

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ УНИФИЦИРОВАННОЙ ШИМ

## IMPLEMENTATION OF CONTROL SIGNALS OF A THREE-PHASE INVERTER IN REAL TIME USING A UNIFIED PWM

*D. Melnikov  
M. Petrovichev*

*Summary.* The article describes a voltage modulation method for high-efficiency voltage generation in a three-phase inverter powered by DC voltage. Considering the method of generating the voltage of the inverter, which consists of six power devices connected in parallel with a reverse diode, it can be found that the output voltage of the inverter is determined by the different voltages between each arm of the inverter and the duration of time during which different voltage is maintained. With optimal use of this time and duration of the strobing pulse, the task of voltage modulation can be greatly simplified, since the output voltage of the inverter is directly synthesized by the "effective time". In the proposed method of wide pulse modulation (PWM), the actual gating time for each arm of the inverter is calculated instantly and simply using the "effective time" displacement algorithm. In addition, by using a single degree of freedom that allows you to move the "effective time" to any location within the sampling interval, various carrier-based PWM strategies can be easily implemented without hardware modification. Consequently, almost instantly, the way the proposed scheme works can be changed to any carrier-based PWM strategy, such as sinusoidal PWM, space-vector PWM, and intermittent modulation schemes.

*Keywords:* control, signal, algorithm, pulse, pulse width modulation, inverter, reference voltage, gating, microcontroller.

*Мельников Дмитрий Владимирович*

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
melnikov-dv@eandex.ru*

*Петровичев Максим Александрович*

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
tabblif@yandex.ru*

*Аннотация.* В статье описывается метод модуляции напряжения для высокоэффективной генерации напряжения в трехфазном инверторе с питанием от постоянного напряжения. Рассматривая способ генерации напряжения инвертора, который состоит из шести силовых устройств, параллельно соединенных с обратным диодом, можно обнаружить, что выходное напряжение инвертора определяется различными напряжениями между каждым плечом инвертора и продолжительностью времени, в течение которого поддерживается разное напряжение. При оптимальном использовании этого времени и длительности стробирующего импульса задача модуляции напряжения может быть значительно упрощена, поскольку выходное напряжение инвертора непосредственно синтезируется «эффективным временем». В предлагаемом методе широко импульсной модуляции (ШИМ) фактическое время стробирования для каждого плеча инвертора вычисляется мгновенно и просто с помощью алгоритма перемещения «эффективного времени». Кроме того, за счет использования одной степени свободы, которая позволяет перемещать «эффективное время» в любое место в пределах интервала выборки, различные стратегии ШИМ на основе несущей могут быть легко реализованы без модификации аппаратных средств. Следовательно, практически мгновенно, способ работы предложенной схемы может быть изменен на любую стратегию ШИМ на основе несущей, такую как синусоидальная ШИМ, пространственно-векторная ШИМ, и схемы прерывистой модуляции.

*Ключевые слова:* управление, сигнал, алгоритм, импульс, широтно-импульсная модуляция, инвертор, опорное напряжение, стробирование, микроконтроллер.

**Б**лагодаря развитию силовых полупроводниковых устройств и алгоритмов управления электрическими машинами, все больший интерес вызывает разработка более точных методов широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Существует большое разнообразие методов ШИМ [1].

К методу ШИМ предъявляются некоторые требования. Среди них полное использование напряжения звена постоянного тока, что чрезвычайно важно для достижения максимального выходного крутящего момента во всех условиях эксплуатации для приводов ма-

шин переменного тока и для получения запаса управляющего напряжения при повышенном напряжении источника для приложений с трехфазным выпрямителем с ШИМ. Другим важным моментом является минимизация пульсаций тока и (или) общих потерь системы преобразователя мощности, и, разумеется, вся задача модуляции должна иметь простейшую форму, чтобы ее можно было легко применять в реальных приложениях. Для одновременного удовлетворения различных требований, упомянутых выше, следует разработать метод модуляции с точки зрения особенностей работы инвертора.

