



# ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДНОЙ КРИВОЙ И НАСТРОЙКИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Rasulova B.I. [10009-0002-3967-5382]*

*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalari universiteti, Elektr energetikasi kafedrası doktoranti,  
E\_mail: rasulova.barchinoy95@gmail.com*

**Анотация.** Широтно-импульсное регулирование (ШИР) в автономных инверторах напряжения отличается разнообразием методов формирования выходного напряжения, характерного для таких устройств. Это разнообразие связано с широкими возможностями выбора алгоритмов коммутации тиристоров, которые задают временную последовательность их включения и отключения. При использовании ШИР выходное напряжение инвертора представлено серией импульсов одинаковой длительности в пределах одного периода. Управление уровнем выходного напряжения осуществляется путём изменения ширины этих импульсов. В зависимости от требуемого спектра гармоник форма выходного напряжения может включать различное количество импульсов за один период — как небольшое, так и значительное.

**Ключевые слова:** силовой тиристор, мостовой инвертор, выходное напряжение, широтно-импульсное регулирование, импульс, электропривод, алгоритм переключений, автономные инверторы напряжения, гармоника, диаграмма.

**Annotatsiya.** Avtonom kuchlanish inverterlarida kenglik-impulsli rostdash (KIR) bunday qurilmalarga xos bo'lgan chiqish kuchlanishini shakllantirish usullarining xilma-xilligi bilan ajralib turadi. Bu xilma-xillik tiristorlarni ulash va uzishning vaqt ketma-ketligini belgilaydigan kommutatsiya algoritmlarini tanlashning keng imkoniyatlari bilan bog'liq. KIR qo'llanilganda, invertorning chiqish kuchlanishi bir davr ichida bir xil davomiylikdagi impulslar ketma-ketligi bilan ifodalanadi. Chiqish kuchlanishi darajasini boshqarish ushbu impulslar kengligini o'zgartirish orqali amalga oshiriladi. Talab qilinadigan garmonikalar spektriga qarab, chiqish kuchlanishining shakli bir davrda oz yoki ko'p miqdordagi turli xil impulsnlarni o'z ichiga olishi mumkin.

**Kalit so'zlar:** kuch tiristori, ko'prik inverter, chiqish kuchlanishi, kenglik-impulsli rostdash, impuls, elektr yuritma, almashlab ulash algoritmi, avtonom kuchlanish inverterlari, garmonika, diagramma.

**Abstract.** Pulse-width modulation (PWM) in autonomous voltage inverters is characterized by a variety of methods for forming the output voltage typical for such devices. This diversity is due to the wide range of thyristor switching algorithms that determine the timing sequence of their turning on and off. Under PWM, the inverter's output voltage is formed as a series of pulses of equal duration within one period. The output voltage level is controlled by varying the width of these pulses. Depending on the required harmonic spectrum, the waveform of the output voltage can include either a small or a large number of pulses per period.

**Keywords:** power thyristor, bridge inverter, output voltage, pulse-width modulation (PWM), pulse, electric drive, switching algorithm, autonomous voltage inverters, harmonic, diagram.

## Введение

Наиболее простой вариант широтно-импульсного регулирования реализуется путём однократного включения силовых тиристоров в течение одного периода. Управление выходным напряжением осуществляется посредством изменения угла проводимости  $\psi$  каждого тиристора, который включается лишь один раз за период. В источнике [1] представлены диаграммы работы силовых тиристоров трёхфазного мостового инвертора при различных значениях угла  $\psi$  ( $180^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ), а также соответствующие кривые фазных и линейных выходных напряжений.



Форма кривой выходного напряжения при таком способе регулирования напрямую зависит от значения угла  $\Psi$ . В процессе регулирования в диапазоне от  $60^\circ$  до  $180^\circ$  наблюдаются существенные изменения в гармоническом составе выходного напряжения.

