

УДК 621.341.572

ББК 31.264.5

Е.Е. МИРГОРОДСКАЯ, В.А. КОЛЧЕВ,
М.Е. МАМОНЬЧЕВ, Н.П. МИТЯШИН, А.С. ЩЕРБАКОВА**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ
ВЕНТИЛЕЙ КОММУТАТОРА
МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

Ключевые слова: многоуровневый инвертор напряжения, импульсный преобразователь, коммутатор, математическая модель, алгоритм переключения вентиляей.

Приведен алгоритм управления транзисторами коммутатора однофазного многоуровневого инвертора напряжения. Структура силовой схемы рассматриваемого преобразователя в отличие от большинства существующих схем не зависит от числа уровней выходной кривой благодаря применению универсального источника уровней, формирующихся на выходных конденсаторах двух импульсных преобразователей постоянного напряжения. Алгоритм управления коммутатором обеспечивает формирование требуемой выходной кривой инвертора и исключает возникновение аварийных ситуаций при коммутациях уровней. Рассмотрены особенности работы преобразователя и коммутатора в режимах передачи активной мощности от импульсных преобразователей нагрузке и восприятия ими реактивной мощности нагрузки инвертора.

Алгоритм работы коммутатора определяет последовательность управляющих импульсов, подаваемых на базы транзисторов, синхронизированную с процессом формирования кривой выходного напряжения, а также направлением входного тока инвертора. При этом рассматриваются особенности коммутаций уровней, отличающиеся направлением перехода по величине напряжений уровней: «вверх» от меньшего значения к большему и «вниз» от большего значения к меньшему. Приведены последовательности подачи и снятия импульсов с управляющих электродов вентиляей и вызываемые ими коммутации при положительном входном токе инвертора. При отрицательном входном токе инвертора реализуются аналогичные коммутации уровней, при этом происходит перестановка индексов вентиляей в соответствии с заменой направления их включения по схеме коммутатора.

Для демонстрации работы алгоритма построена модель коммутатора с помощью программного комплекса Micro-Cap 12. При моделировании транзисторов коммутатора использовалась модель транзистора MJ15003. В модели выходные конденсаторы импульсных преобразователей представлены источниками напряжения, автономный инвертор – активно индуктивной нагрузкой. В качестве примера рассмотрена коммутация от уровня большего напряжения к уровню меньшего напряжения при положительном входном токе инвертора. Результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритма.

Многоуровневые инверторы напряжения (МИН) получили широкое распространение в локальных системах электроснабжения, электроприводе и электротехнологических установках за счет возможности упростить процессы регулирования и стабилизации величины выходного напряжения и получить заданный гармонический состав его выходной кривой [9, 10]. Однако их применение ограничено сложностью звеньев постоянного тока, входящих в структуру МИН и обеспечивающих необходимые число и величину уров-

ней выходной кривой [4, 11, 12]. Несмотря на это, МИН обладают рядом преимуществ, заключающихся, в частности, в отсутствии высокочастотного шума и дополнительных потерь мощности, связанных с переключениями вентиля, перед инверторами с широтно-импульсной модуляцией [2, 3].

В [6, 7] предложено схемотехническое решение, предоставляющее возможность существенно упростить структуру однофазных МИН. Способ формирования выходной многоуровневой кривой такого однофазного автономного инвертора напряжения (АИН) основан на инвертировании знакопостоянного многоуровневого напряжения, подаваемого на вход инвертора. Форма кривой указанного знакопостоянного многоуровневого напряжения, имеющего удвоенную частоту по сравнению с выходной частотой инвертора, соответствует форме положительной полуволны выходной кривой АИН.

Знакопостоянное многоуровневое напряжение создается универсальным источником уровней (УИУ), позволяющим сформировать все уровни напряжения выходной кривой МИН всего на двух конденсаторах. Универсальность УИУ определяется тем, что структура силовых однофазных схем МИН, построенных на его основе, принципиально не зависит от числа уровней выходной кривой инвертора.

