

Ю. А. ГУНЧЕНКО

Украина, Одесская нац. академия связи им. А. С. Попова
E-mail: _ua@mail.ru

Дата поступления в редакцию
22.05—18.09 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. С. ГОЛУБ
(НПФ VD MAIS, г. Киев)

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОФАЗНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ГРАНИЧНО-РАЗРЫВНЫМ РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Предложена и описана система синхронизации и управления, обеспечивающая равномерный сдвиг электрических процессов многофазного импульсного преобразователя с гарантированным отсутствием безразрывного режима.

Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности, резервирования, унификации источников электропитания — преобразователей постоянного напряжения (ППН) является использование их модульного построения из N однотипных взаимозаменяемых модулей — силовых каналов (СК). На рис. 1 изображена структура модульного ППН с предлагаемой системой управления и синхронизации, где ИП — источник первичного электропитания с напряжением $U_{\text{п}}$, СК₁, ..., СК_N — силовые каналы с датчиками нуля тока, выходы которых подключены к общей нагрузке Н с напряжением $U_{\text{н}}$, СУ₁, ..., СУ_N — системы управления, СС — система синхронизации, Д₁...Д_N — сигналы с датчиков нулевого тока, С₁...С_N — сигналы синхронизации, Упр₁...Упр_N — сигналы управления.

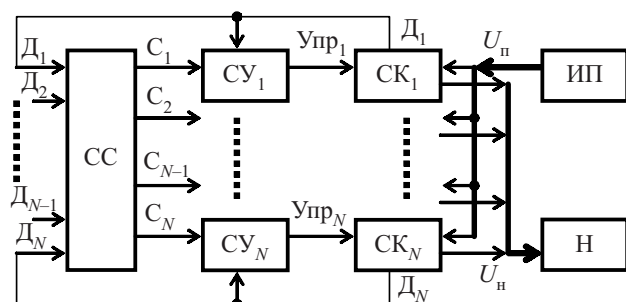


Рис. 1. Функциональная схема модульного ППН

Силовой канал представляет собой либо одну из базовых структур — понижающую, повышающую, инвертирующую (рис. 2), либо их аналоги: прямоходовой, двухтактный, мостовой преобразователи (понижающая структура), обратногоходовой преобразователь (инвертирующая структура).

При параллельном включении СК (рис. 1) модульного ППН токи по цепям питания соответствуют (рис. 2) суммарным токам транзисторных ключей — для понижающей и инвертирующей структур, суммарным токам дросселей — для повышающей струк-

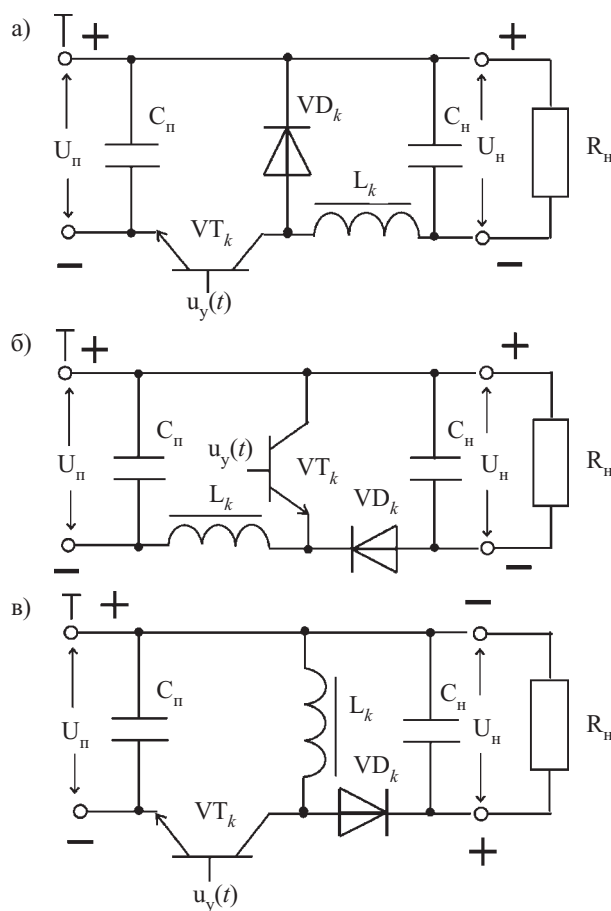


Рис. 2. Базовые структуры СК преобразователей постоянного напряжения:

a — понижающая; б — повышающая; в — инвертирующая

туры; токи по цепям нагрузки соответствуют суммарным токам диодов — для повышающей и инвертирующей структур, суммарным токам дросселей — для понижающей структуры.

