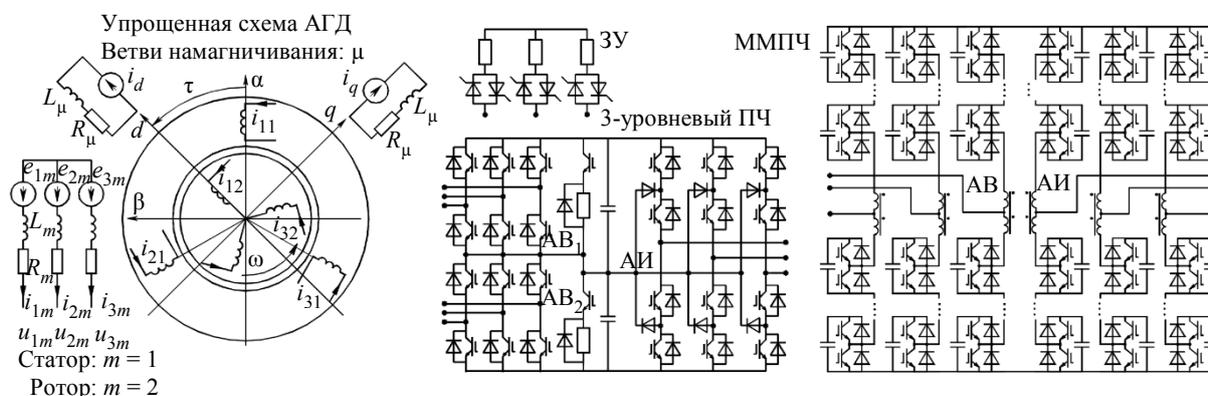


Рис. 2. Схема замещения АД и структуры силовых схем ПЧ  
Fig. 2. IM equivalent circuit and structures of FC power circuits

личением диапазона регулирования скольжения АГД, с увеличением максимального напряжения контактных колец, с увеличением мощности СВ.

**Физические, математические и компьютерные модели АГД и АСЭМПЧ.** Для обеспечения рассматриваемого проекта и других подобных работ осуществлялось физическое и математическое моделирование систем с АГД и транзисторными ПЧ. Результаты этих работ опубликованы в [9]–[18]. Математические описания элементов системы и установок в целом наиболее полно представлены в [18]. По АСЭМПЧ исследовательские и проектные работы выполняются на основе экспериментов [15], накопленного опыта проектирования систем и на базе математического и компьютерного моделирования. При моделировании установок на ЭВМ использована известная методология расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [18], в том числе с дополнениями автора данной статьи [16]–[17]. Применение этой методологии позволяет сократить затраты машинного времени на расчеты и в некоторых случаях обеспечить работу моделей в реальном времени.

В соответствии с рис. 2 математическая модель АГД выполнена в комбинированной системе координат – обмотка статора описана в координатах фаз статора, обмотка ротора – в координатах фаз ротора, контуры намагничивания – во взаимно-перпендикулярных координатах  $dq$ , вращающихся синхронно с ротором. При преобразованиях переменных использованы неподвижные взаимно-перпендикулярные координаты  $\alpha\beta$ . В модели АГД учтена зависимость индуктивности намагничивания от насыщения стали. Учтены также механические потери энергии и их зависимость от частоты вращения ротора АГД. Расчеты на компьютерной модели выполняются по мгновенным значениям переменных и на каждом шаге уточняются индуктивности намагничивания и другие параметры АГД.

Математические описания транзисторных ПЧ и тиристорных ЗУ выполнены при преобразованиях силовых схем. В соответствии с используемой методологией моделирования силовые схемы всей установки и отдельных устройств разделяются на подсистемы, которые связываются друг с другом зависимыми элементами (источниками напряжения, тока и др.) [18]. Математическое описание установки представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений большой размерности, а также логических усло-

вий. Алгоритм расчета имеет два контура вычислений. Во внутреннем контуре итерационными методами решается система алгебраических уравнений, в результате чего определяются мгновенные значения зависимых переменных, через которые подсистемы взаимосвязаны. Во внешнем контуре вычислений переменные интегрируются явным методом Эйлера.

Время выполнения итерационного цикла расчета минимизировано. Во-первых, минимизировано количество искомых в итерационном цикле переменных (количество подсистем обычно невелико, и, следовательно, невелико количество зависимых источников напряжения и тока, через которые подсистемы взаимосвязаны). Во-вторых, подсистемы обычно сравнительно просты и предварительно их математические описания оптимизируются. В-третьих, рассматриваемые системы содержат большое количество полупроводниковых элементов (ПЭ – транзисторы, диоды и др.) и расчеты выполняются с малыми шагами по времени. Поэтому значения переменных в предыдущий момент времени – это близкое приближение к искомым значениям переменных (в следующий момент), что позволяет сократить количество итераций вплоть до их исключения. Сокращение числа искомых переменных, числа итераций и предварительное упрощение описаний подсистем позволяют на порядки сократить затраты машинного времени на расчеты систем по сравнению с аналогичными моделями в MatLab. Эффективность используемых алгоритмов резко возрастает при увеличении в системах количества ПЭ.