Упрощенная схема многоуровневого преобразователя на основе УИУ показана на рис. 1. Здесь АИН – однофазный мостовой инвертор, пунктиром выделены следующие модули, составляющие УИУ: К – коммутатор, ИПН₁ и ИПН₂ – нереверсивные импульсные преобразователи напряжения, получающие питание от источника постоянного напряжения.

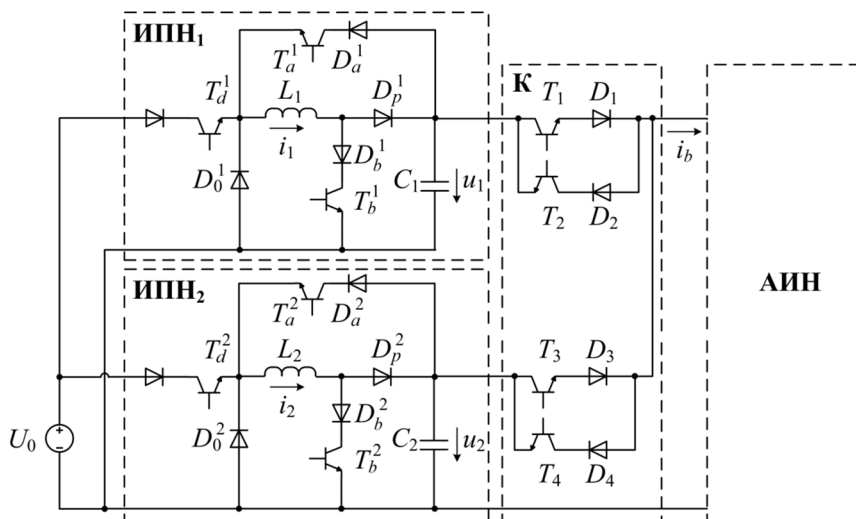


Рис. 1. Многоуровневый преобразователь на основе УИУ

Предполагается, что нагрузка АИН носит активно-индуктивный характер. На рис. 2 показаны макеты блоков коммутатора и инвертора напряжения многоуровневого преобразователя на основе УИУ.

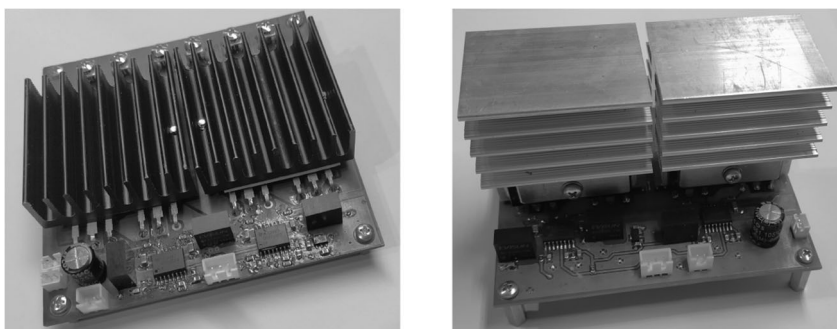


Рис. 2. Макеты блоков коммутатора и инвертора напряжения

Способ формирования многоуровневой кривой однофазного мостового АИН, применяемого в рассматриваемом преобразователе, состоит в попеременном создании требуемых уровней напряжения на выходных конденсаторах C_1 и C_2 преобразователей ИПН₁ и ИПН₂. В частности, нечетные уровни формируются на конденсаторе C_1 , четные – на конденсаторе C_2 . Коммутатор К обеспечивает попеременную подачу напряжения на вход однофазного мостового АИН в соответствии с законом формирования кривой. Особенность рассматриваемого преобразователя состоит в том, что ИПН, отключенный коммутатором от входа инвертора в данный интервал времени, формирует на соответствующем выходном конденсаторе значение напряжения следующего уровня своей четности. Перезаряд конденсатора на новый уровень напряжения происходит при отключении его от входа инвертора. В эти уровневые такты питание нагрузки происходит от другого импульсного преобразователя, что обеспечивается соответствующим состоянием вентильного комплекта коммутатора.