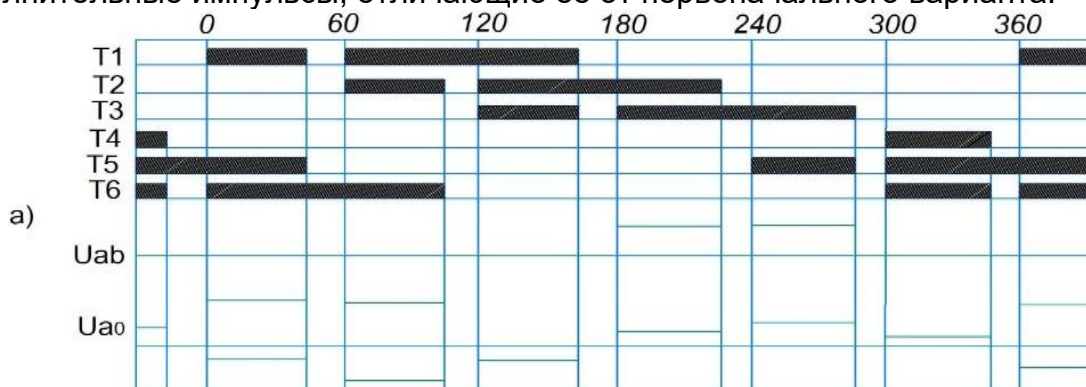
Кроме угла проводимости, форма кривой выходного напряжения (как линейного, так и фазного) также существенно определяется параметрами нагрузки — в частности, её индуктивностью и значением  $\cos\phi$  (за исключением случая, когда  $\Psi=180^\circ$ ). Это объясняется тем, что при углах  $\Psi$  менее  $180^\circ$  не выполняются условия, необходимые для стабильности формы выходного напряжения. В отличие от случая с  $\Psi=180^\circ$ , при котором обеспечивается двусторонняя проводимость всех трёх плеч инверторного моста, при меньших углах возможно возникновение режимов, при которых ток в одной из фаз проходит через обратный диод анодной или катодной группы, в зависимости от индуктивности нагрузки. Это приводит к нестабильности потенциала данной фазы и, как следствие, к искажению формы выходного напряжения.

По этой причине схема с однократным переключением силовых вентиляей не получила широкого самостоятельного применения в системах переменного электропривода.

Решение проблемы нестабильности формы выходного напряжения было найдено за счёт увеличения числа коммутаций силовых тиристоров в пределах интервала  $180^\circ$ . Рассмотрим применение алгоритмов с двукратным переключением тиристоров. В этом случае возможны два варианта, представленные на рисунке 1. Они различаются порядком чередования интервалов проводимости тиристоров во времени.

В варианте алгоритма, изображённого на рис. 1а, первый интервал проводимости тиристора составляет  $\alpha^\circ$ , а второй  $60^\circ + \alpha^\circ$ . В алгоритме по рис. 1б последовательность этих интервалов противоположная. Общим признаком обоих алгоритмов является наличие интервалов продолжительностью  $\beta^\circ$ , в течение которых проводимость сохраняется за одним тиристором. Такой режим обеспечивает двустороннюю проводимость соответствующего плеча инверторного моста, что способствует повышению устойчивости инверторной схемы в указанных временных интервалах.

В результате, при активно-индуктивной нагрузке форма кривой выходного напряжения в случае алгоритма по рис. 1а отклоняется от исходной лишь при значениях угла  $\Psi$ , превышающих  $45^\circ$ . В то же время при использовании алгоритма по рис. 1б структура вентильных цепей инвертора в пределах интервалов  $\beta^\circ$  остаётся неизменной вне зависимости от изменения параметров нагрузки. Однако при этом форма выходного напряжения содержит дополнительные импульсы, отличающие её от первоначального варианта.



