

## Комплекс моделей систем с каскадными преобразователями частоты

А. Г. Воронцов<sup>1,3✉</sup>, М. В. Пронин<sup>1,4</sup>, Ю. А. Сычев<sup>2</sup>, А. П. Соловьев<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> НПЦ «СЭС», Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

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

**Аннотация.** Разработаны новые комплексы компьютерных моделей электромехатронных систем, содержащих каскадные преобразователи частоты (КПЧ). Модели выполнены на языке C++ в среде собственной разработки ComSim, а также в MatLab. Рассмотрены установки, в которых КПЧ питаются от трехфазного источника напряжения ограниченной мощности и питают трехфазную пассивную нагрузку или двигатели (асинхронные, синхронные, асинхронизированные). В состав КПЧ входят многообмоточный трансформатор и блоки преобразования частоты (БПЧ). В каждой фазе нагрузки КПЧ несколько БПЧ включены последовательно, образуя высоковольтный источник энергии. БПЧ выполняются с диодными или активными выпрямителями (ДВ, АВ) и однофазными автономными инверторами напряжения (АИН). Реализовано векторное управление (ВУ) АВ, а также скалярное и векторное управление нагрузкой. Предусмотрены возможности отключения части БПЧ при реализации в системе управления блоков коррекции векторов токов, позволяющих улучшить качество электроэнергии на входе и выходе КПЧ. Рассмотрены возможности сокращения затрат машинного времени на расчеты в ComSim и в MatLab с использованием алгоритмов вычислений по «гладким составляющим» переменных и смешанные модели. Применение новых алгоритмов позволяет рассчитывать длительные электромеханические процессы в установках с КПЧ с большим количеством полупроводниковых элементов при более высоком быстродействии, вплоть до расчетов в реальном времени.

**Ключевые слова:** каскадный преобразователь частоты, диодный выпрямитель, активный выпрямитель, инвертор напряжения, качество электроэнергии, алгоритм управления, моделирование, затраты машинного времени

**Для цитирования:** Комплекс моделей систем с каскадными преобразователями частоты / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, Ю. А. Сычев, А. П. Соловьев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 10. С. 84–96. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-10-84-96.

**Конфликт интересов.** Вклад каждого автора 25 %. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов:

Воронцов А. Г. – разработка моделей в ComSim.

Пронин М. В. – подготовка текста статьи, расчеты.

Сычев Ю. А. – подготовка текста статьи, вывод.

Соловьев А. П. – разработка моделей в MatLab, подготовка текста.

## A Set of Models for Systems with Cascade Frequency Converters

A. G. Vorontsov<sup>1,3✉</sup>, M. V. Pronin<sup>1,4</sup>, Yu. A. Sychev<sup>2</sup>, A. P. Soloviev<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> SPC «SES» LLC, Saint Petersburg, Russia

<sup>4</sup> JSC «Power Machines», Saint Petersburg, Russia

✉ ag.vorontsov@gmail.com

**Abstract.** New sets of computer models for electromechanotronic systems containing cascade frequency converters (CFC) were developed. Models are implemented in C++ in the ComSim proprietary development environment, as well as in MatLab. Installations in which CFCs are fed from a three-phase voltage source of limited power and feed a three-phase passive load or motors (asynchronous, synchronous, double fed machine) are considered. The CFC includes a multi-winding transformer and frequency conversion units (BFC). In each load phase of the CFC, several BFCs are connected in series, forming a high-voltage power source. BFCs are performed with diode or active rectifiers (DFE, AFE) and single-phase voltage source inverters (VSI). Vector control AFE (VC), as well as scalar and VC of load, are implemented. Provisions are made to disable part of the BFC when implementing current vector correction blocks in the control system, to improve the quality of power at the input and output of the CFC. The possibilities of reducing the cost of computer time for calculations in ComSim and MatLab by using algorithms for calculating the «smooth components» of variables and using mixed models are considered. The use of new algorithms makes it possible to calculate long-term electromechanical processes in CFC installations with a large number of semiconductor elements with a higher speed, up to real-time calculations.

**Keywords:** cascade frequency converter, DFE, AFE, VSI, power quality, control algorithm, simulation, machine time costs

**For citation:** A Set of Models for Systems with Cascade Frequency Converters / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, Yu. A. Sychev, A. P. Soloviev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 10. P. 84–96. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-10-84-96.

**Conflict of interest.** The contribution of each author is 25 %. The authors declare no conflicts of interest.

### Author Contributions:

Vorontsov A. G. – model development in ComSim.

Pronin M. V. – text preparation, calculations.

Sychev Yu. A. – text preparation, conclusion.

Soloviev A. P. – model development in MatLab, text preparation.

Электроприводы и системы с мощными преобразователями частоты (ПЧ) и двигателями переменного тока применяются во многих областях техники. Частотно-регулируемые приводы (ЧРП) используются для управления вентиляторами главного проветривания шахт [1], [2], рудоразмольными мельницами [3], [4], в гидроаккумулирующих электростанциях [5]–[8], в системах электродвижения атомных ледоколов [9], [10]; рассматривается их применение в электромеханических вставках в системы электроснабжения мегаполисов [11]–[13] и в других устройствах. ПЧ позволяют придать системам новые свойства,

расширяют возможности управления технологическими процессами.

Во многих случаях в рассматриваемых системах используются или могут быть использованы каскадные преобразователи частоты (КПЧ) [14]–[16]. КПЧ выполняются обычно на сравнительно низковольтных модулях IGBT с использованием в каждой фазе нагрузки последовательно соединенных блоков преобразования частоты (БПЧ). Увеличение количества БПЧ позволяет повышать напряжение на выходе КПЧ и создавать высоковольтные источники питания нагрузки. Системы управления (СУ) обеспечивают взаимные сдвиги

импульсов управления IGBT, вследствие чего форма напряжений и токов КПЧ приближается к синусоидальной.

Питание БПЧ осуществляется от индивидуальных источников электроэнергии. Для этого в КПЧ используются трансформаторы с количеством вторичных обмоток, равным количеству БПЧ. Если рекуперация энергии в питающую сеть не требуется, то в БПЧ применяются диодные выпрямители (ДВ), а высокое качество электроэнергии сети обеспечивается посредством взаимного сдвига по фазе вторичных обмоток трансформатора и создания многопульсного режима работы ДВ. Если рекуперация требуется, то в БПЧ используются активные выпрямители (АВ) [17]–[19]. В этих случаях вторичные трехфазные обмотки трансформатора выполняют синфазными, а повышение качества электроэнергии сети осуществляется посредством организации многофазного режима работы различных АВ.

В качестве нагрузки КПЧ используются синхронные и асинхронные машины (СМ, АМ), рассматриваются системы с асинхронизированными генераторами-двигателями (АГД). Испытания КПЧ на стендах предприятий-изготовителей оборудования часто осуществляется при пассивной нагрузке. В этих случаях также необходимо сопоставлять результаты экспериментов и расчетов на ЭВМ на компьютерных моделях.

