

12. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006.

13. Elman J. L. Finding structure in time // Cognitive Science. 1990. Vol. 14. P. 179–211.

14. Flow estimation using an Elman networks / L. B. Neto, P. G. Coelho J. C. C. B. Soares de Mello, L. Angulo-Meza // 2004 IEEE Intern. Joint Conf. on Neural Net-

works. Conf.: Budapest, Hungary, 2004. Vol. 2. P. 831–836.

15. Белов М. П., Лань Н. В. Разработка дискретного оптимального квадратичного управления электроприводом наведения оптико-механических комплексов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 5. С. 78–84.

M. P. Belov, N. Van Lanh  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## STATE ESTIMATION BASED NEURAL NETWORK OBSERVER IN ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM OF OPTICAL-MECHANICAL COMPLEXES

*Proposes an application of neural state observer using recurrent neural networks to estimate electromechanical variable coordinates in the tracking electric drive of the optical-mechanical complex control system. The mathematical description of the electric drive of optical-mechanical complex in the form of a two-mass electromechanical system with elastic connections is developed. These elastic vibrations of the two-mass system are damped by using feedback signals from the estimated elastic moment and load velocity from neural network observer. The architectures of dynamic recurrent neural networks according to the Elman scheme are analyzed in the form of state space model, which allows it to approximate a wide class of nonlinear dynamic systems. During computer simulation in the MATLAB/Simulink software environment, the comparison of the root-mean-square error between different learning algorithms for Elman's recurrent neural networks was carried out to study their accuracy estimates coordinates in a closed loop control system of optical-mechanical complex.*

**Optical-mechanical complex, recurrent neural networks Elman, neural state observer, two-mass elastic system**

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов  
ООО «НПЦ СЭС» СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

М. В. Пронин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В. В. Глушаков, Н. И. Фёдоров  
АО «Силовые машины»

## Моделирование ЭЭС с продольным СТАТКОМом методами взаимосвязанных подсхем для анализа режимов синхронизации напряжений двух ЛЭП

*Питание потребителей электроэнергии 1-й категории осуществляется от двух взаимно независимых источников. В ряде случаев перерыв питания недопустим и необходимы согласование напряжений и кратковременная или длительная параллельная работа двух источников. Для анализа возможностей статических продольных компенсаторов по согласованию напряжений двух ЛЭП построена компьютерная модель. Моделирование выполнено посредством методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, обеспечивающей минимальные затраты машинного времени. Статический продольный компенсатор позволяет согласовать либо фазы, либо действующие значения напряжений ЛЭП. При согласовании фаз напряжений действующие значения согласовываются другим устройством, например трансформатором с отпайками. При согласовании действующих напряжений двух ЛЭП согласование фаз напряжений должно осуществляться также другим устройством, например фазоповоротным трансформатором.*

**Продольный СТАТКОМ, электроэнергетическая система, высоковольтные линии электропередач, моделирование, синхронизация напряжений, статические продольные компенсаторы**

Мегаполисы, заводы, рудники и многие другие объекты по надежности электроснабжения

относятся к потребителям 1-й категории [1]. Их электроснабжение в электроэнергетических си-

стемах (ЭЭС) осуществляется от взаимно независимых источников. Если мощность потребителя велика, то его электроснабжение осуществляется через высоковольтные линии электропередач (ЛЭП) с напряжением 110, 220 кВ и др. При этом используются трансформаторы, понижающие напряжение до уровня, например, 6.3, 10.5, 15.75 кВ, приемлемого для потребителей меньшей мощности. Для переключения оборудования используются коммутационные аппараты. В зависимости от особенностей ЭЭС и ЛЭП в оборудовании возникают более или менее значительные падения напряжения, изменяются значения и фазы напряжений на концах ЛЭП. Если при переводе нагрузки с одного источника на другой перерыв питания потребителя не допускается, то необходима кратковременная или длительная параллельная работа различных ЛЭП, а также согласование их напряжений. Если при переключении нагрузки допускается перерыв питания, то можно исключить совместную работу ЛЭП. Однако и в этом случае для уменьшения бросков тока при подключении нагрузки целесообразно согласование напряжений ЛЭП.

Указанная задача решается различными путями. В некоторых случаях в состав ЛЭП включаются вставки постоянного тока с выпрямителями и инверторами [2]. В других случаях используются синхронные или асинхронизированные компенсаторы и накопители кинетической энергии [3], асинхронизированные машины гидроаккумулирующих электростанций [4]. Эффективно применение фазопоротных трансформаторов с отпайками [5]. Сравнительно новым техническим решением является применение электромеханических вставок в ЭЭС с асинхронизированными машинами [6]. Применяются также продольные и поперечные статические компенсаторы [7]. Используемые технические решения описаны и в других публикациях [8].