Уменьшить габариты реактивных элементов (фильтров), упростить требования к элементной базе и, как следствие, удешевлять ППН позволяют многофазные импульсные преобразователи (МИП) [1—4], которые, в отличие от однофазных импульсных преобразователей (ОИП), один импульсный процесс преобразования электрической энергии разбивают на N процессов и сдвигают их во времени относительно друг друга (рис. 3).

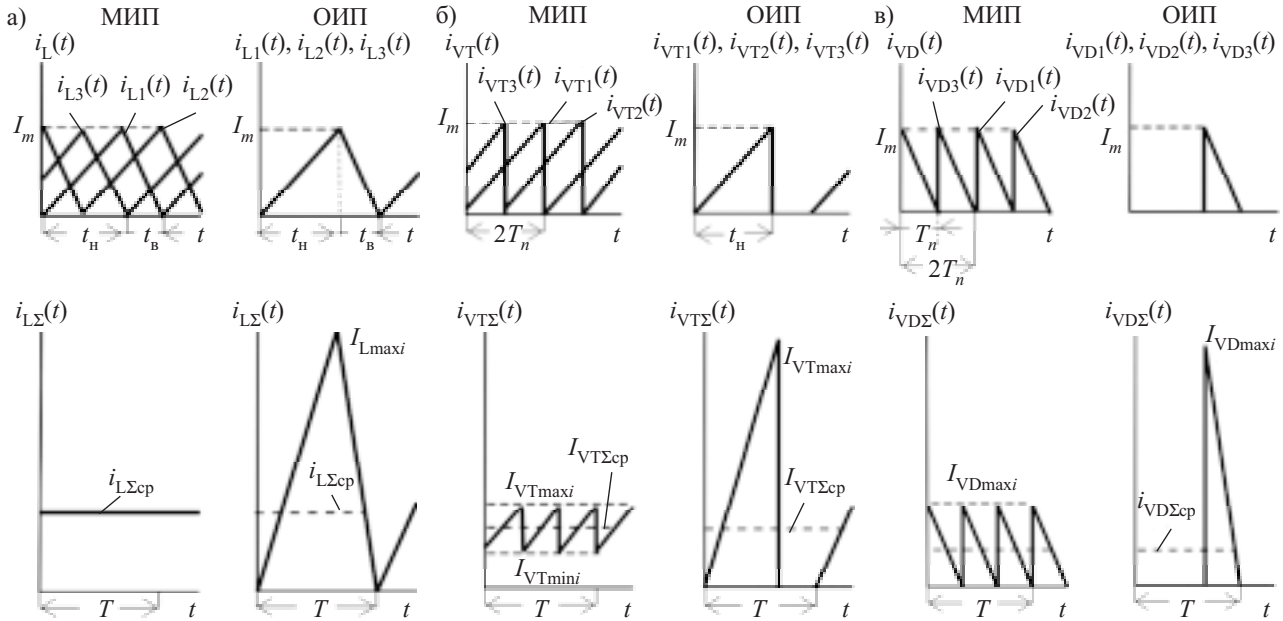


Рис. 3. Диаграммы токов в импульсных преобразователях постоянного напряжения многофазных (МИП) и однофазных (ОИП) с граничным током дросселя при их параллельном включении и суммировании токов по цепям питания и цепям нагрузки при $N=3$ силовых каналах:

а — дроссели; б — транзисторы; в — диоды

На практике часто возникает необходимость работы СК в граничном либо разрывном режимах, т. е. с гарантированным отсутствием безразрывного режима тока силового дросселя. Такие режимы позволяют уменьшить динамические потери и повысить КПД, производя переключение силовых элементов при нулевом токе; полностью использовать энергию, накопленную в дросселе; улучшить динамические характеристики преобразователя. Требования работать только в разрывном либо граничном режиме часто выдвигаются при коммутации высоких напряжений и больших мощностей нагрузки.