К преимуществам КПЧ относится возможность значительного повышения надежности и живучести систем. Это обеспечивается за счет того, что при выходе из строя и отключении части БПЧ перестраивается алгоритм управления КПЧ и остающиеся в работе БПЧ обеспечивают (при наличии резервов) требуемую мощность нагрузки и требуемое качество электроэнергии на входе и выходе КПЧ [20], устраняя при этом нежелательные процессы во внешних устройствах [21].

Для обеспечения проектов систем с КПЧ создаются новые комплексы моделей в среде собственной разработки ComSim на языке программирования C++ [22], а также в известной среде моделирования MatLab. В ComSim модели разрабатываются по методологии расчета сложных систем по взаимосвязанным подсистемам. Теория и примеры использования методологии представлены в публикациях [23]–[25]. Указанная методология продолжает развиваться, в нее добавлены новые методы моделирования и расчета [26], [27]. В том числе разработан метод моделирования систем по «гладким составляющим» переменных,

позволяющий на порядки сократить затраты машинного времени расчета длительных процессов в системах с большим количеством полупроводниковых элементов (ПЭ). Разработана технология создания смешанных моделей, сочетающих расчеты по «гладким составляющим» переменных и расчеты по полным моделям. В смешанных моделях высокая точность расчетов сочетается со сравнительно небольшими затратами машинного времени [26], [27].

В данной статье кроме задач создания комплекса моделей систем с КПЧ рассматриваются вопросы эффективности применения новых методов расчета в ComSim и возможности использования новых методов в других известных комплексах моделирования, например в MatLab. В результате исследований систем на моделях, а также экспериментальных исследований [15] предложены новые алгоритмы управления КПЧ, позволяющие при отключении части БПЧ обеспечить требуемое качество электроэнергии на входе и выходе КПЧ.

**Структуры систем с КПЧ** представлены на рис. 1. В качестве основного варианта рассматривается система, в которой низковольтные БПЧ выполнены с ДВ и однофазными автономными инверторами напряжения (АИН). Питание КПЧ осуществляется от трехфазного источника напряжения, содержащего в фазах ЭДС  $e_{sn}$  и индуктивности  $L_s$ ; напряжения фаз источника  $u_{sn}$ , токи  $i_{sn}$ . В состав КПЧ входит многообмоточный трансформатор Тр и БПЧ (на рис. 1 указаны 18 БПЧ, в ComSim модели разработаны для произвольного количества БПЧ). В других вариантах системы используются БПЧ с трехфазными АВ. Схема активного БПЧ также представлена на рис. 1. В нагрузке КПЧ использована АМ. В других вариантах использованы СМ, АГД и трехфазная  $RL$ -нагрузка. Напряжения фаз на выходе КПЧ  $u_n$ , токи  $i_n$ , ( $n = 1, 2, 3$ ). В моделях предусмотрены возможности отключения части БПЧ, а также улучшение формы токов на входе и выходе КПЧ средствами управления (СУ).

Модели установок с КПЧ построены для расчетов по полным системам уравнений, по «гладким составляющим» переменных, а также при использовании вдвоенных алгоритмов расчета (для сокращения затрат машинного времени при одновременном обеспечении высокой точности вычислений).

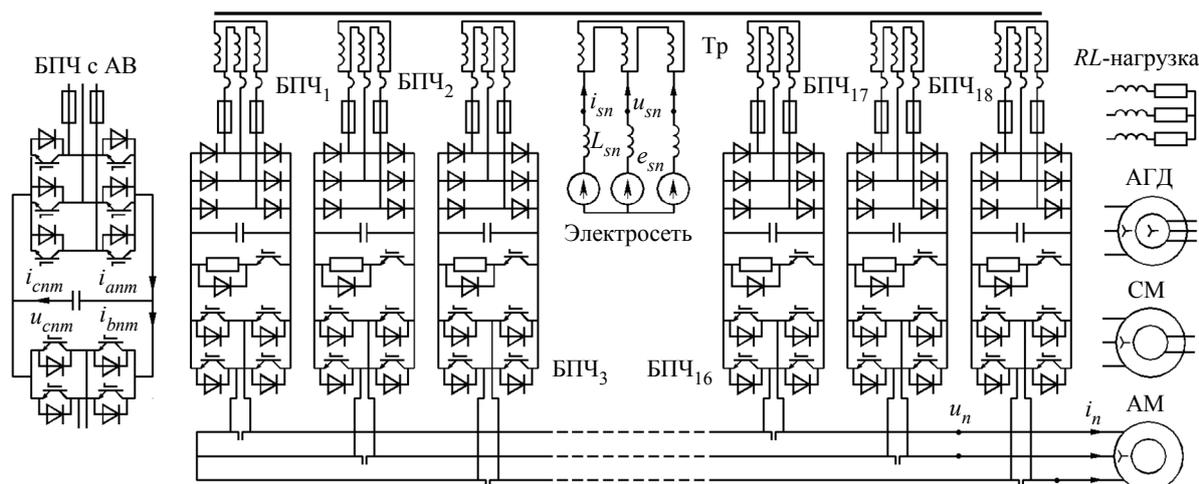


Рис. 1. Схема установки с КПЧ и АМ и схемы вариантов БПЧ и нагрузки

Fig. 1. Schematic diagram of an installation with CFC and IM; schemes of BFC and load variants

**Особенности СУ установок с КПЧ.** Основные задачи СУ КПЧ: обеспечение заданного режима нагрузки (частоты вращения двигателя, мощности, напряжение и др.), обеспечение требуемого качества электроэнергии сети при использовании АВ (коэффициента гармоник напряжений сети, коэффициента мощности). В устройствах управления АВ применяются векторные системы управления (ВСУ), а в устройствах управления двигателями – скалярные и векторные системы управления (ССУ и ВСУ).

Один из вариантов ВСУ поясняется с помощью рис. 2 и 3. На рис. 2 представлен вариант известной ВСУ машиной переменного тока (ЭМ), дополненный блоком коррекции токов статора (БКТ). Математические описания известных ВСУ АМ и СМ представлены в [28], [29], а также в ряде других публикаций. На рисунках использованы следующие обозначения:  $i_d$  – проекция токов фаз ЭМ на продольную ось потокосцепления ротора,  $i_q$  – проекция токов на поперечную ось, АФ – вычислитель амплитуды, ПИ – пропорционально-интегральный регулятор,  $\omega_z$  – заданная частота вращения,  $\tau$  – фаза вектора токов.

БКТ является новым элементом ВСУ и решает следующие задачи. В КПЧ возможно отключение части БПЧ, оно может произойти в любой фазе двигателя. При этом силовые напряжения фаз КПЧ могут оказаться различными, вследствие чего симметрия токов фаз нарушится и в трехфазной системе появятся составляющие обратной последовательности. Токи обратной последовательности увеличивают пульсации электромагнитного момента, создают в ЭМ дополнительные потери энергии и необходимы меры по подавлению

этих составляющих. БКТ выделяет симметричную (полезную) систему токов прямой последовательности и вычитает эти токи из фактических токов фаз. Полученные в результате вредные составляющие токов подавляются П-регуляторами в каждой фазе. На выходе П-регуляторов формируются составляющие напряжений управления АИН, которые складываются с составляющими напряжений управления, формируемыми основной ВСУ.