В данной работе рассматриваются статические продольные компенсаторы, анализируются их возможности по согласованию напряжений двух ЛЭП для обеспечения бесперебойного питания нагрузки от двух взаимно независимых источников энергии. Исследования выполняются на компьютерных моделях, построенных по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [8], [9], обеспечивающей минимальные затраты машинного времени. Анализ выполняется на сравнительно маломощной ЭЭС с напряжением 10.5 кВ. Результаты исследования могут быть распространены и на более мощные системы.

**Схема ЭЭС с продольным СТАТКОМом и задачи исследований.** Для исследования электромагнитных процессов в ЭЭС, содержащей источники электроэнергии, ЛЭП, продольный СТАТКОМ, трехфазную нагрузку и управляющие устройства, используется компьютерная модель, построенная по упрощенной схеме, представленной на рис. 1. На схеме изображены два трехфазных источника напряжения с ограниченной мощностью. Источник 1 содержит трехфазную систему синусоидальных ЭДС  $e_{sn}$  ( $n = 1, 2, 3$ , амплитуда ЭДС фаз  $e_{mx}$ ) и индуктивности в фазах  $L_s$ . Нулевая точка трехфазной обмотки связана с «землей» через емкость  $C_0$ . «Земля» представлена активным сопротивлением  $R_0$ . Источник 2 содержит трехфазную систему синусоидальных ЭДС  $e_{kn}$  и индуктивности в фазах  $L_k$ .

От источника 1 энергия передается в нагрузку через ЛЭП<sub>1</sub>, которая разбита на последовательно соединенные фрагменты (схема фрагмента представлена на рис. 1). Количество фрагментов равно  $M$ . Каждый фрагмент ЛЭП<sub>1</sub> содержит активное сопротивление  $R_l$  и индуктивность  $L_l$  фазы, ЭДС в фазах  $e_{nm}$  ( $n = 1, 2, 3; m = 1, 2, \dots, M$ ), «паразитные» емкости фаз относительно «земли»  $C_0$ , сопротивление «земли»  $R_0$ . С помощью ЭДС  $e_{nm}$  учитываются взаимные индуктивности фаз (различие индуктивностей фаз для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей). Напряжения и токи фаз на выходе фрагмента ЛЭП  $u_{nm}$  и  $i_{nm}$  соответственно, на выходе ЛЭП –  $u_{nM}$  и  $i_{nM}$ . СТАТКОМ создает в фазах добавки напряжений  $\Delta u_n$ . С учетом указанных добавок напряжения фаз на клеммах выключателя  $K_1$  равны  $u_{\Delta n}$ . От источника 2 энергия должна передаваться в нагрузку через ЛЭП<sub>2</sub>, которая учтена сопротивлениями  $Z_k$ . Разность фаз напряжений между ЛЭП<sub>1</sub> и ЛЭП<sub>2</sub> равна  $\Delta \tau_{\text{ЛЭП}}$ .

Продольный СТАТКОМ представлен в схеме трехфазным трансформатором  $Tr$  с разделенными фазами вторичной обмотки с индуктивностью рассеяния  $L_t$  и модульным многоуровневым транзисторным преобразователем. В ряде случаев трансформатор может быть заменен реакторами, что определяется параметрами ЭЭС, структурой СТАТКОМа и его элементной базой.