В моделях АСЭМПЧ система управления построена в соответствии с рис. 3 (один из вариантов). В СУ есть блок управления двумя АГД, в который поступают сигналы по частоте вращения АГД  $\omega$ , угловому положению роторов  $\tau$ , по напряжениям статоров и токам  $u_{1sn}$  и  $u_{2sn}$ ,  $i_{1sn}$  и  $i_{2sn}$ , а также сигналы из автоматизированной системы управления (АСУ) по заданию режима работы, по заданной активной мощности  $P_z$  и др. СУ АГД воздействует на СВ<sub>1</sub> и СВ<sub>2</sub>, системы управления которых СУ<sub>СВ1</sub> и СУ<sub>СВ2</sub> обеспечивают формирование в роторах АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub> требуемых токов фаз  $i_{1rn}$  и  $i_{2rn}$ .

В режимах пуска, синхронизации АГД с ЭЭС, а также при торможении электромашинного агрегата в работе комплекса участвуют ПУ<sub>1</sub> и (или) ПУ<sub>2</sub>. От АСЭМПЧ в АСУ передается информа-

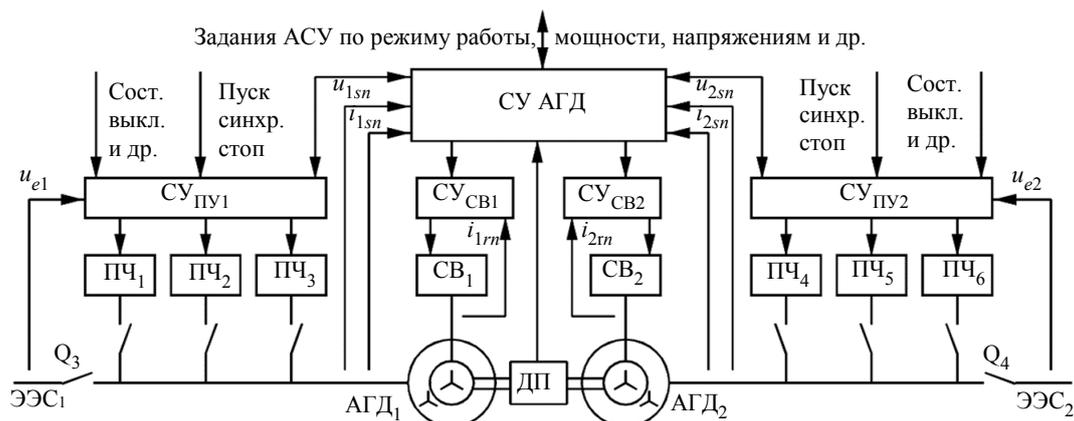


Рис. 3. Структура СУ АСЭМПЧ

Fig. 3. Control system structure of asynchronous electromachine insert

ция о готовности к работе ПЧ<sub>1</sub>–ПЧ<sub>6</sub> из состава ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub>. АСУ определяет те ПЧ, которые должны запускать или тормозить агрегат, формирует соответствующие команды управления и задает требуемый режим работы. При этом пуск агрегата возможен при использовании различного количества ПЧ. В каждом ПУ при параллельной работе двух или трех ПЧ обеспечивается многотактный режим при распределении нагрузки между ПЧ с использованием LC-фильтров и СУ<sub>ПУ</sub>.

В блоке СУ АГД используются две системы управления машинами АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub>. В основном варианте регулирования эти две СУ идентичны и различаются только следующим: одна СУ обеспечивает стабилизацию активной мощности, передаваемой через АГД из одного участка ЭЭС на вал агрегата (или в обратном направлении), другая СУ обеспечивает стабилизацию частоты вращения агрегата, формируя активную мощность, передаваемую с вала агрегата во второй участок ЭЭС (или обратно).

Компьютерные модели системы с АСЭМПЧ выполнены на языке программирования C++ в Visual Studio. Расчеты на ЭВМ выполняются в среде собственной разработки ComSim [19], которая позволяет вводить данные различного вида в ЭВМ, запускать программы расчета, выводить результаты на дисплей в процессе расчета и при его окончании, анализировать и оформлять результаты.

**Расчеты режимов работы комплекса ЭЭС–АСЭМПЧ.** При расчетах режимов работы АСЭМПЧ с двумя ЭЭС использованы следующие основные параметры. Номинальные данные АГД: активная мощность – 200 МВт, коэффициент мощности – 0.85, напряжение статора – 15.75 кВ, частота – 50 Гц, скольжение – 0.005, КПД – 0.985, ин-

дуктивность рассеяния фазы статора – 0.1 о. е., индуктивность намагничивания – 2.52 о. е., индуктивность рассеяния фазы ротора – 0.14 о. е., активное сопротивление фазы статора – 0.0021 Ом, активное сопротивление фазы ротора – 0.034 Ом, коэффициент приведения параметров ротора к статору – 4.902, потери – механические в стали статора и добавочные – 4 МВт. Предельно допустимое скольжение – 2 %, предельно допустимое напряжение контактных колец – 2000 В, суммарный момент инерции роторов двух АГД, приведенный к двухполюсному исполнению, – 50 тм<sup>2</sup>. ПЧ в СВ имеют номинальное выпрямленное напряжение 2000 В, частоту ШИМ – 4000 Гц. При использовании в ПУ трехуровневых ПЧ они имеют выпрямленное напряжение – 4000 В, частоту ШИМ – 1500 Гц, ограничение по амплитуде тока фазы – 2000 А (6000 А для трех ПЧ).