Основой БКТ служит трехфазный фильтр, схема которого представлена на рис. 3. Особенность фильтра в том, что он работает на переменной частоте основных гармоник фильтруемых сигналов. В данной системе на входы фильтра поступает трехфазная система токов  $i_n$ . Токи пофазно умножаются на единичные косинусоиды  $e_n$  ( $n = 1, 2, 3$ ). В результате формируется сигнал  $A$

$$A = (e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3) 2/3.$$

Амплитуда системы входных переменных  $I_m$  определяется в следующих вычислениях:

$$B = (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) / 3,$$

$$C_+ = \frac{1}{T} \int (B - C_t) dt,$$

$$I_m = \sqrt{2C_{t+\Delta t}},$$

где  $B, C$  – промежуточные переменные;  $T$  – постоянная времени;  $t$  – время.

Входными сигналами фильтра могут быть переменные с амплитудой, различающейся на порядки. Чтобы дальнейшие операции упростить, определяется переменная  $D$ , значения которой находятся в пределах  $\pm 1$ :

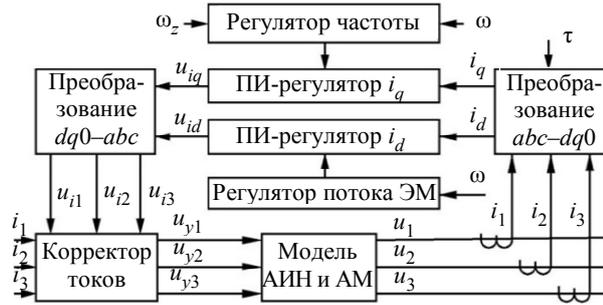


Рис. 2. Структура СУ двигателем  
Fig. 2. Electrical motor control system structure

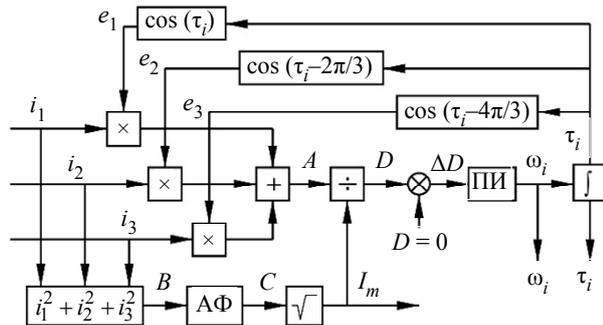


Рис. 3. Схема трехфазного фильтра  
Fig. 3. Schematic diagram of a three-phase filter

если  $I_m \neq 0$ , то  $D = A/I_m$ .

Сигнал  $D$  поступает на вход ПИ-регулятора, формирующий частоту  $\omega_i$  основных составляющих токов фаз, которые затем используются для определения фазы  $\tau_i$  вектора токов

$$\omega_i^+ = DK_{\omega 0} + K_{\omega i} \int D dt, \quad \tau_i = \int \omega_i dt,$$

где  $K_{\omega 0}$ ,  $K_{\omega i}$  – коэффициенты обратных связей ПИ-регулятора по отклонению и интегралу отклонения.

Отфильтрованные токи фаз АМ (симметричная система составляющих прямой последовательности)

$$i_{1n} = I_m \sin[\tau_i - 2\pi(n-1)/3].$$

Отклонения фактических токов фаз от основных гармонических составляющих

$$\Delta i_n = i_n - i_{1n}.$$

Составляющие токов фаз  $\Delta i_n$  отрицательно влияют на процессы, и они подавляются П-регуляторами:

$$\Delta u_{yn} = K_{u0} \Delta i_n,$$

где  $\Delta u_{yn}$  – переменные коррекции напряжений управления АИН;  $K_{u0}$  – коэффициент усиления регулятора.

Напряжения управления фаз АИН формируются в виде сумм сигналов ВСУ и блока коррекции токов

$$u_{yn} = u_{in} + \Delta u_{yn}.$$

В КПЧ системы управления АВ построены аналогично управлению АИН. При отключении части БПЧ возможно увеличение искажений токов сети. В моделях предусмотрена активная фильтрация токов сети при использовании БКТ с трехфазным фильтром рис. 3 при воздействии на напряжения управления АВ.

В комплексе моделей КПЧ предусмотрены варианты формирования пилообразных опорных напряжений (ОН) АИН. В одном варианте ОН взаимно сдвинуты по фазе и имеют размах пульсаций  $\pm 1$  о. е. В другом варианте ОН взаимно смещены по уровню, каждое ОН имеет размах пульсаций  $1/M$  о. е., суммарный размах пульсаций  $\pm 1$  о. е. ( $M$  – количество БПЧ в фазе нагрузки). При низких напряжениях нагрузки в работе оказывается задействована только часть БПЧ, пульсность КПЧ со стороны сети снижается, а искажения токов сети увеличиваются. Для устранения этого недостатка в расчетах может быть предусмотрена периодическая взаимная перестановка ОН. Способ формирования ОН задается в исходных данных для расчетов.

Предусмотрены также возможности внесения в напряжения управления АИН составляющих нулевой последовательности, которые приближают форму напряжений к трапеции.

**Процессы в КПЧ с ДВ при работе всех или части БПЧ.** Процессы в системах с КПЧ анализируются на примерах расчета конкретных устройств. В частности, рассматривается система (рис. 1), содержащая 18 БПЧ с ДВ.  $RL$ -нагрузка имеет мощность 6 МВт, напряжение 6 кВ, частоту 50 Гц, коэффициент мощности 0.9. Напряжение питающей сети – 6 кВ, частота – 50 Гц. Мощность трансформатора – 6.6 МВА, коэффициент трансформации – 9.5, напряжение короткого замыкания – 10 %, взаимный сдвиг вторичных обмоток – 10. В КПЧ емкость конденсаторов в каждом БПЧ 10 мФ, частота – ШИМ 4 кГц, частота чередования средних значений ОН – 730 Гц. На рис. 4 представлен результат расчета процессов в системе в режиме, близком к номинальному.