Граничный и разрывный режимы функционирования широко применяются в системах питания телекоммуникационной аппаратуры в корректорах коэффициента мощности — входных устройствах источников электропитания и систем электроснабжения мощностью свыше 300 Вт [3, 5, 6]. Регулировать выходное напряжение U_n с граничным (разрывным) током дросселя во всем диапазоне регулирования позволяет частотно-широотно-импульсная модуляция, при которой регулирование тока дросселя $i_{Lk}(t)$ производится изменением как длительности регулирующих импульсов ($t_{Hk} = \text{var}$), так и частоты преобразования ($f_k = 1/T_k = \text{var}$).

В отличие от известных систем синхронизации и управления МИП с широтно-импульсной модуляцией [2], в которых обеспечивается равномерный сдвиг импульсов синхронизации СК при неизменной частоте, в МИП с гранично-разрывным режимом (МИПГР) требуется одновременное изменение частоты работы силовых каналов. При этом из условия уменьшения пульсаций целесообразна работа СК как можно ближе к граничному режиму. На практике невозможно добиться абсолютной идентичности

элементов СК и управляющих сигналов. Поэтому в МИПГР один или несколько самых медленных (вялых) СК функционируют в граничном режиме, остальные — в разрывном.

Целью исследования является анализ и определение принципов построения, разработка системы синхронизации и управления МИПГР, что должно способствовать более широкому внедрению их в практику.

Все многообразие ППН [2] сводится к электрическим процессам в трех базовых структурах — понижающей, повышающей, инвертирующей. По соотношениям модели [6] построим регулировочные характеристики для граничного режима в координатах частоты, коэффициента накопления, интервала накопления (длительности импульса управления) (рис. 4).

Анализ регулировочных характеристик (рис. 4) показывает следующее.

1. Регулирование по частоте преобразования $U_n = f(f_k)$ возможно для СК понижающего и инвертирующего типов, при этом с увеличением частоты напряжение нагрузки U_n уменьшается. Для СК повышающего типа частотное регулирование во всем диапазоне невозможно в связи с неоднозначностью — одному значению частоты f_k соответствует несколько значений напряжения нагрузки U_n .

2. При регулировании по коэффициенту накопления $U_n = f(K_{Hk})$ напряжение нагрузки U_n для всех структур увеличивается с увеличением K_{Hk} . Однако сам коэффициент накопления $K_{Hk} = t_{Hk}/T_k$ — параметр, зависящий как от длительности интервала накопления $t_{Hk} = \text{var}$ (импульса управления), так и от частоты $f_k = 1/T_k = \text{var}$ (периода) преобразования, в данном слу-

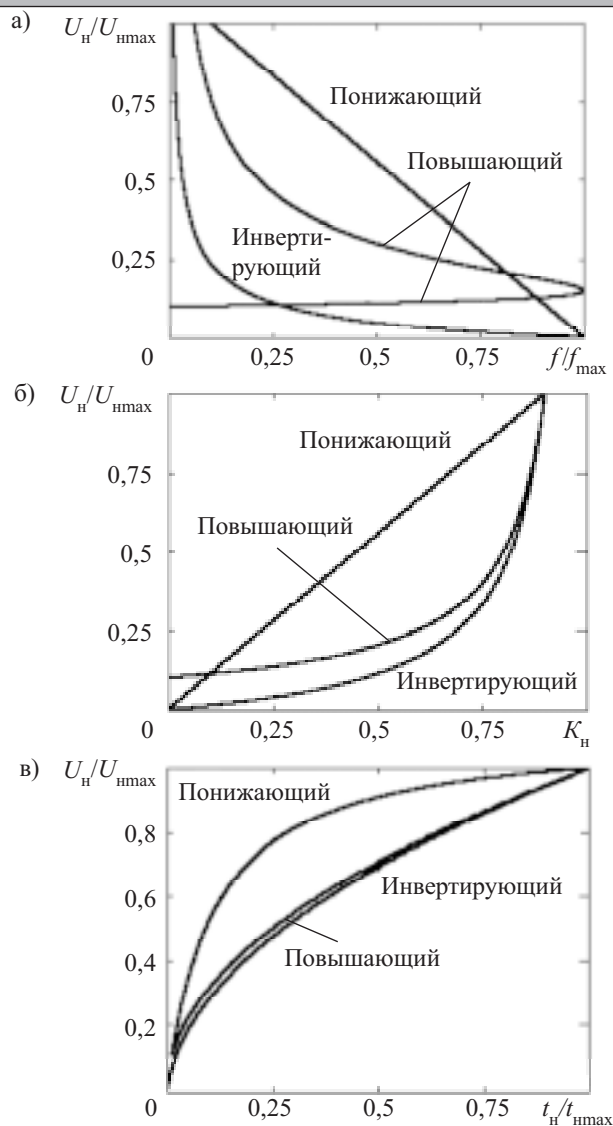


Рис. 4. Регулировочные характеристики базовых силовых каналов:

$a - U_n = f(f_k); б - U_n = f(K_{nk}); в - U_n = f(t_{nk})$

чае носит скорее вспомогательный характер. Регулирование по нему без привязки к частоте невозможно.

3. Регулирование по длительности импульса управления $U_n = f(t_{nk})$ носит однозначный и однотипный для всех структур характер. Регулирование СК с граничным режимом для любой структуры следует производить именно по этому параметру.

Обязательным условием существования граничного (разрывного) режима является включение транзисторного ключа (начало интервала накопления) не ранее, чем ток дросселя упадет до нулевого значения. Следовательно, в СК с граничным (разрывным) режимом необходим датчик нуля тока дросселя (ДТ).

Сформулируем требования к системам синхронизации (СС) и управления (СУ) МИПГР.

1. Выходное напряжение следует регулировать путем изменения длительности интервала накопления — включенного состояния транзистора $U_n = f(t_{nk})$.

2. Обязательным элементом СК должен быть датчик нуля тока дросселя.

3. Так как частота преобразования $f_k = 1/T_k = var$ в процессе регулирования меняется, соответственно должна меняться частота синхронизации системы с подстройкой под самый медленный СК, при этом интервалы времени между импульсами синхронизации любых двух соседних каналов должны быть одинаковыми.

4. Функционирование СК в граничном (разрывном) режиме позволяет отказаться от принудительного выравнивания токов (мощностей) каналов [2, 4, 7].

Известен МИП [8], система управления которого распределяет импульсы синхронизации с равномерным фазовым сдвигом на N силовых каналах, выходы которых подключены к общей нагрузке. Такой преобразователь не обеспечивает изменение частоты синхроимпульсов и не может использоваться в системах с частотно-импульсной модуляцией.

Модульная система с частотно-импульсной модуляцией [9] обеспечивает одинаковую частоту работы СК, но не обеспечивает равномерный фазовый сдвиг работы каналов, что приводит к возникновению низкочастотной составляющей во входных и выходных цепях и, как следствие, к увеличению габаритов фильтра и преобразователя в целом.

При работе МИП [10] в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки силовые каналы могут работать в разрывном, граничном или безразрывном режиме тока дросселя. Однако устройство не может обеспечить функционирование силовых каналов МИП в граничном либо разрывном режимах во всем диапазоне регулирования, что увеличивает потери и электромагнитные помехи, ухудшает динамические показатели.

Задачей предлагаемой системы управления является обеспечение режима функционирования СК преобразователя постоянного напряжения в гарантированном разрывном режиме, наиболее близком к граничному режиму, с одинаковой частотой и равномерным фазовым сдвигом между каналами. Такое регулирование уменьшает потери и электромагнитные помехи за счет переключения силовых элементов (включения транзисторного и выключения диодного ключей при нулевом токе), улучшает динамические показатели за счет полного использования энергии, накопленной в дросселе.

С учетом вышеизложенных требований предлагается система синхронизации к системам управления — типовым контроллерам, имеющим вход синхронизации и способным работать с частотно-импульсной модуляцией для любой из трех базовых структур и их аналогов (рис. 5). Здесь ГЕН — генератор, управляемый напряжением, частота которого в N раз выше частоты преобразования СК; СЧ — десятичный счетчик разрядности N (напомним, что N — количество СК); T_1, \dots, T_N — N D-триггеров; М — мажоритарный элемент; Ф — фильтр низких частот.