Если, например, новый нечетный уровень напряжения λ_2 для конденсатора C_1 больше сменяемого уровня λ_1 , то дозаряд происходит при запертых транзисторах коммутатора T_1 и T_2 по цепи $+U_0, T_d^1, L_1, D_p^1, C_1, -U_0$, а если уровень λ_2 ниже уровня λ_1 , то по цепи L_1, D_p^1, C_1, D_0^1 . В этот же интервал времени конденсатор C_2 подключен к входу инвертора через проводящий транзистор T_3 (при положительном токе i_b) или проводящий транзистор T_4 (при отрицательном токе i_b). Стабилизация напряжения требуемого четного уровня на конденсаторе C_2 при этом осуществляется импульсами тока i_2 по цепи $+U_0, T_d^2, L_2, D_p^2, C_2, -U_0$ или L_2, D_p^2, C_2, D_0^2 .

Вторая особенность преобразователя заключается в способе восприятия УИУ обратного тока инвертора i_b , когда на индуктивном накопителе ИПН аккумулируется возвращаемая энергия и в последующем при положительном направлении тока i_b передается на нагрузку в качестве активной мощности [8]. Эта особенность существенно отличает рассматриваемый преобразователь от большинства МИН, в которых обратный ток инвертора i_b воспринимается конденсаторами, формирующими уровни выходной кривой.

Указанная аккумуляция возвращаемой инвертором энергии реализуется следующим образом. При возникновении, например, на четном уровне выходной

кривой отрицательного тока i_b , поступающего на заряд конденсатора C_2 через транзистор T_4 , управляющий импульс снимается с транзистора T_a^2 и подаются управляющие импульсы на транзисторы T_b^2 и T_a^2 . В результате помимо цепи заряда конденсатора C_2 отрицательным током i_b , искажающим величину уровня, возникает контур, содержащий $C_2, D_a^2, T_a^2, L_2, D_b^2, T_b^2$, ток которого, совпадающий с током индуктивного накопителя i_2 , компенсирует этот заряд. Существенно, что ток i_2 индуктивного накопителя, находящегося под положительным напряжением, нарастает, что и эквивалентно аккумуляции в индуктивности возвращаемой инвертором энергии. Система стабилизации напряжения на конденсаторе C_2 , управляющая импульсами тока в контуре, обеспечивает равенство возвращаемой инвертором энергии, аккумулированной в индуктивности, которая в дальнейшем при положительном токе i_b возвращается активно-реактивной нагрузке.

Для исключения коротких замыканий в многоуровневом преобразователе в режимах передачи активной мощности нагрузке и компенсации реактивной мощности нагрузки необходимо избежать при переключениях вентилей коммутатора одновременного подсоединения выходных конденсаторов C_1 и C_2 к входным полюсам инвертора. Следовательно, необходимо реализовать соответствующую последовательность переключения транзисторов коммутатора $T_1 - T_4$.

Несмотря на то, что многоуровневый преобразователь (рис. 1) достаточно подробно рассмотрен в [6–8], в этих работах не рассмотрен процесс реализации переключения вентилей коммутатора. В настоящей статье предлагаются алгоритм и условия переключения вентилей коммутатора преобразователя, обеспечивающие требуемую форму кривой и исключают возникновение аварийных ситуаций при коммутациях.

Алгоритм переключения вентилей коммутатора многоуровневого инвертора. Алгоритм работы коммутатора определяет последовательность управляющих импульсов, подаваемых на базы транзисторов, синхронизированную с процессом формирования кривой выходного напряжения, а также направлением входного тока i_b . При этом необходимо, во-первых, рассмотреть коммутации уровней (КУ), отличающиеся направлением перехода по величине напряжений уровней: «вверх» (от меньшего значения U^- к большему U^+) и «вниз» (от большего значения U^+ к меньшему U^-). Во-вторых, КУ различаются передачей питания инвертора от конденсатора C_1 к конденсатору C_2 и обратно. Таким образом, с учетом двух возможных направлений тока i_b алгоритм работы содержит 8 видов КУ.