Некоторые результаты расчетов процессов в ЭЭС с АСЭМПЧ представлены в публикациях, в частности в [18] представлена диаграмма нескольких основных режимов работы системы. Рассчитаны следующие процессы: пуск электромашиного агрегата и разгон до номинальной частоты вращения, синхронизация АГД<sub>2</sub> с ЭЭС<sub>2</sub>, синхронизация АГД<sub>1</sub> с ЭЭС<sub>1</sub>, наброс номинальной активной мощности на агрегат (200 МВт) и ее передача из одного участка ЭЭС в другой, реверс активной мощности – 200 МВт за время около 1 с.

Кроме подтверждения эффективности используемых технических решений при реализации указанных режимов работы АСЭМПЧ необходима оценка требуемой кратности форсировки напряжений возбуждения АГД, а также кратности изменения скольжения АГД в динамических режимах. Эти задачи также решались на указанной полной модели системы. Установлено, что в ди-

намических режимах работы АСЭМПЧ (наброс и реверс номинальной активной мощности – 200 МВт) скольжение АГД может изменяться до 2 %, соответственно изменяется напряжение на контактных кольцах АГД и напряжения СВ. Участок процесса реверса активной мощности 200 МВт отображен на рис. 4.

Из рисунка видно, что в начале процесса при работе АГД с номинальной активной мощностью размах колебаний напряжений управления АИ в СВ в 2...2.5 раза меньше размаха колебаний пилообразных опорных напряжений. Это означает, что при принятых выпрямленных напряжениях ПЧ в СВ (2000 В) имеется (2...2.5)-кратная форсировка по напряжению возбуждения АГД. Эта форсировка полностью используется при набросе и реверсе номинальной активной мощности (при быстром изменении мощности АГД амплитуда напряжений управления СВ достигает амплитуды опорных напряжений).

**Варианты пуска АСЭМПЧ.** В соответствии с рис. 3 разгон электрического агрегата из не-

подвижного состояния до номинальной скорости вращения осуществляется с использованием различного количества ПЧ из состава ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub>. Ниже приведены расчетные данные по пуску электрического агрегата при использовании в ПУ трехуровневых ПЧ (при указанных ограничениях по напряжениям и токам).

Разгон агрегата двумя ПЧ из состава двух или одного ПУ осуществляется за 325 с (рис. 5). Пуск агрегата от трех ПЧ из состава ПУ<sub>1</sub> или ПУ<sub>2</sub> осуществляется за 204 с. Агрегат разгоняется за 168 с при пуске его от четырех ПЧ различных ПУ. Наиболее быстрый разгон агрегата возможен при пуске его от шести ПЧ. В этом случае длительность пуска 95 с.

Из приведенных данных следует, что в АСЭМПЧ обеспечивается многократное взаимное дублирование устройств пуска агрегата.

**Использование АСЭМПЧ для бесперебойного электроснабжения нагрузок.** Если АСЭМПЧ не используется, то в ЭЭС рис. 1 при отключении

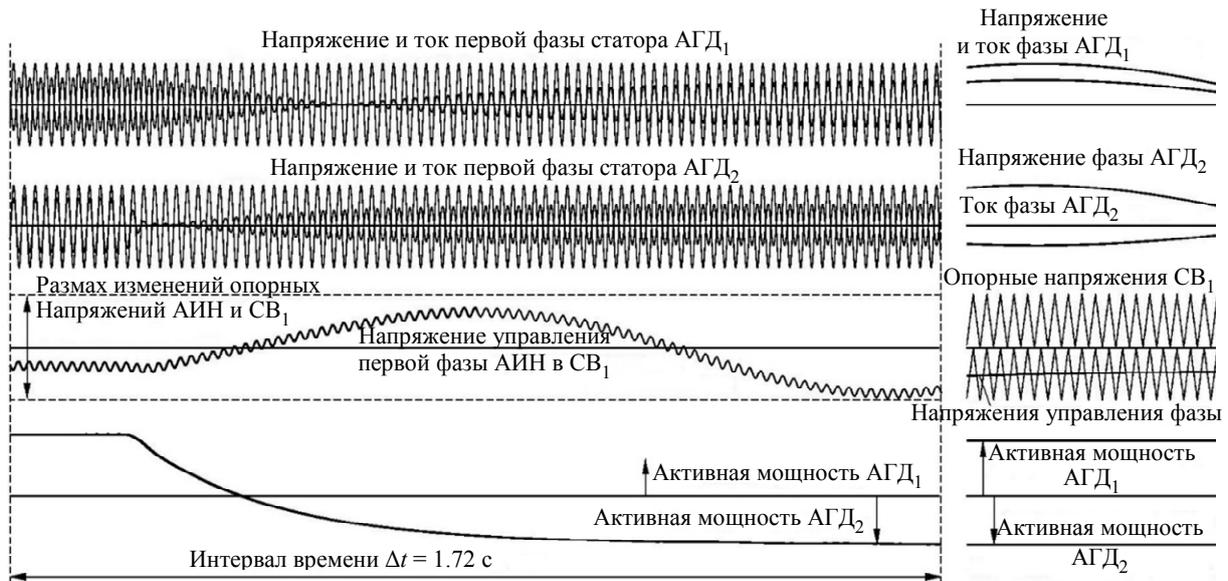


Рис. 4. Реверс активной мощности 200 МВт в АСЭМПЧ  
Fig. 4. Active power reverse 200 MW in asynchronous electromachine insert

