

## ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭНЕРГОСИСТЕМ

Шавёлкин А. А.

Донецкий национальный технический университет

vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

*In paper some results of works which are carried out in DonNTU on research and perfection of power circuits and principles of control of converters of frequency of medium voltage with multilevel formation of a output voltage are submitted. The basic directions of researches is minimization of the circuits and decrease of losses on commutation of switches. As the tool of researches computer simulation of processes is used.*

Электропривода большинства механизмов в системе собственных нужд энергосистем оснащены асинхронными и синхронными двигателями среднего напряжения (6 - 10кВ). Вопросы энергосбережения при этом напрямую связаны с необходимостью регулирования их частоты вращения, для чего наиболее эффективно частотное регулирование. Однако однозначного решения применительно преобразователям частоты (ПЧ) соответствующего класса напряжения нет. Только несколько фирм-производителей предлагают преобразователи частоты среднего напряжения. При этом основным принципом является многоуровневое формирование - ступенчатая аппроксимация синусоиды выходного напряжения. Достоинствами таких ПЧ являются:

- выходное напряжение по гармоническому составу приближается к существующим стандартам и в отличие от традиционных ШИМ инверторов характеризуется сниженным  $du/dt$ , что дает возможность применения без дополнительных «синусных» фильтров;
- силовые цепи могут быть выполнены на низковольтных полупроводниковых приборах;
- за счет использования на входе многофазных схем выпрямления потребляют от сети практически синусоидальный входной ток;
- как правило имеют более низкую частоту коммутации, что снижает потери в схеме.

В настоящее время используются в основном две топологии схем [1]: инвертор с многоуровневым источником в звене постоянного тока (NPC) с фиксирующими диодами или конденсаторами и каскадные с последовательным соединением мостовых однофазных инверторов в выходных фазах ПЧ и изолированными источниками постоянного тока. В первом случае напряжение на выходе формируется путем подключения фаз нагрузки к разным уровням напряжения источника, при этом число возможных состояний схемы ПЧ достаточно велико, что существенно усложняет систему управления. Поэтому практическое воплощение нашла в основном схема трехуровневого инвертора (SAMI MEGASTAR (ABB), SIMOVERT MV (SIEMENS)).

Наибольший интерес в последнее время уделяется ПЧ с каскадным соединением инверторов [1-3], у которых выходное напряжение формируется как результат суммирования напряжений отдельных инверторов в фазах. Здесь существенным недостатком является большое число силовых ключей ( $k$ ) и изолированных источников в схеме – при  $n$ - уровнях выходного напряжения  $k=4n$  и  $n$  – источников на фазу.

В обоих случаях схемы и алгоритмы управления ПЧ достаточно сложны и нуждаются в глубоких исследованиях и проработке. В силу сложности реализации ПЧ первоочередное внимание уделяется вопросам моделирования их схем и процессов в них.

Внедрение частотного привода среднего напряжения, как важнейшего элемента системы энергосбережения в настоящее время является, как никогда ранее, актуальной задачей. В этом плане актуален вопрос совершенствования схемы и принципов управления ПЧ с целью улучшения его показателей и привода в целом.

**Цель работы:** исследование принципов реализации многоуровневого формирования выходного напряжения ПЧ при различных топологиях схем и возможностей их минимизации, а также исследование возможностей для снижения числа коммутаций в схеме. При этом необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать возможность использования несимметричного принципа при разных соотношениях напряжений в звене постоянного тока.
- Исследовать возможные варианты схем силовых цепей, выявить новые.
- Исследовать и обосновать принцип управления ключами ПЧ.

Для исследований в работе использовалась симуляция схемы ПЧ в программных пакетах MATLAB 6.1 (приложения Simulink и Power System Blockset) и EWB.

В процессе исследований рассматривались практически все основные варианты топологии многоуровневых ПЧ (МПЧ) и принципы управления ими. Как показали исследования, при меньших мощностях привода в силу более простой схемы силовых цепей предпочтительнее вариант схемы с последовательным соединением

ключей в плечах трехфазного мостового автономного инвертора напряжения (АИН) и, соответственно, с несколькими уровнями напряжения источника питания. При двух уровнях получаем  $4 \times 3 = 12$  ключей, при трех –  $6 \times 3 = 18$  ключей. Схема одной фазы АИН с тремя уровнями источника и использованием фиксирующих (clamped) диодов (VD7 - VD10) приведена на рис.1. Следует отметить, что фиксирующие диоды при равных напряжениях источников блокируют различные напряжения и, соответственно, должны иметь разные обратные напряжения. При этом VD8, VD9 должны иметь удвоенное обратное напряжение – фактически используется последовательное соединение двух диодов.