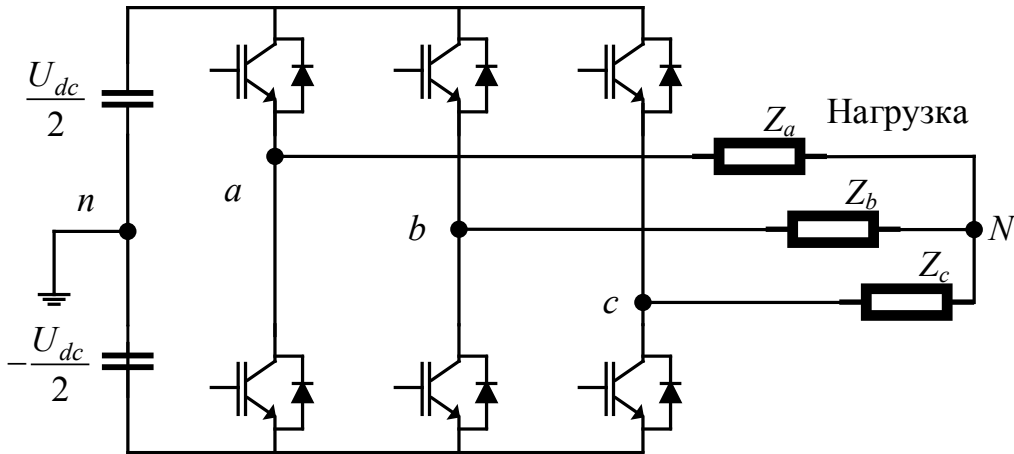


Рис. 1. Трехфазная инверторная система

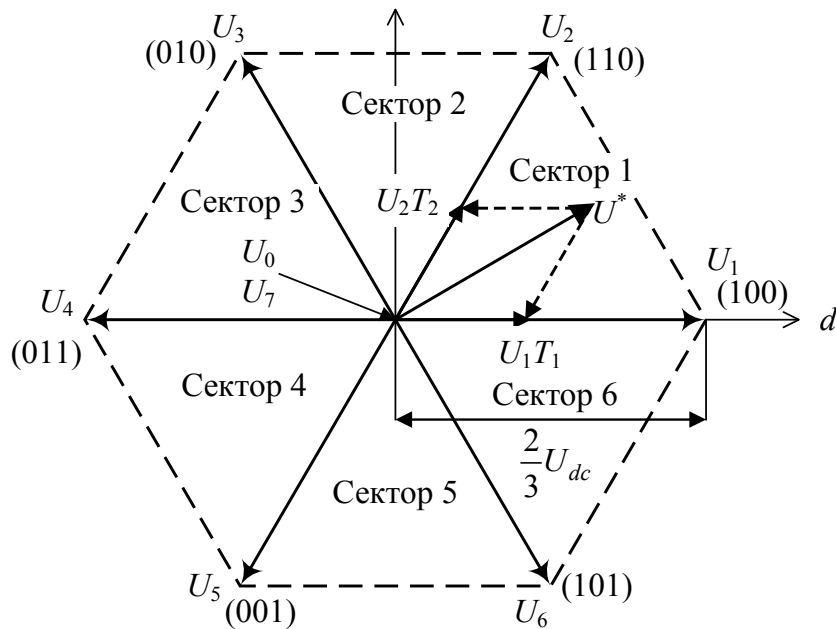


Рис. 2. Пространственно-векторная диаграмма векторов переключения

Рассматривая способ генерации напряжения инвертора с питанием от напряжения, который состоит из шести силовых устройств, параллельно соединенных с обратным диодом, можно обнаружить, что выходное напряжение инвертора определяется различными напряжениями между каждым плечом инвертора и продолжительностью времени, в течение которого поддерживается разное напряжение. Интерес должен быть сосредоточен на продолжительности времени, когда разность напряжений не равна нулю, потому что в течение этого времени создается эффективный поток мощности. Этот интервал времени будет называться «эф-

фективное время», т.е., другими словами, это фактическое время, затраченное на перенос электрической энергии от источника к потребителю. На самом деле идея эффективного времени уже была введена в методе пространственного вектора напряжения (векторный ШИМ) [2, 3, 4]. В этих статьях время приложения для определенного доступного вектора напряжения оценивалось на основе концепции среднего напряжения. На практике эта схема ШИМ превосходит другие схемы с точки зрения использования напряжения в звене постоянного тока и гармоник тока. Тем не менее, реализация этой схемы сложна на практике (на микроконтролл-