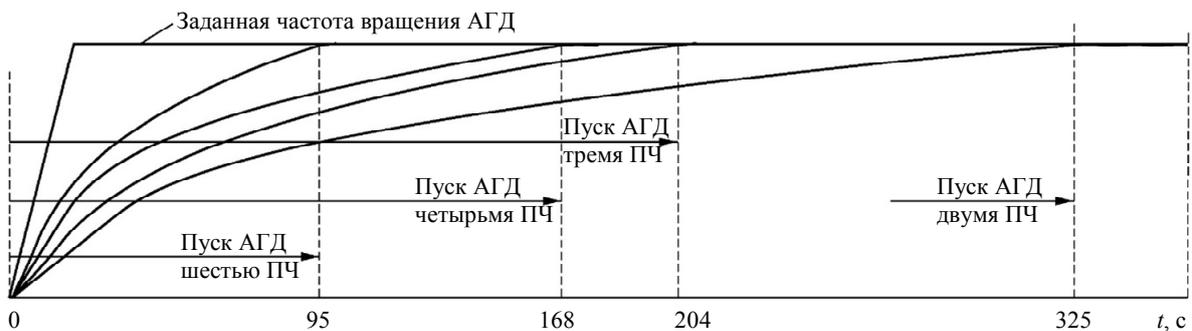


Рис. 5. Разгон агрегата с помощью нескольких ПЧ  
Fig. 5. Acceleration of the unit with several inverters

источника ИЭ<sub>1</sub> или ИЭ<sub>2</sub> нагрузки теряют питание на время включения коммутационного аппарата Q<sub>0</sub> (по ПУЭ 7 до 0.5–0.7 с). АСЭМПЧ позволяет устранить указанный перерыв питания нагрузок – сделать питание бесперебойным. Предпосылки этого заключаются в следующем. При отключении источника напряжения от обмотки статора АГД в машине магнитный поток не исчезает, ротор вращается и в статоре наводится ЭДС. А во вращающихся массах машин есть запас кинетической энергии, которая может быть преобразована в активную мощность обмотки статора. Для регулирования этих процессов необходима перестройка СУ. В частности, АГД, потерявший связь с внешним источником электроэнергии, в этом режиме должен обеспечивать стабилизацию напряжения нагрузки, изменяя ток возбуждения. АГД, питающийся от внешнего источника электроэнергии, должен стабилизировать частоту вращения агрегата на заданном уровне, потребляя от источника энергию и передавая ее в аварийную часть ЭЭС.

Указанный алгоритм управления реализован в математической и компьютерной моделях ЭЭС с АСЭМПЧ. Расчеты выполнены при указанных параметрах системы с условием, что нагрузки ЭЭС<sub>1</sub> и ЭЭС<sub>2</sub> пассивные. При расчетах задано, что активные мощности нагрузок ЭЭС равны 200 МВт. Каж-

дая нагрузка получает питание от своего источника. АСЭМПЧ работает в режиме, близком к холостому ходу. В заданный момент времени источник питания ЭЭС<sub>1</sub> отключается, а питание нагрузки аварийного участка обеспечивается через АСЭМПЧ. Фрагмент рассчитанного процесса длительностью 1.5 с представлен на рис. 6.

На рис. 6 представлены следующие кривые (см. рис. 1): напряжение фазы источника 1 сети – 220 кВ, напряжения фаз статорных обмоток АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub>, активные мощности статорных обмоток АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub>, активная мощность нагрузки ЭЭС<sub>1</sub>, скольжение АГД. В начале рассматриваемого интервала времени напряжения источников электроэнергии ЭЭС 220 кВ номинальные. АГД работают с напряжениями статорных обмоток, близкими к номинальным 15.75 кВ. Активные мощности АГД малы, но не нулевые (некоторая энергия тратится на потери). Частоты напряжений статорных обмоток АГД заданы равными 50 Гц. Частота вращения роторов ( $\omega_p$ ) АГД немного выше синхронной 100.29 %. Скольжение каждого АГД  $s = -0.29 \%$ .