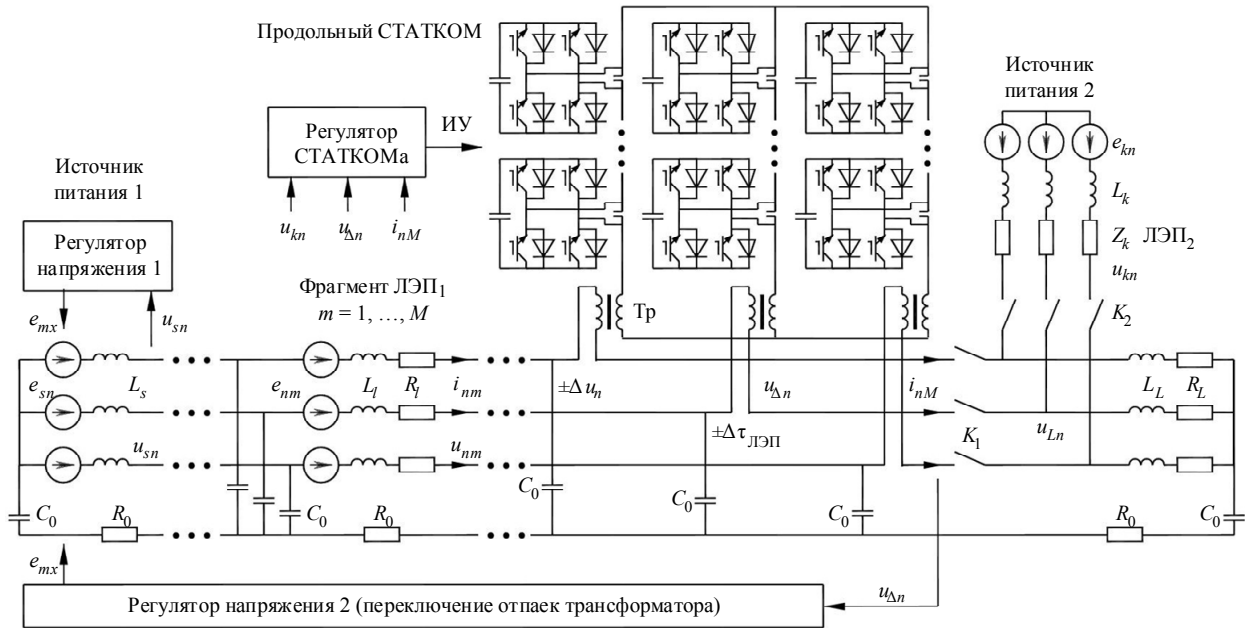


Рис. 1

Нагрузка в схеме представлена индуктивностями  $L_L$  и активными сопротивлениями  $R_L$ ; напряжения фаз нагрузки –  $u_{Ln}$ . Нагрузка подключается к источнику 1 и ЛЭП выключателем  $K_1$ , к источнику 2 – выключателем  $K_2$ .

В ЭЭС рис. 1 при питании нагрузки от источника 1 ( $K_1$  замкнут), если возникает задача включения еще и источника 2 ( $K_2$  разомкнут), то необходима синхронизация напряжений ЛЭП<sub>1</sub> ( $u_{\Delta n}$ ) и ЛЭП<sub>2</sub> ( $u_{kn}$ ). Напряжения на входах выключателей должны быть выравнены по фазе и значению (частоты напряжений одинаковы). В модели предусмотрено задание различия фаз ЭДС источников 1 и 2. В зависимости от нагрузки различия в фазах синхронизируемых напряжений (на входах выключателей  $K_1$  и  $K_2$ ) изменяются. Фазы синхронизируемых напряжений выравниваются при регулировании реактивной мощности СТАТКОМа, в котором контролируются токи фаз ЛЭП<sub>1</sub>, напряжения на входах выключателей и формируются импульсы управления транзисторами (ИУ). Амплитуды напряжений выравниваются другим образом, например переключением отпаяк трехфазных трансформаторов. Для исследования способов управления устройствами ЭЭС в модели по схеме рис. 1 предусмотрено два варианта управления источником 1. В варианте 1 поддерживается напряжение непосредственно источника 1, в варианте 2 – напряжение на входе выключателя  $K_2$ . При этом предполагается, что поддержание напряжения

обеспечивается переключением отпаяк трансформатора (в составе источника 1).

**Модели ЭЭС с продольным СТАТКОМом.** Моделирование ЭЭС (см. рис. 1) осуществляется поэтапно. На первом этапе модель системы выполняется по упрощенной схеме силовой части ЭЭС (рис. 2), в которой СТАТКОМ представлен трехфазной системой регулируемых источников напряжения  $\Delta u_n$  и индуктивностями рассеяния трансформаторов  $L_t$ . Нагрузка в схеме на рис. 1 представлена индуктивностями  $L_L$  и активными сопротивлениями  $R_L$ . Модель предназначена для оценки параметров СТАТКОМа в зависимости от характеристик источников электроэнергии и ЛЭП, а также для оценки его возможностей по синхронизации напряжений ЛЭП.

Упрощенная модель ЭЭС с ЛЭП и СТАТКОМом построена по схеме на рис. 2. Предполагается, что в начале работы ЭЭС трехфазный ключ  $K_1$  замкнут, ключ  $K_2$  разомкнут и необходима синхронизация напряжений двух источников и ЛЭП перед их объединением для питания общей нагрузки. Различие фаз напряжений определяется уровнями нагрузок, параметрами источников и ЛЭП, а также заданной разностью начальных фаз ЭДС источников 1 и 2. В СТАТКОМе предусмотрено векторное формирование ЭДС  $\Delta u_n$  в фазах, в соответствии с которым при контроле токов фаз определяется фаза вектора тока и формируется вектор ЭДС, перпендикулярный вектору тока.

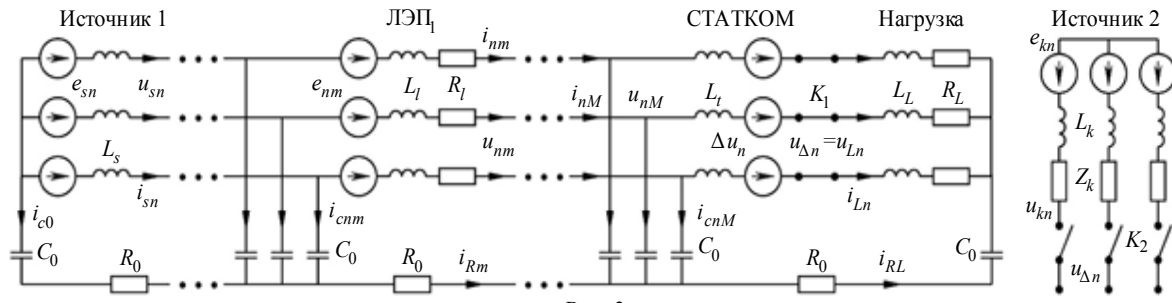


Рис. 2

Амплитуда этого вектора ЭДС формируется регулятором в зависимости от разности фаз синхронизируемых напряжений.

