

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов, А. Р. Мамутов  
ООО «НПЦ СЭС» СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

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

## Алгоритмы управления многотактными несимметричными ШИП при их работе на общую нагрузку

*Рассмотрена система, содержащая два транзисторных преобразователя переменного напряжения и аккумуляторную батарею, работающие на общую нагрузку постоянного тока. Указанные устройства содержат многотактные несимметричные широтно-импульсные преобразователи, которые стабилизируют токи или напряжения на выходе либо ток заряда аккумуляторной батареи (в зависимости от заданного режима работы). Рассмотрены алгоритмы управления преобразователями, позволяющие обеспечить все режимы работы системы при отсутствии взаимных связей преобразователей по цепям управления. Рассмотрены режимы стабилизации напряжения нагрузки, тока заряда аккумуляторной батареи, токов преобразователей в переходных режимах работы с учетом обмена энергией между преобразователями. Построены математическая и компьютерная модели системы. Выполнены расчеты электромагнитных процессов, приведены диаграммы напряжений и токов в системе в различных режимах работы. Указаны предпосылки возникновения недопустимых перенапряжений и средства ограничения напряжений.*

### Широтно-импульсный преобразователь, многотактный, параллельная работа, рекуперация энергии, перенапряжение, моделирование, расчет

Во многих случаях электрические и электро-механические нагрузки выполняются на постоянном токе и для их питания создаются электрические сети постоянного напряжения. Если первичный источник электроэнергии выполнен на переменном напряжении, то для питания сети постоянного напряжения используют электрома-шинные или полупроводниковые преобразователи (ПП). В электросетях постоянного напряжения используют также аккумуляторные батареи (АБ). ПП могут содержать диодные выпрямители (ДВ) и широтно-импульсные преобразователи постоянно-го напряжения (ШИП). ДВ обеспечивают потребление энергии из электросетей переменного напряжения с коэффициентом мощности, близким к единице. ШИП обеспечивают регулирование напряжения или тока нагрузки и могут выполняться на модулях IGBT. Если мощность ШИП значительна, а напряжение нагрузки низкое, то ШИП

выполняются многотактными при параллельном включении некоторого количества однотактных ШИП и равномерном распределении импульсов управления транзисторами на каждом периоде опорных напряжений. Структуры ПП переменного напряжения с многотактными ШИП и особенности их управления и работы рассмотрены во многих публикациях [1]–[8].

В публикации [1] описана структура ПП переменного напряжения, в которой использованы ДВ и многотактный несимметричный ШИП. Схема этого ПП представлена на рис. 1.

В фазах ДВ установлены дроссели  $L_k$ . В цепи выпрямленного напряжения установлен LC-фильтр с индуктивностью  $L_d$  и емкостью  $C_1$ . К емкости  $C_1$  подключены несколько однотактных ШИП с транзисторами и обратными диодами, которые в целом представляют собой многотактный ШИП.

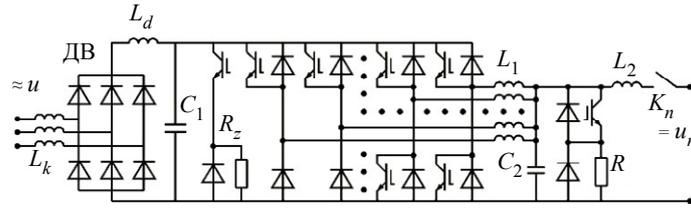


Рис. 1

Однотактные ШИП включены параллельно через дроссели с индуктивностями  $L_1$ . На выходе многотактного ШИП использован LC-фильтр с индуктивностью  $L_2$  и емкостью  $C_2$ . Емкости  $C_1$  и  $C_2$  зашунтированы защитными цепями с чопперами и резисторами  $R_z$  и  $R$  для снятия перенапряжений. Диоды, шунтирующие конденсатор  $C_2$ , предназначены для подавления резонансов в переходных режимах работы ШИП. На выходе ПП формируется постоянное напряжение нагрузки  $u_n$ , которое подается на нее через выключатель  $K_n$ .