В момент времени 12.54 с в ЭЭС<sub>1</sub> источник 1 аварийно отключается (на рис. 6 его напряжение становится нулевым). Регуляторы АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub>

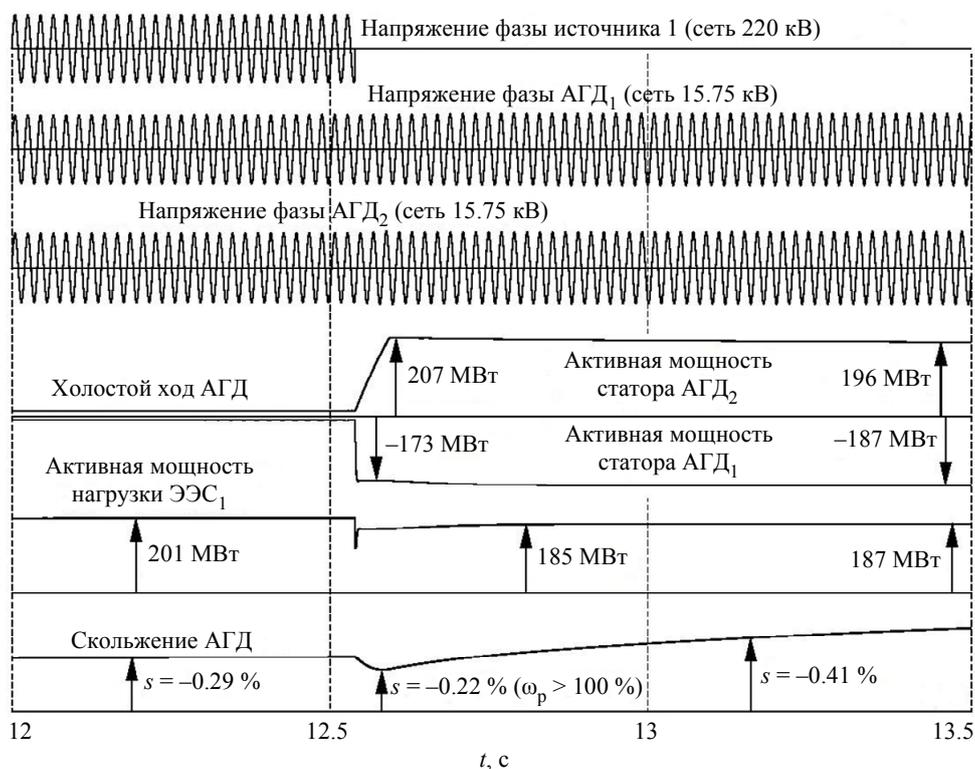


Рис. 6. Обеспечение бесперебойности питания при отключении сети 1  
 Fig. 6. Ensuring uninterrupted power supply during a power outage 1

стабилизируют напряжения статорных обмоток на заданном уровне, изменяя реактивные мощности машин (на рис. 6 заметных изменений этих напряжений нет). В нагрузке 1 возникает кратковременное снижение активной мощности приблизительно на 35 % длительностью 2–3 мс. Затем глубина провала активной мощности уменьшается до 14 % и далее за доли секунды мощность практически восстанавливается. Кратковременное снижение мощности нагрузки объясняется тем, что СВ<sub>1</sub> стабилизирует напряжение статора АГД<sub>1</sub>, а напряжение сети 220 кВ меняется из-за изменения направления токов в трансформаторе Тр<sub>1</sub> (рис. 1). Указанное напряжение сети 220 кВ должно корректироваться другими средствами (переключение отпаек трансформатора и др.).

Следует обратить внимание на то, что в начале аварийного процесса происходит некоторое снижение частоты вращения АГД от уровня 100.29 % до уровня 100.22 %. При этом кинетическая энергия, накопленная во вращающихся массах, преобразуется в активную мощность АГД<sub>1</sub>, которая передается в нагрузку 1. Восполнение запаса кинетической энергии в агрегате при увеличении его частоты вращения осуществляется от источника 2 в ЭЭС<sub>2</sub>, но с некоторым запаздыванием.

Напряжение АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub> при обеспечении бесперебойного электроснабжения нагрузок  
Voltage of AGD<sub>1</sub> and AGD<sub>2</sub> while ensuring uninterrupted power supply to loads

Статор	Действующие напряжения фазы/линейное, В			Фаза фазного напряжения, ...°		
	Момент времени, с					
	12.5	12.6	13.4	12.5	12.6	13.4
АГД <sub>1</sub>	8731/ 15 122	8797/ 15 236	9091/ 15 745	-0.9	-9.1	42.0
АГД <sub>2</sub>	8730/ 15 120	8949/ 15 500	9041/ 15 659	-2.3	-13.1	-12.6

В рассмотренном аварийном режиме СВ<sub>1</sub> и СВ<sub>2</sub> получают питание от обмоток статоров АГД, напряжения которых поддерживаются на постоянном уровне. Существенные отклонения этих напряжений не возникают, поэтому переключения в СВ не требуются.

Точность отдельной стабилизации напряжений обмоток статоров АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub> можно оценить по расчету рис. 6. В частности, выполнен гармонический анализ напряжений фаз АГД<sub>1</sub> и АГД<sub>2</sub> до начала аварийного процесса ( $t = 12.5$  с), сразу после аварии ( $t = 12.6$  с) и с некоторой задержкой ( $t = 13.4$  с). Результаты представлены в таблице.