Амплитуда ЭДС фаз источника 1 формируется ПИ-регулятором. Предусмотрено два варианта управления источником 1. В одном варианте напряжение стабилизируется на заданном уровне непосредственно на зажимах источника. В другом варианте напряжение стабилизируется на конце ЛЭП<sub>1</sub> с учетом добавки от СТАТКОМа (для обеспечения всех условий синхронизации напряжений).

При моделировании силовой части системы, содержащей источник 1, ЛЭП<sub>1</sub>, СТАТКОМ и нагрузку, выполняют преобразования схемы, при которых используются токи

$$\begin{aligned} i_{c0} &= -i_{s1} - i_{s2} - i_{s3}, \quad i_{cn1} = i_{sn} - i_{n1}; \\ &\dots \\ i_{cnm} &= i_{n(m-1)} - i_{nm}; \\ &\dots \\ i_{cnM} &= i_{nM} - i_{n(M-1)}, \quad i_{RL} = -i_{L1} - i_{L2} - i_{L3}; \\ m &= 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Токи в сопротивлениях нулевой последовательности

$$\begin{aligned} i_{R0} &= i_{c0}, \quad i_{R1} = i_{R0} + i_{c11} + i_{c21} + i_{c31}; \\ &\dots \\ i_{Rm} &= i_{R(m-1)} + i_{c1m} + i_{c2m} + i_{c3m} \quad m = 1, 2, \dots, M. \end{aligned}$$

Емкости и сопротивления нулевых ветвей представляются зависимыми источниками:

$$\begin{aligned} u_{c0} &= \frac{1}{C_0} \int i_{c0} dt; \quad u_{cR0} = -u_{c0} - R_0 i_{c0}; \\ u_{Rm} &= -R_0 i_{Rm}; \quad u_{cnm} = \frac{1}{C_0} \int i_{cnm} dt; \\ u_{cRL} &= u_{cL} + R_0 i_{RL}; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Источники ЭДС из ветвей с сопротивлениями нулевой последовательности переносятся в другие ветви схемы. Эта операция осуществляется последовательно – сначала перенос из нулевой ветви, затем перенос из первой ветви, и т. д. В результате в нулевом проводе (в «земле») все источники исчезают. Затем зависимые источники нулевых вет-

вей складываются с зависимыми источниками, заменяющими «паразитные» емкости фаз:

$$e_{cnm} = u_{cnm} + u_{Rm}, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, 3.$$

При этом схема на рис. 3 преобразуется к виду рис. 4. В схеме на рис. 4 источник 1 замкнут накоротко, каждый фрагмент ЛЭП<sub>1</sub> и нагрузка также замкнуты накоротко. Это позволяет отделить все короткозамкнутые фрагменты ЭЭС друг от друга и рассматривать ЭЭС как совокупность подсистем, которые взаимосвязаны зависимыми источниками напряжения и тока. Параметры этих источников в каждый момент времени определяются в результате итерационного расчета. После этого осуществляется переход к следующему моменту времени посредством интегрирования токов и напряжений явным методом Эйлера при использовании производных, найденных в итерационном цикле расчета.

Производные токов фаз в подсхеме источника 1

$$\frac{di_{sn}}{dt} = \frac{1}{L_s + L_{st}} \left( e_{sn} - R_s i_{sn} - e_{cn1} + L_{st} \frac{di_{sn}}{dt} \right),$$

где  $L_{st}$  – стабилизирующая индуктивность.

При математическом описании процессов в подсистемах ЛЭП (рис. 4) используются ЭДС, которые позволяют учесть взаимные индуктивности фаз:

$$e_{nm} = \frac{L_l - L_{l0}}{3} \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt},$$

где  $L_l$  – индуктивность фазы фрагмента ЛЭП для токов прямой и обратной последовательностей;  $L_{l0}$  – индуктивность нулевой последовательности фрагмента ЛЭП.