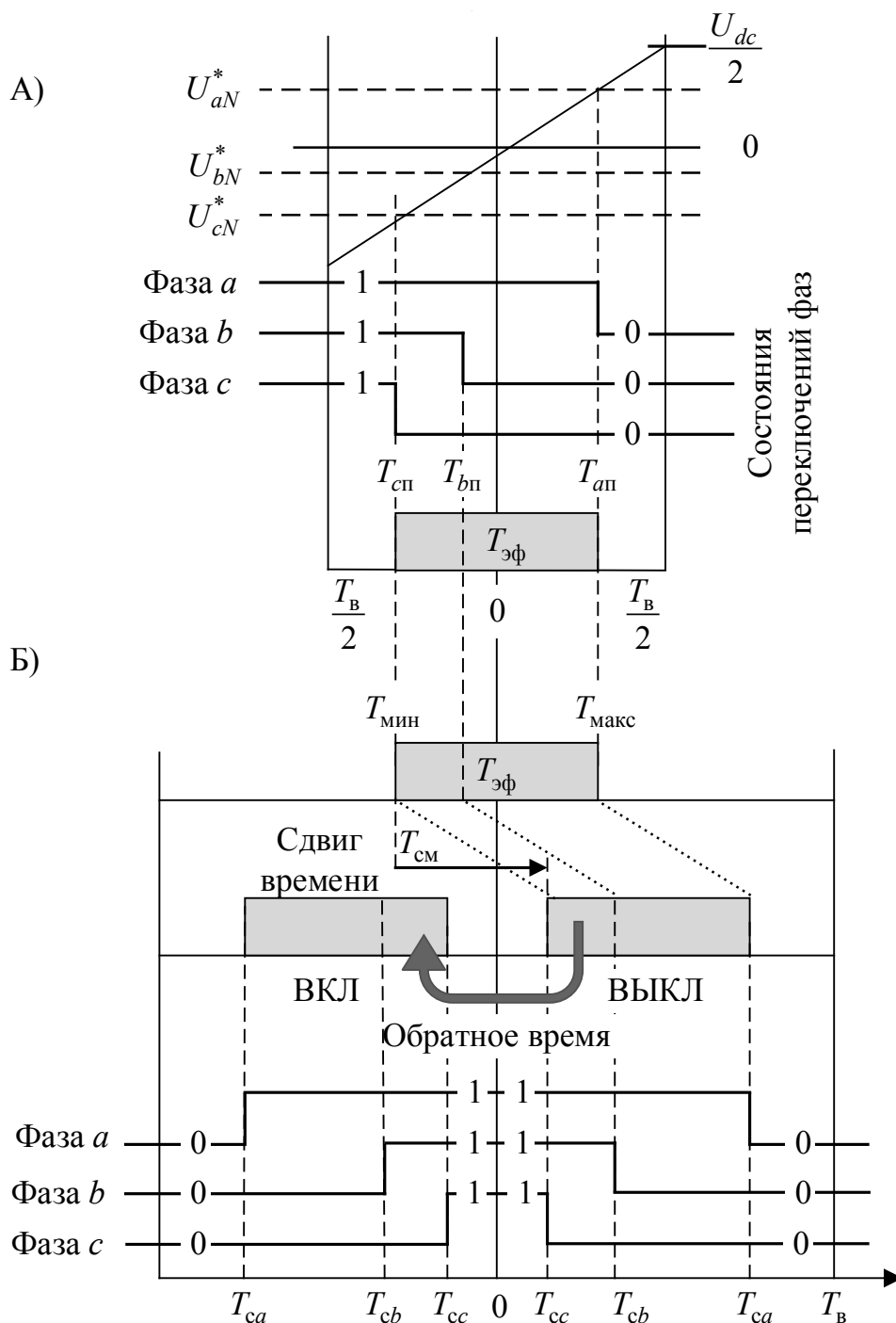


Рис. 3. Унифицированная ШИМ А) взаимосвязь между эффективным временем и выходным напряжением Б) фактическое формирование длительности стробирующего импульса

лере), т.к. время приложения вектора рассчитывается с помощью тригонометрических функций, и необходимо выполнить процесс рекомбинации для расчета фактической длительности стробирующего импульса [3]. Более того, поскольку эта схема оценивалась на основе состояний переключения, взаимосвязь между схемами ШИМ не была определена.

Рассмотрим новый метод модуляции напряжения под названием «унифицированная модуляция напряжения». При правильном использовании концепции эффективного времени задача модуляции напряжения может быть значительно упрощена, поскольку выходное напряжение инвертора непосредственно синтезируется «эффективным временем». В предлагаемом

методе ШИМ фактическое время стробирования для каждого плеча инвертора вычисляется сразу (мгновенно) и просто с помощью алгоритма перемещения «эффективного времени». Кроме того, за счет использования одной степени свободы, которая позволяет перемещать «эффективное время» в любое место в пределах интервала выборки, различные стратегии ШИМ на основе несущей могут быть легко реализованы без модификации аппаратных средств. Следовательно, практически мгновенно, способ работы предложенной схемы может быть изменен на любую стратегию ШИМ на основе несущей, такую как синусоидальная ШИМ, векторная ШИМ, и схемы прерывистой модуляции. Широко используемая схема перемодуляции также просто реализуется с помощью концепции эффективного времени.

На рис. 1 представлен типичный силовой каскад трехфазного инвертора и эквивалентная схема нагрузки. На рис. 2 представлены восемь доступных различных векторов переключения [3, 4]. Состояние переключения «1» означает открытие верхнего транзистора одного плеча, а напряжение на полюсе ( $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$ ) будет составлять половину значения напряжения в звене постоянного тока. Индекс модуляции определим как отношение амплитуды фазного напряжения к  $U_{dc} / 2$  (обозначим его  $M$ ).

Состояния переключения каждого плеча должны сочетаться друг с другом, чтобы получить требуемое трехфазное выходное напряжение. Поскольку каждое напряжение  $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$  (назовем его полюсным) имеет только два уровня в соответствии с состоянием переключения, продолжительность времени, в течение которого поддерживаются различные напряжения, определенно связана с задачей модуляции напряжения. Поэтому задачу модуляции можно значительно упростить, если учесть зависимость между длительностью импульса и выходным напряжением.

Рассмотрим «эффективное напряжение», которое создает фактический переток мощности между инвертором и нагрузкой. Как показано на рис. 3, когда состояния переключения каждой фазы изменяются с 0 на 1 в разное время в течение одного интервала выборки, на сторону нагрузки подается эффективное напряжение.

Параметр  $T_g$  обозначает время получения выборки, а  $T_{эф}$  обозначает продолжительность времени, в течение которого поддерживается различное напряжение.  $T_{эф}$  называется «эффективным временем». Это значение напрямую связано с фазным напряжением, и может быть определено следующим образом.

$$\frac{U_{aN}^*}{U_{dc}} = \frac{T_{ап}}{T_B} \Rightarrow T_{ап} = \frac{T_B}{U_{dc}} \cdot U_{aN}^*,$$

$$\frac{U_{bN}^*}{U_{dc}} = \frac{T_{бп}}{T_B} \Rightarrow T_{бп} = \frac{T_B}{U_{dc}} \cdot U_{bN}^*,$$

$$\frac{U_{cN}^*}{U_{dc}} = \frac{T_{сп}}{T_B} \Rightarrow T_{сп} = \frac{T_B}{U_{dc}} \cdot U_{cN}^*.$$

где  $U_{aN}^*, U_{bN}^*, U_{cN}^*$  — опорные напряжения. Эти время переключения ( $T_{ап}, T_{бп}, T_{сп}$ ) могут быть отрицательными (задано отрицательное фазное напряжение). Поэтому в данной случае это время является «мнимым временем переключения».

Эффективное время может быть определено как продолжительность времени между наименьшим и наибольшим из трех мнимых времен, как указано

$$T_{эф} = T_{макс} - T_{мин},$$

где

$$T_{мин} = \min(T_{ап}, T_{бп}, T_{сп}), T_{макс} = \max(T_{ап}, T_{бп}, T_{сп}).$$

Когда фактические стробирующие сигналы для силовых устройств генерируются в алгоритме ШИМ, существует одна степень свободы, с помощью которой эффективное время может быть перемещено в любое место в пределах интервала выборки. Следовательно, к мнимым временам переключения будет применена операция временного смещения (сдвига), чтобы сгенерировать фактические времена стробирования ( $T_{ca}, T_{cb}, T_{cc}$ ) для каждого плеча инвертора, как показано на рис. 3Б. Эта задача выполняется путем добавления одного и того же значения к мнимому времени следующим образом:

$$T_{ca} = T_{ап} + T_{см},$$

$$T_{cb} = T_{бп} + T_{см},$$

$$T_{cc} = T_{сп} + T_{см},$$

где  $T_{см}$  — время смещения.