ДВ не позволяет рекуперировать энергию в питающую сеть и из нагрузки через ШИП невозможна передача значительной энергии в емкость  $C_1$ . С целью упрощения системы и снижения стоимости оборудования однотактные ШИП можно выполнять полууправляемыми (с одним транзистором). Однако если все однотактные ШИП – полууправляемые, то в переходных режимах при возврате энергии из нагрузки в емкость  $C_2$  возможно недопустимое увеличение напряжения  $u_{C_2}$  на этой емкости. Для предотвращения аварии часть однотактных ШИП выполнена полностью управляемой (с двумя транзисторами). В целом многотактный ШИП (рис. 1) можно рассматривать как несимметричный.

Одно из применений рассматриваемого ПП – установка на подвижном объекте, например на судне при обеспечении совместной работы с ис-

точниками питания на берегу. Систему управления такого ПП целесообразно строить при минимизации взаимных связей по сигналам управления. Задачей данной статьи является проверка работоспособности системы в целом во всех режимах работы при отсутствии прямых связей между СУ различных ШИП, для чего разрабатываются математическая и компьютерная модели установки.

**Структура и алгоритмы управления системы с двумя ШИП, АБ и нагрузкой.** Схема для анализа режимов работы двух ПП с многотактными несимметричными ШИП, одной АБ и нагрузкой представлена на рис. 2. В схеме источники питания и ДВ представлены упрощенно – диодами, источниками постоянного напряжения  $e_{d1}$  и  $e_{d2}$ , индуктивностями  $L_d$ , а также активными сопротивлениями  $R_d$ , которые учитывают индуктивности фаз. В ШИП общее количество ветвей равно  $N$ , количество полностью управляемых однотактных ШИП произвольно. Из состава ШИП исключены цепи защиты от перенапряжений конденсаторов  $C_2$ . В АБ учтены ЭДС, активное сопротивление и индуктивность (на рисунке не указаны). В нагрузке учтены индуктивность  $L_n$  и активное сопротивление  $R_n$ . Соединения элементов схемы осуществляются ключами  $K_{11}, K_{12}, K_a, K_n$ .

На рис. 2 изображены также элементы системы управления (СУ) одного ШИП. СУ второго ШИП аналогична и не имеет прямых связей с

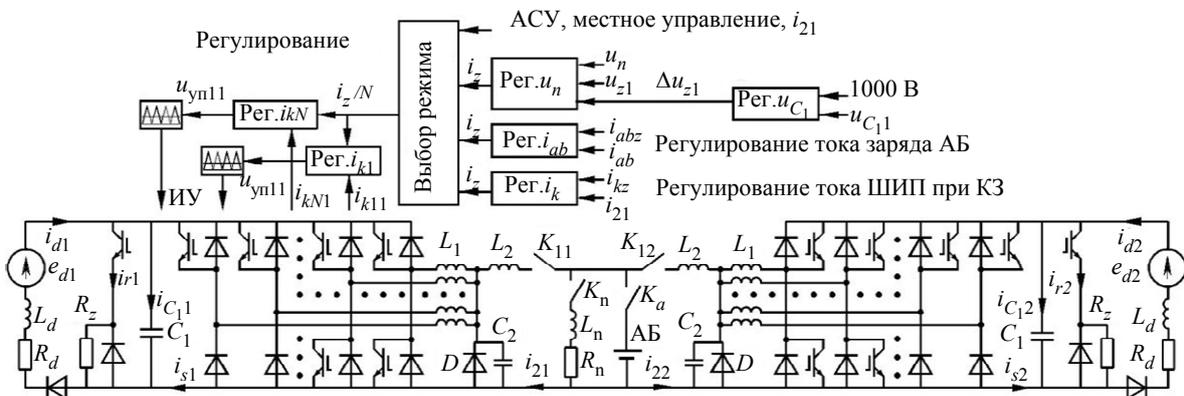


Рис. 2

первой СУ. Режим работы задается сигналами автоматизированной системы управления верхнего уровня (АСУ). Эти сигналы подаются в блок выбора режима. Могут быть заданы режимы поддержания напряжения нагрузки, поддержания тока заряда АБ, короткого замыкания (КЗ) сети постоянного напряжения.

