

# Трехуровневый повышающий преобразователь:

## непрерывные и прерывистые токи, несимметричный режим работы

**Растущая необходимость в более эффективном производстве, распределении и преобразовании электроэнергии заставляет проводить исследования новых топологий преобразователей. В статье сравниваются важные параметры многоуровневых и трехуровневых повышающих преобразователей (ТПП), выполненных на основе переключающих конденсаторов и ограничительных диодов. Основное внимание уделено трехуровневому повышающему преобразователю с ограничительными диодами, выявлению особенностей его работы с непрерывными и прерывистыми токами дросселя в статике и динамике. Рассмотрен несимметричный режим работы такого преобразователя. Анализ подтвержден моделированием и экспериментами.**

**Валерий Мелешин  
Сергей Хухтиков  
Семен Сачков**

### Введение

Традиционные неизолированные повышающие преобразователи, обычно называемые boost converters (BC) [1], широко применяются в одно-, трех- и многофазных корректорах коэффициента мощности (ККМ), а также в импульсных регуляторах, предназначенных для получения более высокого напряжения на нагрузках от источников с низким уровнем напряжения. Их применения охватывают системы генерации и распределения с возобновляемыми источниками энергии.

Кроме того, они востребованы в транспортных системах, причем во всех случаях позволяют создать высоковольтную шину постоянного напряжения. Задачи преобразования энергии, которые становятся все актуальнее, а также предъявляемые требования, которые делаются все более жесткими, заставляют вести поиск других повышающих топологий, позволяют миниатюризировать устройство, увеличивать КПД и снижать стоимость. Неизолированные повышающие преобразователи, отличающиеся от традиционных, в том числе и многоуровневые, рассматривались в литературе. Трехуровневые повышающие топологии были представлены применительно к трехфазному выпрямителю [2] и для однофазного ККМ в работе [3].

Четырехуровневые двухквadrантные DC/DC-преобразователи были предложены в работе [4]. Их можно использовать и как однонаправленные при получении многих полезных свойств в случае повышения напряжения, но авторы [4] не указали на такую возможность. Новая топология многофазных ТПП со связанными дросселями, предложенная для снижения пульсаций входного тока и радиопомех,

рассматривалась в работе [5]. В работе [6] трехуровневая версия повышающего преобразователя с переключающим конденсатором (FCBC) применялась в ККМ малой мощности. Трехфазная система, работающая от солнечных батарей (СБ) с ТПП, в которой осуществлялось управление с поиском точки максимальной мощности (МРРТ), представлена в работе [7]. В работе [8] обсуждаются два возможных решения построения изолированных DC/DC-преобразователей для вспомогательного источника, применяемого на железной дороге.

Одна из рассматриваемых топологий содержит модуль ТПП, за которым следует полумостовой преобразователь с переключением на нуле тока.

В работе [9] описывается многоуровневый повышающий преобразователь, работающий от возобновляемых источников энергии. Авторы называют такие преобразователи «многофазными вертикальными структурами». Рассмотрены четырех- и пятиуровневые преобразователи с различным порядком переключения регулирующих элементов, а также возможность реализации переключения при нуле напряжения (ZVS). Показаны результаты моделирования четырехуровневого преобразователя с параметрами  $U_{вх} = 800$  В,  $U_{вых} = 3$  кВ,  $P_{вых} = 150$  кВт.

В работе [10] рассмотрены архитектуры станций на солнечных батареях, построенных по распределенному принципу. Такие станции являются альтернативой системам с классическим основным инвертором. В них востребованы преобразователи с высоким КПД и простыми топологиями, помогающие снизить стоимость системы. Взамен традиционных BC в работе [10] предложено применять ТПП для выполнения жестких технических требований.

**Таблица.** Соотношения для сравнения действующих значений токов

Схема	Режим	Конденсатор	$I_{rms}/I_{load}$
ТПП	Без перекрытия С перекрытием	C1 (C2)	$\sqrt{D/(2-D)}$ $\sqrt{(1+D)/(1-D)}$
Преобразователь с переключающим конденсатором	Без перекрытия С перекрытием	C1	$2\sqrt{D/(2-D)}$ $2/\sqrt{1-D}$
	Без перекрытия С перекрытием	C2	$\sqrt{D/(2-D)}$ $\sqrt{(1+D)/(1-D)}$

В статье [11] раскрывается двухступенчатая архитектура энергосистемы на основе СБ. Два модуля ТПП, каждый из которых имеет выходную мощность 500 кВт, входят в систему, имеющую общую мощность 1 МВт.

Выходная ступень (инвертор) с улучшенной системой управления снижает искажения напряжения в сети. Каждый модуль ТПП работает от своих СБ при входном напряжении 1050 В. Двухуровневый выходной инвертор обеспечивает 690 В АС в сети.

Приведенный краткий обзор публикаций по многоуровневым повышающим преобразователям показывает растущий интерес разработчиков к новым решениям. Это происходит вследствие вполне ожидаемого улучшения характеристик преобразователей по сравнению с имеющимися у традиционных ВС, особенно там, где работа происходит при большой кратности входных напряжений и большой мощности.

Авторы перечисленных работ никогда раньше не показывали основных различий между повышающими многоуровневыми преобразователями с переключающими конденсаторами и преобразователями, использующими ограничительные диоды. В этой статье частично восполнено отсутствие такой информации. Основное внимание будет уделено ТПП. Такой преобразователь способен работать в двух основных режимах — без перекрытия или с перекрытием ключей. В свою очередь, работа в каждом из режимов может происходить либо с непрерывным током (continuous current — CC), либо с прерывистым током (discontinuous current — DC) в дросселе.