Эта задача определения времени стробирования выполняется только для интервала выборки, в котором все состояния переключения каждого плеча переходят от 1 к 0. Этот интервал называется «последовательностью ВЫКЛ». В другой последовательности (от 0 к 1) она называется «последовательностью ВКЛ». Чтобы сгенерировать симметричную схему импульсов переключения в течение двух интервалов выборки, фактическое время переключения будет заменено значением вычитания, при этом время выборки будет следующим:

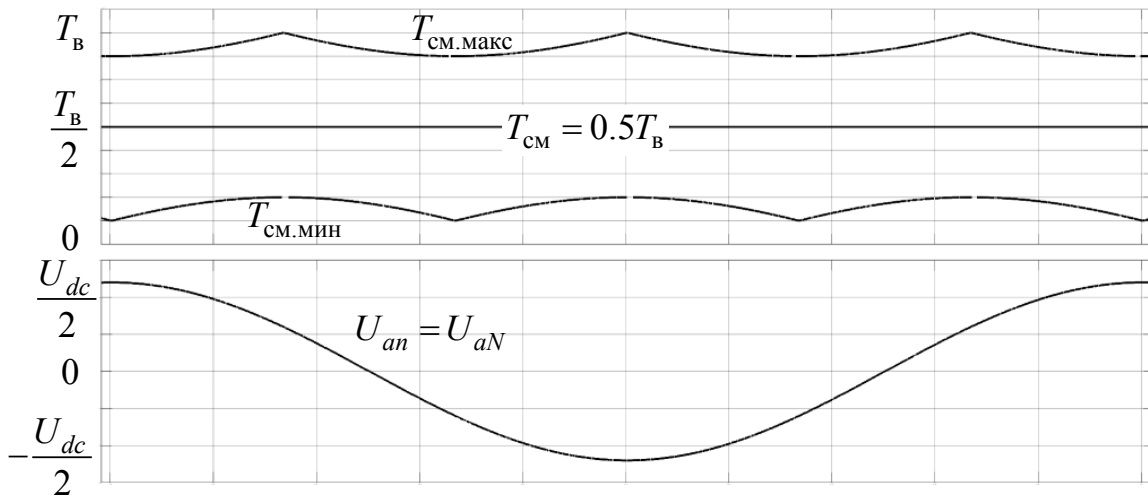


Рис. 4. Время смещения, фазное и полюсное напряжения синусоидальной ШИМ ( $M = 0,8$ ).

$$\begin{aligned} T_{ca} &= T_B - T_{ca}, \\ T_{cb} &= T_B - T_{cb}, \\ T_{cc} &= T_B - T_{cc}. \end{aligned}$$

Для гарантированного использования полного напряжения звена постоянного тока, фактическая длительность стробирующего импульса должна быть ограничено значением от 0 до  $T_B$  следующим образом:

$$0 \leq T_{\text{мин}} + T_{\text{см}}, \quad T_{\text{макс}} + T_{\text{см}} \leq T_B.$$

Исходя из вышесказанного, диапазон доступного времени смещения может быть рассчитан следующим образом:

$$T_{\text{см.мин}} \leq T_{\text{см}} \leq T_{\text{см.макс}},$$

где

$$T_{\text{см.мин}} = -T_{\text{мин}}, \quad T_{\text{см.макс}} = T_B - T_{\text{макс}}.$$

$T_{\text{см.мин}}$  и  $T_{\text{см.макс}}$  — доступные минимальное и максимальное значения смещения соответственно.

Покажем, что различные схемы ШИМ могут быть получены путем произвольного изменения  $T_{\text{см}}$  (между  $T_{\text{см.мин}}$  и  $T_{\text{см.макс}}$ ).

#### А. Синусоидальный ШИМ.

Синусоидальная схема ШИМ является классическим и широко используемым методом. В этом случае нет разницы между фазным напряжением ( $U_{aN}$ ) и полюсным напряжением ( $U_{aN}$ ). Следовательно, коэффициент

заполнения фазы А выходного импульса инвертора становится равным

$$\frac{T_{ca}}{T_B} = \frac{1}{2} + \frac{U_{an}^*}{U_{dc}} = \frac{1}{2} + \frac{U_{aN}^*}{U_{dc}}$$

и  $T_{ca}$  может быть переставлен как

$$T_{ca} = \frac{T_B}{2} + \frac{T_B}{U_{dc}} U_{aN}^* = \frac{T_B}{2} + T_{an}.$$

Следовательно, для реализации синусоидальной ШИМ значение смещения определяется следующим образом:

$$T_{\text{см}} = \frac{1}{2} T_B. \tag{1}$$

Как известно, этот метод ШИМ имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что линейный диапазон регулируемого напряжения ограничен индексом модуляции 1. Этот недостаток вызван неоптимальным расположением эффективного времени. Здесь независимо от условий работы положение эффективного времени всегда фиксировано. На рис. 4 показаны время смещения и фазное и полюсное напряжение синусоидальной схемы ШИМ. Полюсное напряжение в этом случае синтезируется с использованием рассчитанной длительности стробирующего импульса по следующему уравнению:

$$U_{an} = \left( \frac{T_{ca}}{T_B/2} - 1 \right) \frac{U_{dc}}{2}.$$

#### Б. Пространственно-векторный ШИМ (ПВШИМ)

Метод ПВШИМ оценивается на основе концепции среднего напряжения в течение одного периода вы-