В режиме поддержания в ШИП<sub>1</sub> выходного напряжения работает ПИ-регулятор напряжения, на входы которого поступают сигналы по заданному  $u_{z1}$  и фактическому  $u_n$  напряжениям на выходе ШИП<sub>1</sub>. Регулятор напряжения формирует сигнал по заданному току на выходе ШИП<sub>1</sub>  $i_z$ . В блоке выбора режима работы заданный ток делится на количество ветвей ШИП<sub>1</sub> и формируются  $N$  сигналов заданий регуляторам токов однотактных ШИП. На вход каждого регулятора тока ШИП поступают сигналы по заданному току ветви и по фактическому току  $i_{kn1}$  ( $n$  – номер ветви ШИП). На выходе регулятора тока каждого однотактного ШИП формируется напряжение управления ветви ШИП  $u_{уп11}$ . Напряжения управления всех ветвей ШИП<sub>1</sub> сравниваются с пилообразными опорными напряжениями ветвей. В блоках сравнения опорных и управляющих напряжений формируются импульсы управления транзисторами. При этом опорные напряжения ветвей формируются со взаимным сдвигом по фазе для обеспечения многотактного режима работы ШИП<sub>1</sub>. Аналогичное управление имеет ШИП<sub>2</sub>.

Если выходное напряжение ШИП<sub>1</sub> сравнительно невелико, а выходное напряжение ШИП<sub>2</sub> больше, то при их соединении выключателями  $K_{11}$  и  $K_{12}$  выходной ток ШИП<sub>1</sub> будет отрицательным и энергия будет передаваться от ШИП<sub>2</sub> к ШИП<sub>1</sub> в емкость  $C_2$ , при этом напряжение на емкости будет увеличиваться, а регулятор напряжения, поддерживая выходное напряжение ШИП<sub>1</sub>, будет изменять напряжения управления, вследствие чего энергия будет передаваться далее – в емкость  $C_1$ . Напряжение на емкости  $C_1$  будет увеличиваться и достигнет предельно допустимого значения, при котором вступает в работу регулятор напряжения  $u_{C1}$ , формирующий добавку  $\Delta u_{z1}$  к заданному напряжению на выходе ШИП<sub>1</sub>. В этом случае ПИ-регулятор напряжения будет работать при следующем заданном напряжении:

$$u_z = u_{z1} + \Delta u_{z1}.$$

Действие блока защиты приводит к тому, что напряжение емкости  $C_1$  ограничивается на максимально допустимом уровне, а выходные напряжения ШИП<sub>1</sub> и ШИП<sub>2</sub> выравниваются.

Переход в режим поддержания заданного тока заряда АБ осуществляется по команде АСУ или по команде с местного пульта управления (команды поступают в блок выбора режима работы ШИП). По этим командам из нескольких заданных токов на выходе ШИП  $i_z$  выбирается для использования тот ток, который формирует регулятор тока. На входы регулятора тока АБ поступают сигналы по заданному  $i_{abz}$  и фактическому  $i_{ab}$  токам. На выходе этого регулятора ШИП<sub>1</sub> формируется заданный ток  $i_z$ . Соответствие фактического тока ШИП<sub>1</sub> заданному значению обеспечивается регуляторами токов ветвей ШИП<sub>1</sub>. В процессе заряда АБ напряжение сети и токи сетевых нагрузок увеличиваются. Соответственно увеличивается ток на выходе ШИП<sub>1</sub>. Если этот ток достигает максимально допустимого значения, то он на этом значении ограничивается, и для достижения требуемого тока заряда АБ включается в работу ШИП<sub>2</sub>. В конце процесса заряда АБ заданными токами осуществляется переход в режим поддержания напряжения сети.