Работа ТПП с прерывистым током ранее не рассматривалась. В зависимости от того, каким является ток в дросселе — непрерывным или прерывистым, характеристики как установившегося, так и переходного процесса существенно изменяются.

Ранее в литературе можно было найти только упоминание о несимметричной работе ТПП [3] и некоторые методы исправления этого недостатка [7].

Данная статья предназначена для инженеров, занимающихся как разработкой силовой части, так и системой управления преобразователем. Они могут найти в ней информацию, полезную для их деятельности. Прежде всего, проводится анализ работы ТПП с прерывистым током как для режима без перекрытия, так и для режима с перекрытием ключей. Рассмотрены переходные процессы в этих режимах с прерывистым и непрерывным токами и показаны значительные различия в них, происходящие при этом. Раскрыты причины

несимметрии в ТПП и предложены различные варианты ее устранения.

При правильном применении ТПП может оказаться мощным инструментом, помогающим преодолевать проблемы, происходящие из-за требований работы в условиях широкого изменения входных/выходных параметров, ограничений в функционировании компонентов, а также необходимости работать на повышенных частотах преобразования.

### Многоуровневые топологии повышающих преобразователей

Многоуровневые преобразователи с переключающим конденсатором известны достаточно давно [6]. Прямым конкурентом такой топологии является многоуровневый повышающий преобразователь с ограничительными диодами. Четырехуровневые варианты этих схем показаны на рис. 1, 2. На первый взгляд, обе схемы как будто равноценны: они используют одинаковое число компонентов, у обеих есть режимы без перекрытия ключей и с перекрытием, а также существует та же самая регулировочная характеристика (РХ) при НТ в дросселе. В самом общем случае при работе без перекрытия обе схемы имеют РХ, определяемую соотношением:

$$V_0 = \frac{V_{in} N}{N - (N - 1)D}, \quad (1)$$

где  $N$  — число ключей в «стойке» схемы;  $D = Nt_i/T$  — коэффициент заполнения, изменяющийся от 0 до 1;  $T$  — период переключения одного ключа;  $t_i$  — временной интервал накопления энергии в дросселе (время импульса).

Когда любая из многоуровневых топологий работает с перекрытием ключей, существуют две основные последовательности переключения. В первой имеется  $N-1$  ключей, проводящих

ток в течение всей паузы. Во второй последовательности имеется дополнительный интервал паузы за период переключения, когда все ключи разомкнуты. Многоуровневая схема имеет лучшую РХ, когда работа происходит при первой последовательности. Полагая, что ток в дросселе непрерывный, РХ в этом случае определяется соотношением

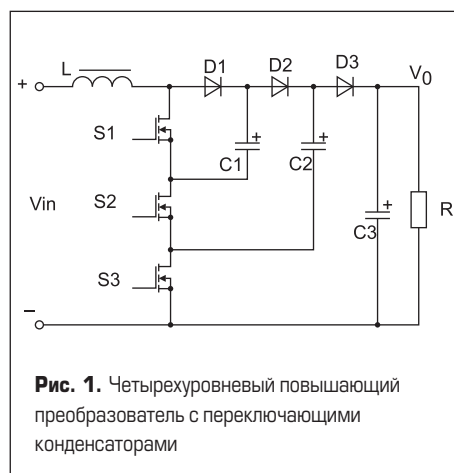
$$V_0 = \frac{V_{in} N}{1 - D}. \quad (2)$$

Помимо худшей РХ, частота переключения каждого ключа при второй последовательности вдвое больше, чем при первой. Следовательно, первая последовательность переключения транзисторов в схеме более выгодна.

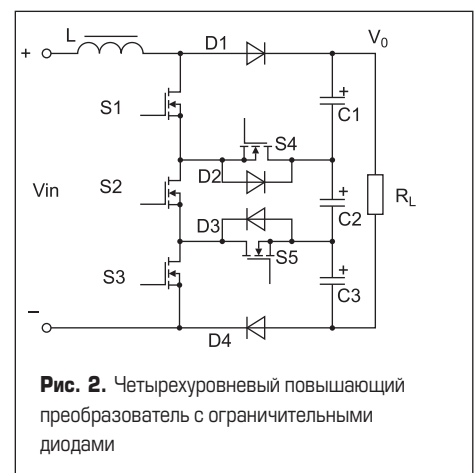
Имеются различия в работе обеих топологий (рис. 1, 2). Во-первых, в схеме с переключающими конденсаторами имеется общий провод, соединяющий вход и выход. У преобразователя с ограничительными диодами (рис. 2) такого соединения нет, и потому топология должна использовать вспомогательный источник, изолированный от входа. Тем не менее в настоящее время этот недостаток не может рассматриваться как решающий.

Второе различие между двумя топологиями более существенно. Конденсаторы в тех схемах, где они являются переключающими, работают с различными уровнями напряжения, в то время как в схемах с ограничительными диодами все они имеют одинаковое напряжение, равное  $V_0/N$ . Это является очевидным преимуществом таких схем. Токовые нагрузки конденсаторов в обеих топологиях также различны. В таблице показано в качестве примера отношение действующих значений токов в конденсаторах к току нагрузки для трехуровневых схем. Обе топологии работают в режимах как с перекрытием, так и без него. Конденсатор C2 в преобразователе с переключающим конденсатором подключен к выходу.

Из таблицы видно, что конденсатор C1 в преобразователе с переключающим конденсатором нагружен большим током, чем в схеме ТПП. Этот факт подтверждает недостаток преобразователя с переключающим конденсатором. Аналогичные результаты получены и для многоуровневых структур.