Производные токов фаз в подсистемах фрагментов ЛЭП

$$\begin{aligned} \frac{di_{nm}}{dt} &= \frac{1}{L_l + L_{st}} \times \\ &\times \left( e_{cnm} + e_{nm} - R_l i_{nm} - e_{cnm+1} + L_{st} \frac{di_{nm}}{dt} \right). \end{aligned}$$

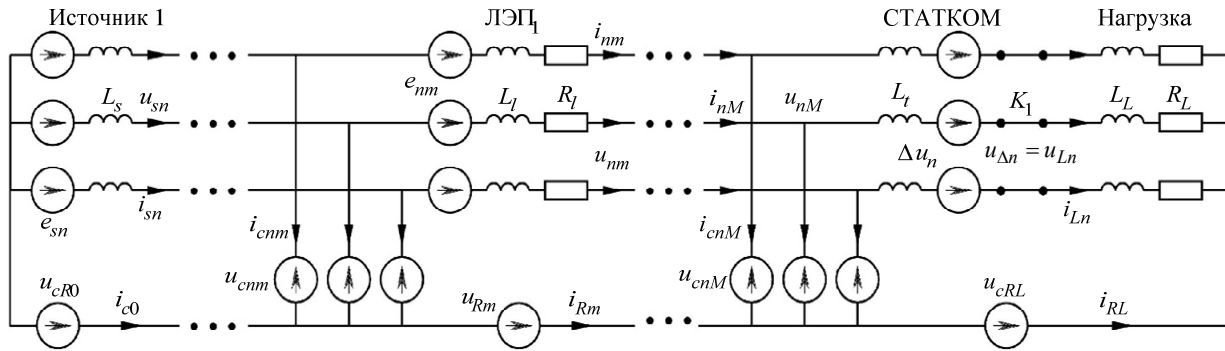


Рис. 3

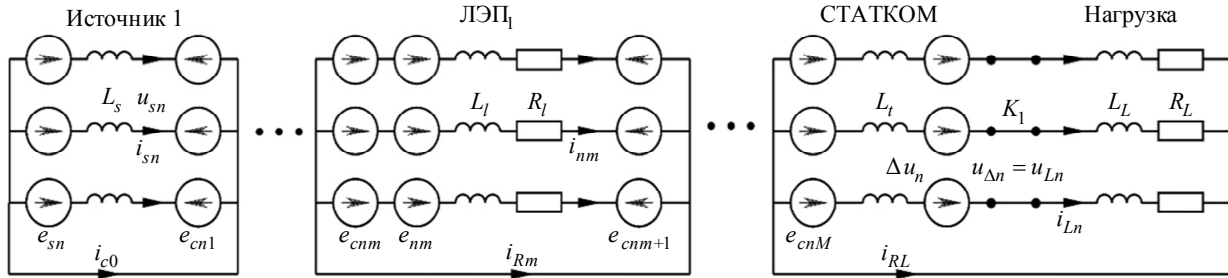


Рис. 4

Производные токов фаз в подсхеме СТАТКОМа и нагрузки

$$\frac{di_{Ln}}{dt} = \frac{1}{L_t + L_L + L_{st}} \times \left( e_{cnM} + \Delta u_n - R_L i_{Ln} + L_{st} \frac{di_{Ln}}{dt} \right).$$

**Компьютерная модель ЭЭС с двумя источниками электроэнергии, ЛЭП, СТАТКОМом и нагрузкой.** На основе представленного математического описания ЭЭС разработана компьютерная модель Mains\_Line\_StCom\_Load на языке C++ для расчетов на ЭВМ в среде Visual Studio (версия 13) с использованием программы ComSim1\_5 [10]. В модели представлены уравнения, а также описание систем управления сведены в единый алгоритм итерационного расчета электромагнитных процессов в ЭЭС [8]. Предусмотрен вывод графической информации, возможности гармонического анализа кривых и др.

**Расчеты процессов синхронизации двух ЛЭП продольным СТАТКОМом.** Рассматривается одна из задач СТАТКОМа, которая заключается в синхронизации напряжений ЛЭП<sub>1</sub> и ЛЭП<sub>2</sub>. Предполагается, что источники энергии генерируют напряжения одной частоты, но из-за различия параметров ЛЭП и падений напряжения в элементах ЭЭС синхронизируемые напряжения различаются по фазам и действующим значениям. СТАТКОМ вносит ЭДС в фазы ЛЭП<sub>1</sub>, с помощью которых корректируется фаза вектора

напряжения. При этом действующее напряжение ЛЭП<sub>1</sub> стабилизируется регулятором, который воздействует на амплитуду ЭДС источника 1. Предусмотрены два варианта регуляторов напряжения – поддержание напряжения непосредственно на выходе источника 1 и поддержание напряжения на входе выключателя К<sub>1</sub>.