Каждая КУ состоит из последовательности изменений состояния вентильного комплекта коммутатора. Состояние вентильного комплекта зададим в виде матрицы

$$\Sigma = \begin{bmatrix} t_1 & d_1 \\ t_2 & d_2 \\ t_3 & d_3 \\ t_4 & d_4 \end{bmatrix}.$$

Здесь $t_i = 1$, если на базу транзистора T_i подан управляющий импульс, и $t_i = 0$ в противном случае. Величина $d_i = 1$, если транзистор и последовательно включенный с ним диод D_i находится в проводящем состоянии, т.е. их ток положителен.

Рассмотрим четыре КУ, соответствующие случаю положительности тока i_b .

1. КУ при переходе «вниз» с передачей питания инвертора от ИПН₁ к ИПН₂, т.е. при $u_1 = U^+$ и $u_2 = U^-$ осуществляется нижеприведенная последовательность состояний вентильного комплекта коммутатора

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В первом состоянии конденсатор C_1 подключен ко входу АИН через открытый по управляющему электроду транзистор T_1 и проводящий в силу $i_b > 0$. На базу транзистора T_2 подан управляющий импульс на случай смены направления тока i_b . Для перехода питания к ИПН₂ этот импульс снимается с базы T_2 , а затем подается управляющий импульс на базу транзистора T_3 . В результате последовательно реализуются второе и третье состояния коммутатора. Рассмотренные три состояния имеют подготовительный характер и не изменяют токопротекания через вентили. Соответствующие переходы состояний отмечены в (1) простыми стрелками \rightarrow .

Непосредственный переход тока i_b от ИПН₁ к ИПН₂ начинается после снятия управляющего импульса с транзистора T_1 , в результате чего повышается сопротивление этого транзистора. В силу реактивного характера тока i_b это приводит к его плавному переходу к транзистору T_3 . Таким образом реализуется четвертое состояние, в котором питание АИН переведено к ИПН₂. Соответствующий переход состояний отмечен в (1) двойной стрелкой.

Последнее состояние рассмотренной КУ определяется подачей управляющего импульса на базу T_4 , что делается для обеспечения коммутации при возможной смене направления тока i_b .

Приведем описание остальных трех КУ при $i_b > 0$.

2. КУ при переходе «вниз» с передачей питания инвертора от ИПН₂ к ИПН₁, т.е. при $u_1 = U^-$ и $u_2 = U^+$, осуществляется такая последовательность состояний вентильного комплекта коммутатора

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Отличие этого КУ от первого заключается в том, что переход тока с ветви вентилей T_1 и D_1 на ветвь вентилей T_3 и D_3 происходит не в результате

снятия управляющего импульса с вентиля T_1 и соответствующего увеличению его сопротивления и отпираания предварительно включенного по управляющему электроду вентиля T_3 под действием индуктивной ЭДС нагрузки, а в результате подачи импульса на управляющий электрод вентиля T_3 . При этом образуется контур, включающий в себя вентили T_1, D_1, T_3, D_3 и конденсаторы C_1 и C_2 . В данном случае напряжение $u_2 - u_1 > 0$. Для вентиляей T_1 и D_1 это напряжение является запирающим, а для вентиляей T_3, D_3 – отпирающим, что и приводит к переходу тока i_b на ветвь вентиляей T_3 и D_3 .

3. КУ при переходе «вверх» с передачей питания инвертора от ИПН₁ к ИПН₂, т.е. при $u_1 = U^-$ и $u_2 = U^+$, осуществляется такая последовательность состояний вентильного комплекта коммутатора

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

4. КУ при переходе «вверх» с передачей питания инвертора от ИПН₂ к ИПН₁, т.е. при $u_1 = U^+$ и $u_2 = U^-$, осуществляется такая последовательность состояний вентильного комплекта коммутатора

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

При $i_b < 0$ реализуются аналогичные КУ, при этом происходит перестановка индексов вентиляей в соответствии с заменой направления их включения по схеме рис. 1.