В процессе работы системы возможно возникновение КЗ в сети постоянного напряжения. Для своевременного выявления этого события в блок выбора режима работы ШИП поступает сигнал по уровню тока на выходе ШИП. Если этот ток превысил допустимый уровень, то происходит переход в режим поддержания на выходе ШИП заданного тока КЗ – например, 120 % номинального значения. Этот ток поддерживается в течение заданного времени для обеспечения селективной работы коммутационных аппаратов в сети постоянного напряжения. Если внешние коммутационные аппараты отключили КЗ, то восстанавливается нормальный режим работы ШИП, если не отключили, – то выключается ШИП.

**Моделирование системы с двумя ШИП, АБ и нагрузкой.** Моделирование установки с двумя ШИП, АБ, нагрузкой и СУ осуществляется по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [8]. На первом этапе разделения установки на взаимосвязанные подсистемы силовая часть отделяется от СУ и эти две части связы-

ваются друг с другом сигналами датчиков и управляющих воздействий. Учитывается, что СУ цифровая, обработка сигналов датчиков выполняется с заданной дискретностью (несколько измерений на периоде ШИП и усреднение измеренных значений), а сигналы в СУ передаются с другой заданной дискретностью (период ШИП). СУ формирует напряжения управления с дискретностью одного периода ШИП. Импульсы управления транзисторами формируются аналоговыми средствами (в модели – на каждом шаге расчета по времени). При разделении на взаимосвязанные подсхемы силовой части установки осуществляются следующие преобразования схемы (рис. 2).

Одно из преобразований заключается в том, что аккумуляторная батарея, имеющая ЭДС  $e_a$ , активное сопротивление  $R_a$ , индуктивность  $L_a$ , и ток  $i_a$ , представляется зависимым источником напряжения  $u_n$  (напряжение сети):

$$u_n = u_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a.$$

Источник напряжения  $u_n$  переносится в цепь нагрузки с индуктивностью  $L_n$  и активным сопротивлением  $R_n$ , а также в ветви ШИП, содержащие индуктивности  $L_2$ . Это преобразование позволяет отделить ШИП<sub>1</sub> от ШИП<sub>2</sub> по цепям выпрямленных напряжений. При этом сумму токов на выходе ШИП, определенных в соответствующих подсхемах, и тока в ветви с нагрузкой можно рассматривать в качестве зависимого источника тока, действующего на АБ в соответствующей подсхеме:

$$i_a = i_{21} + i_{22} + i_n, \quad \frac{di_a}{dt} = \frac{di_{21}}{dt} + \frac{di_{22}}{dt} + \frac{di_n}{dt}.$$

Результаты преобразований силовой схемы отображены на рис. 3.

Другое преобразование силовой схемы заключается в замене емкостей  $C_2$  и шунтирующих диодов  $D$  зависимыми источниками напряжения  $u_{dC_1}$  и  $u_{dC_2}$ . Эти источники напряжения используются в подсхемах с ШИП. Токи, протекающие в этих ветвях, определяются в подсхемах ШИП и представляются в других подсхемах в виде зависимых источников тока  $i_{dC_1}$  и  $i_{dC_2}$ . Подсхемы с указанными источниками представлены на рис. 3.

Со стороны входных цепей ШИП также происходит преобразование силовой схемы. Оно заключается в замене емкостей  $C_1$  зависимыми источниками напряжения  $u_{C_11}$  и  $u_{C_12}$ :

$$u_{C_1m} = \frac{1}{C_1} \int i_{C_1m} dt, \quad m = 1, 2.$$

Источники напряжения  $u_{C_11}$  и  $u_{C_12}$  переносятся в другие ветви схемы, и в узлах подключения емкостей схема разделяется на более простые части. Определенные в этих подсхемах токи представляются в виде зависимых источников тока  $i_{C_11}$  и  $i_{C_12}$

$$i_{C_1m} = i_{dm} - i_{sm} - i_{rm}, \quad m = 1, 2.$$

Полученные зависимые источники тока воздействуют на емкости  $C_1$  в соответствующих подсхемах. Разделение силовой схемы установки на взаимосвязанные подсхемы отображено на рис. 3.