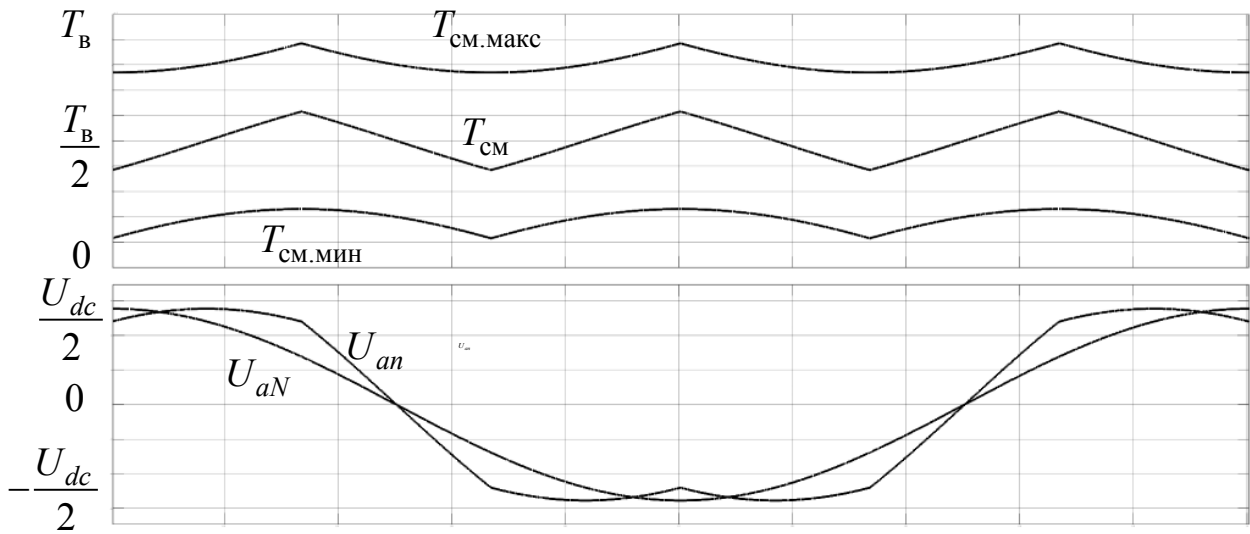


Рис. 5. Время смещения, фазное и полюсное напряжения ПВШИМ ( $M = 0,8$ ).

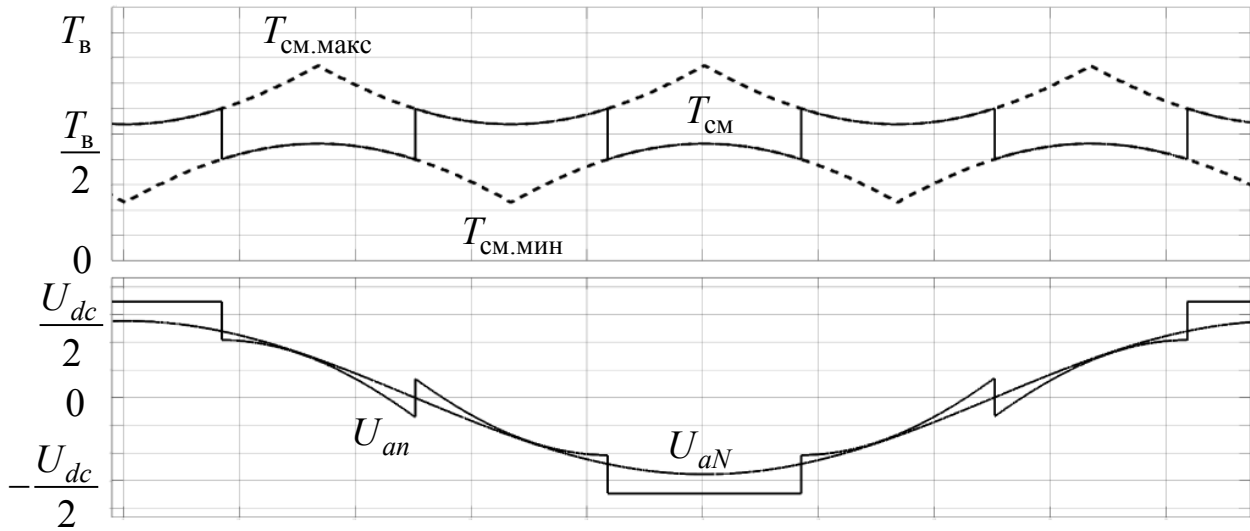


Рис. 6. Время смещения, фазное и полюсное напряжения 60° ПШИМ ( $M = 0,8$ ).

борки. Если вектор постоянного опорного напряжения задан в области шестиугольника, как показано на рис. 2, то этот вектор может быть представлен двумя ближайшими активными векторами следующим образом [3, 4]:

$$U^* = (T_1 U_n + T_2 U_{n+1}) / T_B,$$

а время  $T_1, T_2$  выводится через систему координат  $U_d^{s*}, U_q^{s*}$  [4]:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_B}{U_{dc}} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{3}m\right)U_d^{s*} - \cos\left(\frac{\pi}{3}m\right)U_q^{s*} \right]$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_B}{U_{dc}} \left[ -\sin\left(\frac{\pi}{3}(m-1)\right)U_d^{s*} + \cos\left(\frac{\pi}{3}(m-1)\right)U_q^{s*} \right]$$

$$T_0 = T_B - T_1 - T_2$$

где  $U_d^{s*} = |U^*| \cos(\theta), U_q^{s*} = |U^*| \sin(\theta),$   
 $\theta = \alpha + (\pi/3)(m-1), m$  — номер сектора (1, 2, ..., 6).