**Рис. 1.** Четырехуровневый повышающий преобразователь с переключающими конденсаторами



**Рис. 2.** Четырехуровневый повышающий преобразователь с ограничительными диодами

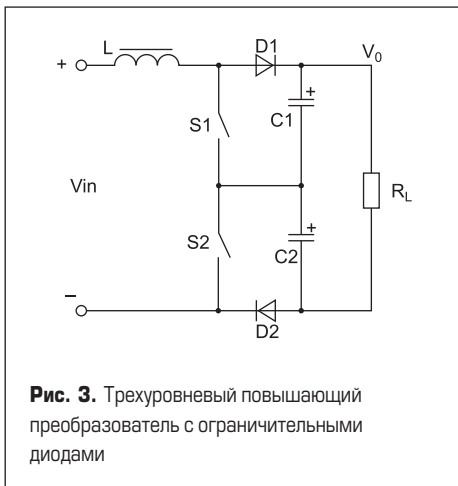


Рис. 3. Трехуровневый повышающий преобразователь с ограничительными диодами

**Работа с непрерывным и прерывистым токами в дросселе ТПП**

Схема ТПП с ограничительными диодами показана на рис. 3.

**Режим работы без перекрытия**

**Непрерывный ток в дросселе**

Диаграммы в ТПП, работающих без перекрытия с непрерывным током в дросселе, представлены в работе [13].

Рассматривая уравнения для схемы в четырех интервалах на периоде работы одного ключа и произведя усреднение на этом периоде, получим:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{2-d}{2L}v_{C1} - \frac{2-d}{2L}v_{C2} + \frac{v_{in}}{L} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{2-d}{2C}i_L - \frac{v_{C1}}{CR} - \frac{v_{C2}}{CR} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{2-d}{2C}i_L - \frac{v_{C1}}{CR} - \frac{v_{C2}}{CR} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $C = C_1 = C_2$ ;  $d$  — усредненный коэффициент заполнения.

После линеаризации системы (3) получим уравнения, являющиеся основой для построения более сложных моделей, включающих управление с обратными связями и воздействием по возмущению (Feedforward).

**Прерывистый ток в дросселе**

Для этого случая диаграммы показаны на рис. 4. Выражение для статического коэффициента передачи  $M$  (PX) как функции от входного напряжения  $V_{in}$ , (4) где  $D = 2T_f/T$  — коэффициент заполнения ключа, работающего без перекрытия;  $f$  — частота работы одного ключа;  $\tau = L/R_L$  — постоянная времени нагрузки;  $T_f$  — интервал накопления энергии в дросселе.

Если  $D + D_p = 1$  (где  $D_p = 2T_p/T$  — коэффициент заполнения интервала паузы,  $T_p$  —

$$M = \frac{V_O}{V_{in}} = \frac{\left[ 1 - D^2 / (16\tau f) + \sqrt{\left( 1 + D^2 / (16\tau f) \right)^2 + 4D^2 / (16\tau f)} \right]}{2}, \quad (4)$$

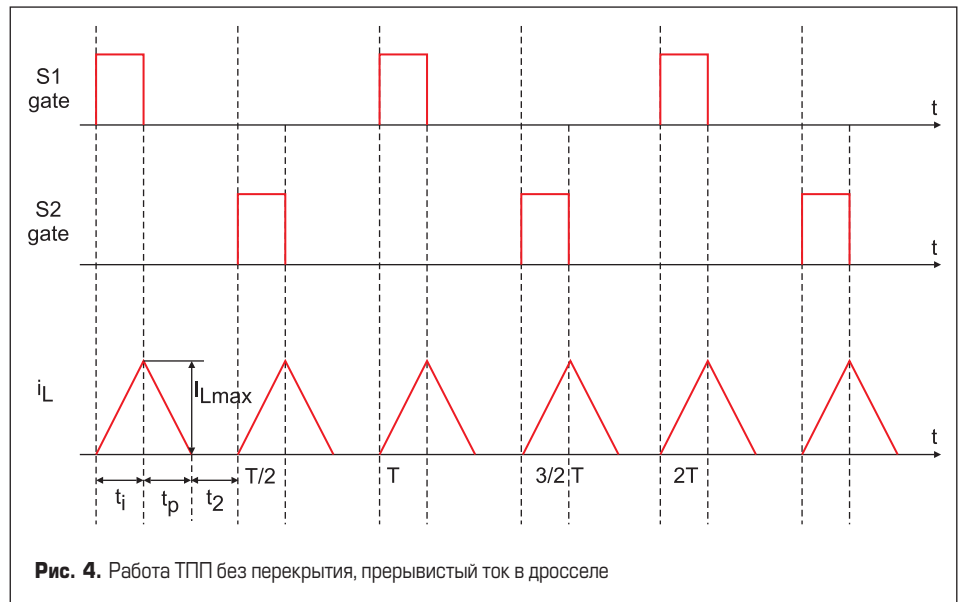


Рис. 4. Работа ТПП без перекрытия, прерывистый ток в дросселе

время снижения тока в дросселе), получим границу между непрерывным и прерывными токами в дросселе.

Выражение, определяющее граничное значение  $(\tau f)_b$ , при котором происходит переход от режима непрерывного тока к прерывистому, записывается как функция коэффициента передачи  $M$ :

$$(\tau f)_b = \frac{(2-M)(M-1)}{4M^3}. \quad (5)$$

Если параметр  $\tau f$  превышает значение из уравнения (5), работа будет происходить при непрерывном токе дросселя (CC), а в противном случае — при прерывистом токе (DC). Получение динамических характеристик ТПП в таком режиме требует рассмотрения шести временных интервалов за период работы ключа. Соответствующая нелинейная система уравнений в форме переменных состояния после усреднения имеет вид:

$$\begin{cases} i_{LMAX} = \frac{v_{in} - v_{C1}}{2Lf} d, \\ v_{in}d_{\Sigma} + dv_o / 2 - d_{\Sigma}v_o = 0, \\ C \frac{dv_{C1}}{dt} = -di_L / 2 + d_{\Sigma}i_L - \frac{v_o}{R_L} \end{cases}. \quad (6)$$

При получении соотношений (6) было сделано допущение, что производная тока дросселя равна нулю за один период переключения.