На рис. 3 две подсхемы с ШИП сравнительно сложны для математического описания, поэтому они также преобразуются в более простые взаимосвязанные подсхемы, как описано, например, в [8].

В соответствии с рассмотренным подходом к описанию системы (рис. 2) разработана компьютерная модель, с помощью которой выполнен ряд расчетов.

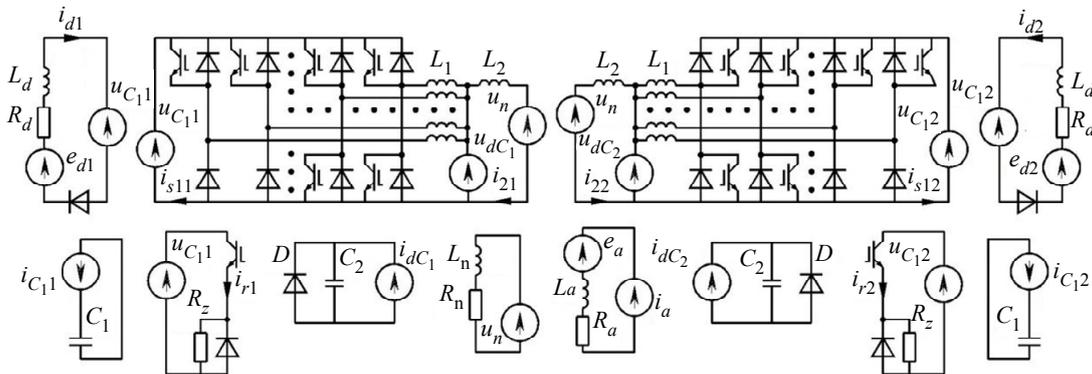


Рис. 3

При расчетах использованы следующие параметры установки. Эквивалентная ЭДС источника питания  $e_d = 700$  В, активное сопротивление  $R_d = 0.035$  Ом, индуктивность  $L_d = 220$  мкГн. Количество параллельно включенных ветвей многотактного ШИП равно 6. Емкость конденсаторов на входе ШИП  $C_1 = 6000$  мкФ, на выходе  $C_2 = 5500$  мкФ. Индуктивности  $L_1 = 20$  мкГн;  $L_2 = 5$  мкГн,  $L_n = 4.5$  мкГн. Активные сопротивления  $R_1 = 0.076$  мОм,  $R = 1000$  Ом. Номинальное напряжение нагрузки – 220 В, номинальный ток нагрузки – 5000 А, номинальная мощность нагрузки – 1200 кВт. Предельное напряжение электрической дуги коммутационного аппарата – 1100 В. Частота импульсов управления ШИП 6000 Гц. Минимальное и максимальное напряжения управления ШИП – 4 и 96 %. Шаг расчета по времени – 7 нс, шаг записи результатов расчетов – 1 мкс. Ограничения заданного тока в ветвях ШИП: сверху –  $6000/6$  А, снизу –  $1500/6$  А.

В рассматриваемом режиме общая нагрузка двух параллельно работающих ШИП – 7500 А. В режиме поддержания напряжения нагрузки заданное напряжение на выходах: ШИП<sub>1</sub> – 240 В; ШИП<sub>2</sub> – 220 В. На рис. 4 представлена диаграмма напряжений и токов в системе в различных режимах работы. Расчет выполнен при отключенных цепях защиты от увеличения напряжений конденсаторов  $C_1$ . Общая длительность рассчи-