Как видно из таблицы, отклонения линейного действующего напряжения от заданного номинального уровня (15 750 В) незначительны, несмотря на то что на электромашинный агрегат осуществляется наброс номинальной мощности (около 200 МВт). Вместе с тем, заметно изменяются фазы напряжений, особенно в машине АМ<sub>1</sub>.

### Выводы.

1. Разработаны компьютерные модели асинхронизированной электромашинной вставки в систему электроснабжения мегаполиса, содержащей два асинхронизированных генератора-двигателя на общем валу, транзисторные активные преобразователи частоты в системах возбуждения и пуска электромашинного агрегата, а также систему управления. Расчеты на модели подтверждают возможность объединения участков высоковольтной энергосистемы через механическую связь двух асинхронизированных машин без гальванической связи участков.

2. Использование асинхронизированной электромашинной вставки в электроэнергетической системе позволяет разделить ЭЭС на участки, имеющие энергетическую связь через механическую передачу, и за счет этого ограничить токи короткого замыкания в ЭЭС, отдельно стабилизировать напряжения участков ЭЭС, использовать кинетическую энергию электромашинного агрегата для стабилизации напряжений участков ЭЭС и питания нагрузок в аварийных режимах.

3. В системах повышенной надежности электроснабжения нагрузок применение асинхронизированной электромашинной вставки позволяет обеспечить бесперебойное питание нагрузок при достаточно стабильном напряжении.

### Список литературы

1. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // EPE 05. Dresden, Germ: Sept, 2005. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224642877\\_Analysis\\_of\\_a\\_300\\_MW\\_variable\\_speed\\_drive\\_for\\_pump-storage\\_plant\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/224642877_Analysis_of_a_300_MW_variable_speed_drive_for_pump-storage_plant_applications) (дата обращения 29.11.2022).

2. Contribution of Kyogoku Power Station, an adjustable speed pumped storage, in actual grid operation / T. Ishizuki, R. Hasagawa, Y. Shiozaki, K. Iwabuchi // CIGRE,

Session 47, A1-105, 2018, Paris. URL: [https://cigre.ru/research\\_commitets/ik\\_rus/a1\\_rus/materials/docs/2-CIGRE\\_2018\\_REPORT\\_RUS\\_VER\\_55.pdf](https://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/a1_rus/materials/docs/2-CIGRE_2018_REPORT_RUS_VER_55.pdf) (дата обращения 29.11.2022).

3. Кошечев Л. А., Сокур П. В., Шакарян Ю. Г. Эффективность применения асинхронизированных генераторов-двигателей на ГАЭС // Изв. НТЦ ЕЭС. 2018. № 2 (79). С. 96–108.

4. Анализ систем возбуждения гидрогенераторов ГАЭС / И. Я. Довганюк, Р. Д. Мнев, Т. В. Плотникова, П. В. Сокур, П. Ю. Тузов // Электротехника. 2012. № 6. С. 50–55.

5. Features of the design and operating modes of the asynchronous turbogenerator T3FSU-320 / Yu. Sharov, A. Mikhailov, A. Surkov, D. Zhukov, M. Roytgarts, Yu. Shakaryan, P. Sokur, P. Tuzov // CIGRE, Session 48, A1-206, 2020, Paris. URL: [http://www.cigre.ru/activity/session/session\\_2020/files/2.%20A1\\_eng.pdf](http://www.cigre.ru/activity/session/session_2020/files/2.%20A1_eng.pdf) (дата обращения 29.11.2022).

6. Результаты испытаний асинхронизированных компенсаторов типа АСК-100-4УХЛ4 на ПС 500 кВ Бескудниково / Л. Г. Володарский, И. Я. Довганюк, Р. Д. Мнев, Т. В. Плотникова, П. В. Сокур, П. Ю. Тузов // Электрические станции. 2013. № 7. С. 28–36.

7. Thyristor starters for ASK-100 asynchronous compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technol. and Engin. 2010. Vol. 44, № 5. P. 411–415. doi: 10.1007/S10749-011-0200-1. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10749-011-0200-1> (дата обращения 29.11.2022).

8. А. с. СССР №1354334. Способ управления асинхронизированным электромеханическим преобразователем частоты / И. Ю. Мирошников, В. В. Саркисян, Р. С. Цгоев, Ю. Г. Шакарян / Кл. Н 02 J 3/6, 1987.

9. A pumped storage power plant with double-fed induction machine and cascaded frequency converter / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev // EPE-2011. URL: [https://www.researchgate.net/publication/252044300\\_A\\_pumped\\_storage\\_power\\_plant\\_with\\_double-fed\\_induction\\_machine\\_and\\_cascaded\\_frequency\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/252044300_A_pumped_storage_power_plant_with_double-fed_induction_machine_and_cascaded_frequency_converter) (дата обращения 29.11.2022).

10. Electric and hydraulic process connection in hydraulic and pumped storage hydroelectric power stations / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev, M. E. Kuzin // IECON 2013, Vienna, Austria. P. 2031–2036. doi: 10.1109/IECON.2013.6699444. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261060874\\_Electric\\_and\\_hydraulic\\_process\\_connection\\_in\\_hydraulic\\_and\\_pumped\\_storage\\_hydroelectric\\_power\\_stations](https://www.researchgate.net/publication/261060874_Electric_and_hydraulic_process_connection_in_hydraulic_and_pumped_storage_hydroelectric_power_stations) (дата обращения 29.11.2022).