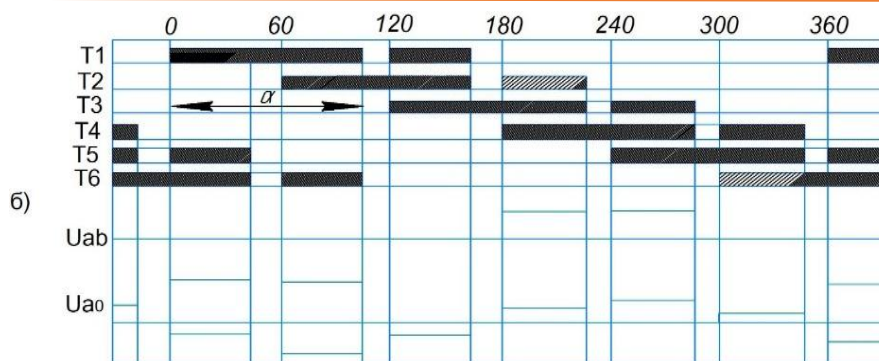


Рис.1. Диаграммы работы силовых тиристоров и формы линейного и фазного напряжений.

Во всех рассмотренных алгоритмах переключения (АП) основным ограничением для их широкого применения в системах переменного электропривода является чувствительность формы выходного напряжения инвертора к параметрам нагрузки. В алгоритмах с двукратным переключением тиристоров в течение одного периода обеспечивается проводимость одного тиристора на каждом временном интервале. Однако, чтобы сохранить стабильную форму выходного напряжения независимо от изменений характеристик активно-индуктивной нагрузки, необходимо, чтобы на интервалах  $\beta^\circ$  между фазами нагрузки сохранялось соединение через вентили инвертора.

Для реализации этого условия требуется, чтобы на данных интервалах одновременно проводили ток три тиристора, принадлежащие одной и той же группе либо анодной, либо катодной. С этой целью существующие алгоритмы были модифицированы: на интервалах  $\beta^\circ$  дополнительно включаются (а затем выключаются) один или два тиристора.

В результате подобных изменений, как показано в работах [1,5], были разработаны алгоритмы, в которых выходное напряжение содержит четыре импульса за период (см. рис.2). Благодаря введению дополнительных переключений достигается последовательное включение тиристоров в каждой фазе, обеспечивается проводимость всех трёх плеч инверторного моста на каждом временном интервале, и тем самым достигается независимость формы выходного напряжения от изменений в параметрах нагрузки.

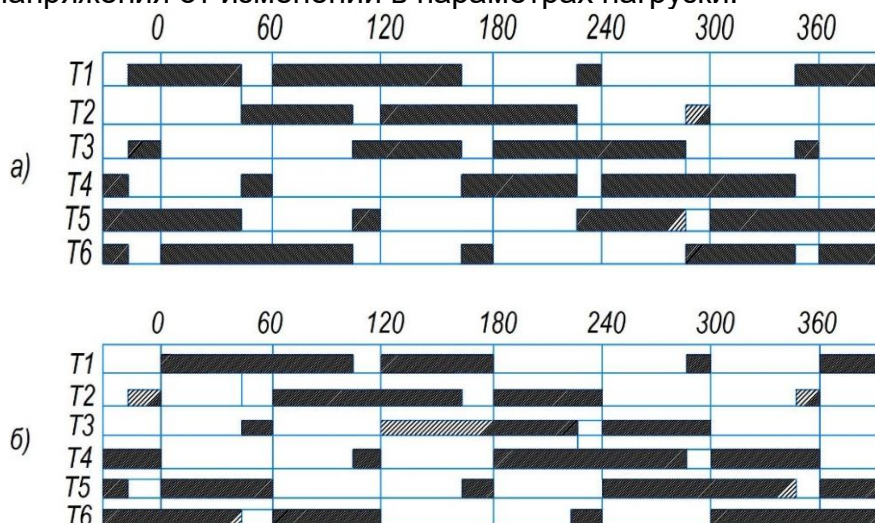


Рис.2. Диаграммы состояний силовых тиристоров для алгоритмов с дополнительными интервалами проводимости: последовательности интервалов а)  $\alpha^\circ, 60^\circ + \alpha^\circ$ ; б)  $60^\circ + \alpha^\circ, \alpha^\circ$ .