Анализ установившегося режима работы (рис. 4) системы с КПЧ показал, что частота и напряжение нагрузки соответствуют заданию (50 Гц, 6 кВ) при мощности 6.07 МВт. Средние

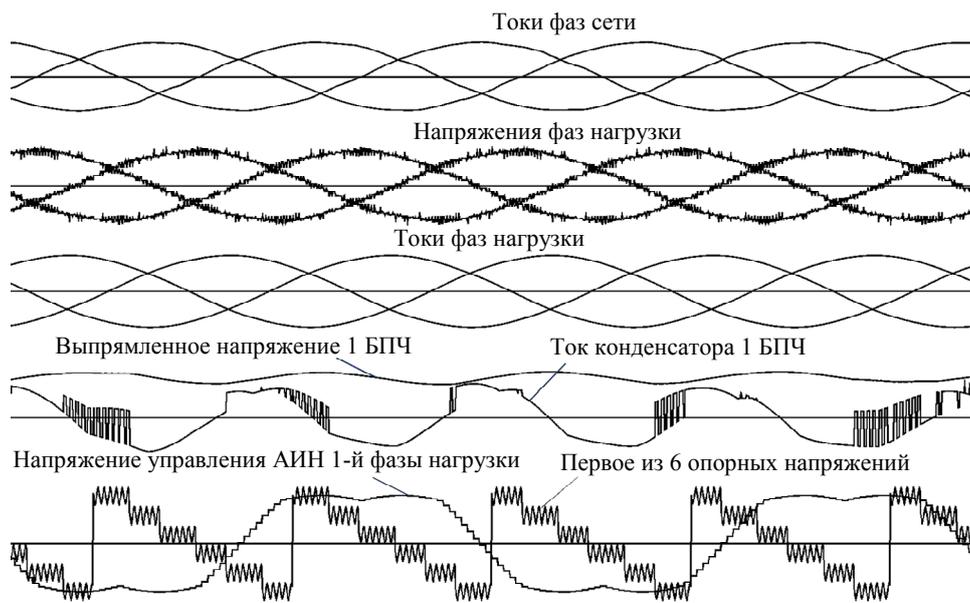


Рис. 4. Напряжения и токи КПЧ в режиме работы, близком к номинальному  
 Fig. 4. Voltages and currents of the cascade frequency converter in near nominal operating mode

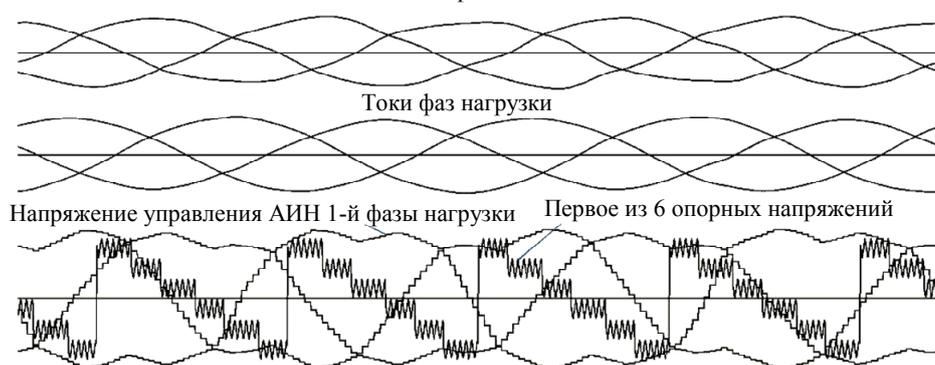


Рис. 5. Напряжения и токи КПЧ в режиме работы, близком к номинальному при отключении трех БПЧ

Fig. 5. Voltages and currents of the CFC in near nominal operation when the three BFC are switched off

значения выпрямленных напряжений БПЧ – 853 В. Коэффициенты гармоник тока сети – 1.92 %, тока нагрузки – 0.82 %, напряжения нагрузки – 8.35 %. Амплитуда напряжений управления АИН – 0.847 о. е., запас по напряжению ~15 %. Благодаря указанному запасу и используемым алгоритмам управления, номинальная мощность нагрузки обеспечивается при симметрии напряжений и токов фаз в случаях отключения одного или двух БПЧ в одной фазе нагрузки.

На рис. 5 представлена диаграмма токов и напряжений КПЧ при отключении трех БПЧ в одной фазе нагрузки. Заданная мощность нагрузки – та же, фактическая мощность снизилась до 5.8 МВт.

Из рисунка видно, что в КПЧ АИН работают со значительной перемодуляцией, коэффициенты гармоник напряжений нагрузки – 11.3 %, токов

нагрузки – 7.1 %. В фазах нагрузки кривые токов практически синусоидальны. Однако искажения все-таки существуют за счет нарушения условий симметрии. По напряжениям управления АИН видно, что амплитуды кривых 2-й и 3-й фаз сблизились и угол взаимного сдвига основных гармоник этих кривых меньше  $120^\circ$  (пояснения даны в публикации [20]). Это означает, что СУ пытается обеспечить симметрию токов нагрузки, но это ей удается сделать не полностью из-за перехода АИН в режим перемодуляции. На рис. 5 токи сети заметно искажены, коэффициент гармоник увеличился до 8.05 %. Причина заключается в том, что часть БПЧ отключена и пульсность системы выпрямления токов снижена.

Указанный недостаток устраняется при использовании АВ вместо ДВ. Выполнены расчеты

процессов в КПЧ при 18 БПЧ с АВ при пассивной нагрузке с заданной мощностью 6 МВт (рис. 1). Если все БПЧ участвуют в работе, то в расчете мощность нагрузки равна 5941 кВт, коэффициент гармоник токов нагрузки 0.16 %, токов сети 2.8 % (в данной модели БКТ реализован в нагрузке, в сети его нет). Если в одной фазе нагрузки отключены два БПЧ, то фактическая мощность нагрузки в расчете равна 5929 кВт, коэффициент гармоник токов сети 2.6 %, токов нагрузки – 1.4 %. При наличии в КПЧ некоторого запаса по мощности, АВ и АИН с блоками коррекции токов позволили сохранить требуемую мощность нагрузки и практически устранили отрицательное влияние отключения части БПЧ на качество электроэнергии на входе и выходе КПЧ (отключено 11 % БПЧ).

**Расчет систем с КПЧ на смешанных моделях.** Система с активным КПЧ с 18 БПЧ содержит 396 полупроводниковых элементов (ПЭ), работающих при сравнительно высокой частоте ШИМ, например 4 кГц. Расчеты процессов в таких установках выполняются обычно с малыми шагами интегрирования, например 1–2 мкс. Разработан метод расчета процессов по «гладким составляющим» переменных, позволяющий на порядок сократить затраты машинного времени за счет исключения ПЭ и увеличения шага интегрирования. Для установки (рис. 1) с активным КПЧ этот метод реализуется при следующих преобразованиях расчетной схемы, системы уравнений и алгоритма расчета.

При расчете процессов в системе с крупным шагом интегрирования переменных  $\Delta t$  на каждом шаге вычисляются напряжения емкостей всех БПЧ (обозначения переменных указаны на рис. 1)

$$u_{cnm} = \frac{1}{C} \int i_{cnm} dt,$$

где  $u_{cnm}$ ,  $i_{cnm}$  – напряжение и ток в емкости,  $n$  – номер фазы нагрузки,  $m$  – номер БПЧ в фазе нагрузки.