11. Pronin M. V., Vorontsov A. G., Kuzin M. E. Simulation and investigation of a kinetic energy storage as part of EPS // EPE'14 ECCE EUROPE. Lappeenranta, Finland.

2014. doi: 10.1109/EPE.2014.6910951. URL: [https://www.researchgate.net/publication/286591854\\_Simulation\\_and\\_investigation\\_of\\_a\\_kinetic\\_energy\\_storage\\_as\\_part\\_of\\_EPS](https://www.researchgate.net/publication/286591854_Simulation_and_investigation_of_a_kinetic_energy_storage_as_part_of_EPS) (дата обращения 29.11.2022).

12. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia, V. V. Glushakov, P. V. Sokur // EPE'20. Lyon, France. 2020. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347153427\\_A\\_synchronized\\_electromechanical\\_converter\\_in\\_the\\_electrical\\_supply\\_system\\_of\\_powerful\\_energy\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347153427_A_synchronized_electromechanical_converter_in_the_electrical_supply_system_of_powerful_energy_consumers) (дата обращения 01.12.2022).

13. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Shelyukh, V. Glushakov, D. Kukushkin, M. Pronin, V. Tretyakov // IECON 2020. Singapore. 2020. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347044436\\_The\\_electromechanical\\_power\\_system\\_link\\_for\\_backup\\_power\\_supply\\_of\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347044436_The_electromechanical_power_system_link_for_backup_power_supply_of_consumers) (дата обращения 01.12.2022).

14. Features of a drive system for pump-storage plant applications based on the use of double-fed induction machine with a multistage-multilevel frequency converter / M. V. Pronin, O. B. Shonin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev // EPE-PEMC 2012. Novi Sad, Serbia. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397208. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261392429\\_Features\\_of\\_a\\_drive\\_system\\_for\\_pump-storage\\_plant\\_applications\\_based\\_on\\_the\\_use\\_of\\_double-fed\\_induction\\_machine\\_with\\_a\\_multistage-multilevel\\_frequency\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/261392429_Features_of_a_drive_system_for_pump-storage_plant_applications_based_on_the_use_of_double-fed_induction_machine_with_a_multistage-multilevel_frequency_converter) (дата обращения 01.12.2022).

15. Экспериментальные исследования системы с асинхронизированным генератором-двигателем и каскадным преобразователем частоты / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, А. А. Бажанова, Ф. Г. Келеш // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 50–60.

16. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих двойных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.

17. Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 57–65.

18. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020. 336 с.

19. Свид. 2019661058. Программа для ЭВМ Com Sim1\_5 / А. Г. Воронцов, дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.