Алгоритмы, представленные на рисунке 2, лежат в основе одного из типов широтно-импульсного регулирования (ШИР), рассматриваемого в данной работе. Более подробно остановимся на алгоритме, в результате которого в кривой линейного напряжения формируются четыре импульса (см. рис. 2б) [5].

Данный алгоритм представляет собой модифицированный вариант 180-градусного режима управления с введением дополнительных участков открытых и закрытых состояний тиристоров длительностью  $\alpha^\circ$ , а также интервалов закрытого состояния  $\beta^\circ$ , равных  $60^\circ$ . Дополнительные коммутации тиристоров выполняются в правой половине средних  $60^\circ$ -градусных интервалов проводимости и замкнутого состояния. Например, для тиристора Т1 это происходит в интервалах от  $60^\circ$  до  $120^\circ$  и от  $240^\circ$  до  $300^\circ$ .

Общей чертой алгоритмов, представленных на рисунках 1 и 2, является наличие четырёх импульсов в форме линейного выходного напряжения инвертора. Несмотря на относительную простоту реализации, эти алгоритмы не всегда способны удовлетворить все требования, предъявляемые к системам электропривода переменного тока. Их основной недостаток заключается в ограниченном диапазоне совместного регулирования выходного напряжения и частоты [1,6]. Это обусловлено высоким уровнем высших гармоник в кривых выходного напряжения и тока двигателя, что приводит к увеличенным потерям в асинхронном двигателе (АД) и значительному возрастанию токов в силовой части инвертора.

Перечисленные выше недостатки можно устранить, применяя алгоритмы переключения (АП), в которых форма выходного напряжения инвертора формируется с увеличенным числом импульсов за период. В этом контексте рассмотренные ранее кривые, включая форму, приведённую на рис. 2б, служат базой для построения выходного напряжения с числом импульсов, превышающим четыре за период.

Увеличение количества импульсов достигается за счёт введения в исходные алгоритмы дополнительных участков открытых и закрытых состояний силовых тиристоров. Для обозначения количества создаваемых пауз (перерывов в проводимости) в пределах одного  $60^\circ$ -градусного интервала вводится параметр  $n \geq 1$  [1,3].

При этом число импульсов длительностью  $\alpha^\circ$  в кривых линейного ( $K_{\text{лн}}$ ) и фазного ( $K_{\text{фн}}$ ) напряжений за один период составляет:

$$K_{\text{лн}} = 4n; K_{\text{фн}} = 3/2 K_{\text{лн}} = 6n \quad (1)$$

Существенным параметром АП является показатель кратности коммутации  $K_k$ , отражающий количество переключений двух силовых тиристоров в фазе и количество перезарядов коммутирующего конденсатора в фазном узле принудительной коммутации на периоде:

$$K_k = 4n + 2 \quad (2)$$

Исходным показателем качества формы кривой выходного напряжения является содержание в ней высших гармонических. На рис. 1.5 представлены зависимости относительного состава гармонических от  $\alpha^\circ$  соответственно для  $n=1$  (а),  $n=2$  (б),  $n=3$  (в),  $n=4$  (г). Амплитудное значение напряжений гармонических получается из выражения (1,3):

$$A_{mv} = \frac{4E}{\pi v} \sin \frac{v\alpha^\circ}{2} \left( \frac{\sin \frac{\pi v}{3}}{\sin \frac{2\pi v}{6n}} \right) \quad (3)$$

где:  $A_{*mv} = \frac{A_{mv} 2\sqrt{3}E}{\pi}$  – амплитудное значение гармонической в относительных единицах;  $v=1,3,5,7,11$ , – номера гармонических;  $E$  – напряжение питания. Так как



$$\alpha^\circ + \beta^\circ = 60/\eta \quad (4)$$

В области низких частот рекомендуется формировать кривую выходного напряжения с увеличенным числом импульсов, в то время как при повышении частоты количество импульсов целесообразно уменьшать.