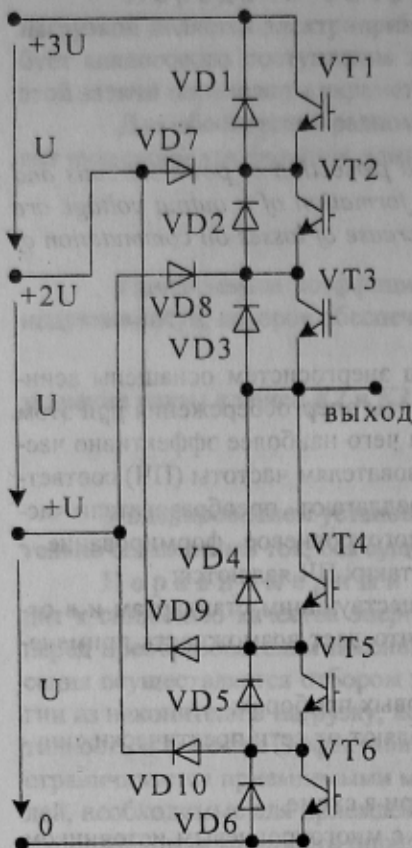


Рисунок 1 – схема фазы ПЧ

зонах взамен нулевых для регулирования величины результирующего вектора используются вектора из нижнего уровня входящие в данный сектор. Формирование пространственного вектора для ряда фиксированных положений осуществляется изменением продолжительности нахождения

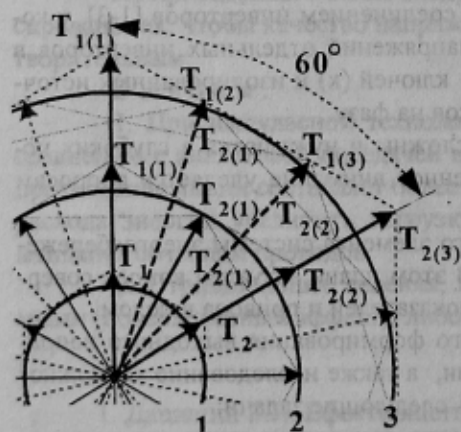


Рисунок 2 - Пространственный вектор напряжения АИН

полнены по мостовой схеме на четырех IGBT транзисторах. Каждая из полувольт выходного фазного напряжения разделена на  $n$  уровней относительно амплитуды фазного номинального напряжения при частоте 50Гц, при этом  $u_k$  может принимать значения  $+U_d, 0, -U_d$  ( $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока).

Для управления ключами схемы рассматривался метод формирования пространственного вектора выходного напряжения инвертора (векторной ШИМ), который находит повсеместное применение для традиционных двухуровневых инверторов и открывает более широкие возможности управления. При этом достигается:

1. Минимальное число коммутаций транзисторов (ключей) схемы, что возможно, если на каждом интервале коммутации переключение осуществляется только в одной фазе инвертора, причем без увеличения частоты коммутации.
2. Сочетание метода ШИМ с амплитудным регулированием. При этом число уровней в кривой выходного напряжения (соответственно и ее амплитуда) изменяется в зависимости от его значения.
3. Снижение амплитуды пульсаций путем исключения (по возможности) при формировании выходного напряжения нулевых состояний.

Пространственные векторы выходного напряжения АИН приведены на рис.2. В зависимости от уровня напряжения имеем 6 возможных векторов, конец которых скачкообразно перемещается по траектории соответствующей правильному шестиграннику (предельный случай). Поскольку в данном случае не преследуется цель получения максимального значения первой гармоники, что приводит к ухудшению гармонического состава, в дальнейшем предполагается получение вращающегося вектора. При этом в качестве предельной траектории рассматриваем окружность, вписанную в шестигранник. При трех уровнях напряжения имеем соответственно три окружности (см. рис.2) и, соответственно, регулирование осуществляется в трех зонах. Первая ограничена окружностью 1, при этом результирующий вектор формируется из векторов ограничивающих сектор в  $60^\circ$ . Число ненулевых состояний схемы АИН – 6 и 2 нулевых. Во второй зоне (между окружностями 1 и 2) имеем в рамках выделенного сектора два по  $30^\circ$  и вдвое большее число состояний схемы. В третьей зоне (между окружностями 2 и 3) – три сектора по  $20^\circ$ . Во второй и третьей