## Информация об авторе

**Воронцов Алексей Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

## References

1. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // EPE 05. Dresden, Germ: Sept, 2005. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224642877\\_Analysis\\_of\\_a\\_300\\_MW\\_variable\\_speed\\_drive\\_for\\_pump-storage\\_plant\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/224642877_Analysis_of_a_300_MW_variable_speed_drive_for_pump-storage_plant_applications) (data obrashheniya 29.11.2022).
2. Contribution of Kyogoku Power Station, an adjustable speed pumped storage, in actual grid operation / T. Ishizuki, R. Hasagawa, Y. Shiozaki, K. Iwabuchi // CIGRE, Session 47, A1-105, 2018, Paris. URL: [https://cigre.ru/research\\_commitets/ik\\_rus/a1\\_rus/materials/docs/2-CIGRE\\_2018\\_REPORT\\_RUS\\_VER\\_55.pdf](https://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/a1_rus/materials/docs/2-CIGRE_2018_REPORT_RUS_VER_55.pdf) (data obrashheniya 29.11.2022).
3. Koshcheev L. A., Sokur P. V., SHakaryan YU. G. Jefektivnost' primeneniya asinhronizirovannykh generatorov-dvigatel'ey na GAES // Izv. NTC EES. 2018. No. 2 (79). P. 96–108. (In Russ.).
4. Analiz sistem vobuzhdeniya gidrogeneratorov GAJES / I. YA. Dovganyuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, P. Ju. Tuzov // Jelektrotehnika. 2012. No. 6. P. 50–55. (In Russ.).
5. Features of the design and operating modes of the asynchronous turbogenerator T3FSU-320 / Yu. Sharov. A. Mikhailov, A. Surkov, D. Zhukov, M. Roytgarts, Yu. Shakaryan, P. Sokur, P. Tuzov // CIGRE, Session 48, A1-206, 2020, Paris. URL: [http://www.cigre.ru/activity/session/session\\_2020/files/2.%20A1\\_eng.pdf](http://www.cigre.ru/activity/session/session_2020/files/2.%20A1_eng.pdf) (data obrashheniya 29.11.2022).
6. Rezul'taty ispytaniy asinhronizirovannykh kompensatorov tipa ASK-100-4UHL4 na PS 500 kV Beskudnikovo / L. G. Volodarskiy, I. JA. Dovganyuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, P. JU. Tuzov // Jelektricheskie stancii. 2013. No. 7. P. 28–36. (In Russ.).
7. Thyristor starters for ASK-100 asynchronous compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technol. and Engin. 2010. Vol. 44, No. 5. P. 411–415. doi: 10.1007/S10749-011-0200-1. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10749-011-0200-1> (data obrashheniya 29.11.2022).
8. A. s. SSSR No.1354334. Kl. Sposob upravleniya asinhronizirovannym jelektromekhanicheskim preobrazovatelem chastoty / I. YU. Miroshnikov, V. V. Sarkisyan, R. S. Goev, Ju. G. SHakarjan / H 02 J 3/6, 1987. (In Russ.).
9. A pumped storage power plant with double-fed induction machine and cascaded frequency converter / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev // EPE-2011. URL: [https://www.researchgate.net/publication/252044300\\_A\\_pumped\\_storage\\_power\\_plant\\_with\\_double-fed\\_induction\\_machine\\_and\\_cascaded\\_frequency\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/252044300_A_pumped_storage_power_plant_with_double-fed_induction_machine_and_cascaded_frequency_converter) (data obrashheniya 29.11.2022).
10. Electric and hydraulic process connection in hydraulic and pumped storage hydroelectric power stations / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev, M. E. Kuzin // IECON 2013, Vienna, Austria. P. 2031–2036. doi: 10.1109/IECON.2013.6699444. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261060874\\_Electric\\_and\\_hydraulic\\_process\\_connection\\_in\\_hydraulic\\_and\\_pumped\\_st](https://www.researchgate.net/publication/261060874_Electric_and_hydraulic_process_connection_in_hydraulic_and_pumped_storage_hydroelectric_power_stations)
11. Pronin M. V., Vorontsov A. G., Kuzin M. E. Simulation and investigation of a kinetic energy storage as part of EPS // EPE'14 ECCE EUROPE. Lappeenranta, Finland. 2014. doi: 10.1109/EPE.2014.6910951. URL: [https://www.researchgate.net/publication/286591854\\_Simulation\\_and\\_investigation\\_of\\_a\\_kinetic\\_energy\\_storage\\_as\\_part\\_of\\_EPS](https://www.researchgate.net/publication/286591854_Simulation_and_investigation_of_a_kinetic_energy_storage_as_part_of_EPS) (data obrashheniya 29.11.2022).
12. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia, V. V. Glushakov, P. V. Sokur // EPE'20. Lyon, France. 2020. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347153427\\_Asynchronized\\_electromechanical\\_converter\\_in\\_the\\_electrical\\_supply\\_system\\_of\\_powerful\\_energy\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347153427_Asynchronized_electromechanical_converter_in_the_electrical_supply_system_of_powerful_energy_consumers) (data obrashheniya 01.12.2022).
13. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Shelyukh, V. Glushakov, D. Kukushkin, M. Pronin, V. Tretyakov // IECON 2020. Singapore. 2020. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347044436\\_The\\_electromechanical\\_power\\_system\\_link\\_for\\_backup\\_power\\_supply\\_of\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347044436_The_electromechanical_power_system_link_for_backup_power_supply_of_consumers) (data obrashheniya 01.12.2022).
14. Features of a Drive System for Pump-Storage Plant Applications based on the use of Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter / M. V. Pronin, O. B. Shonin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev // EPE-PEMC 2012. Novi Sad, Serbia. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397208. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261392429\\_Features\\_of\\_a\\_drive\\_system\\_for\\_pump-storage\\_plant\\_applications\\_based\\_on\\_the\\_use\\_of\\_double-fed\\_induction\\_machine\\_with\\_a\\_multistage-multilevel\\_frequency\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/261392429_Features_of_a_drive_system_for_pump-storage_plant_applications_based_on_the_use_of_double-fed_induction_machine_with_a_multistage-multilevel_frequency_converter) (data obrashheniya 01.12.2022).
15. Jeksperimental'nye issledovaniya sistemy s asinhronizirovannym generatorom-dvigatelem i kaskadnym preobrazovatelem chastoty / M. V. Pronin, A. G. Voroncov, A. A. Bazhanova, F. G. Kelesh // Izv. SPbGETU «LETI». 2017. No. 4. P. 50–60. (In Russ.).
16. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami na bystrodejstvujushchih sdvoennykh modeljah // Jelektrotehnika. 2021. No. 1. P. 20–25. (In Russ.).
17. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovaniya EMTS po vzaimosvyazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. Vol. 15, No. 3. P. 57–65. (In Russ.).
18. Pronin M. V., Voroncov A. G. Elektromekhanotronnye komplekсы i ih modelirovanie na JEVМ po vzaimosvyazannym podsistemam. SPb.: Ladoga, 2020. 336 s. (In Russ.).
19. Svid. 2019661058. Programma dlja JEVМ ComSim1\_5 / A. G. Voroncov, data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. (In Russ.).

Information about the author

**Aleksey G. Vorontsov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06.12.2022; принята к публикации после рецензирования 27.12.2022; опубликована онлайн 25.04.2023.

Submitted 06.12.2022; accepted 27.12.2022; published online 25.04.2023.

---