Моделирование. Для демонстрации и исследования работы алгоритма построена модель коммутатора с помощью программного комплекса Micro-Cap 12 [1]. Моделирование коммутатора целесообразно производить отдельно от моделирования остальной схемы преобразователя из-за значительного отличия временных масштабов соответствующих процессов.

В связи с этим выходные конденсаторы импульсных преобразователей представлены источниками напряжения V_1, V_2 , соответствующими ранее введенным уровням напряжения U^+ и U^- , а автономный инвертор – активно индуктивной нагрузкой. Такие допущения возможны, поскольку исследуемые коммутации уровней занимают незначительные промежутки времени по сравнению с длительностью самих уровней и при неизменных состояниях вентиляей инвертора [5].

Схема модели приведена на рис. 3.

При моделировании транзисторов коммутатора использовалась модель транзистора MJ15003.

В качестве примера рассмотрена коммутация (1) от уровня большего напряжения $U^+ = 100$ В к уровню меньшего напряжения $U^- = 50$ В при положительном входном токе инвертора.

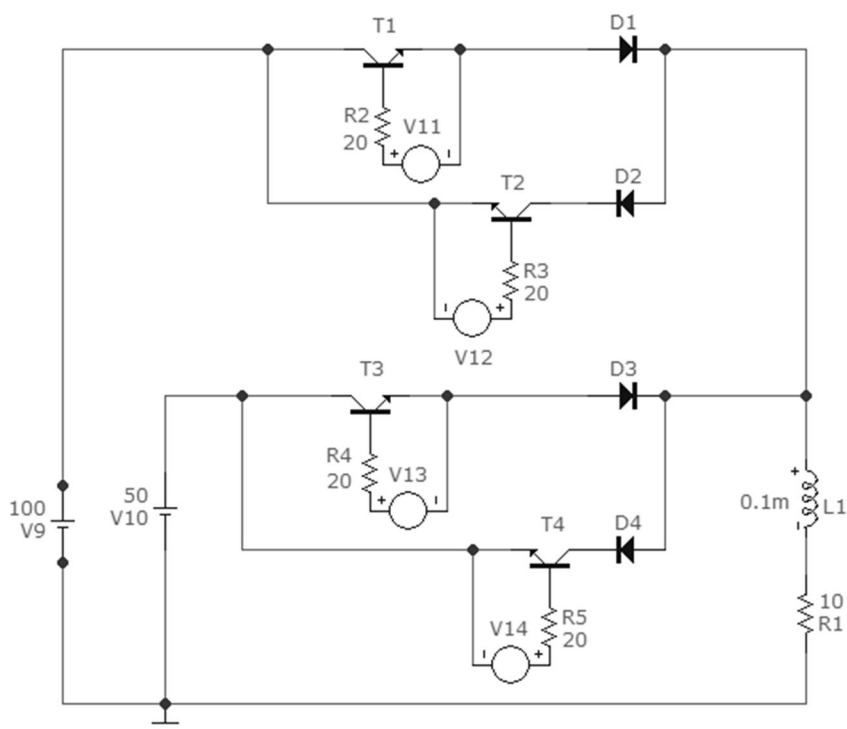


Рис. 3. Схема модели коммутатора

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Начало моделирования $t_1 = 1.495$ мс соответствует завершению реализации уровня U^+ , который в момент $t_2 = 1.500$ мс должен быть заменен на уровень U^- . Благодаря ранее поданному на транзистор T_1 управляющему импульсу на интервале времени $[t_1, t_2)$ реализуется цепь $+V_1, T_1, D_1, L_1, R_1, -V_1$, в связи с чем напряжение на нагрузке равно U^+ , а ток нагрузки равен 10 А.