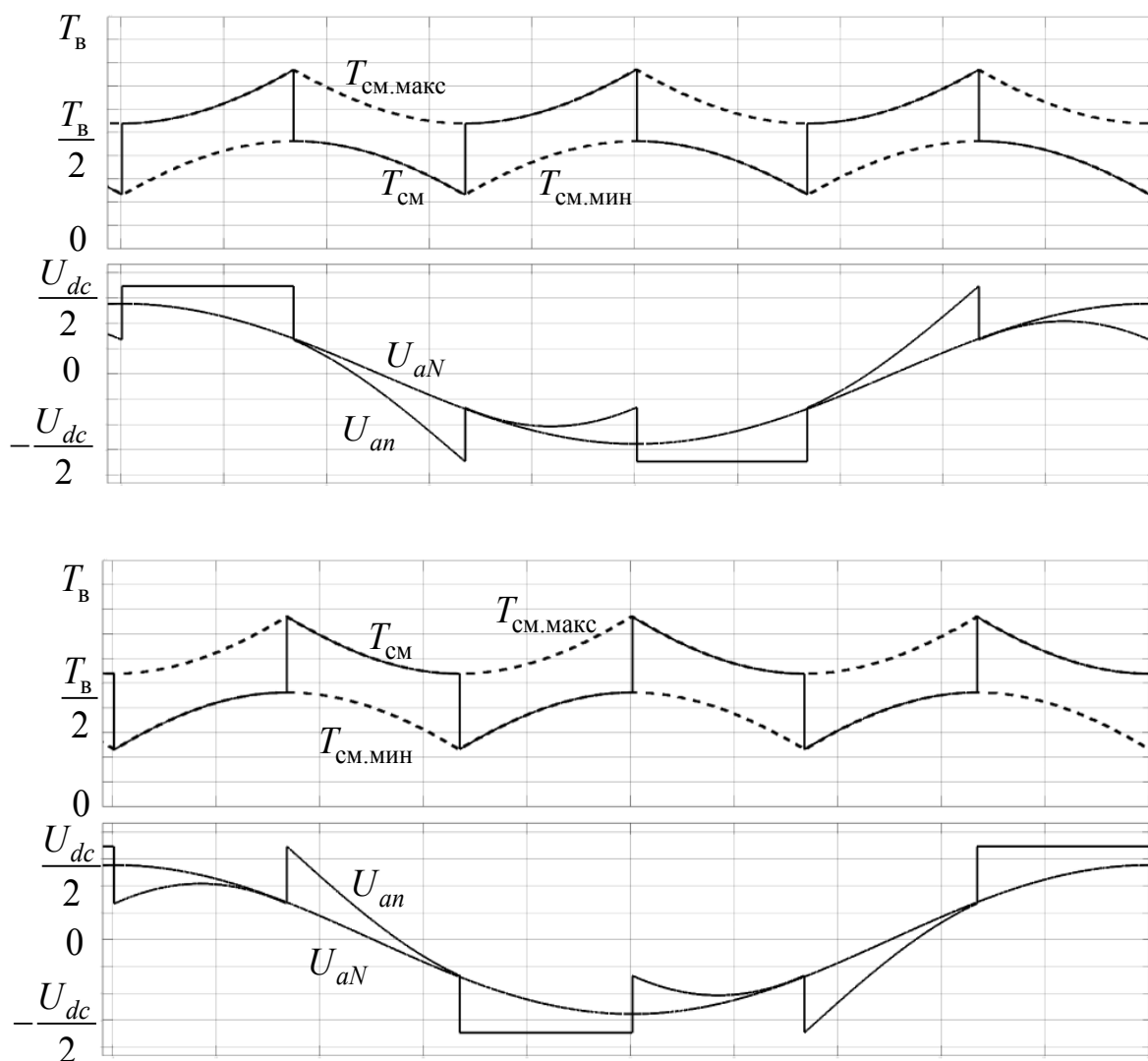


Рис. 7. Время смещения, фазное и полюсное напряжения ШИМ со сдвигом  $\pm 30^\circ$  от  $60^\circ$  ПШИМ ( $M = 0,8$ ).

Время подачи означает продолжительность, в течение которой прикладываются активные напряжения, но не подразумевает фактическую длительность стробирующего импульса (время стробирования).

Следовательно, чтобы рассчитать фактическое время стробирования, время подачи должно быть повторно объединено со временем подачи нулевого напряжения  $T_0$  в соответствии с положением опорного вектора. В этом методе ШИМ время подачи нулевого напряжения распределяется симметрично в начале и в конце интервала дискретизации симметричным образом. Следовательно, чтобы использовать этот метод ШИМ для работы инвертора, необходимо выполнить более сложную задачу для определения номера сектора и комбинации времени подачи. Такой способ является

довольно сложным при реализации в практических приложениях.

Однако можно восстановить фактическую длительность стробирующего импульса без сложных вычислений, применяя концепцию эффективного времени. Если время нулевого напряжения симметрично распределено в одном периоде дискретизации, вся задача модуляции для ПВШИМ легко решается с помощью предложенного алгоритма. Более подробное объяснение представлено в [5]. Чтобы переместить эффективное время в центр интервала дискретизации, значение смещения времени  $T_{см}$  должно быть равно