Следующие определения были приняты в уравнениях (6):

$$d_{\Sigma} = 2(t_i + t_p)/T,$$

где  $T = 1/f$  — частота переключения одного ключа;  $t_i$  — временной интервал работы ключа в проводящем состоянии;  $t_p$  — время снижения тока в дросселе;  $R_L$  — сопротивление нагрузки;  $L$  — индуктивность дросселя.

После процедуры линеаризации уравнений (6) первое уравнение позволяет получить ту часть непрерывной линейной модели, которая связана с входным напряжением. Второе и третье уравнения приводят к другой части модели, связанной с током нагрузки, токами в конденсаторах и зависимых источниках тока.

**Режим работы с перекрытием**

**Непрерывный ток в дросселе**

Диаграммы в ТПП, работающих с перекрытием, показаны в работе [13]. Уравнения для непрерывного тока записываются в четырех интервалах. После процедур усреднения и линеаризации можно получить линейную непрерывную модель для режима с перекрытием при непрерывном токе в дросселе.

**Прерывистый ток в дросселе**

Диаграммы процессов в ТПП, работающих с перекрытием и в режиме прерывистого тока, показаны на рис. 5.

Для прерывистого тока получено следующее выражение для регулировочной характеристики:

$$M = 1 + \sqrt{1 + D^2 / (4\tau f)}. \quad (7)$$

Если работа происходит в установившемся режиме и  $D + D_p = 1$ , то преобразователь останется в граничном режиме между непрерывным и прерывистым токами. Значение  $(\tau f)_b$  определяет эту границу:

$$(\tau f)_b = (M-2)/4M^3. \quad (8)$$

Получение динамической модели требует рассмотрения работы преобразователя на шести временных интервалах, как это происходило для решения без перекрытия и при работе с прерывистым током.

В результате, после применения метода усреднения, получается система нелинейных

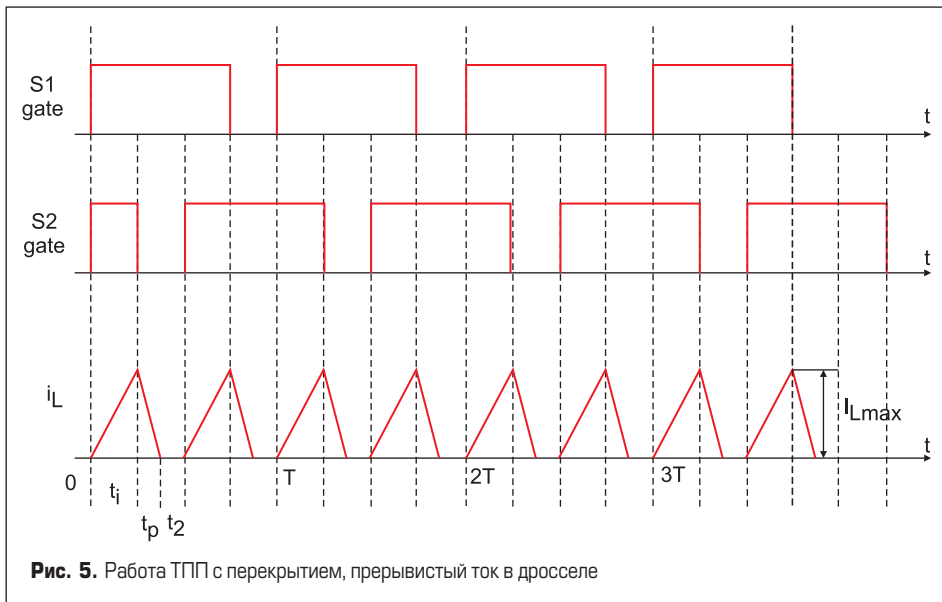


Рис. 5. Работа ТПП с перекрытием, прерывистый ток в дросселе

уравнений. При этом было учтено, что производная тока дросселя равна нулю за период работы ключа:

$$\begin{cases} i_{LMAX} = \frac{v_m d}{2Lf} \\ v_m d_\Sigma - d_p v_o / 2 = 0, \\ C \frac{dv_{C1}}{dt} = d_p i_L - \frac{v_o}{R_L} \end{cases} \quad (9)$$

где  $d_p = 2t_p / T$ ; остальные определения такие же, как и для системы уравнений (6).

### Несимметричный режим работы ТПП

Несимметрия в работе ТПП обнаруживается, когда средние значения напряжений на конденсаторах становятся неравными, что может быть вызвано различными причинами:

- производственным разбросом в значениях емкостей конденсаторов;
- разбросом параметров полупроводников (например,  $R_{ds\ on}$  ключей и  $V_f$  диодов);
- неодинаковостью параметров воздушного форсированного охлаждения ключей и диодов;
- разбросом выходных параметров драйверов, управляющих ключами.

Последствия несимметричной работы приводят к нарушению расчетных значений напряжений на конденсаторах, ключах и диодах схемы. В свою очередь, этот факт может приводить к недопустимому превышению параметров силовой части схемы. При работе ТПП методы управления несимметричным режимом могут быть различными.

Например, возможно шунтирование ключей резисторами для выравнивания напряжений на конденсаторах. Но при этом очевидно, что потери возрастают при усложнении конструкции и недостаточной эффективности

решения. Такой метод будет давать результат только в случае, если основной причиной является различие в токах утечки обоих ключей.