Найденные напряжения представляются зависимыми источниками и переносятся в цепи выпрямленных токов АВ и АИН. В результате часть схемы (рис. 1) с источником питания, трансформатором и всеми АВ отделяется от другой части системы со всеми АИН и нагрузкой. Указанные две части установки описываются системами уравнений и при решении этих систем определяются выпрямленные токи всех АВ ( $i_{anm}$ ) и АИН ( $i_{bnm}$ ). Найденные выпрямленные токи позволяют

определить токи в емкостях для последующего их использования на следующем шаге расчета

$$i_{cnm} = i_{anm} - i_{bnm}.$$

Расчеты подсистем с АВ и АИН выполняются на основе использования следующей особенности транзисторных преобразователей (ПП) – силовые напряжения ПП подобны напряжениям управления. Указанное подобие позволяет в каждом АВ и в каждом АИН заменить транзисторный мост на источник напряжения:

$$\text{для АВ } e_{anm} = u_{cnm} u_{aynm},$$

$$\text{для АИН } e_{bnm} = u_{cnm} u_{bynm},$$

где  $u_{aynm}$  и  $u_{bynm}$  – напряжения управления АВ и АИН.

При расчетах процессов в системах по «гладким составляющим» переменных достаточно точно учитываются все гармонические составляющие напряжений и токов, имеющие частоты ниже частоты ШИМ. Гармоники более высокого порядка не учитываются, что вносит в расчеты некоторую погрешность. Для ее устранения используются смешанные модели систем – большая часть процесса рассчитывается по «гладким составляющим» переменных, затем осуществляется переход к расчету по полной модели системы с уменьшенным шагом интегрирования переменных.

**Расчеты в ComSim систем с КПЧ и RL-нагрузкой на смешанных моделях.** Результаты расчета в ComSim системы с КПЧ при 18 БПЧ на смешанной модели представлены на рис. 6. В установке использован активный КПЧ с 18 БПЧ. Нагрузка имеет мощность 6 МВт, напряжение 6 кВ, частоту 50 Гц (другие параметры приведены ранее). Выполнен расчет процесса длительностью 100 с при шаге интегрирования 100 мкс, последние 0.03 с расчет выполнялся с шагом 2 мкс.

На ЭВМ средней производительности расчет выполнялся 42 с (в 2.4 раза быстрее реального времени).

Аналогичный результат расчета по «гладким составляющим» переменных получен при анализе системы с многофазным двигателем на постоянных магнитах (ДПМ) и многотактным преобразователем, содержащим 480 транзисторов и диодов. Расчет выполнялся в 2.3 раза быстрее реального времени) [30].

**Расчеты в ComSim систем с КПЧ и двигателями.** Комплекс моделей систем с КПЧ позволяет анализировать различные структуры устройств, а также различные алгоритмы управления. В каче-

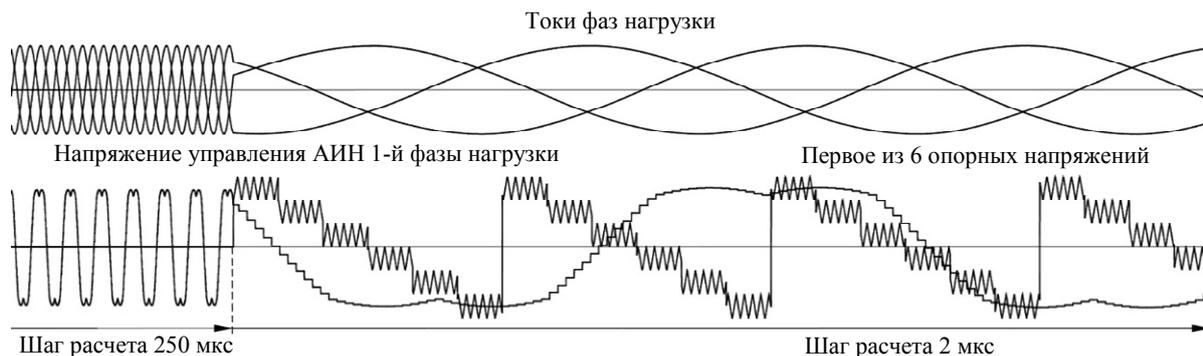


Рис. 6. Напряжения и токи КПЧ при переходе от расчета по «гладким составляющим» переменных к расчету по полной модели системы  
 Fig. 6. CFC voltages and currents in the transition from the calculation by «smooth components» variables to the calculation by the full system model

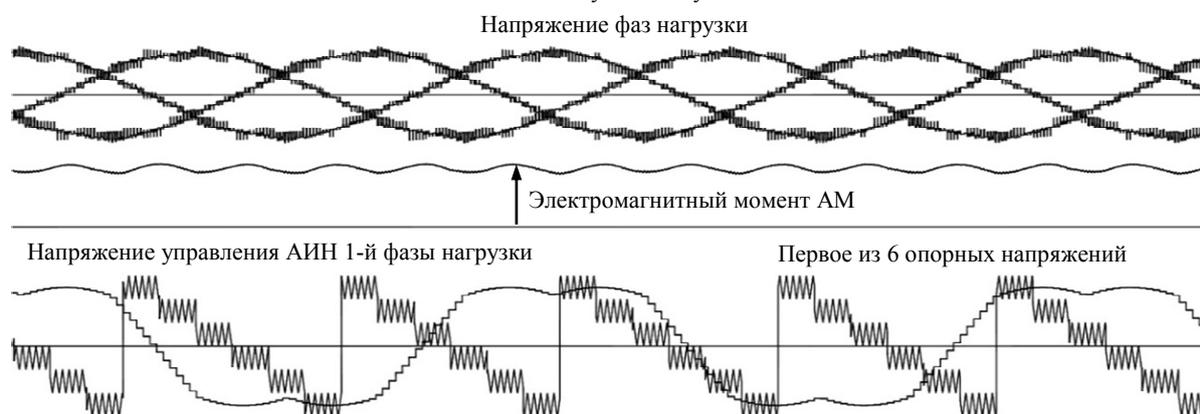


Рис. 7. Напряжения и токи КПЧ и электромагнитный момент АД при работе в режиме, близком к номинальному  
 Fig. 7. CFC voltages and currents and IM electromagnetic torque during operation in near nominal mode

стве примера на рис. 7 представлен результат расчета электромеханических процессов в установке с активным КПЧ и АМ (см. рис. 1) в номинальном режиме работы.

Расчет выполнен при следующих условиях: мощность АМ – 6 МВт, напряжение – 6 кВ, частота – 50 Гц, другие параметры установки приведены ранее. В данном случае электромагнитный момент АД имеет 6-кратные пульсации, что соответствует 6-пульсному преобразованию токов и напряжений в системе АИН-и АМ.

**Расчеты в MatLab систем с КПЧ и двигателями.** Аналогично комплексу моделей в ComSim разрабатывается комплекс моделей систем с КПЧ в MatLab. Выполненные модели в MatLab построены на тех же принципах, что и модели в ComSim. В качестве примера рассчитаны процессы в приводе мельницы, содержащем АМ и КПЧ с ДВ (см. рис. 1). Мощность АМ – 5.15 МВт, напряжение – 6 кВ, частота – 50 Гц.