Расчеты электромагнитных процессов в ЭЭС выполнены для установки с напряжением 10.5 кВ, при частоте 50 Гц и предельных для этого напряжения значений других параметров – мощность нагрузки 2.1 МВт, длина ЛЭП<sub>1</sub> 5 км [11]. Коэффициент мощности нагрузки принят равным 0.9, ЛЭП<sub>1</sub> разделена на 5 участков длиной по 1 км. На каждом участке ЛЭП<sub>1</sub> индуктивности фазы – 0.00127 Гн/км; активное сопротивление фазы – 0.000854 Ом/км, емкость фазы относительно «земли» – 0.009 мкФ/км, сопротивление «земли» – 0.049 Ом/км. Источник 1 содержит в фазах индуктивности 0.0029 Гн, действующие линейные ЭДС 10.5 кВ в начале процесса, далее ЭДС регулируются в процессе поддержания напряжения нагрузки. Источник 2 имеет те же напряжение и частоту, но начальная фаза вектора напряжения смещена относительно фазы источника 1 на заданный угол. Индуктивность стабилизации вычислительного процесса принята равной 0.00005 Гн. Шаг интегрирования – 0.1 мкс, шаг записи информации – 10 мкс, заданное число итераций на каждом шаге расчета по времени – 25. Результат расчета процессов в ЭЭС в режиме

синхронизации ЛЭП представлен на рис. 5 (заданная разность фаз ЭДС двух источников равна  $5^\circ$ ).

При подключении ЛЭП<sub>1</sub> к источнику 1 происходит заряд емкостей с появлением пусковых токов. В модели ЭЭС для ограничения пусковых токов предусмотрено начальное подключение ЛЭП<sub>1</sub> через пусковые сопротивления. Через заданное время эти сопротивления шунтируются (в данном расчете через 0.15 с). Одновременно к ЛЭП<sub>1</sub> подключается нагрузка.

Система управления СТАТКОМа контролирует фазу вектора тока выключателя  $K_1$ , а также фазы векторов напряжений на контактах выключателей  $K_1$  и  $K_2$ . В зависимости от разности фаз векторов напряжений СТАТКОМ формирует до-

бавку к напряжениям ЛЭП<sub>1</sub>, перпендикулярную вектору тока. При этом, как видно из рис. 5, разность фаз векторов напряжений на контактах выключателей постепенно уменьшается до нуля.

При указанном управлении устройствами ЭЭС выполнена серия расчетов характеристик системы при стабилизации действующего напряжения источника 1 и при изменении заданной разности фаз векторов ЭДС двух источников от  $-12$  до  $+12^\circ$ . Результаты расчетов представлены на рис. 6. Напряжение источника 2 во всех случаях неизменно ( $U_1 = U_2$ ). Фазы векторов синхронизируемых напряжений выравниваются СТАТКОМом достаточно точно (погрешность не превышает  $0.03^\circ$ ). При этом изменение рассогласования по фазе векторов ЭДС источников на  $24^\circ$