$$T_{см} = \frac{1}{2}T_0 - T_{мин},$$

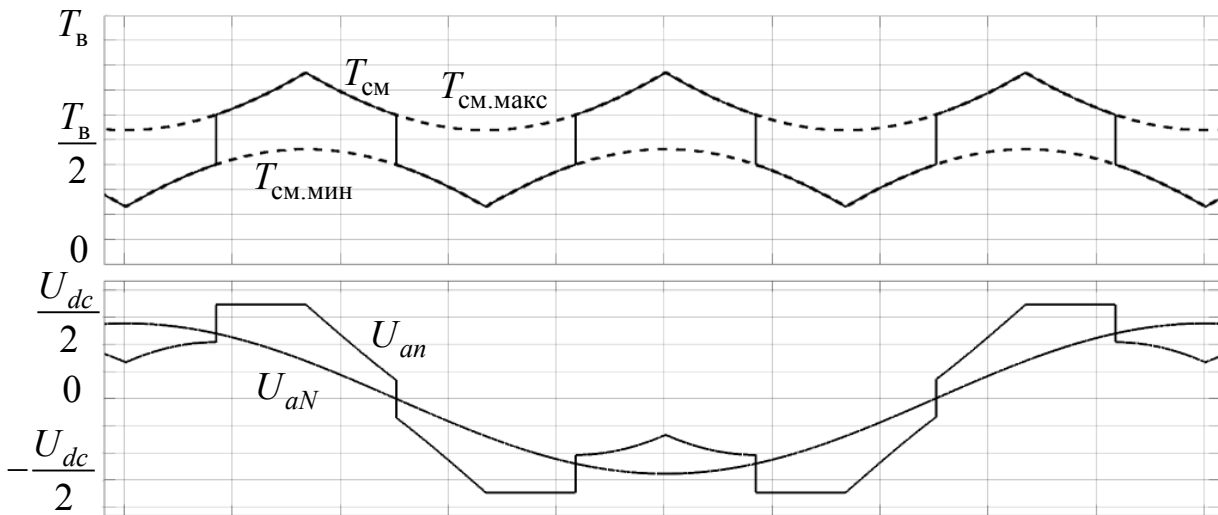


Рис. 8. Время смещения, фазное и полюсное напряжения 30° ПШИМ ( $M = 0,8$ ).

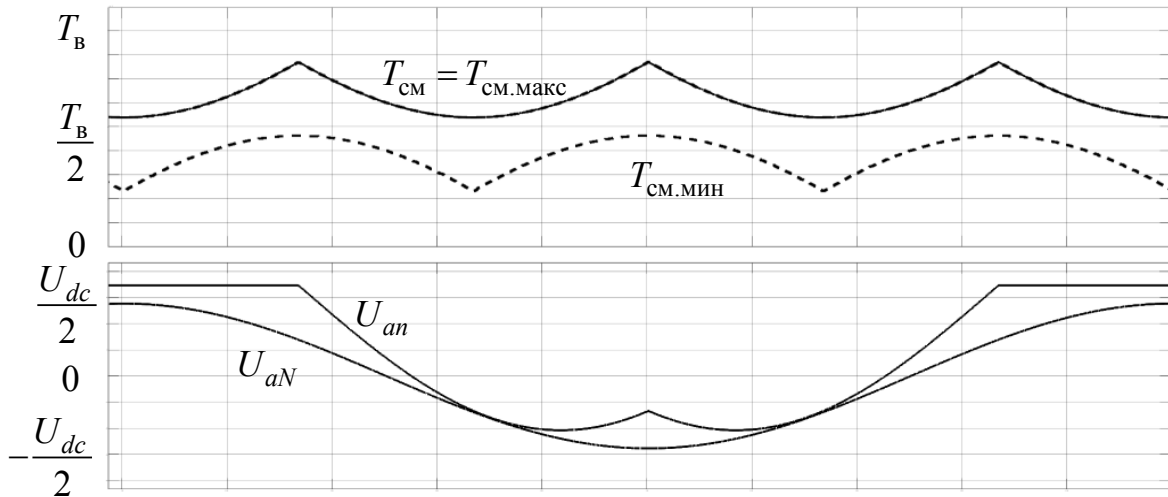


Рис. 9. Время смещения, фазное и полюсное напряжения 120° ПШИМ ( $M = 0,8$ ),  $T_{CM} = T_B - T_{МАКС}$ .

где

$$T_0 = T_B - T_{эф}. \tag{2}$$

На рис. 5 показаны время смещения, фазное и полюсное напряжение схемы ПВШИМ. Отмечается, что время смещения составляет середину  $T_{CM.мин}$  и  $T_{CM.макс}$ . Для этой схемы максимальный коэффициент модуляции составляет  $M = 2/\sqrt{3} = 1,154$ .

**С. Схемы прерывистой модуляции (ПШИМ)**

Эти схемы ШИМ, которые также приводит к максимальному диапазону модуляции, как и ПВШИМ, использует операцию прерывистого переключения. В этом случае каждый выход ветвей инвертора попеременно оставляют на положительной или отрицательной шине напряжения звена на интервале 120° электрического периода. Хотя эта схема ШИМ обычно приводит к более высоким гармоникам тока по сравнению с ПВШИМ, она представляет особый интерес, поскольку снижает среднюю частоту переключения на 33% и, таким образом, приводит к меньшим потерям на переключения ключей.