Управление АД осуществляется в двух вариантах – при ССУ и ВСУ. На рис. 8 представлен результат расчета процесса в приводе при исполь-

зовании ССУ. На рассчитанной диаграмме имеется интервал времени, на котором заданная скорость равна нулю и с помощью КПЧ осуществляется создание магнитного потока в АМ. На следующем интервале заданная скорость линейно увеличивается до номинальной и за ней следует фактическая скорость вращения АМ. Далее привод работает в номинальном режиме до поступления команды на торможение АМ. При использовании ССУ в переходных режимах наблюдаются значительные колебания электромагнитного момента, токов фаз и частоты вращения АМ. Причина колебаний заключается в том, что в данном случае в ССУ не предусмотрены контроль и коррекция токов фаз и потока АМ.

Выполнен также аналогичный расчет по методу «гладких составляющих» переменных. Результат представлен на рис. 9. Сравнение рис. 8 и 9 позволяет сделать вывод, что данный метод обеспечивает достаточно точные результаты расчета при значительном сокращении затрат машинного времени. Из рисунков видно, что свойства систе-

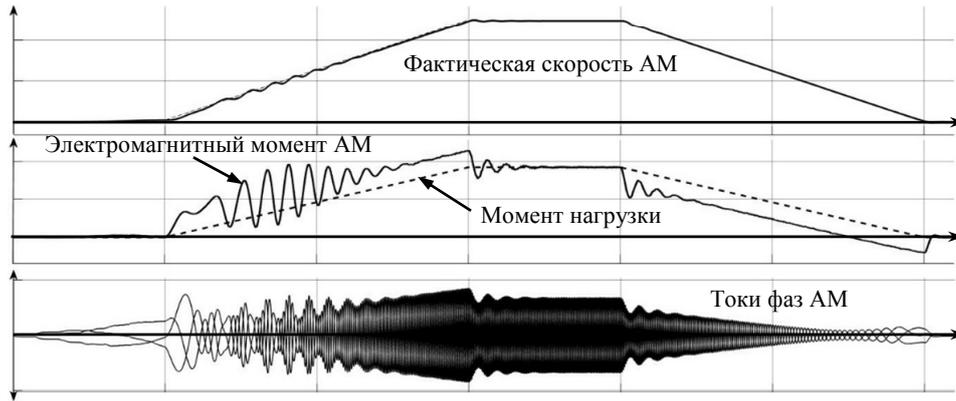


Рис. 8. Пуск привода мельницы при частотном способе управления. Расчет на полной модели  
Fig. 8. Starting a mill drive under frequency control. Calculation on full model

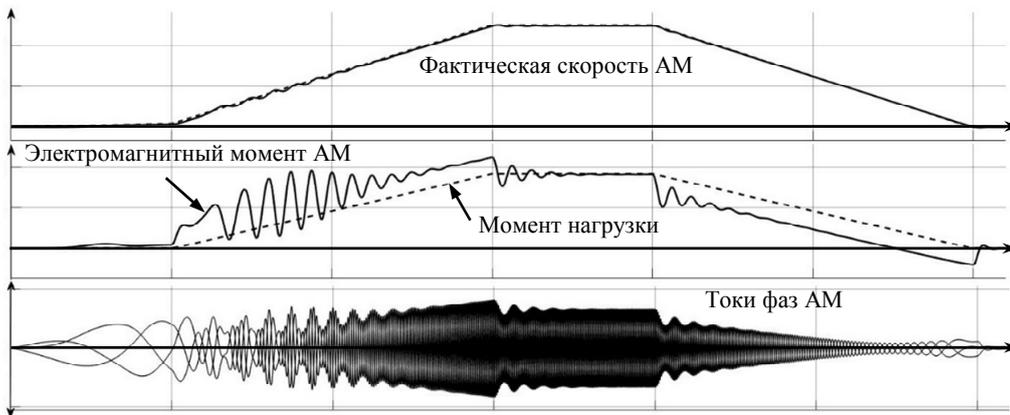


Рис. 9. Пуск привода мельницы при частотном способе управления.  
Расчет по гладким составляющим  
Fig. 9. Starting a mill drive under frequency control. Calculation by smooth components

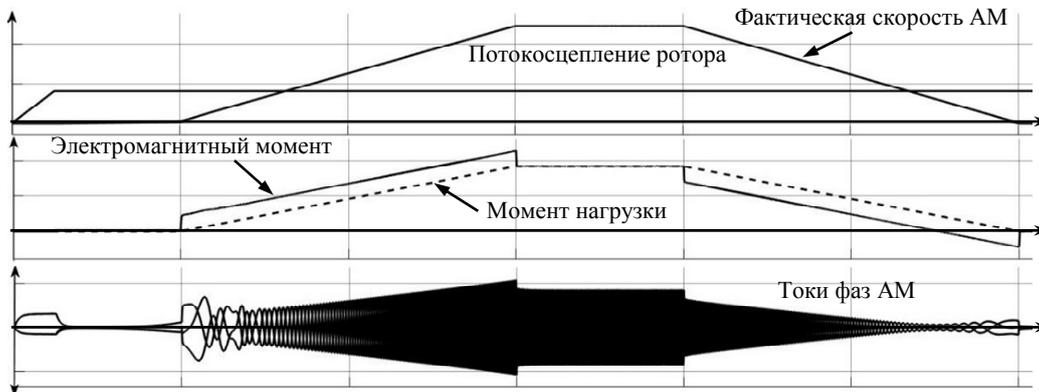


Рис. 10. Пуск привода мельницы при векторном способе управления  
Fig. 10. Starting a mill drive under vector control

мы сохраняются при исключении из процесса вычислений операций с ПЭ.

ВСУ позволяет контролировать напряжения и токи фаз АМ, а с помощью вычислителя определять потокосцепление ротора, частоту вращения потокосцепления и его фазу. Полный контроль состояния АМ позволяет в переходных режимах избежать существенных колебаний переменных. Это подтверждается рис. 10, на котором представлены процессы возбуждения, разгона, уста-

новившегося номинального режима работы и торможения АМ в приводе мельницы (аналогично рис. 8 и 9).

Модели систем с КПЧ при использовании ВСУ построены в MatLab также по методу расчетов по «гладким составляющим» переменных.

Для оценки эффективности моделей в MatLab выполнены расчеты процессов в системе с КПЧ с 18 БПЧ с ДВ (параметры системы указаны выше). Длительность рассчитанного интервала – 10 с,

шаг интегрирования – 2 мкс. При расчетах по полной модели привода затраты машинного времени составили 1225 с. При расчете по «гладким составляющим» переменных шаг интегрирования принят 250 мкс, затраты машинного времени составили 25 с, расчет выполнялся в 2.5 раза медленнее реального времени, но в 49 раз быстрее, чем при использовании полной модели.

