



УДК 621.314.263

В. В. Глушаков, А. С. Григорян, И. А. Пименова  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Алгоритмы управления транзисторными источниками постоянного напряжения при их параллельной работе

Разработаны алгоритмы управления транзисторными источниками постоянного напряжения (ИПН). Построена модель в среде MatLab-Simulink, позволяющая анализировать алгоритмы. На основании расчетов сделаны выводы о возможности реализации ИПН без чопперов. Разработанная структура системы управления позволяет распределить нагрузку между источниками равномерно, без использования взаимных связей по токам.

### Широтно-импульсный преобразователь, моделирование, система управления, параллельные преобразователи, распределение нагрузки

В автономных электроэнергетических системах (ЭЭС), например в ветроэлектрических установках, для питания потребителей постоянного напряжения может быть использован транзисторный источник напряжения (ИПН) с ШИП [1]–[6]. Разработка ИПН выполняется на основе визуального моделирования в MatLab-Simulink [7], [8] и по методологии моделирования систем по взаимосвязанным контурам на C++ в Visual Studio [9], [10]. Помимо разработки алгоритмов управления в нормальных, переходных и аварийных режимах возникает необходимость создания алгоритмов совместной работы с другими источниками. При заряде аккумуляторной батареи (АБ) с помощью рассматриваемого ИПН требуется поддержание заданного тока. В случае работы одного ИПН на нагрузку и АБ [11] одновременно мощность одного ИПН может оказаться недостаточной. В этом случае возникает необходимость параллельного объединения нескольких ИПН. В связи с вышесказанным помимо разработки алгоритмов управления в нормальных, переходных и аварийных режимах возникает необходимость создания алгоритмов совместной работы с другими источниками.

Описание структуры и расчет переходных режимов работы ИПН рассмотрены в [12]. В данной статье рассмотрена совместная работа нескольких ИПН на нагрузку и АБ. Разработана

компьютерная модель в среде MatLab-Simulink, позволяющая оценить качество алгоритмов и оптимизировать структуру ИПН. В [13] равномерное распределение нагрузки между источниками обеспечивается с помощью специальных дросселей, рассматриваемая же структура системы управления позволяет распределить нагрузку между двумя ИПН равномерно без использования взаимных связей по токам.

**Система управления транзисторными источниками постоянного напряжения.** Структурная схема системы управления (СУ), изображенная на рис. 1, включает в себя два транзисторных источника постоянного напряжения (ИПН1 и ИПН2), внешние устройства (ВУ) (нагрузка  $Z_H$ , АБ) и коммутационные аппараты  $Q_1$ – $Q_3$  и АСУ.

В АСУ поступают сигналы действующих напряжений и токов ИПН1  $u_1, i_1$ , ИПН2  $u_2, i_2$  и АБ  $u_{AB}, i_{AB}$ . Из АСУ в СУ каждого ИПН посту-

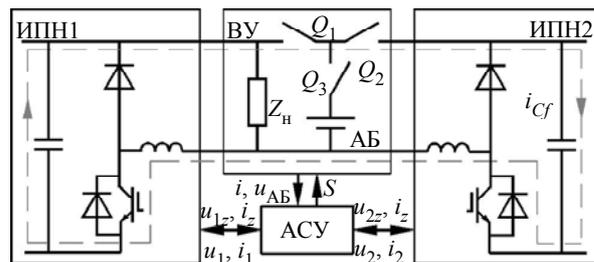


Рис. 1

пают задания напряжений  $u_{1z}$ ,  $u_{2z}$  и токов  $i_z$ . Также в АСУ формируются сигналы управления коммутационными аппаратами  $S$ . На рис. 2 изображена структура системы управления ИПН. Источник напряжения получает питание от трехфазной сети ABC и содержит трехобмоточный трансформатор Т, два диодных выпрямителя В, элементы ШИП (транзисторы и диоды), предохранитель FU, элементы СУ (регуляторы тока  $Per.i$  и регуляторы напряжения  $Per.U$ ) и др.  $R_L$  учитывает активное сопротивление дросселей ИПН.