На рис. 6 представлены диаграммы работы СС для $N=3$ СК. Сигнал СЧ — состояние десятичного

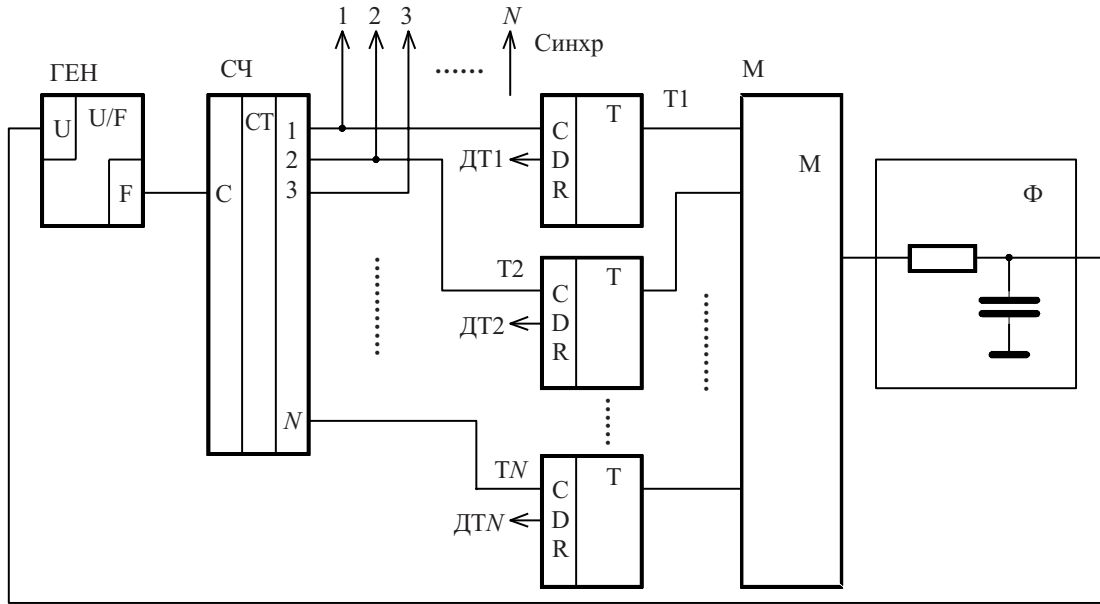


Рис. 5. Функциональная схема системы синхронизации МППР

счетчика (в данном случае их три — это 1, 2, 3). Каждый из выходов счетчика через дифференциальную цепочку, выделяющую фронт импульса (на схеме не показана), выдает сигнал, который является сигналом синхронизации (сигналы C_1, C_2, C_3) для соответствующего СК и сигналом строба по С-входу одного из D-триггеров (выход C_1 к T_1, C_2 к T_2, C_3 к T_3). На D-входы триггеров подаются сигналы с датчиков нулевого тока ДТ силовых каналов (сигналы $D_1—D_3$), логическая «1» — ток равен нулю, логический «0» — ток ненулевой (сигнал D_1 на T_1, D_2 на T_2, D_3 на T_3). Для иллюстрации на осях сигналов датчиков тока приведены диаграммы токов дросселей $i_{Lk}(t)$ соответствующих каналов. По стробу C_k соответствующий триггер сохраняет состояние D-входа.

Выходные сигналы триггеров (сигналы T_1, T_2, T_3) подаются на вход мажоритарного элемента М, вы-

ходной сигнал которого (сигнал М) принимает логическое состояние большинства входов. Сигнал с мажоритарного элемента сглаживается фильтром Ф, выходной сигнал которого (сигнал Ф) является входным для генератора, управляемого напряжением, и управляет его частотой.

Предположим, что СК₁ — самый медленный (его собственная частота минимальна), СК₃ — самый быстрый, стремится работать с максимальной частотой. Собственная частота преобразования СК₂ находится между частотами работы СК₁ и СК₃. Такие режимы могут возникнуть, например, при технологическом разбросе индуктивностей дросселей СК. Тогда в силовом канале с наименьшей индуктивностью дросселя (при равных прочих условиях) электрические процессы протекают быстрее, при наибольших индуктивностях — медленнее.

В момент времени t_1 формируется строб и синхросигнал C_1 для СК₁, т. к. СК₁ — самый медленный: период преобразования в нем еще не закончился, соответственно ток дросселя $i_{L1}(t_1) \neq 0$, а сигнал датчика тока $D_1=0$. Таким образом, выход триггера T_1 устанавливается в логический «0».

В момент времени t_2 формируется строб и синхросигнал C_2 на СК₂. К этому моменту период преобразования в СК₂ закончился, ток дросселя $i_{L2}(t_2)=0$, датчиком тока формируется сигнал $D_2=1$, который фиксируется триггером T_2 ($T_2=1$). В момент t_2 выход мажоритарного элемента переключается в «1», напряжение на выходе фильтра Ф и, соответственно, частота генератора ГЕН начинают увеличиваться.