#### Выводы.

1. В среде ComSim собственной разработки, а также в MatLab разработаны новые комплексы компьютерных моделей установок с каскадными преобразователями частоты и нагрузками переменного тока различного типа. В моделях предусмотрены возможности отключения части низковольтных блоков каскадного преобразователя при восстановлении качества электроэнергии на входе и выходе средствами управления.

2. В установках с каскадными преобразователями частоты, содержащих низковольтные блоки преобразования с диодными выпрямителями, отключение части блоков приводит к увеличению содержания высших гармоник в токах питающей сети вследствие снижения пульсности системы выпрямления. Нарушается также симметрия токов нагрузки вследствие искажения трехфазной системы

напряжений. Для повышения качества электроэнергии на выходе преобразователя предложено использовать корректор трехфазных токов нагрузки.

3. В установках с каскадными преобразователями частоты при использовании активных блоков преобразования возможно сохранение качества электроэнергии на входе и выходе преобразователя при отключении части блоков. Для обеспечения этого качества установок предложено в системах управления использовать корректоры трехфазных систем токов сети и нагрузки.

4. Численными экспериментами в среде ComSim на моделях систем с каскадными преобразователями подтверждена эффективность и адекватность расчетов процессов по «гладким составляющим» переменных, а также целесообразность использования смешанных моделей. В моделях систем с числом переключающих элементов более 500 электромагнитные процессы могут рассчитываться быстрее реального времени на персональных ЭВМ средней производительности.

5. Численными экспериментами на моделях систем с каскадными преобразователями подтверждена эффективность и адекватность расчетов процессов по «гладким составляющим» переменных в MatLab.

#### Список литературы

1. Беляев Д. В., Вейнгер А. М., Шатохин А. А. Регулируемые синхронные электроприводы шахтных вентиляторов с векторным управлением, ориентированным по полю // Электротехника. 2012. № 8. С. 2–9.

2. Пинчук Н. Д., Дробкин Б. З., Пронин М. В. Электроприводы и системы с полупроводниковыми преобразователями филиала ОАО «Силовые машины» «Электросила» // Тр. V Междунар. (XVI Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП–2007. СПб.: СПб Политех. ун-т, 2007.

3. Жуковский Ю. Л., Королев Н. А., Малькова Я. М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Зап. Горного ин-та. 2022. Т. 256. С. 686–700. doi: 10.31897/PMI.2022.91.

4. Крутяков Е. А. Электроприводы мельниц ГОК «Олимпиадинский» // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5. С. 17–20.

5. Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций / С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур // Электрические станции. 2014. № 8. С. 33–37.

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

7. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // 2005 European Conf. on Power Electronics and Appl. Dresden, Germany, 2005. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434.

8. Bocquel A., Janning J. 4\*300 MW Variable speed drive for pump-storage plant applications // Intern. Conf. on Energy and Power Engin. (EPE 2003). Toulouse, France, 2003. P. 1–10.

9. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 80–90.

10. Воронцов А. Г. Варианты систем электродвижения ледоколов мощностью 60 и 120 МВт // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 8. С. 83–89.

11. Electromechanical AC converter for regime control and short-circuit current limitation in the metropolitan energy system / Y. A. Dementiev, P. V. Sokur, Y. G. Shakaryan, A. V. Mayorov, A. M. Shabash, D. N. Yarosh, N. D. Pinchuk, V. S. Tretyakov // Энергия единой сети. 2017. No. 4A (33). P. 18–27.

12. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Glushakov, M. Pronin, V. Shelyukh, D. Kukushkin, V. Tretyakov // 46<sup>th</sup> Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020). Singapore: IEEE, 2020. P. 1715–1720. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241.

13. 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 // 22<sup>nd</sup> European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France, 2020. P. 1–9. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841.
14. A Cascade multilevel frequency changing converter for high-power applications / D. E. Soto-Sanchez, R. Pena, R. Cardenas, J. Clare, P. Wheeler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, № 6. P. 2118–2130. doi: 10.1109/TIE.2012.2194971.
15. Компьютерные и экспериментальные исследования макета гидроаккумулирующей электростанции / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, А. А. Бажанова, Ф. Г. Келеш // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 50–60.
16. Symmetric and asymmetric operating modes of hybrid cascade frequency converters / A. G. Vorontsov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia // 22<sup>nd</sup> European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France, 2020. P. 1–9. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215589.
17. Ефимов А. А. Моделирование системы управления в скольльзящем режиме активным преобразователем тока // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2 (93). С. 49–59.
18. Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // Зап. Горного ин-та. 2021. Т. 247. С. 132–140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14.
19. Авербух М. А., Кузнецова А. Д. Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 1 (13). С. 7–18.
20. Особенности управления каскадными ПЧ / А. Г. Воронцов, В. В. Глушаков, М. В. Пронин, Ю. А. Сычев // Зап. Горного ин-та. 2020. Т. 241. С. 37–45. doi: 10.31897/pmi.2020.1.37.
21. Несимметричные режимы в многофазных двигателях и приводах / В. С. Томасов, А. А. Усольцев, М. Моравец, П. Щепанковский, Р. Стшелецкий // Электротехника. 2021. № 7. С. 2–12.
22. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019661058 РФ. Программа для ЭВМ ComSim1\_5 (регистрация 19.08.2019) / Воронцов А. Г.
23. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.
24. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 216 с.
25. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Изд-во «Ладoga», 2020. 336 с.
26. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих двояных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.
27. 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.
28. Фираго Б. И., Васильев Д. С. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2015. № 5. С. 5–16.
29. Муртазин Т. Э., Титов В. Г. Синхронный электропривод с векторным управлением // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 41–52. doi: 10.46960/2658-6754\_2021\_2\_41.
30. Воронцов А. Г. Управление многофазным двигателем на постоянных магнитах при несинусоидальных ЭДС и питании от АИН // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 91–99.

---

#### Информация об авторах

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

E-mail: ag.voroncov@gmail.com

**Пронин Михаил Васильевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mvproninn@gmail.com

**Сычев Юрий Анатолиевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Sychev\_YuA@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0119-505X>