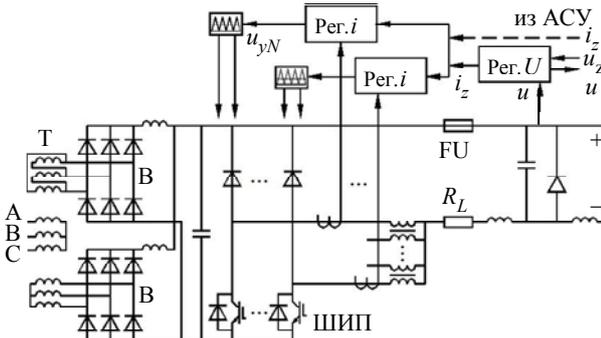


Рис. 2

В нормальном режиме работы СУ ИПН содержит внешний контур регулирования напряжения и внутренний контур регулирования токов ветвей ШИП и включает в себя датчики тока и напряжения, а также устройства формирования импульсов управления транзисторами. При совместной работе СУ содержит внешний контур регулирования тока нагрузки (в АСУ) и внутренний контур регулирования токов ветвей ШИП.

В режиме холостого хода на выходе ШИП ПИ-регулятором поддерживается заданное из АСУ напряжение  $u_z$ . На вход регулятора поступает разница сигналов по заданному  $u$  и фактическому  $\Delta u$  напряжениям, на выходе формируются напряжения управления  $u_y$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= u_z - u, \\ u_y &= K_{uo} \Delta u + K_{ui} \int \Delta u dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $K_{uo}$  и  $K_{ui}$  – коэффициенты по отклонению напряжения (токов) и интеграла напряжения (токов).

При работе ИПН на нагрузку заданное напряжение  $u_z$  из внешней АСУ поступает в СУ ИПН. На вход ПИ-регулятора напряжения поступает разница сигналов по заданному и фактическому напряжениям. ПИ-регулятор напряжения ИПН формирует задание токов ветвей ШИП  $i_z$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= u_z - u, \\ i_z &= K_{uo} \Delta u + K_{ui} \int \Delta u dt. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Разница сигналов по заданному и фактическим токам ветвей ШИП поступает на входы ПИ-регуляторов тока. На выходах регуляторов токов формируются напряжения управления ветвей  $u_y$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta i &= i_z - i, \\ u_y &= K_{uo} \Delta i + K_{ui} \int \Delta i dt. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Импульсы управления транзисторами  $K_{in}$  ШИП формируются при сравнении пилообразных опорных напряжений и напряжений управления:

$$\left. \begin{aligned} \text{если } u_y > u_{оп}, & \text{ то } K_{in} = 1, \\ \text{иначе} & K_{in} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $u_{оп}$  – опорное напряжение.

При совместной работе регулируется ток заряда АБ. На вход ПИ-регулятора тока (в АСУ) поступает разница сигналов между заданным  $i_{zAB}$  и фактическим  $\Delta i_{AB}$  токами. На выходе регулятора формируется задание токов ветвей ШИП для обоих ИПН

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{AB} &= i_{zAB} - i_{AB}, \\ i_z &= K_{uo} \Delta i_{AB} + K_{ui} \int i_{AB} dt. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В остальном система работает так же, как и в предыдущем варианте управления.

При КЗ в цепи нагрузки выходной ток ШИП заданный ток на выходе ИПН поддерживается на уровне 120–125 % [12] (максимальное значение тока задается в системе управления) в течение 10 с. По истечении указанного времени с транзисторов снимаются импульсы управления.

**Моделирование установки с несколькими ИПН, нагрузкой и АБ.** Разработана компьютерная модель (рис. 3), позволяющая оценить алгоритмы совместной работы нескольких ИПН в среде MatLab-Simulink. Модель включает в себя 2 ИПН со структурой, приведенной на рис. 1 (ИПН1 и ИПН2), нагрузку  $Z_H$ , АБ, СУ и коммутационные аппараты.

АБ представлена RLC-цепью со следующими параметрами: активное сопротивление 0.4 мОм, емкость 20 Ф, индуктивность 500 мкГн.

Параметры модели: напряжение источника 690 В, частота 50 Гц, мощность нагрузки 700 кВт, заданный ток заряда АБ 1800 А, время расчета 0.7 с, шаг интегрирования 0.5 мкс.