Другой метод заключается в подключении к каждому ключу преобразователя дополнительной цепочки, которая состоит из последовательно включенных резистора и вспомогательного ключа R1, R2, S3, S4 соответственно (рис. 6). Ключи S3 и S4 управляются от блока, подавляющего несимметрию. Входные сигналы на этот блок поступают от конденсатора C2 и выходного напряжения. Эта цепь подавления несимметричного режима не подключается к основному контроллеру (последний не показан на рис. 6) и имеет определенные преимущества по сравнению с предыдущим решением, в котором применены резисторы, непосредственно подключенные к ключам S1 и S2:

- потери в резисторах R1, R2 меньше снижают КПД преобразователя;
- вспомогательные ключи S3 и S4 применяются со значительно меньшим допустимым током, чем основные ключи S1 и S2;
- схема, показанная на рис. 6, подавляет несимметрию, появляющуюся по любой причине, а не только вследствие неравенства токов утечек основных ключей.

Подключение дополнительных элементов и отдельной схемы управления являются очевидными недостатками рассмотренного решения, которые основаны на изменении длительностей импульсов ключей ТПП, с целью получения требуемого результата. Для достижения этой цели контроллер (как правило, DSP) выполняет все управляющие функции, и не только для ТПП, но и для других устройств, входящих в систему. Обязательным при этом является измерение напряжения на одном из конденсаторов. Затем выходной сигнал этого датчика сравнивается с выходным напряжением  $V_o$ . При использовании цифрового контроллера возможны следующие варианты работы:

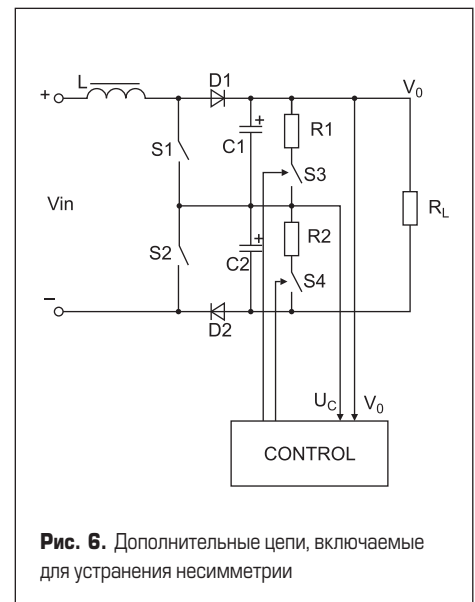


Рис. 6. Дополнительные цепи, включаемые для устранения несимметрии

- сигнал несимметрии воздействует только на один ключ ТПП;
- сигнал несимметрии воздействует на оба ключа одновременно для снижения несимметрии;
- сигнал несимметрии воздействует на один или оба ключа с использованием релейного принципа работы и зоны нечувствительности.

Во всех случаях требуется модель силовой части ТПП для проверки работы системы, основанной на принципе цифрового управления.

Ниже представлены уравнения для режима работы с перекрытием:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1-d}{2L} v_{C1} - \frac{1-d}{2L} v_{C2} + \frac{v_m}{L} + a(v_{C1} - v_{C2}) / 2 \\ \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{1-d}{2C} i_L - \frac{v_{C1}}{CR} - \frac{v_{C2}}{CR} - ai_L / 2 \\ \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1-d}{2C} i_L - \frac{v_{C1}}{CR} - \frac{v_{C2}}{CR} + ai_L / 2 \end{cases} \quad (10)$$

где  $a$  — сигнал на ключ, устраняющий режим несимметрии.

После линеаризации (10) полученная схема управления используется для расчетов и моделирования.

### Моделирование

Модели ТПП, показанные в предыдущих разделах, были проверены с помощью MATLAB Simulink. Переходный процесс, полученный с помощью непрерывной линейной модели, упоминавшейся в разделе «Режим работы с перекрытием», показан на рис. 7. Работа модели происходила при следующих условиях:  $V_{in} = 110$  В;  $V_o = 400$  В;  $R_L = 160$  Ом;  $L = 432$  мкГн. Коммутирующее сопротивление нагрузки  $R_{L1} = 124,4$  Ом. Параметры ПИД-регулятора в контуре управления выходным напряжением:  $K_p = 0,048$ ;  $K_i = 11,2 \times 10^{-3}$ ;  $K_d = 1,8$ ; усиление в контуре тока дросселя  $1,24 \times 10^{-3}$ .



Переходный процесс для режима с перекрытием (ток в дросселе прерывистый) получен с помощью модели (9) после ее линейризации и показан на рис. 8. Условия моделирования те же самые, что и в предыдущем случае, за исключением других значений сопротивлений нагрузки:  $R_L = 800 \text{ Ом}$ ;  $R_{L1} = 641 \text{ Ом}$ .

Модель силовой части, показанная на рис. 9, выполнена на основе линейризации уравнений (10) для режима с перекрытием, ток в дросселе непрерывный. Канал регулирования выходного напряжения взаимодействует с каналом компенсации несимметрии. Несимметричный режим создавался подключением резистора через дополнительный ключ к нижнему конденсатору ТПП. Это дополнительное сопротивление составляет 1700 Ом. Система подавления несимметричного режима была выполнена статической. Результат работы модели (рис. 9) показан на рис. 10. Сигнал несимметрии воздействует на оба ключа ТПП. Погрешность симметрирования составила 1,4 В, а номинальное напряжение на каждом конденсаторе равнялось 200 В. Параметры ТПП при моделировании:  $V_{in} = 110 \text{ В}$ ;  $V_o = 400 \text{ В}$ ;  $R_L = 145,5 \text{ Ом}$ . Если сигнал несимметрии воздействует только на один ключ, ошибка составляет 4 В, другими словами, эффективность работы системы компенсации несимметрии в этом случае оказывается намного хуже.

