

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С МНОГОУРОВНЕВЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Шавёлкин А. А., к.т.н., доц.

Донецкий национальный технический университет

Украина, 83000, Донецк, ул. Артема 58, ДонНТУ, кафедра "Электротехника"

тел. (062) 304-90-28, E – mail: vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

*Представлені результати досліджень різних типів багаторівневих перетворювачів частоти і принципів керування ними. Найбільш придатними для потужних електроприводів середньої напруги є перетворювачі з послідовним з'єднанням низьковольтних інверторів у вихідних фазах. Розглянуті питання зниження комутаційних витрат у ключах схеми і можливість зменшення кількості елементів у силових колах при використанні інверторів з різними напругами джерел живлення.*

*Представлены результаты исследований различных типов многоуровневых преобразователей частоты и принципов управления ими. Наиболее подходящими для мощных приводов среднего напряжения являются преобразователи с последовательным соединением низковольтных инверторов в выходных фазах. Рассмотрены вопросы снижения коммутационных потерь и возможности уменьшения числа элементов в силовых цепях при использовании инверторов с различными напряжениями источников питания.*

В настоящее время преобразователи частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) находят повсеместное применение. В низковольтном асинхронном электроприводе это решение стало уже классическим. Этого нельзя сказать о приводах переменного тока среднего напряжения (3-10кВ), где мощности составляют сотни и тысячи кВт.

В последнее время во всем мире все большее внимание уделяется ПЧ среднего напряжения. Причем вопрос решен однозначно в пользу ПЧ с многоуровневым формированием выходного напряжения. Достоинствами таких ПЧ являются:

- качество выходного напряжения приближается к принятым стандартам, сниженное в отличие от традиционных ШИМ инверторов значение  $du/dt$ , что дает возможность применения ПЧ 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]: многоуровневый инвертор (МАИН) с несколькими уровнями напряжения источника в звене постоянного тока (НПС) с фиксирующими диодами или конденсаторами и каскадные ПЧ (КПЧ) с последовательным соединением в выходных фазах однофазных мостовых АИН с изолированными источниками постоянного тока. В МАИН напряжение формируется путем подключения фаз нагрузки к разным уровням напряжения источника, число состояний схемы ПЧ достаточно велико, что существенно усложняет систему управления. Поэтому практическое воплощение нашла только схема 9 уровневый МАИН с двумя уровнями напряжения источника. Наиболь-

ший интерес уделяется КПЧ [1-3], когда напряжение формируется путем суммирования напряжений отдельных инверторов в фазах. Они имеют большее в сравнении с МАИН число силовых ключей ( $k$ ) и изолированных источников в схеме – при  $N$ - уровнях выходного напряжения число АИН и, соответственно, источников на фазу  $n=(N-1)/2$ ,  $k=4n$ .

Схемы и алгоритмы управления многоуровневых преобразователей достаточно сложны в реализации и нуждаются в глубоких исследованиях и проработке.

На современном этапе внедрение энергосберегающих технологий напрямую связано с использованием частотно-регулируемого электропривода. При больших мощностях привод и сам по себе является объектом энергосбережения. Именно поэтому 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 многоуровневого формирования выходного напряжения ПЧ при различных топологиях схем и возможностей их минимизации, а также исследование путей снижения коммутационных потерь в схеме. При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать возможные принципы управления ключами схемы ПЧ;
- исследовать возможность использования несимметричного принципа при разных соотношениях напряжений в звене постоянного тока.
- исследовать возможные варианты схем силовых цепей, выявить новые.

Немаловажную роль в исследовании таких сложных систем как многоуровневые ПЧ (МПЧ) играет моделирование. Это предполагает создание соответствующих моделей. Для исследований в работе использовалась симуляция схем ПЧ в программных

пакетах MATLAB и EWB. Топология схем МПЧ на настоящий момент базируется на двух основных структурах - рис.1 и рис.2 (для одной фазы). Объективная оценка и сравнение схем МПЧ это достаточно сложный вопрос. Оба типа преобразователей имеют на входе трансформатор и многофазный входной выпрямитель с несколькими уровнями напряжения (на всю мощность привода  $S$ ) или несколько изолирован-

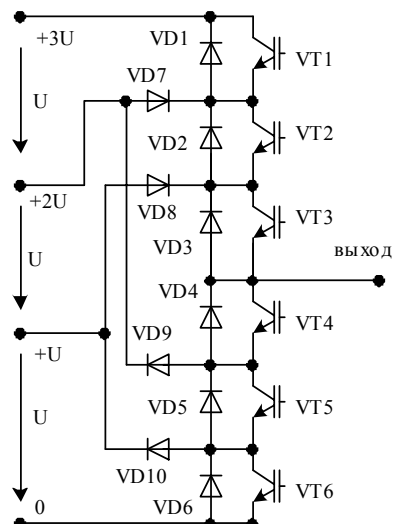


Рис. 1 – схема фазы МАИН

ных выпрямителей (на часть мощности –  $S/3n$ ). При отсутствии тормозных режимов выпрямители неуправляемые на диодах с конденсаторами на выходе. Что касается схемы непосредственно ПЧ, то здесь проявляются существенные отличия по количеству элементов. МАИН при числе уровней в кривой выходного напряжения – 9 (учитываются все уровни, включая 0) имеет два уровня напряжения источника ( $n=2$ ), 4 ключа с обратным диодом и 2 фиксирующих диода на фазу. МАИН с 13 уровнями (рис.1) имеет  $n=3$ , 6 ключей и 4 фиксирующих диода на фазу. Фиксирующие диоды при равных напряжениях источников  $U$  блокируют разные напряжения и, соответственно, должны иметь разные обратные напряжения. При этом VD8, VD9 должны иметь удвоенное обратное напряжение – фактически используется последовательное соединение двух диодов.