танного процесса – 0.8 с. На диаграмме представлены кривые напряжений на конденсаторах  $C_1$ , кривые напряжений и токов на выходе двух ШИП, кривая тока нагрузки, ток ветви ШИП<sub>1</sub>, содержащей полностью управляемый полумост, а также ток ветви ШИП<sub>1</sub>, содержащей полууправляемый полумост. В начале процесса ШИП<sub>1</sub> подключен к сети постоянного напряжения, но нагрузка отсутствует. При этом ШИП<sub>2</sub> работает на холостом ходу и к сети постоянного напряжения не подключен. Напряжения на конденсаторах  $C_1$  равны, поскольку ЭДС источников одинаковы, а нагрузки нет ( $u_{11} = u_{12}$ ). В ШИП<sub>1</sub> средние значения токов в ветвях равны нулю, но в ветвях с полным управлением мгновенные значения токов колеблются относительно нуля.

В момент времени  $t_1$  к электросети постоянного напряжения подключается ШИП<sub>2</sub>. Поскольку заданное напряжение на выходе ШИП<sub>2</sub> меньше на 20 В, в ветвях ШИП<sub>2</sub> появляются отрицательные токи, которые заряжают конденсатор  $C_1$ . Амплитуда напряжения на конденсаторе  $C_1$  достигает 878 В. Напряжения на выходах двух ШИП выравниваются ( $u_{21} = u_{22}$ ).

В момент времени  $t_2$  к электросети постоянного напряжения подключается активно-индуктивная нагрузка. Ток нагрузки за достаточно короткое время плавно увеличивается до 7498 А