Для реализации указанной коммутации уровней предварительно в момент времени, равный 1,497 мс, подается управляющий импульс на транзистор T_3 , так что при снятии управляющего импульса с транзистора T_1 осуществляется его выключение, а под действием ЭДС индукции нагрузки – включение транзистора T_3 .

Как следует из графиков, переключение тока нагрузки с транзистора T_1 на транзистор T_3 и полное изменение величины напряжения нагрузки происходят за время 0,005 мс. Аналогичные результаты получены при исследовании модели (рис. 3) при реализации других рассмотренных коммутаций уровней. На основании исследований влияния точности реализации требуемых углов коммутации на форму кривой, например четырехуровневого инвертора, можно сделать вывод, что применение указанного выше транзистора в коммутаторе представленного преобразователя не приводит к значимым ее искажениям при частотах преобразования до 2 кГц [5].

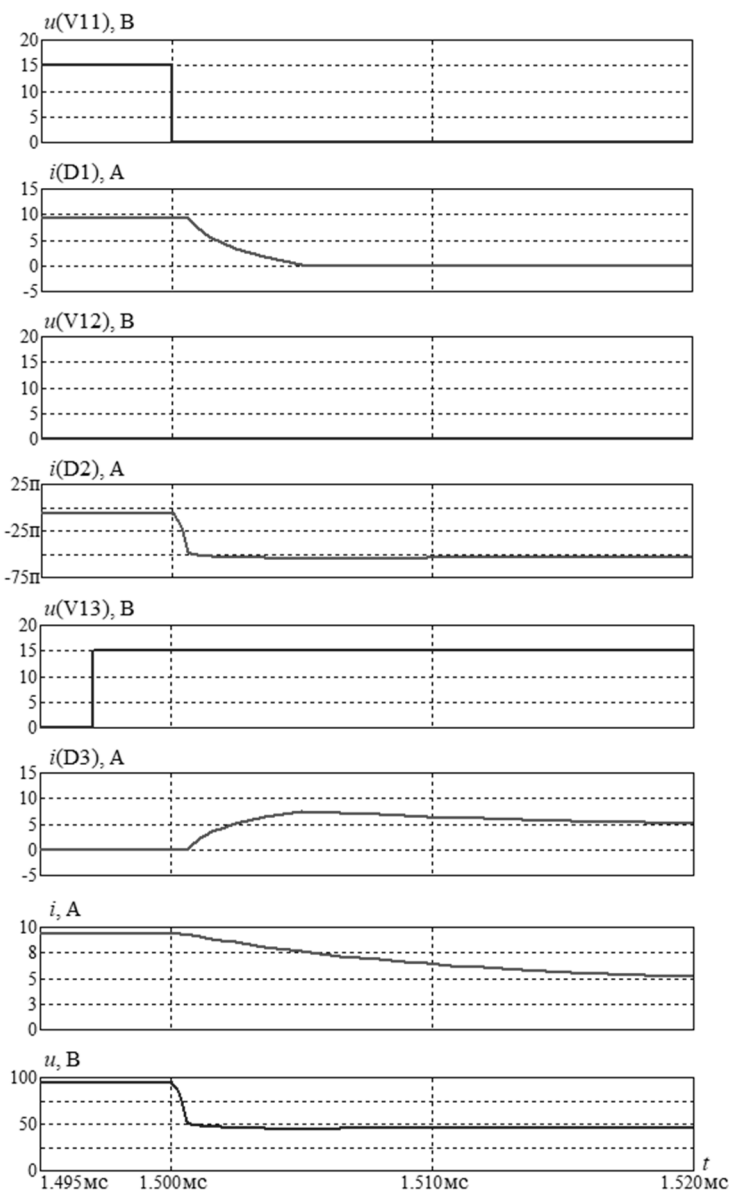


Рис. 4. Мгновенные значения напряжения источника V11, тока диода D1, напряжения источника V12, тока диода D2, напряжения источника V13, тока диода D3, тока и напряжения нагрузки

Результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритма.