### Экспериментальные результаты

Начнем этот раздел с подтверждения формулы  $PX$  (4), полученной для режима без перекрытия, ток в дросселе прерывистый. На рис. 11, помимо экспериментальной кривой, приведены также расчетные кривые параметра  $M$  в зависимости от коэффициента заполнения  $D$  ( $R_L = 368$  и  $700 \text{ Ом}$ ), а также от этого же коэффициента при непрерывном токе дросселя (расчет проводился по выражению  $M = 2/(2-D)$ ). На рис. 11 видно явное отличие  $PX$  при работе с непрерывным и прерывистыми токами дросселя, а также хорошее совпадение между расчетными результатами и экспериментальными. Опыты проводились при следующих условиях:  $V_{in} = 90 \dots 140 \text{ В}$ ,  $V_o = 150 \text{ В}$ ,  $f = 10 \text{ кГц}$ ,  $L = 432 \text{ мкГн}$ . Аналогичные кривые, полученные для режима с перекрытием и прерывистым током, представлены на рис. 12. Расчетные кривые получены при нагрузке  $R_L = 950$  и  $2000 \text{ Ом}$  (формула (7)), эксперимент проводился при  $R_L = 950 \text{ Ом}$ . Частота работы дросселя и его индуктивность были те же самые, как и в предыдущем случае. Там же (рис. 12) кривая для непрерывного тока в дросселе рассчитывалась в соответствии с формулой  $M = 2/(1-D)$ .

На рис. 13 можно видеть переходный процесс, полученный в результате эксперимента (режим с перекрытием, непрерывный ток в дросселе). Результаты хорошо совпадают с результатами моделирования, которые были получены для того же режима и представлены на рис. 7. Данные эксперимента:  $V_{in} = 110 \text{ В}$ ,  $V_o = 400 \text{ В}$ ,  $R_L = 160 \text{ Ом}$ ,  $R_{L1} = 124,4 \text{ Ом}$ , шкала напряжения 10 В/дел, шкала тока 20 А/дел.

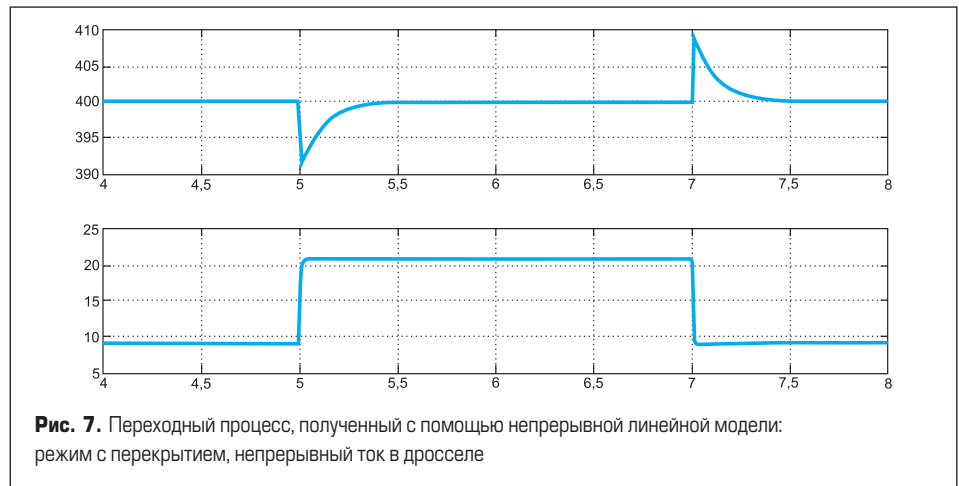


Рис. 7. Переходный процесс, полученный с помощью непрерывной линейной модели: режим с перекрытием, непрерывный ток в дросселе

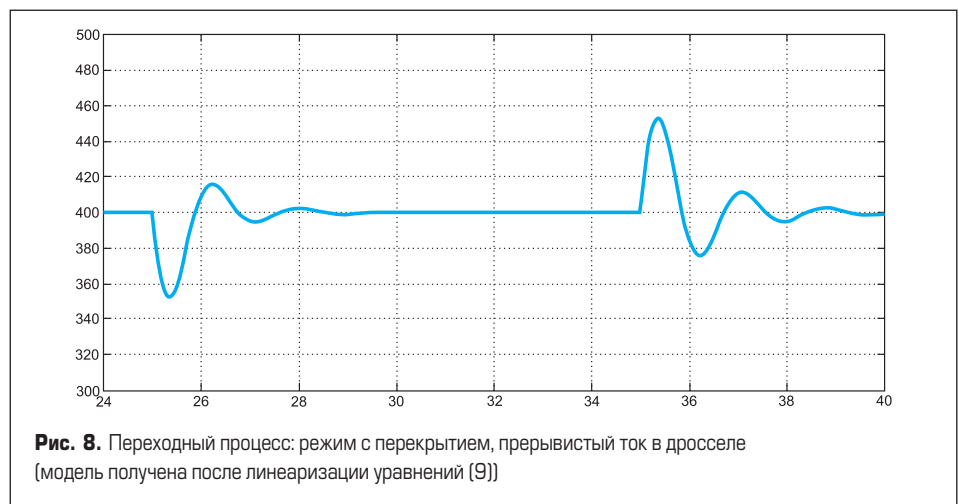


Рис. 8. Переходный процесс: режим с перекрытием, прерывистый ток в дросселе (модель получена после линейризации уравнений (9))