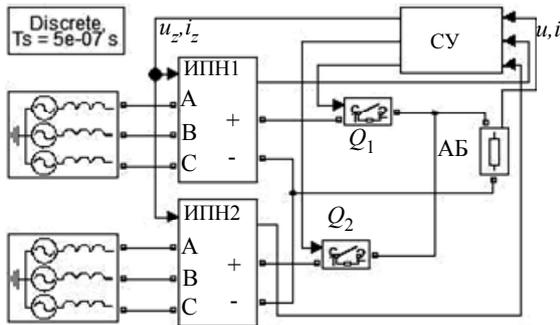


Рис. 3

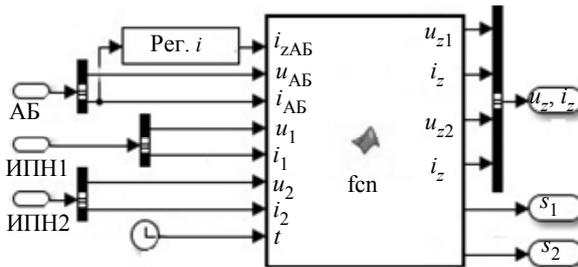


Рис. 4

Модель СУ, представленная на рис. 4, содержит MatLab-функцию, в которой на языке MatLab описываются алгоритмы работы системы. На рис. 4 АБ, ИПН1 и ИПН2 – сигналы по токам и напряжениям АБ и ИПН;  $s_1$  и  $s_2$  – сигналы управления коммутационными аппаратами.

Возможно использование множества алгоритмов совместной работы. В данной статье рассматриваются два алгоритма. В первом случае имеется внешняя АСУ, которая на основании поступающих с датчиков напряжения ИПН1 и ИПН2 выравнивает напряжения перед осуществлением коммутации.

Во втором случае связей по сигналам напряжений между ИПН нет. При коммутации допускается рассогласование между напряжениями ИПН1 и ИПН2 по напряжению порядка 80 В. Однако при таком алгоритме управления возможно образование обратных токов в контуре, приведенном на рис. 1 штриховой линией, которые приведут к росту выпрямленного напряжения на входе ШИП. Для ограничения напряжения входного конденсатора ШИП в таком случае потребуется установка чопперного сопротивления.

**Расчет режимов совместной работы источников.** На рис. 5 представлены результаты расчета электромагнитных процессов ИПН и АБ при первом алгоритме управления. В начальный момент времени ИПН1 работает на нагрузку при напряжении 220 В. ИПН2 работает на холостом ходу при напряжении 240 В. По сигналу из АСУ на 0.2 с в ИПН1 устанавливается напряжение АБ и включается  $Q_1$  (0.25 с). Как только ИПН1 выхо-

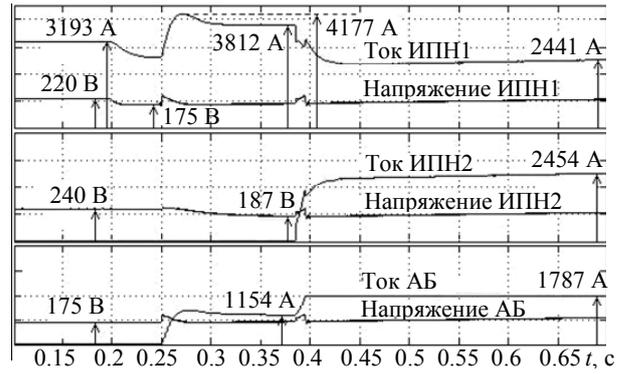


Рис. 5

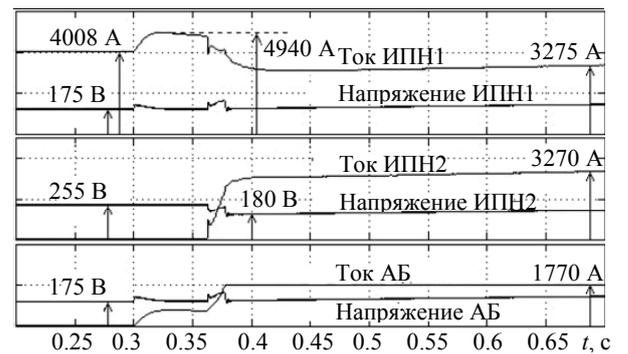


Рис. 6

дит на ограничение, напряжение ИПН2 выравнивается с ИПН1 и включается аппарат  $Q_2$  (0.37 с). В конце процесса (0.7 с) нагрузка между ИПН1 и ИПН2 распределяется равномерно.

На рис. 6 приведены результаты расчета электромагнитных процессов ИПН при втором алгоритме работы. В начальный момент времени напряжение ИПН1 и АБ составляет 175 В, а напряжение ИПН2 – 255 В. В момент времени 0.3 с АБ подключается к ИПН1. Как только ИПН1 выходит на ограничение, в работу на 0.36 с включается ИПН2.

На рис. 7 приведены результаты расчета при условии, что в начальный момент времени напряжение ИПН1 и АБ равно 320 В, напряжение ИПН2 – 255 В. Временные интервалы аналогичны предыдущему случаю. Обратный ток через конденсатор ИПН2 (рис. 4) – 500 А.