Выводы. Предложен алгоритм и описаны условия переключения вентиля коммутатора в однофазном МИН на основе УИУ, обеспечивающие требуемую форму кривой и исключают возникновение аварийных ситуаций при коммутациях в преобразователе при работе в режимах передачи активной мощности нагрузке и компенсации реактивной мощности нагрузки.

Проведено моделирование последовательности переключений вентилей коммутатора многоуровневого преобразователя, результаты которого доказали работоспособность представленного алгоритма.

Литература

1. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. 617 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2003. 664 с.
3. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трех-фазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 8. С. 56–59.
4. Baker R.H. High-voltage converter circuit. U.S. Patent 4 203 151, 1980.
5. Govorukhin P.P., Mirgorodskaya E.E. Application of sensitivity of harmonic distortion factor of output curve of multilevel inverter. In: Proc. of Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2015, pp. 455–459. DOI: 10.1109/EDM.2015.7184583.
6. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B., Golembiovsky Yu.M., Miroshnichenko A.Yu., Lukov D.Yu. Multi-level voltage inverter with structure invariant to the number of levels of the output curve. In: Proc. of Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2020, pp. 346–351. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153476.
7. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Kolchev V.A., Tomashevskiy Yu.B., Stepanov S.F., Artyukhov D.I. Universal power source of single-phase multilevel inverters. In: Proc. of 16th Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 2019, pp. 337–341. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771654.
8. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Kolchev V.A., Artyukhov I.I., Stepanov S.F. Method of solving of the problem of the reactive power of the load in multilevel inverters. In: Proc. of 16th Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 2019, pp. 331–336. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771538.
9. Mittal N., Singh B., Singh S. P., Dixit R., Kumar D. Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing*, 2012, vol. 10, pp. 1–16. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508041.
10. Rashid M.H. Power Electronics handbook. Butterworth-Heinemann, 2018. 1522 p.
11. Skvarenina T.L. The handbook on power electronics. CRC Press LLC, 2002. 602 p.
12. Zhiguo Pan, Fang Zheng Peng, Corzine K.A., Stefanovic V.R., Leuthen J.M., Gataric S. Voltage balancing control of diode-clamped multilevel rectifier/inverter systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 1698–1706. DOI: 10.1109/TIA.2005.857473.

МИРГОРОДСКАЯ ЕКАТЕРИНА ЕВГЕНЬЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mee85@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4519-6567>).

КОЛЧЕВ ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (tabby333@yandex.ru).

МАМОНЫЧЕВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mamonychev@gmail.com).

МИТЯШИН НИКИТА ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mityashinnp@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6696-6455>).

ЩЕРБАКОВА АНАСТАСИЯ СЕРГЕЕВНА – инженер, АО «НПП «Алмаз», Россия, Саратов (anastasi.mikhailowa2015@yandex.ru).

Ekaterina E. MIRGORODSKAYA, Vadim A. KOLCHEV,
Mikhail E. MAMONYCHEV, Nikita P. MITYASHIN,
ANASTASIA S. SHCHERBAKOVA

**SIMULATION OF COMMUTATION PROCESSES
OF MULTI-LEVEL VOLTAGE INVERTER SWITCHES**

Key words: *multilevel voltage inverter, pulse converter, commutator, mathematical model, commutation algorithm of switches.*

An algorithm for controlling of commutator's transistors of a single-phase multi-level voltage inverter is presented. The structure of the power circuit of the considered converter, in contrast to most existing circuits, does not depend on the levels number of the output curve due to the using of an universal source of levels, which are formed by output capacitors of two pulsed DC-converters. The commutator control algorithm ensures the formation of the required output curve of the inverter and excludes the occurrence of emergency situations during level commutating. Features of the converter and commutator operation in modes of active power transmission from pulse converters to the load and perception of the reactive power of the inverter load by them are considered.