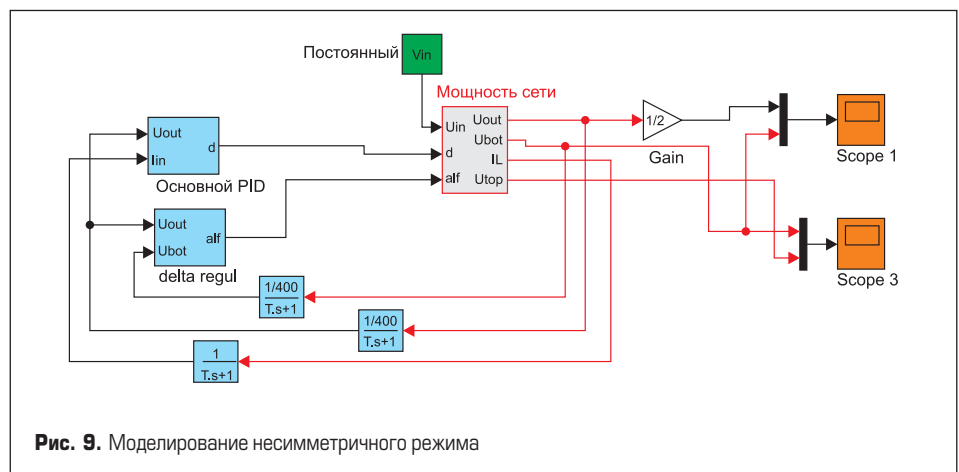


Рис. 9. Моделирование несимметричного режима

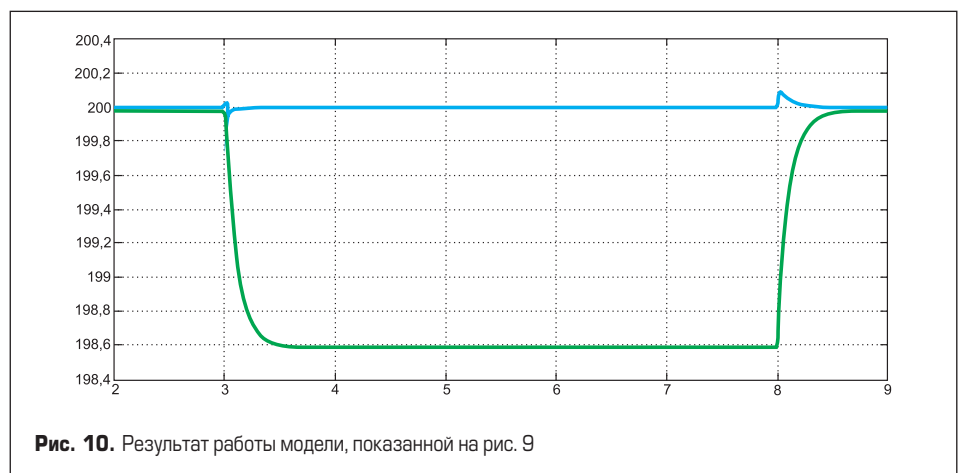
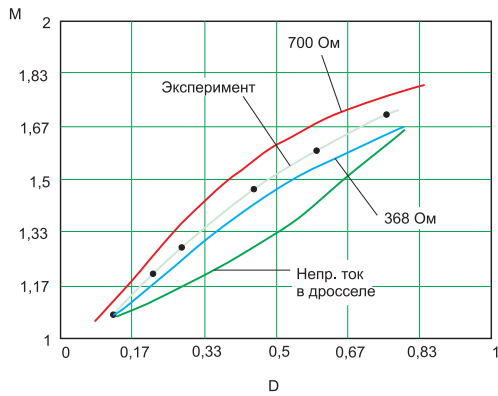
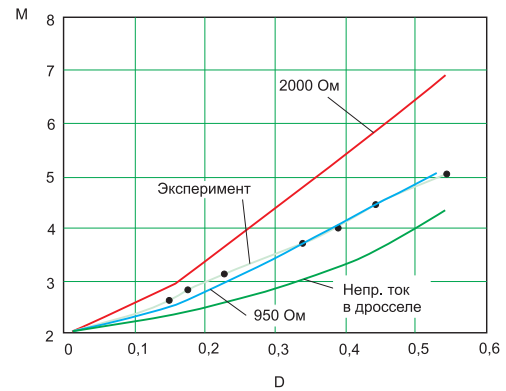


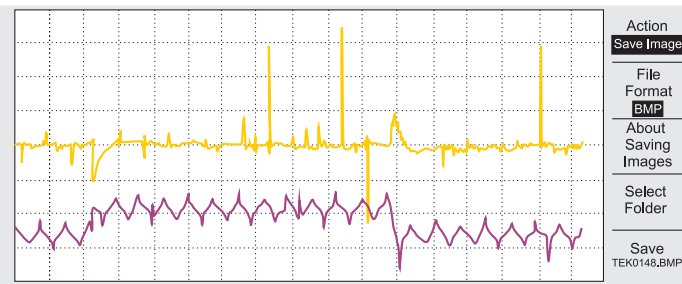
Рис. 10. Результат работы модели, показанной на рис. 9