Рассмотренный метод ШИР, известный как “односторонний” (ШИР1) [2], предполагает, что все импульсы линейного и фазного напряжения имеют одинаковую длительность  $\alpha^\circ$ . Существует также “двусторонний” вариант ШИР (ШИР2) [2], при котором импульсы в кривой выходного и фазного напряжения могут иметь разную длительность.

Метод ШИР2 был впервые предложен в работе [5], а его особенности подробно рассмотрены в источниках [2,3,4]. Алгоритм переключения силовых тиристоров в данном способе также базируется на 180-градусном режиме управления. Для реализации ШИР2 дополнительные коммутации тиристоров выполняются в центральной части средних  $60^\circ$  интервалов проводимости и открытых состояний.

В кривой линейного напряжения на полупериодах крайние импульсы имеют длительность  $\alpha^\circ$ , тогда как центральные импульсы — удвоенную длительность, равную  $2\alpha^\circ$ . При параметре  $\eta = 1$  суммарная длительность открытых и закрытых состояний силовых тиристоров в  $60^\circ$  интервале составляет.

$$2\alpha^\circ + \beta^\circ = 60^\circ \quad (5)$$

Особенностью является и форма кривой фазного напряжения, в которой наблюдается непосредственный переход между импульсами без пауз. Представленный алгоритм переключения (АП) служит базовым для метода ШИР2 при формировании кривых выходного напряжения с увеличенным числом импульсов. В данном случае это достигается за счёт введения соответствующего количества пауз в проводимости силовых тиристоров в рассматриваемом  $60^\circ$  интервале.

Количество импульсов длительностью  $\alpha^\circ$  в кривых линейного и фазного напряжений за один период при использовании ШИР2 определяется следующим образом:

$$K_{\text{лн}} = 8\eta; K_{\text{фн}} = 3/2 K_{\text{лн}} = 12\eta \quad (6)$$

## Заключение

Анализ гармонического состава выходного напряжения выявил, что регулирование с большим числом импульсов значительно уменьшает амплитуду высших гармоник, что способствует снижению потерь в асинхронном двигателе и уменьшению коммутационных токов в инверторе. При этом рекомендуется разделение полного диапазона регулирования частоты на поддиапазоны, каждому из которых соответствует определённое значение параметра  $n$ , что оптимизирует качество выходного напряжения в широком диапазоне рабочих частот.

Полученные результаты и разработанные алгоритмы могут быть эффективно применены для повышения качества управления автономными тиристорными инверторами напряжения в системах электропривода переменного тока, обеспечивая улучшение энергетической эффективности и надёжности работы.

## Список использованной литературы:

[1]. Баранов Г.В. Широтно-импульсная модуляция и её применения // М.: Наука, 2005.



- [2]. Корнев М.В. Системы с широтно-импульсной модуляцией // М.: Энергия, 2008.
- [3]. Бояркин Л.Я. Электронные преобразователи на базе ШИМ // М.: Высшая школа, 2010.
- [4]. Стариков В.М. Применение ШИМ в источниках питания // Журнал радиоэлектроники, 2012.
- [5]. Петров С.А. Методы контроля и регулирования напряжения в цепях постоянного тока // Электротехника, 2011.
- [6]. Смирнов К.Д. Теория и практика широтно-импульсной модуляции // Сибирский университет, 2013.
- [7]. Khalil A.N. Pulse Width Modulation and its Applications // IEEE Transactions, 2011.
- [8]. Manjunath D.G. Modulation Techniques in Power Electronics // Wiley, 2009.
- [9]. Arce G.L. PWM Techniques in Electrical Engineering // Springer, 2014.
- [10]. Narasimhan V.J.G. Power Conversion with PWM // McGraw-Hill, 2015.