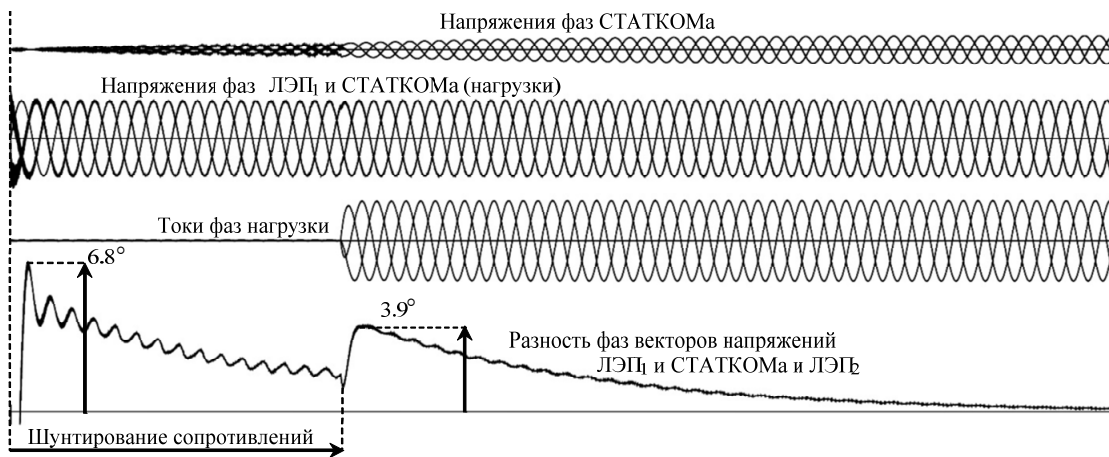


Рис. 5

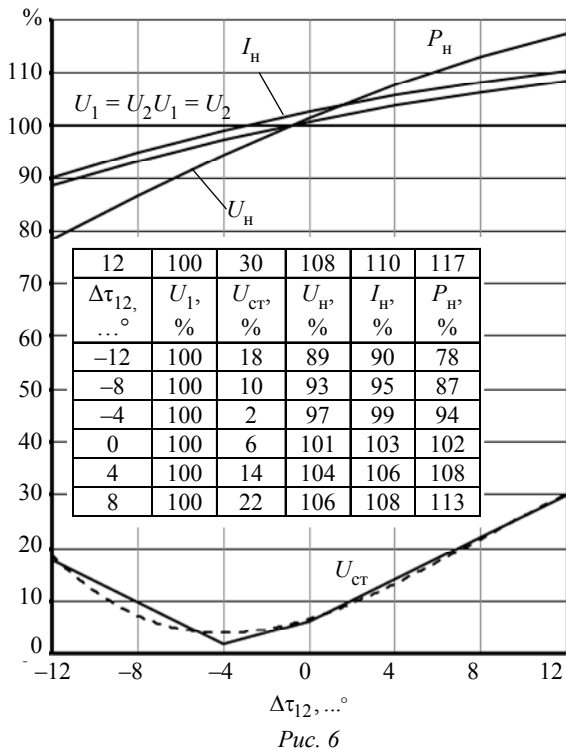


Рис. 6

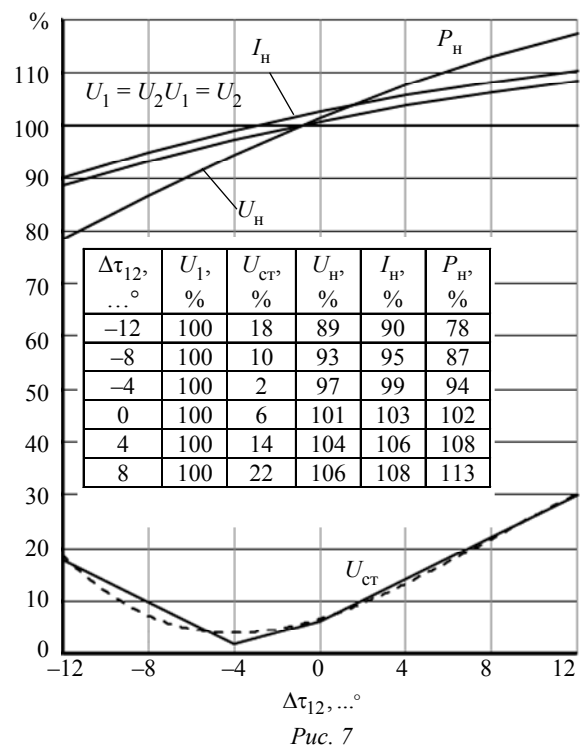


Рис. 7

приводит к изменению напряжения и тока нагрузки приблизительно на 20 %, а активной мощности нагрузки – почти на 40 %. При максимальном рассогласовании фаз ЭДС источников СТАТКОМ должен иметь напряжение 30 % от напряжения источников и ЛЭП.

Другая серия расчетов выполнена при условии, что источником 1 стабилизируется напряжение на входе выключателя  $K_1$ . Результаты расчетов представлены на рис. 7, где отображены следующие параметры:  $\Delta\tau_{12}$  – разность фаз векторов напряжений источников 1 и 2;  $U_1$  – относительное напряжение источника 1;  $U_{ст}$  – относительное напряжение СТАТКОМа;  $U_H, I_H, P_H$  – относительные напряжение, ток и мощность нагрузки (базисными считаются номинальные параметры нагрузки).

При расчетах характеристик (рис. 7) обеспечена та же точность согласования синхронизируемых напряжений по фазе, что и в предыдущем случае. По согласованию действующих напряжений погрешность достигает 3 %. Но эти показатели обеспечиваются при значительном изменении напряжения источника 1, а именно в пределах от 111 до 93 %.

Необходимо рассмотреть также другой вариант использования продольного СТАТКОМа в ЭЭС. В частности, он может синхронизировать напряжения двух ЛЭП по действующим значениям. Анализ такого режима работы ЭЭС выполнен при использовании той же компьютерной модели с небольшим изменением. В частности, в системе управления СТАТКОМа для формирования трехфазной системы силовых напряжений регулируется не разность фаз векторов синхронизируемых напряжений, а разность их действующих значений. Расчеты ЭЭС выполнены при тех же исходных параметрах установки. Результаты расчетов представлены в таблице. Из рис. 8 видно, что при действующем напряжении СТАТКОМа ( $U_{ст}$ ) 5 % от номинального напряжения источников и ЛЭП обеспечивается достаточно точное соответствие напряжений ЛЭП<sub>1</sub> и ЛЭП<sub>2</sub> по действующим значениям. При этом различия в фазах векторов синхронизируемых напряжений (на концах ЛЭП<sub>1</sub> и ЛЭП<sub>2</sub>) определяются в основном расхождением фаз ЭДС источников 1 и 2.