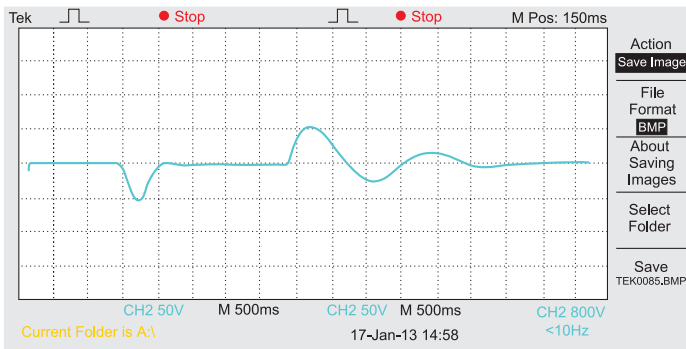
**Рис. 11.** Экспериментальная и расчетные кривые коэффициента  $M$  как функции коэффициента заполнения  $D$ : режим без перекрытия, прерывистый ток в дросселе. Одна расчетная кривая показана для непрерывного тока в дросселе



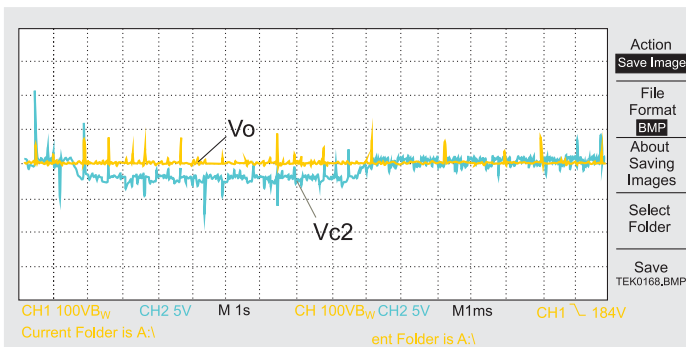
**Рис. 12** Экспериментальная и расчетные кривые коэффициента  $M$  как функции коэффициента заполнения  $D$ : режим с перекрытием, прерывистый ток в дросселе. Одна расчетная кривая показана для непрерывного тока в дросселе



**Рис. 13.** Переходный процесс на выходе ТПП, полученный при эксперименте. Режим с перекрытием, непрерывный ток в дросселе



**Рис. 14.** Переходный процесс на выходе ТПП, полученный при эксперименте. Режим с перекрытием, прерывистый ток в дросселе



**Рис. 15.** Эксперимент. Результат работы схемы управления при подавлении режима несимметрии. Напряжение  $V_{c2}$  масштабировано

Экспериментальный переходный процесс для режима с перекрытием, прерывистый ток в дросселе, показан на рис. 14. Можно видеть хорошее совпадение результатов этого эксперимента с результатом моделирования, полученным при тех же условиях (рис. 8).

Результаты проверки работы системы подавления несимметрии приведены на рис. 15. Эксперимент проводился при тех же условиях, которые описывались в разделе «Моделирование». И снова можно видеть хорошее совпадение эксперимента и моделирования (рис. 10).

### Выводы

Анализ, проведенный в статье, позволил сравнить значения напряжений и токов в многоуровневых топологиях с переключающими конденсаторами и ограничительными диодами. Результат анализа: топология с ограничительными диодами имеет значительные преимущества. Показаны результаты анализа РХ для многоуровневых преобразователей обоих типов. Получены РХ для ТПП при прерывистом токе в дросселе и границы перехода от непрерывного тока к прерывистому. В статье также представлены динамические модели для всех возможных случаев работы ТПП.

Представлены причины возникновения несимметричного режима в ТПП, предложены методы их ограничения и проведен их сравнительный анализ. Подтверждение теоретического анализа получено с помощью моделирования и эксперимента.

### Литература

- Северенс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания: Пер. с англ. под ред. Л.Е. Смольникова – М.: Энергоатомиздат. 1988.
- Kolar J.W., Ertl H., Zach F.C. Realization considerations for unidirectional three-phase PWM rectifier system with low effects on the mains // 6<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Motion Control. 1990.

3. Single-Phase three-level boost power factor correction converter / M.T. Zhang, Y. Yiang, F.C. Lee, M.M. Jovanovich // Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. APEC. 1995. p. 434–439.
4. Keith A. Corzine, and Sonal K. Majeethia, "Analysis of a Novel Four-Level DC-DC Boost Converter," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 36, September/October 2000.
5. G. Yao, L. Hu, Y. Liu, A. Chen, X. He. Interleaved Three-Level Boost Converter with Zero Diode Reverse-Recovery Loss. APEC. 2004.
6. Using the multilevel imbricated cells topologies in the design of low-power power-factor-corrector converters / F. Forest, T.A. Meynard, S. Faucher, F. Pichardeau, J.-J. Huselstein, C. Joubert // IEEE Trans. on Power Electronics. 2005. Vol. 52, N. 1.
7. Jung-Min Kwon, Bong-Hwan Kwon and Kwang-Hee Nam. Three-phase photovoltaic system with three-level boosting MPPT control // IEEE Trans. on Power Electronics, 2008. September. Vol. 23. N 5/
8. Deblecrer O., Moretti A., Vallee F. Comparative analysis of two zero-current switching isolated DC-DC converters for auxiliary railway supply // International Symposium on Power Electronics – SPEEDAM. 2008.
9. Butti G. and Biela J. Novel high efficiency multilevel DC-DC boost converter topologies and modulation strategies // EPE'11.
10. DC-DC converter topology assessment for large scale distributed plant architectures / M. S. Agamy, M. Harfman-Todorovic, A. Elasser, J. A. Sabate, R. L. Steigerwald, Y. Jiang, S. Essakiappan // ECCE. 2011.
11. Haddad Kevork. Three level DC-DC converters as efficient interface in two stage PV power systems // Energytech, IEEE. 2012. Cleveland, OH.
12. Meynard T.A., Foch H. Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters // Power Electronics Specialists Conference, PESC 1992. Vol. 1.P. 397–403.
13. Мелешин В. И., Жикленков Д. В., Ганьшин А. А. Трехуровневый повышающий преобразователь напряжения // Силовая электроника. 2015. № 1.