В момент времени t_3 формируется сигнал синхронизации на СК₃ и строб записи состояния тока канала C_3 . Так как СК₃ — самый быстрый, к этому моменту ток дросселя $i_{L3}(t_3)=0$, сигнал с датчика тока $D_3=1$, на выходе триггера T_3 формируется логическая «1».

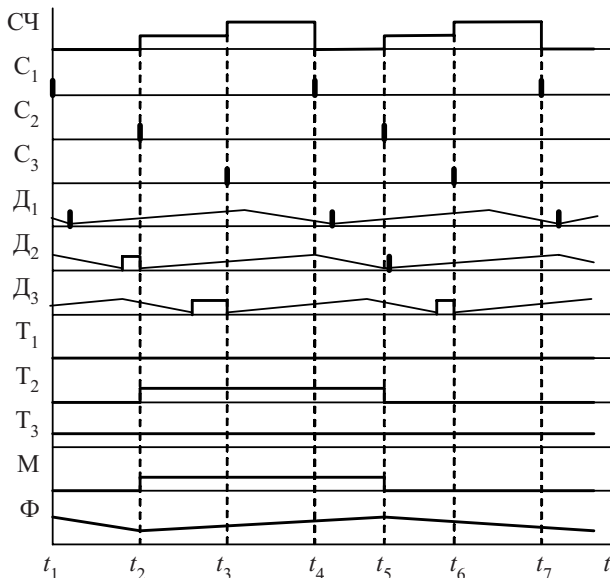


Рис. 6. Диаграммы работы системы синхронизации при трех СК

В момент времени t_4 , аналогично t_1 , формируется синхроимпульс на СК₁, в триггер Т₁ записывается 0.

В момент времени t_5 формируется сигнал синхроимпульса СК₂ и строба С₂ триггера Т₂, но в связи с увеличением частоты генератора ГЕН (с момента времени t_2) ток дросселя СК₂ не успевает упасть до нуля, и на выходе триггера Т₂ формируется логический «0». Одновременно на выходе мажоритарного элемента М также формируется логический «0» (M=0), выходное напряжение фильтра Ф и частота генератора ГЕН, управляемого напряжением, начинают уменьшаться.

В момент времени t_6 , аналогично t_3 , формируется сигнал синхронизации для СК₃, логическая «1» записывается в триггер Т₃.

В моменты времени t_7 и далее описанные процессы в системе синхронизации будут повторяться. При этом в квазиустановившемся режиме синхроимпульсы на самые медленные каналы (в примере — СК₁) будут приходить до окончания периода преобразования, на самые быстрые (в примере — СК₃) — всегда в моменты нуля тока дросселя. На каналы со средней скоростью функционирования (в примере — СК₂) синхроимпульсы могут приходить в моменты как нулевого, так и ненулевого тока дросселя. При этом частота импульсов синхронизации всех силовых каналов МИПГР всегда будет соответствовать частоте самого медленного СК (в примере СК₁: $f_2=f_1, f_3=f_1$).

Для предотвращения включения СК в моменты ненулевого тока дросселя $i_{Lk}(t) \neq 0$, когда формируется сигнал синхронизации С_к (в примере на рис. 6 моменты времени t_1, t_4, t_7 для СК₁, t_5 для СК₂), необходимо сами системы управления дополнить, минимум, тремя элементами, как это показано на рис. 7 на примере токовой системы управления. Здесь делитель R₁, R₂ — датчик напряжения нагрузки; U_{REF} — источник опорного напряжения; D₁ — усилитель сигнала рассогласования; D₂ — компаратор, сравнивающий сигнал с усилителя рассогласования (D₁) и