положений осуществляется изменением продолжительности нахождения схемы в каждом из трех состояний при фиксированном периоде коммутации. Соответствующие интервалы времени находятся для каждого из секторов из геометрических соотношений. Расчеты выполнены с дискретностью перемещения вектора в  $10^\circ$ , что соответствует частоте коммутации 1800Гц при частоте выходного напряжения 50Гц. Соответствующие осциллограммы для фазного и линейного выходного напряжений при  $U_{ном}$  (коэффициент модуляции  $\mu = U/U_{ном} = 1$ ) и  $f_{ном} = 50$ Гц приведены на рис.3, а.

При каскадном включении последовательно соединенных АИН в фазах ПЧ многоуровневое формирование выходного напряжения достигается путем суммирования напряжений нескольких источников  $u_k$ . Снижение напряжений отдельных источников в  $\sqrt{3}$  раз достигается при соединении фаз ПЧ по схеме «звезда».

Входные цепи инверторов изолированы и питаются через трехфазные мостовые выпрямители от отдельных вторичных обмоток входного понижающего трансформатора ТВ. Инвертора однофазные и вы-

Традиционным методом управления является многоуровневая или мультиплексорная ШИМ [1]. Формирование напряжений управления ключами отдельных АИН осуществляется путем сравнения треугольного напряжения несущей частоты и заданного синусоидального (рис.4). Соответствующие импульсы формируются при превышении значения одного из этих напряжений. При этом несущие напряжения для разных АИН в фазе

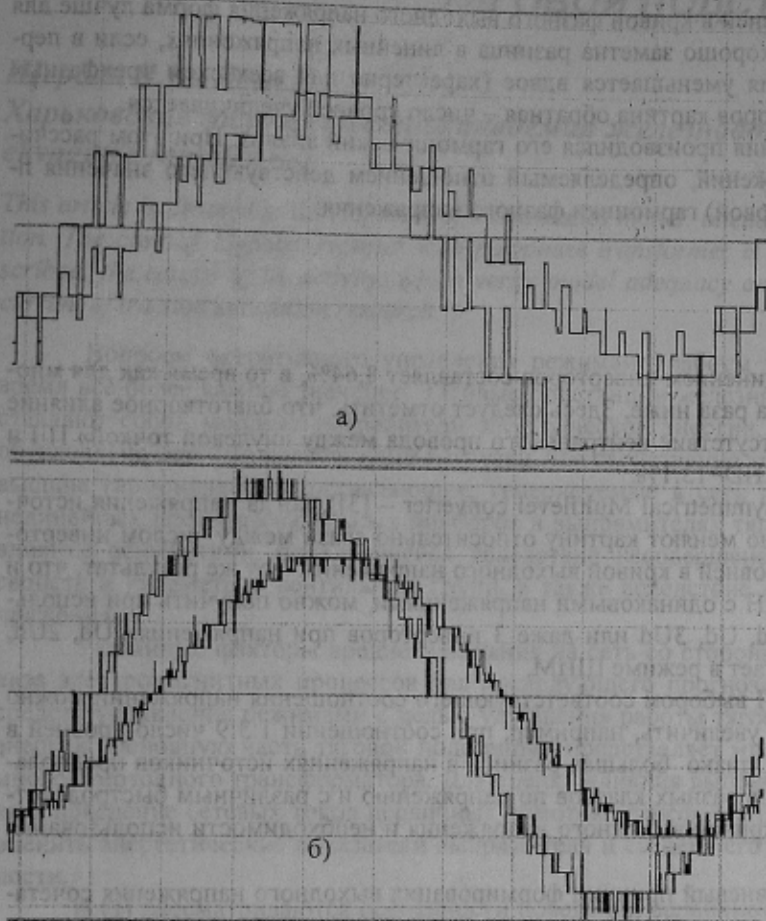


Рисунок 3 – Осциллограммы выходного напряжения:  
а) - многоуровневый инвертор (NPC);  
б) – ПЧ с каскадным соединением инверторов.