The commutator operation algorithm determines the sequence of control pulses, applied to the base of transistors, the sequence being synchronized with the process of the output voltage curve forming, as well as the direction of the inverter input current. At the same time, features of the level commutating are considered. They differ in the transition direction in value of level voltages: "up" from a lower value to a higher one and "down" from a higher value to a lower one. The sequence of supply and removal of pulses from control electrodes of switches and commutations caused by them, when the inverter input current is positive, are given. The similar commutating of levels is realized, when the inverter input current is negative. Wherein indexes of switches are rearranged in accordance with the direction replacement of their switching of the commutator circuit.

A commutator model is realized using Micro-Cap 12 to demonstrate the operation of the algorithm. The transistor MJ15003 model is used as a commutator's switch. In the model, output capacitors of pulse converters are represented by voltage sources, an autonomous inverter – by an active inductive load. The commutating from a higher voltage level to a lower one with a positive input current of the inverter is considered as an example. Simulation results confirm the performance of the algorithm.

References

1. Amelina M.A., Amelin S.A. *Programma skhemiticheskogo modelirovaniya Micro-Cap. Versii 9, 10* [Micro-Cap circuit simulation program. Versions 9, 10]. Smolensk, 2012, 617 p.
2. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Power electronics basics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2003, 664 p.
3. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondrat'ev D.E. *Shirotno-impul'snaya modulyatsiya v trekhfaznykh invertorakh napryazheniya* [Pulse width modulation in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 8, pp. 56–59.
4. Baker R.H. High-voltage converter circuit. U.S. Patent 4 203 151, 1980.
5. Govorukhin P.P., Mirgorodskaya E.E. Application of sensitivity of harmonic distortion factor of output curve of multilevel inverter. In: Proc. of Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2015, pp. 455–459. DOI: 10.1109/EDM.2015.7184583.
6. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B., Golembiovsky Yu.M., Miroshnichenko A.Yu., Lukov D.Yu. Multi-level voltage inverter with structure invariant to the number of levels of the output curve. In: Proc. of Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2020, pp. 346–351. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153476.
7. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Kolchev V.A., Tomashevskiy Yu.B., Stepanov S.F., Artyukhov D.I. Universal power source of single-phase multilevel inverters. In: Proc. of 16th Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 2019, pp. 337–341. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771654.

8. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Kolchev V.A., Artyukhov I.I., Stepanov S.F. Method of solving of the problem of the reactive power of the load in multilevel inverters. In: Proc. of 16th Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 2019, pp. 331–336. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771538.
9. Mittal N., Singh B., Singh S. P., Dixit R., Kumar D. Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing*, 2012, vol. 10, pp. 1–16. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508041.
10. Rashid M.H. Power Electronics handbook. Butterworth-Heinemann, 2018. 1522 p.
11. Skvarenina T.L. The handbook on power electronics. CRC Press LLC, 2002. 602 p.
12. Zhiguo Pan, Fang Zheng Peng, Corzine K.A., Stefanovic V.R., Leuthen J.M., Gataric S. Voltage balancing control of diode-clamped multilevel rectifier/inverter systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 1698–1706. DOI: 10.1109/TIA.2005.857473.

EKATERINA E. MIRGORODSKAYA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mee85@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4519-6567>).

VADIM A. KOLCHEV – Post-Graduate Student, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (tabby333@yandex.ru).

MIKHAIL E. MAMONYCHEV – Post-Graduate Student, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mamonychev@gmail.com).

NIKITA P. MITYASHIN – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mityashinnp@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6696-6455>).

ANASTASIA S. SHCHERBAKOVA – Engineer, SC "NPP "Almaz", Russia, Saratov (anastasi.mikhailowa2015@yandex.ru).

Формат цитирования: *Миргородская Е.Е., Колчев В.А., Мамоничев М.Е., Митяшин Н.П., Щербакова А.С.* Моделирование процессов переключения вентилей коммутатора многоуровневого инвертора напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 83–93. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-83-93.