$\Delta\tau_{12}, \dots^\circ$	$\Delta\tau_{ЛЭП}, \dots^\circ$	$U_1, \%$	$U_{ст}, \%$	$U_H, \%$	$I_H, \%$	$P_H, \%$
-12	-11.3	100	5	100	100	100
-8	-7.33	100	5	100	100	100
-4	-3.33	100	5	100	100	100
0	0.67	100	5	100	100	100
4	4.67	100	5	100	100	100
8	8.67	100	5	100	100	100
12	12.67	100	5	100	100	100

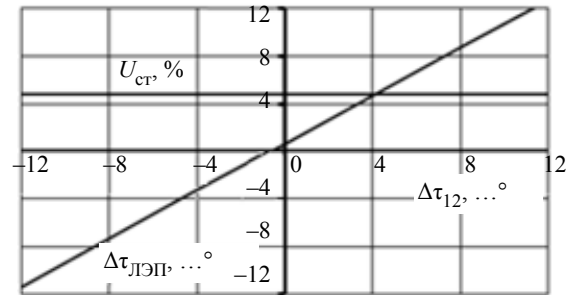


Рис. 8

Очевидно, что для выравнивания напряжений двух ЛЭП не только по действующим напряжениям, но и по фазам векторов напряжений, необходимо применение дополнительного устройства, например фазоповоротного трансформатора.

Для расчетной оценки параметров продольного СТАТКОМа и эффективности его применения разработана компьютерная модель ЭЭС, содержащая два трехфазных источника напряжения, ЛЭП, СТАТКОМ, нагрузку и системы регулирования. В модели предусмотрены различные варианты управления СТАТКОМом при синхронизации напряжений двух ЛЭП в системе бесперебойного питания нагрузки.

В варианте 1 управления СТАТКОМом напряжения двух ЛЭП согласуются по фазе. При этом согласование напряжений по действующим значениям осуществляется другими устройствами, например, трансформатором с отпайками путем их переключения.

В варианте 2 управления СТАТКОМом напряжения ЛЭП согласуются по действующим значениям. В этом случае согласование напряжений по фазе осуществляется другим устройством, например фазоповоротным трансформатором. Причем для обеспечения плавности управления трансформатор должен иметь достаточное количество отпаяк.

При формировании вектора напряжений продольного СТАТКОМа перпендикулярно вектору токов возможно снижение устойчивости ЭЭС при уменьшении нагрузки в связи с увеличением погрешностей измерений токов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): СО 153-34.20.120-03. М: ЭНАС, 2011.
2. Косолапов И. А., Дементьев Ю. А. Вставка несинхронной связи для обеспечения параллельной работы объединенных энергосистем Сибири и Востока // Энергия единой сети. 2013. № 5 (10). С. 26–35.
3. Thyristor starters for ASK-100 asynchronous compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technology and Engineering. 2010. Vol. 44, № 5. P. 411–415.
4. 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, 2013. P. 2031–2036.
5. Фазоповоротный трансформатор в схеме выдачи мощности крупной гидроэлектростанции / А. С. Брилинский, Г. А. Евдокунин, В. А. Крицкий, Ю. В. Матвиенков, А. П. Сидельников, Л. С. Смирнова // Изв. НТЦ ЕЭС. 2019. № 1 (80). С. 6–14.
6. 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. P. 18–21.
7. Новые технологии компенсации реактивной мощности / 12 сентября 2014 г. URL: <https://www.elec.ru/articles/novye-tehnologii-kompensacii-reaktivnoj-moshnosti> (дата обращения 01.02.2021).
8. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020.
9. Об утверждении Методических рекомендаций по определению предварительных параметров выдачи мощности строящихся (реконструируемых) генерирующих объектов в условиях нормальных режимов функционирования энергосистемы, учитываемых при определении платы за технологическое присоединение таких генерирующих объектов к объектам электросетевого хозяйства: приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 30.04.2008 г. № 216. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902100062> (дата обращения 01.02.2021).
10. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих двоясных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.
11. Пат. 2019661058 РФ. ComSim1\_5 / А. Г. Воронцов. Оpubл. 19.08.19.

A. G. Vorontsov  
OJSC «Npcses» (Saint Petersburg)

M. V. Pronin  
Saint Petersburg Electrotechnical University

V. V. Glushakov, N. I. Fedorov  
JSC «Power machines»

## SIMULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM SSSC BY METHODS OF INTERCONNECTED CIRCUITS FOR ANALYSIS OF THE VOLTAGE SYNCHRONIZATION MODES OF TWO LINE

*Electricity consumers of category 1 are powered from two mutually independent sources. In some cases, power interruption is unacceptable and voltage matching and short-term or long-term parallel operation of two sources are necessary. To analyze the capabilities of static longitudinal compensators for matching the stresses of two power lines, a computer model has been built. Modeling is carried out according to the methodology for calculating systems for interconnected subsystems, which ensures the minimum consumption of computer time. The static longitudinal compensator allows you to match either the phases or the effective values of the voltage of the transmission line. When phase matching the voltages, another device, for example a tapped transformer, matches the root mean square values. When matching the operating voltages of two power lines, the phase matching of the voltages should also be carried out by another device, for example, a phase-shifting transformer.*

**STATCOM, electric power system, power lines, simulation, voltage synchronization, SSSC**