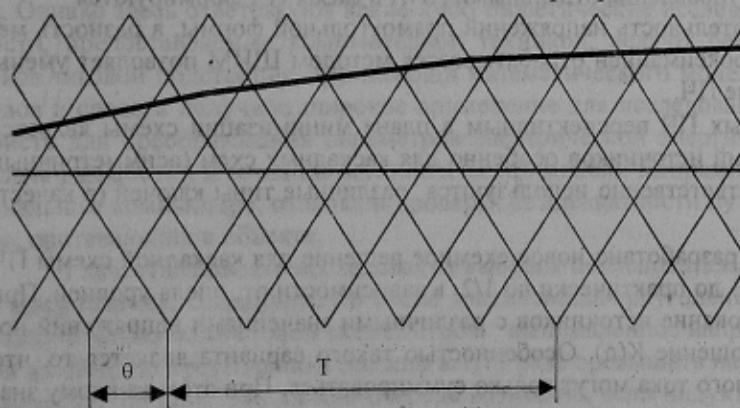


Рисунок 4 - Принцип реализации мультиплексорной ШИМ

ПЧ сдвинуты по фазе на угол  $\theta=2\pi/n$ . Для исключения одновременной коммутации несущие напряжения двух других фаз сдвинуты на угол  $\varphi=2\pi/(3n)$ . Однако авторами [1] допускается неточность – при четном  $n$ , например  $n=6$  имеем для несущих напряжений одной фазы угол  $\theta=60^\circ$ . Таким образом четвертое и последующие напряжения будут изменяться в противофазе по отношению к первому – третьему. По результатам моделирования следует отметить, что сохраняя сдвиг  $\theta=60^\circ$  для первого - третьего и четвертого - пятого несущих напряжений необходимо обеспечить сдвиг между этими группами сигналов в  $90^\circ$ .

Другим вариантом является многоуровневая ШИМ когда несущие напряжения для каждого АИН сдвинуты относительно друг друга по уровню (по вертикали), а задающее синусоидальное напряжение имеет амплитуду в  $n$ - раз больше амплитуды несущего напряжения (для максимального напряжения на выходе). Таким образом, выходное напряжение ПЧ формируется как результат суммирования  $n$  – ШИМ модулированных напряжений отдельных инверторов. Система управления, реализующая рассмотренные принципы достаточно сложна. Хотя частота несущего напряжения обычно невелика (600 – 1000 Гц) это обуславливает дополнительные потери на коммутацию в ключах АИН.

Анализ возможных вариантов формирования выходного напряжения АИН показал, что наиболее простым в реализации является рассмотренный ниже вариант. При линейном выходном напряжении 6000В каждая фаза ПЧ состоит из шести или пяти низковольтных (до 1000 В) АИН ( $U_{z1}-U_{z6}$ ). Законы управления отдельными АИН в фазах ПЧ отличаются.

Их можно сформулировать следующим образом (для одной выходной фазы при  $n=6$ ):

$$U_{зад.ф} = \mu b \sin \omega_2 t$$

$$U_{1-3} = \text{sign}(U_{зад.ф})$$

$$U_4 = \text{sign}(U_{зад.ф} - 2\text{sign}U_{зад.ф})$$

$$U_5 = \text{sign}(U_{зад.ф} - 4\text{sign}U_{зад.ф})$$

$$U_6 = U_{зад.ф} - 3U_1 - U_4 - U_5,$$

где:  $\omega_2$  – частота выходного напряжения;

$\mu = (0 \div 1)$  – коэффициент модуляции,

определяющий значение выходного напряжения относительно номинального.

Следует отметить, что напряжения АИН  $U_{z1} - U_{z5}$  имеют прямоугольную форму и только  $U_{z6}$  имеет сложную форму, которая для реализации предполагает использование ШИМ. В то же время напряжения  $U_{z1} - U_{z3}$  полностью идентичны. Эти факторы в значительной степени упрощают выполнение, как силовой цепи, так и системы управления преобразователем. Так преобразователи  $U_{z1}-U_{z3}$  могут быть заменены одним с напряжением  $3U_d$ . Естественно, что класс ключей по напряжению тоже более высокий,  $U_d^* = 3U_d = 3 \cdot 816 = 2448В$ , но поскольку ШИМ не требуется, то могут быть использованы незапираемые тиристоры с узлом принудительной коммутации или GTO тиристоры (ИЕСТ). Это позволяет сократить число АИН на фазу до четырех. Для снижения пульсаций выходного напряжения и, соответственно, улучшения его гармонического состава целесообразно