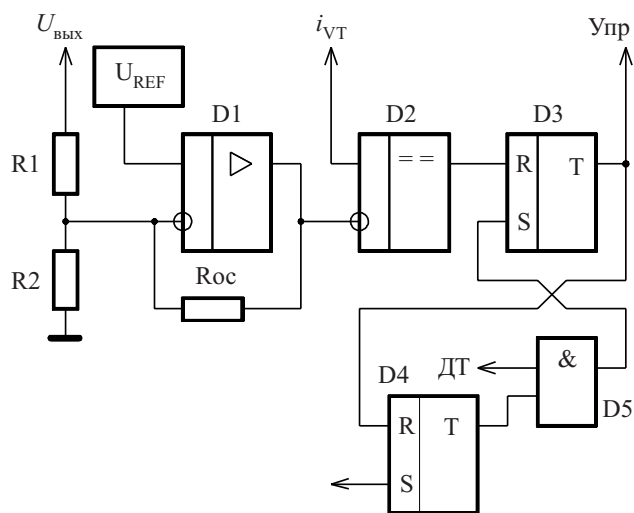


Рис. 7. Функциональная схема системы токового управления СУ_к силовым каналом

сигнал, пропорциональный току транзистора $i_{VTk}(t)$. Все это элементы, входящие в состав типового контроллера. Элементы D₃, D₄, D₅ — вспомогательные, минимально необходимые для предотвращения безразрывного режима тока дросселя, подключаются между выходом типового контроллера (выход D₂) и транзисторным ключом VT_к СК (выход Упр_к).

На рис. 8 рассмотрены все возможные варианты работы СУ_к k-го силового канала. К моменту t_1 формирования синхроимпульса С_к ток дросселя $i_{Lk}(t_1)=0$ упал до нуля (разрывный режим), следовательно, датчик тока формирует сигнал D_к=1, транзистор VT_к выключен (сигнал Упр_к=0). По импульсу синхронизации «взводится» триггер D₄, на его выходе появляется сигнал логической «1», который через элемент 2И D₅ поступает на S-вход триггера D₃. На выходе D₃ (сигнал Упр_к) формируется логическая «1» — сигнал на включение транзистора VT_к силового канала.

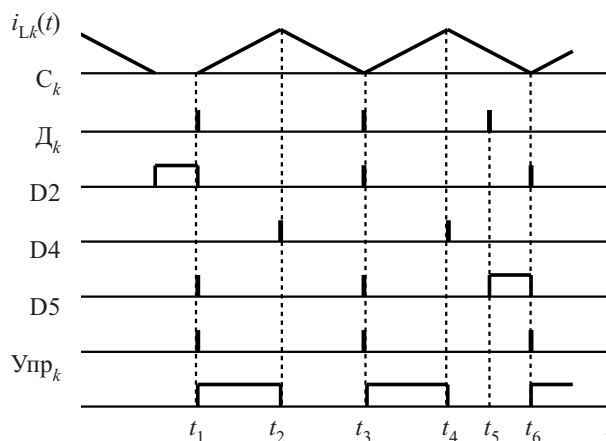


Рис. 8. Диаграммы работы системы управления k-го СК

Этот же сигнал поступает на R-вход триггера D₄ и сбрасывает его. Как только начинается интервал накопления, ток дросселя увеличивается, сигнал с датчика тока D_к изменяет свое логическое состояние на «0». В момент времени t_2 ток дросселя СК достигает своего максимального значения $i_{Lk}(t_2)=I_{mk}$, что фиксируется компаратором D₂ (сигнал D₂), при этом триггер D₃ сбрасывается, прекращается формирование сигнала управления Упр_к.

В момент времени t_3 одновременно формируются сигналы синхронизации С_к=1 и датчика тока D_к=1. При этом сигнал С_к взводит триггер D₄, с выхода которого логическая «1» через D₅ поступает на S-вход триггера D₃. На выходе D₃ (сигнал Упр_к) формируется «1», транзистор открывается, начинается новый период преобразования, а триггер D₄ сбрасывается. СК_к работает в граничном режиме.

В момент времени t_4 , аналогично моменту t_2 , ток дросселя достигает своего пикового значения, триггер D₃ сбрасывается, что формирует сигнал Упр_к=0 и закрывает транзистор СК — начинается интервал возврата.

В момент времени t_5 приходит импульс синхронизации С_к, который взводит триггер D₄ (D₄=1). Однако на выходе элемента 2И D₅ логическая «1» по-

является в момент времени t_6 , когда ток дросселя спадает до нуля. Таким образом, сигнал управления на транзистор V_{T_k} СК поступает по сигналу синхронизации, но не ранее окончания интервала возврата.

Предложенные схемы и алгоритм работы системы управления обеспечивают синхронизацию силовых каналов МИПГР с равномерным сдвигом, гарантируя функционирование каждого СК в граничном либо разрывном режиме с одинаковой частотой.