**Соловьев Андрей Павлович** – бакалавр Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: mrsoloviev01@gmail.com

---

## References

1. Beljaev D. V., Vejnger A. M., Shatohin A. A. Reguli-ruemye sinhronnye jelektroprivody shahtnyh ventiljatorov s vektornym upravleniem, orientirovannym po polju // *Jelektrotehnika*. 2012. № 8. S. 2–9. (In Russ.).
2. Pinchuk N. D., Drobkin B. Z., Pronin M. V. Jelektroprivody i sistemy s poluprovodnikovymi preobrazovateljami filiala OAO «Silovye mashiny» «Jelektrosila» // *Tr. V Mezhdunar. (XVI Vseros.) konf. po avtomatizirovanomu jelektroprivodu AJeP-2007*. SPb.: SPb Politeh. un-t, 2007. (In Russ.).
3. Zhukovskij Ju. L., Korolev N. A., Mal'kova Ja. M. Monitoring sostojanija izmel'chenija v barabannyh mel'nichah po rezul'tirujushhemu momentu na valu // *Zap. Gornogo in-ta*. 2022. T. 256. S. 686–700. doi: 10.31897/PMI.2022.91. (In Russ.).
4. Krutjakov E. A. Jelektroprivody mel'nic GOK «Olimpiadinskij» // *Gornoe oborudovanie i jelektromehani-ka*. 2005. № 5. S. 17–20. (In Russ.).
5. Povyshenie jenergojeffektivnosti gidroakkumulirujushhij jelektrostancij / S. F. Artjuh, V. V. Galat, V. V. Kuz'min, I. I. Chervonenko, Ju. G. Shakarjan, P. V. Sokur // *Jelektricheskie stancii*. 2014. № 8. S. 33–37. (In Russ.).
6. Analiz sistem vozbuzhdenija gidrogeneratorov GAJeS, rabotajushhij s peremennoj chastotoj vrashhenija / I. Ja. Dovganjuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, P. Ju. Tuzov // *Jelektrotehnika*. 2012. № 6. S. 50–55. (In Russ.).
7. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // *2005 European Conf. on Power Electronics and Appl. Dresden, Germany, 2005*. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434.
8. Bocquel A., Janning J. 4\*300 MW Variable speed drive for pump-storage plant applications // *Intern. Conf. on Energy and Power Engin. (EPE 2003)*. Toulouse, France, 2003. P. 1–10.
9. Voroncov A. G., Pronin M. V. Modeli sistem jelektrodvizenija ledokolov s asinhronnymi dvigateljami i trehurovnevymi preobrazovateljami // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2022. T. 15, № 9. S. 80–90. (In Russ.).
10. Voroncov A. G. Varianty sistem jelektrodvizenija ledokolov moshhnost'ju 60 i 120 MVt // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2022. T. 15, № 8. S. 83–89. (In Russ.).
11. Electromechanical AC converter for regime control and short-circuit current limitation in the metropolitan energy system / Y. A. Dementiev, P. V. Sokur, Y. G. Shakarjan, A. V. Mayorov, A. M. Shabash, D. N. Yarosh, N. D. Pinchuk, V. S. Tretyakov // *Энергия единой сети*. 2017. No. 4A (33). P. 18–27.
12. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Glushakov, M. Pronin, V. Shelyukh, D. Kukushkin, V. Tretyakov // *46<sup>th</sup> Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020)*. Singapore: IEEE, 2020. P. 1715–1720. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241.
13. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consum-ers / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia, V. V. Glushakov, P. V. Sokur // *22<sup>nd</sup> European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe)*. Lyon, France, 2020. P. 1–9. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841.
14. A Cascade multilevel frequency changing converter for high-power applications / D. E. Soto-Sanchez, R. Pena, R. Cardenas, J. Clare, P. Wheeler // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60, № 6. P. 2118–2130. doi: 10.1109/TIE.2012.2194971.
15. Kompjuternye i jeksperimental'nye issledovanija maketa gidroakkumulirujushhej jelektrostancii / M. V. Pronin, A. G. Voroncov, A. A. Bazhanova, F. G. Kelesh // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2017. № 4. S. 50–60. (In Russ.).
16. Symmetric and asymmetric operating modes of hybrid cascade frequency converters / A. G. Vorontsov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia // *22<sup>nd</sup> European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe)*. Lyon, France, 2020. P. 1–9. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215589.
17. Efimov A. A. Modelirovanie sistemy upravlenija v skol'zjashhem rezhime aktivnym preobrazovatelem toka // *Informacionno-upravljajushhie sistemy*. 2018. № 2 (93). S. 49–59. (In Russ.).
18. Sychev Ju. A., Zimin R. Ju. Povyshenie kachestva jelektroenergii v sistemah jelektrosnabzhenija mineral'no-syr'evogo kompleksa gibridnymi fil'trokompensirujushhimi ustrojstvami // *Zap. Gornogo in-ta*. 2021. T. 247. S. 132–140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14. (In Russ.).
19. Averbuh M. A., Kuznecova A. D. Imitacionnoe modelirovanie dinamicheskijh processov v kranovom jelektroprivode s aktivnym vyprjamatelem // *Intellectual'naja jelektrotehnika*. 2021. № 1 (13). S. 7–18. (In Russ.).
20. Osobennosti upravlenija kaskadnymi PCh / A. G. Voroncov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, Ju. A. Sychev // *Zap. Gornogo in-ta*. 2020. T. 241. S. 37–45. doi: 10.31897/pmi.2020.1.37. (In Russ.).
21. Nesimmetrichnye rezhimy v mnogofaznyh dvigateljah i privodah / V. S. Tomasov, A. A. Usol'cev, M. Moravec, P. Shhepankovskij, R. Stsheleckij // *Jelektrotehnika*. 2021. № 7. S. 2–12. (In Russ.).
22. Svid. o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2019661058 RF. Programma dlja JeVM ComSim1\_5 (registracija 19.08.2019) / Voroncov A. G. (In Russ.).
23. Pronin M. V., Voroncov A. G. Silovye polnost'ju upravljajemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet). SPb.: OAO «Jelektrosila», 2003. 172 s. (In Russ.).
24. Pronin M. V. Jelektromehanotronnye sistemy. Sozdanie na osnove kompleksa utocnennyh bistrodejsvujushhijh modelej. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 216 s. (In Russ.).
25. Pronin M. V., Voroncov A. G. Jelektromehanotronnye komplekсы i ih modelirovanie na JeVM po vzaimosvjazannym podsistemam. SPb.: Izd-vo «Ladoga», 2020. 336 s. (In Russ.).

26. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s jektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami na bystrodejstvujushhikh sdvoennykh modeljah // JeLektrotehnika. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).

27. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovaniya JeMITS po vzaimosvjazannym podsistemam i kompleks modellej v ComSim // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 3. S. 57–65. (In Russ.).

28. Firago B. I., Vasil'ev D. S. K voprosu vektornogo upravlenija asinhronnymi dvigateljami // Jenergetika. Izv.

vuzov i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG. 2015. № 5. S. 5–16. (In Russ.).

29. Murtazin T. Je., Titov V. G. Sinhronnyj jelektropri- vod s vektornym upravleniem // Intellektual'naja jelektrotehnika. 2021. № 2. S. 41–52. doi: 10.46960/2658-6754\_2021\_2\_41. (In Russ.).

30. Voroncov A. G. Upravlenie mnogofaznym dvigatelem na postojannykh magnitah pri nesinusoidal'nykh JeDS i pitanii ot AIN // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 7. S. 91–99. (In Russ.).

---

#### Information about the authors

**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.voroncov@gmail.com

**Mikhail V. Pronin** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mvproninn@gmail.com

**Yurii A. Sychev** – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electromechanics, Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Sychev\_YuA@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0119-505X>

**Andrey P. Soloviev** – bachelor of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: mrsoloviev01@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.06.2023; принята к публикации после рецензирования 02.11.2023; опубликована онлайн 19.12.2023.

Submitted 07.06.2023; accepted 02.11.2023; published online 19.12.2023.

---