но использовать в Узб однополярную ШИМ. Поскольку только в одном АИН используется метод ШИМ, потери мощности переключения ключей в схеме ПЧ могут быть существенно снижены, что упрощает систему охлаждения. Осциллограммы выходного фазного и линейного напряжений при  $\mu=1$ , частоте  $f_{\text{вых}}=50\text{Гц}$  и частоте модуляции  $1800\text{Гц}$  приведены на рис.3,б. Из сопоставления рис.3,а и рис.3,б (сняты при равных условиях) нетрудно заметить, что при одинаковом числе уровней в кривой фазного выходного напряжения форма лучше для ПЧ с каскадным соединением АИН. Особенно хорошо заметна разница в линейных напряжениях, если в первом случае число уровней в кривой напряжения уменьшается вдвое (характерно для всех схем трехфазных АИН), то в ПЧ с каскадным соединением инверторов картина обратная – число уровней увеличивается.

Для оценки качества выходного напряжения производился его гармонический анализ. При этом рассчитывался общий коэффициент нелинейных искажений, определяемый отношением действующего значения высших гармоник к действующему основной (первой) гармонике фазного напряжения:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k}}{U_1}$$

Этот показатель для ПЧ с каскадным соединением инверторов составляет 8,64%, в то время как для многоуровневого АИН – 19,04%, т.е. более чем в два раза ниже. Здесь следует отметить, что благотворное влияние на качество выходного напряжения оказывает отсутствие нейтрального провода между «нулевой точкой» ПЧ и нагрузки – для схемы с нейтральным проводом  $\text{THD}=13,1\%$ .

ПЧ с несимметричными источниками (Asymmetrical Multilevel converter – [3]), когда напряжения источников постоянного тока различны принципиально меняют картину относительно связи между числом инверторов с изолированными источниками и числом уровней в кривой выходного напряжения. Тот же результат, что и в рассмотренной выше схеме (рис.3,б) при 6 АИН с одинаковыми напряжениями, можно получить при использовании 4 инверторов при напряжениях  $U_d, U_d, U_d, 3U_d$  или даже 3 инверторов при напряжениях  $U_d, 2U_d, 3U_d$ . В любом случае только один из АИН работает в режиме ШИМ.

При использовании трех АИН на фазу ПЧ выбором соответствующего соотношения напряжений можно число уровней в кривой выходного напряжения увеличить, например, при соотношении 1:3:9 число уровней в полувольте выходного напряжения составит 13. Однако большая разница в напряжениях источников предполагает использование полупроводниковых приборов разных классов по напряжению и с различным быстродействием, что отразится появлением «всплесков» в кривой выходного напряжения и необходимости использования соответствующих фильтров.

Важным является также то, что многоуровневый принцип формирования выходного напряжения сочетает в себе достоинства амплитудного регулирования с ШИМ, при этом регулирование выходного напряжения достигается изменением числа ступенек и соответственно амплитуды напряжения при постоянном коэффициенте модуляции.

- Предложенный принцип, когда сигналы управления отдельными АИН в фазах ПЧ формируются преобразованием синусоиды задания в последовательность напряжений прямоугольной формы, а разность между исходной синусоидой и ее ступенчатой аппроксимацией обрабатывается методом ШИМ позволяет уменьшить число коммутаций, а значит и потери в схеме ПЧ.

- В существующих схемах многоуровневых ПЧ перспективным в плане минимизации схемы является использование принципа несимметрии напряжений источников особенно для каскадных схем (асимметричный многоуровневый преобразователь). При этом соответственно используются различные типы ключей (в качестве высоковольтных - тиристоры).

- На основе анализа имеющихся решений разработано новое схемное решение для каскадной схемы ПЧ позволяющее сократить количество ключей от  $1/3$  до практически до  $1/2$  в зависимости от числа уровней. При этом число ключей на фазу  $K=2(n+1)$ . Использование источников с различными значениями напряжений позволяет еще в большей степени изменить соотношение  $K(n)$ . Особенностью такого варианта является то, что напряжения изолированных источников постоянного тока могут только суммироваться. При этом каждому значению выходного напряжения соответствует включение определенной комбинации ключей. Данный вариант схемы в настоящее время проходит всестороннюю проверку и исследование возможностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. José Rodríguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 4, AUGUST 2002, pp.724-738.

2. J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, A. Rufer. A Generalized Design Principle of a Uniform Step Asymmetrical Multilevel Converter For High Power Conversion. EPE 2001 – Graz.

3. J. Song-Manguelle, A. Rufer. Asymmetrical multilevel inverter for large induction machine drives. EDPE, 3-5 October 2001, pp.101-107.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Ковальовим Є.Б.