Выводы

1. Построены и проанализированы регулировочные характеристики понижающего, повышающего, инвертирующего силовых каналов. Показано, что для системы управления любой из трех рассмотренных структур подходит регулирование по длительности управляющего импульса (интервала накопления).

2. Определены требования к системе синхронизации и управления многофазного импульсного преобразователя с гранично-разрывным режимом.

3. Предложена функциональная схема синхронизации, описана ее работа на примере трех силовых каналов.

4. Предложена доработка типового контроллера управления с частотно-импульсной модуляцией для обеспечения гранично-разрывного характера тока дросселя силового канала во всем диапазоне регулирования. Рассмотрено функционирование доработанной системы управления на примере системы управления с токовым регулированием.

5. Для предложенной системы синхронизации и управления показано гарантированное отсутствие безразрывного режима тока дросселя и правильная синхронизация систем управления силовыми каналами.

Для дальнейших исследований можно рекомендовать анализ быстродействия и динамических показателей предложенной системы, выявление ограничений по частотам, количеству силовых каналов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кадацкий А. Ф., Грабовой А. А., Гурков В. Г. Использование многофазных принципов преобразования электроэнергии в устройствах электропитания телекоммуникационных систем // Праці УНДІРТ.— 2003.— № 2–3.— С. 66—68.
2. Кадацкий А. Ф. Теория и проектирование многофазных импульсных преобразователей постоянного напряжения / Автореф. дис. ... докт. техн. наук.— М.: МЭИ, 1996.
3. Кадацкий А. Ф., Гунченко Ю. А. Электрические процессы в модульных импульсных преобразователях постоянного напряжения с граничным режимом функционирования // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.— 2004.— № 1.— С. 9—15.
4. Кадацкий А. Ф. Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при разрывном режиме работы // Электронная техника в автоматике.— 1985.— Вып. 16.— С. 55—67.
5. Гунченко Ю. А. Использование частотно-широко-импульсной модуляции в преобразователях напряжения // Мат-лы 7-го Междунар. молодежн. форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке».— Харьков, ХНУРЭ.— 2003.— С. 189.
6. Кадацкий А. Ф., Гунченко Ю. А. Электрические процессы в импульсных преобразователях постоянного напряжения с граничным режимом функционирования // Праці УНДІРТ.— 2003.— № 2–3.— С. 77—79.
7. Глебов Б. А., Новиков А. А., Новикова Т. Н. Способы параметрического выравнивания выходных мощностей преобразователей в многоячейковых источниках электропитания // Техническая электродинамика.— 1983.— № 6.— С. 43—47.
8. Пат. 6285571 В1 США. Method and apparatus for an efficient multiphase switching regulator / S. W. Brooks, L. J. Maggloino.— 2001.
9. Пат. 5724237 США. Apparatus and method for sharing a load current among frequency-controlled D.C.-to D.C. converters / P. L. Hunter; Unipower Corp.— 1998.
10. Пат. 6381155 США. Method for clusterized power sharing conversion and regulation of the primary power source within a converting and regulating power supply, and system / A. F. Kadatsky, E. V. Karpov, N. I. Volovets.— 2002.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Четырнадцатая ежегодная международная научно-практическая конференция студентов и аспирантов
«РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА»
 28—29 февраля 2008, г. Москва

Организаторы

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Московский энергетический институт (технический университет)
 Академия электротехнических наук
 Ассоциация международных отделов технических университетов стран Центральной и Восточной Европы (АМО)
 Институт инженеров по электротехнике и электронике США (IEEE) (студенческая секция)

Адрес оргкомитета

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14,
 МЭИ (ТУ), ИРЭ, деканат РТФ.
 Телефоны: (495) 362-7309, (495) 362-7104
 (Зайко Елена Семеновна)
 E-mail: istc@mpei.ru

Научные направления:

- ✦ радиотехника и связь;
- ✦ электроника;
- ✦ медицинская электроника;
- ✦ информационные технологии;
- ✦ электротехника, электромеханика и электротехнологии;
- ✦ инженерная экология;
- ✦ экономика и менеджмент;
- ✦ энергетика и экономика предприятий;
- ✦ теплофизика;
- ✦ теплоэнергетика;
- ✦ энергомашиностроение;
- ✦ электроэнергетика