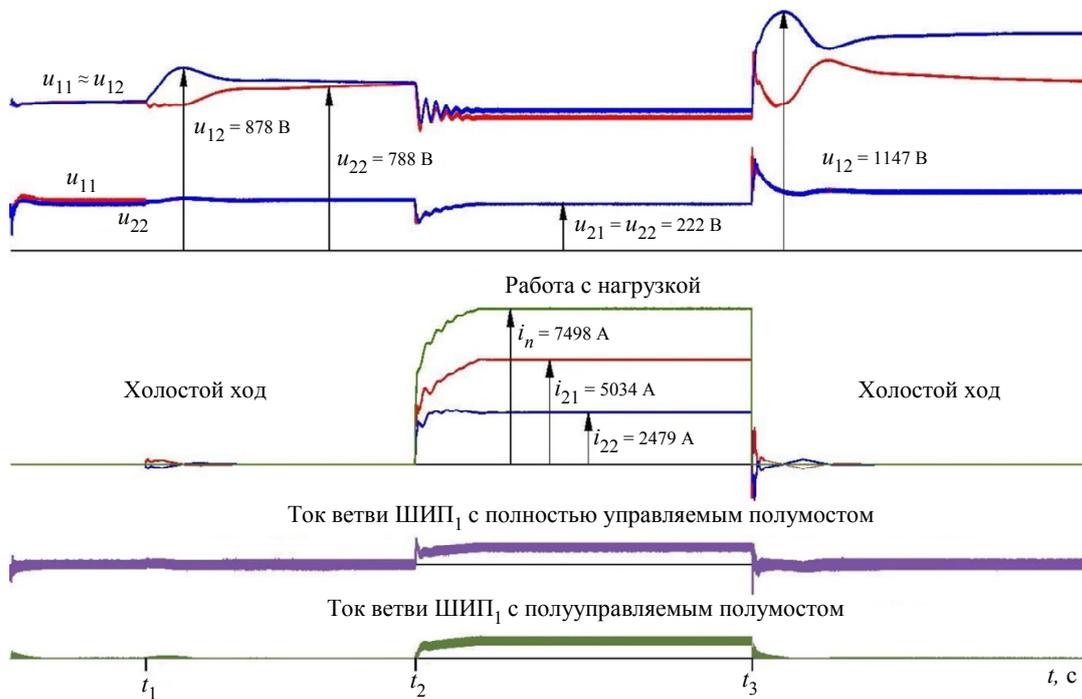


Рис. 4

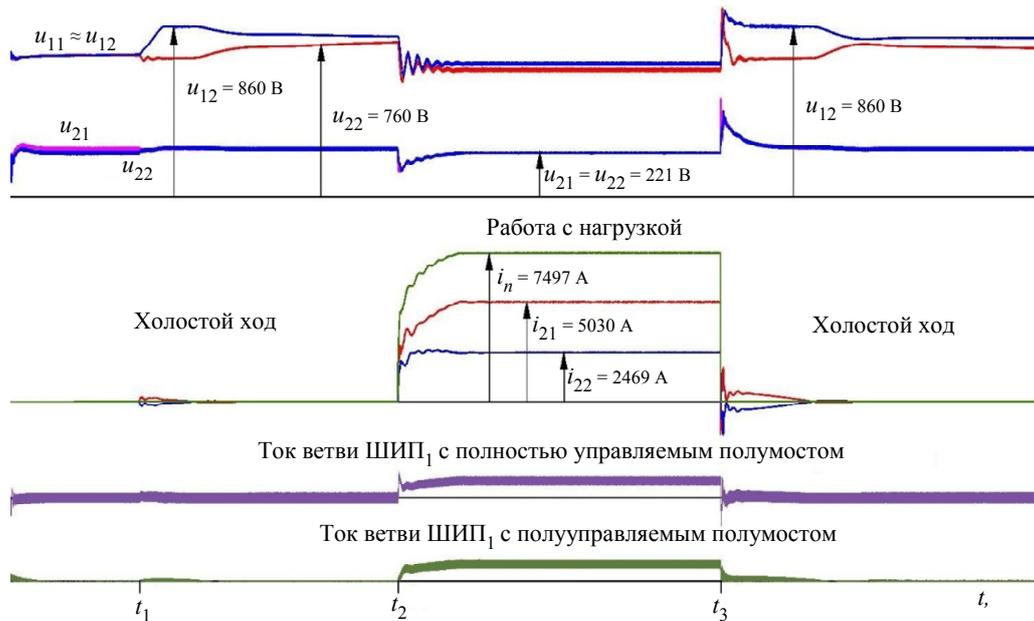


Рис. 5

(задано 7500 А). Поскольку в двух ШИП заданы различные выпрямленные напряжения, то токи нагрузки в них распределяются неравномерно. В ШИП<sub>1</sub> ток нагрузки – 5034 А (ограничение 5000 А), а в ШИП<sub>2</sub> – 2479 А. Напряжение электросети устанавливается на уровне 222 В. Токи в полностью управляемых и в полууправляемых ветвях ШИП выравниваются не только по среднему значению, но и по форме.

В момент времени  $t_3$  происходит скачкообразный сброс нагрузки 7500 А. При этом в ШИП<sub>1</sub> исчезает ~5000 А нагрузки, а в ШИП<sub>2</sub> – ~2500 А нагрузки. В момент отключения нагрузки на выходах ШИП скачкообразно увеличиваются напряжения, которые затем сравнительно быстро затухают. Это увеличение напряжений следует отнести к импульсным коммутационным перенапряжениям.

С некоторой задержкой по времени напряжения в системе увеличиваются более значительно. При отключении нагрузки оба ШИП остаются подключенными к общей электросети и между ними происходят колебания токов и обмен энергией. При этих колебаниях в конденсаторе  $C_1$  в ШИП<sub>2</sub> напряжение увеличивается до 1147 В, что значительно превышает напряжение источников питания (700 В). Указанная особенность рассматриваемой системы свидетельствует о том, что для ограничения недопустимого увеличения напряжений необходимо использовать защитные цепи с чопперами и резисторами при шунтировании ими конденсаторов  $C_1$  в соответствии со схемой на рис. 2.

Для оценки эффективности использования защитных цепей в системе с двумя ШИП выполнен дополнительный расчет. В этом расчете все исходные параметры системы оставлены без изменений, кроме одного – напряжение срабатывания защитной цепи принято равным 860 В. Результаты расчета представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что при работе ШИП<sub>1</sub> на холостом ходу с электросетью постоянного напряжения и подключении к электросети ШИП<sub>2</sub> напряжение на конденсаторе  $C_1$  в ШИП<sub>2</sub> увеличивается, но только до уровня срабатывания защитной цепи 860 В. Далее при сбросе нагрузки 7500 А возникают коммутационные перенапряжения, которые сравнительно быстро затухают. После их затухания напряжение в ШИП<sub>2</sub> также ограничивается уровнем 860 В.