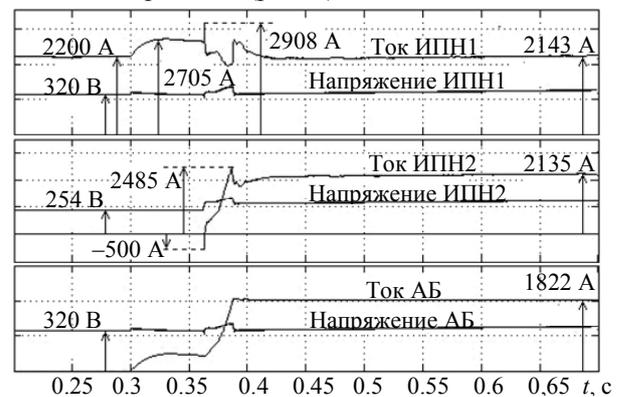


Рис. 7

Расчеты, выполненные в среде MatLab-Simulink, подтверждают возможность использования предложенных алгоритмов. На модели проведены расчеты влияния температуры ИПН (путем увеличения активных сопротивлений дросселей ИПН1) и отклонения напряжения питания ИПН на распределение нагрузки между двумя ИПН. Результаты расчетов при изменении активных сопротивлений дросселей ИПН1 и при отклонении напряжения питания аналогичны приведенным выше и подтверждают равномерность распределения нагрузки между работающими параллельно ИПН.

#### Выводы:

1. В MatLab-Simulink разработана модель, позволяющая анализировать алгоритмы совместной работы нескольких источников постоянного напряжения при совместной работе на нагрузку и АБ.

2. Использование предложенных алгоритмов работы возможно без добавления чопперов, ограничивающих входное напряжение ШИП ИПН.

3. Предложенная структура системы управления позволяет распределить нагрузку между работающими параллельно транзисторными источниками постоянного напряжения равномерно, без использования взаимных связей по токам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afshang H., Tahami F., Molla-Ahmadian H. A Novel Hybrid Modeling of DC-DC Series Resonant Converters / Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 278–284.
2. An Improved Averaged Model for Boost DC-DC Converters / E. Chapter, G. Gatto, I. Marongiu et al. // An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 410–415.
3. A Novel Continuous-Time Equivalent Circuit for Boost DC-DC Converters / G. Gatto, I. Marongiu, A. Mocci et al. // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 260–265.
4. A High Efficiency Non-isolated Bidirectional DC-DC Converter with Zero-Voltage-Transition / H. JiTai, L. Chang-Soon, C. Ja-Hwi, K. Rae-Young, H. Dong-Seok // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 196–201.
5. Kurokawa F., Furukawa Y. 1 MHz Sampled Quick Response Digital Control DC-DC Converter // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 126–131.
6. Multi-Objective Design of a Close-Coupled Inductor for a Three-Phase Interleaved 140 kW DC-DC Converter / J. Zwysen, R. Gelagaev, J. Driesen et al. // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 1054–1059.

7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК-Пресс, 2014. 288 с.
8. Кузин М. Е. Особенности моделирования электрических систем в Simulink и методами их расчета по взаимосвязанным подсистемам // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 6. С. 67–77.
9. Пронин М. В. Электромехатронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 224 с.
10. Мамутов А. Р., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Моделирование обратимого статического многотактного преобразователя переменного-постоянного напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 55–58.
11. Averaged Modeling and Control of a Single-Phase Grid-Connected Two-Stage Inverter for Battery Application / H. Dong-Yub, L. Chang-Soon, K. Rae-Young et al. // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 487–492.
12. Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети постоянного напряжения / И. А. Пименова, В. В. Глушаков, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 7. С. 60–66.
13. MPC Algorithms for Parallel MultiCell Converters / E. Solano, A. Llor, T. Meynard et al. // 7<sup>th</sup> An. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2013). Vienna, Austria. P. 1047–1053.

V. V. Glushakov, A. S. Grigorian, I. A. Pimenova  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### CONTROL ALGORITHMS FOR PARALLEL DC-DC CONVERTERS

*Control algorithms for DC-DC converters have been designed. Models of Parallel DC-DC converters that allows analyzing algorithms have been constructed in MatLab-Simulink. On the basis of calculations the conclusions about the feasibility of the DC-DC converters without the choppers. The structure of the control system allows to distribute the load evenly between the sources, without the use of mutual links in the currents.*

**Pulse-width converter, modeling, control system; parallel converters, load distribution**