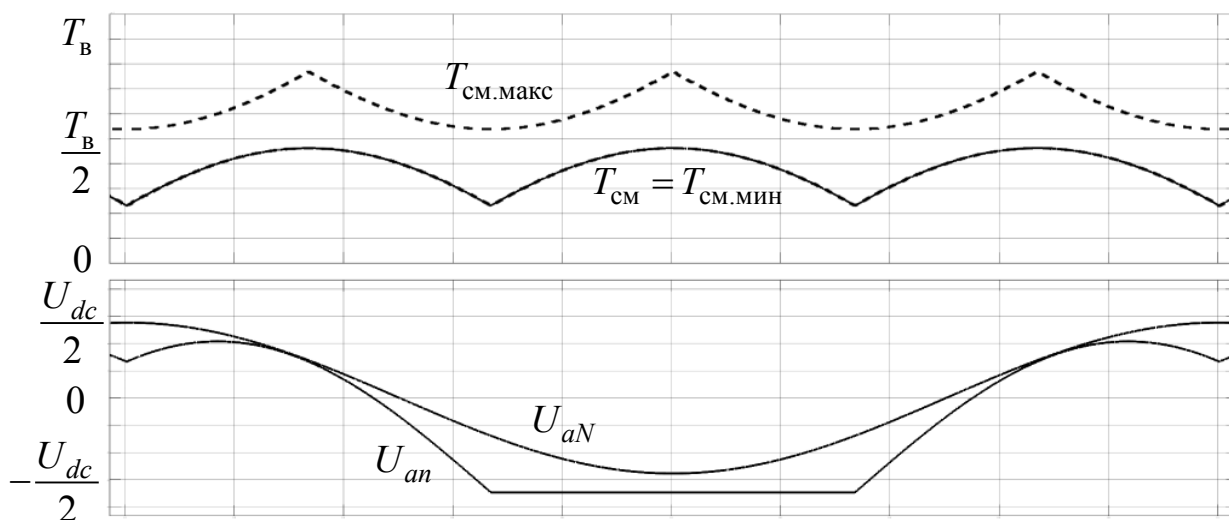


Рис. 10. Время смещения, фазное и полюсное напряжения  
 $120^\circ$  ПШИМ ( $M = 0,8$ ),  $T_{cm} = -T_{мин}$ .

Среди разнообразия ШИМ с прерывистой модуляцией (ПШИМ), особый интерес представляет ШИМ для линейного преобразователя, так как позволяет минимизировать потери при переключении (рис. 6). Принцип этой схемы ШИМ можно изобразить с точки зрения эффективного времени следующим образом. Если опорное напряжение фазы положительное (или отрицательное) и имеет максимальную величину, переключатель фазы должен быть зафиксирован в положении ВКЛ (или ВЫКЛ). То есть,

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} \geq 0 \Rightarrow T_{макс} + T_{см} = T_B,$$

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} < 0 \Rightarrow T_{мин} + T_{см} = 0.$$

Таким образом, значение временного сдвига равно

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} \geq 0 \Rightarrow T_{см} = T_B - T_{макс},$$

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} < 0 \Rightarrow T_{см} = -T_{мин}. \quad (3)$$

В некоторых приложениях с точки зрения минимизации гармоник тока требуется изменить последовательность включения инвертора с ПВШИМ на эту схему или обратно [6, 7]. В предлагаемом унифицированном методе ШИМ этот переход может быть выполнен плавно, путем изменения только времени смещения с (2) на (3) или обратно.

Сдвиг продолжительности включения на  $\pm 30^\circ$  секунд возможен без ограничения диапазона модуляции. Продолжительность включения для каждого плеча инвертора сдвинута на  $30^\circ$ , чтобы минимизировать потери при переключении в соответствии с коэффициентом мощности нагрузки. Эта схема ШИМ также легко реали-

зуется путем изменения времени смещения в предлагаемой схеме, как показано на рис. 7.

Рассмотрим  $30^\circ$ -ю прерывистую схему ШИМ. В этой схеме коммутационные потери не зависят от фазового угла, так как область ВКЛ распределена равномерно по основному периоду, гармоники тока наименьшие среди прерывистых ШИМ. Схема переключения этой схемы противоположна упомянутой выше  $60^\circ$  ШИМ. Таким образом, время смещения определяется выражением

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} \geq 0 \Rightarrow T_{см} = -T_{мин},$$

$$\text{если } T_{мин} + T_{макс} < 0 \Rightarrow T_{см} = T_B - T_{макс}.$$

В схемах  $120^\circ$  ПШИМ полюсное напряжение не является полувольтным симметричным и содержит постоянную составляющую. С точки зрения времени смещения можно записать следующие уравнения. Для схемы ШИМ, представленной на рис. 9

$$T_{см} = T_B - T_{макс},$$

а для схемы ШИМ рис. 10

$$T_{см} = -T_{мин}.$$

Как видно на рис. 9, различные ШИМ можно синтезировать путем изменения параметра  $T_{см}$ .

Как видно на рис. 10, различные ШИМ можно синтезировать путем изменения параметра  $T_{см}$ .

Предложенный метод модуляции напряжения, использующий концепцию эффективного времени, может быть реализован на базе микроконтроллера без каких-либо таблиц и тригонометрических функций и мо-

жет быть легко применен в промышленных приложениях. Благодаря присущей предлагаемой схеме простоте изменение схемы модуляции в реальном времени осуществляется плавно.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Holtz, "Pulsewidth modulation — A survey," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, pp. 410–420, Oct. 1992.
2. H.W. Van der Broeck and H.C. Skudelny, "Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 24, pp. 142–150, Jan./Feb. 1988.
3. К пониманию векторной системы широтно-импульсной модуляции инвертора напряжения / А.А. Емельянов, Д.И. Пестеров, А.С. Вотяков [и др.].— Текст: непосредственный // Молодой ученый.— 2017.— № 52 (186).— С. 1–14.— URL: <https://moluch.ru/archive/186/47596/> (дата обращения: 26.10.2022).
4. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 654 с.
5. J.W. Kolar, H. Ertl, and F.C. Zach, "Influence of the modulation method on the conduction and switching losses of a PWM converter system," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, pp. 1063–1075, Nov./Dec. 1991.
6. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 654 с.
7. Калачёв, Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе / Калачёв Ю.Н. — Москва: ДМК Пресс, 2019. — 98 с. — ISBN978–5–97060–766–4.— Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт].— URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970607664.html> (дата обращения: 08.11.2022).

© Мельников Дмитрий Владимирович ( melnikov-dv@eandex.ru ), Петровичев Максим Александрович ( tabblif@yandex.ru ).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