Следует отметить, что при нагрузке в индуктивностях системы протекают токи и им соответствует некоторый запас энергии. При сбросе нагрузки токи в индуктивностях сравнительно быстро исчезают, а энергия емкостей и их напряжения увеличиваются.

#### Выводы:

1. В низковольтных источниках напряжения с многотактными ШИП на модулях IGBT и LC-фильтрами на входе и выходе для равномерного распределения нагрузки между параллельно включенными ветвями ШИП целесообразно применение индивидуальных дросселей в ветвях ШИП.

2. В источниках по п. 1 для уменьшения перенапряжений в переходных режимах работы целе-

сообразно снижению запаса энергии в источнике с помощью уменьшения индуктивностей дросселей при одновременном повышении частоты опорных напряжений ШИП.

3. В источниках по п. 1 для обеспечения управляемости в режиме холостого хода и уменьшения перенапряжений в переходных режимах работы целесообразно в структуре ШИП

предусмотреть возможность возврата энергии с выхода на вход. При этом конденсаторы на входе и на выходе ШИП целесообразно шунтировать защитными цепями с чопперами и резисторами.

4. Для снижения стоимости источника напряжения с многотактным ШИП по п. 1 целесообразно обеспечить возврат энергии через часть параллельно включенных ветвей ШИП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ структур источника напряжения с мощным многотактным ШИП на модулях IGBT / М. В. Пронин, А. С. Григорян, А. Г. Воронцов, Г. И. Прокофьев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 59–65.

2. Моделирование и исследование транзисторной системы самовозбуждения синхронного генератора / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, В. Ю. Шелюх, И. А. Пименова, А. С. Григорян // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 10. С. 50–56.

3. Self-Excitation Systems of a Synchronous Generator with a bipolar and unipolar PWM DC-DC Converters / A. S. Grigoryan, I. A. Pimenova, M. V. Pronin, V. A. Shelyuh // EPE'16 ECCE Europe. Germany: Karlsruhe, 2016. P. 1–10.

4. A model of a synchronous machine with a transistor exciter for analysis of normal operations, external and turn-to-turn faults / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, I. A. Pimenova, A. S. Grigoryan // IECON 2016. Firenze, Italy, 2016. P. 23–27.

5. Мамутов А. Р., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Моделирование обратимого статического преобразователя переменного-постоянного напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 55–59.

6. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Хон А. Ю. Управление сверхпроводящим индуктивным накопителем энергии // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4 (59). С. 20–24.

7. 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.

8. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2017.

---

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

M. V. Pronin  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## CONTROL ALGORITHMS FOR MULTISTAGE NON-SYMMETRICAL PWM DC-DC CONVERTER WORKING FOR A COMMON LOAD

*A system containing two semiconductor AC-DC voltage converters and a storage battery, working for a common DC load were considered. The devices contain multistage non-symmetrical PWM DC-DC converters, which stabilize currents or voltage at the output or charge current of the battery (depending on the specified operating mode). The algorithms for the control of converters were considered, which make it possible to ensure all modes of operation of the system in the absence of interconnections of converters in control circuits. Modes of voltage stabilization, battery charging current and converter currents in transient operating modes are considered, taking into account the exchange of energy between the converters. Mathematical and computer models of the system have been built. Calculations of electromagnetic processes are performed, diagrams of voltages and currents in the system in various modes of operation are given. The prerequisites for the occurrence of unacceptable overvoltages and means of limiting voltages are indicated.*

**Pulse-width modulation (PWM) converter, multistage, parallel work, energy recuperation, overvoltages, modeling, calculation**

---