Схема КПЧ приведена на рис.2. Многоуровневое формирование выходного напряжения достигается суммированием напряжений нескольких источников  $U_n$ . Снижение напряжений отдельных источников в  $\sqrt{3}$  раз достигается при соединении фаз ПЧ по схеме "звезда". ПЧ с 13 уровнями в кривой выходного напряжения имеет 6 инверторов или 24 ключа на фазу.

Традиционными методами управления ПЧ являются многоуровневая и мультиплексорная ШИМ [1]. Формирование напряжений управления ключами ПЧ осуществляется путем сравнения треугольного напряжения несущей частоты  $U_{mp}$  и заданного синусоидального  $U_{zc}$ . Соответствующие импульсы формируются при превышении значения одного из этих напряжений.

При многоуровневой ШИМ несущие напряжения сдвинуты относительно друг друга по уровню (по

вертикали), а  $U_{zc}$  имеет амплитуду в  $n$ - раз больше амплитуды  $U_{mp}$  (для максимального напряжения на выходе). При мультиплексорной ШИМ (используется для КПЧ) напряжения  $U_{mp}$  для разных АИН 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 на-

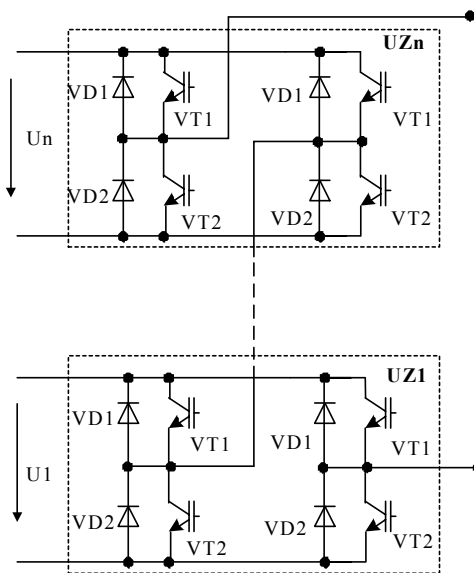


Рис. 2 – каскадный ПЧ

пряжения 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 - шестого  $U_{mp}$  необходимо обеспечить сдвиг между этими группами сигналов в  $90^\circ$ .

Для управления МАИН рассматривался также метод формирования пространственного вектора  $U_{вых}$  (векторной ШИМ - ВШИМ). При этом, если на каждом интервале коммутации переключение осуществляется только в одной фазе инвертора достигается минимальное число коммутаций ключей схемы.

В процессе исследований метод ВШИМ был применен для МАИН с 13 уровнями. Нельзя не отметить сложность его реализации особенно при регулировании величины выходного напряжения. Применение ВШИМ для МАИН с большим числом уровней нецелесообразно.

Сравним требования к ключам схем (рис.1 и рис.2) по напряжениям. По результатам моделирования для 9 уровневой МАИН при ВШИМ из условия получения минимума искажений соотношение между напряжением источника  $U_{dc}$  и первой гармоникой линейного выходного напряжения  $U_n(1)$  составляет  $U_{dc}=1.46U_n(1)$ . При этом для ключей схемы имеем  $U=0.5U_{dc}=0.73U_n(1)$ . При 13 уровнях  $U_{dc}=\sqrt{2}U_n(1)$ , а напряжение ключа  $U=U_{dc}/3=0.471U_n(1)$ .

Для 13 уровневой каскадной ПЧ при синусоидальной модуляции  $U_{dc}=U_n(1)/(1.2)$ , тогда для ключей отдельного АИН  $U=U_{dc}/6=U_n(1)/(7.2)$

Для оценки качества  $U_{\text{вых}}$  производился его гармонический анализ. При этом рассчитывался общий коэффициент нелинейных искажений, определяемый отношением действующего значения n-высших гармоник к действующему значению основной (первой) гармоники фазного напряжения:

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

Этот показатель при 13 уровнях  $U_{\text{вых}}$  для КПЧ составляет 8,64%, в то время как для МАИН – 19,04%, т.е. более чем в два раза ниже. Здесь следует отметить, что благотворное влияние на качество  $U_{\text{вых}}$  оказывает отсутствие нейтрального провода между "нулевой точкой" ПЧ и нагрузки – для схемы КПЧ с нейтральным проводом THD=13.1%.

Таким образом, вариант КПЧ особенно при больших мощностях предпочтительнее. Дальнейшее рассмотрение посвящено именно этой топологии.

Рассмотренным методам управления присущ общий недостаток - АИН в фазах ПЧ при мультиплексорной ШИМ весь период выходного напряжения и часть периода при многоуровневой ШИМ работают в режиме переключений с частотой модуляции. Это обуславливает дополнительные потери в схеме.

Как вариант управления рассмотрен метод квантования синусоиды по уровню с дискретностью соответствующей напряжению источника  $U$ . При этом синусоида заменяется ступенчатой кривой ( $u_{\text{ст}}$  на рис.3), а ошибка квантования  $u_1$  обрабатывается одним ШИМ инвертором. При этом остальные АИН

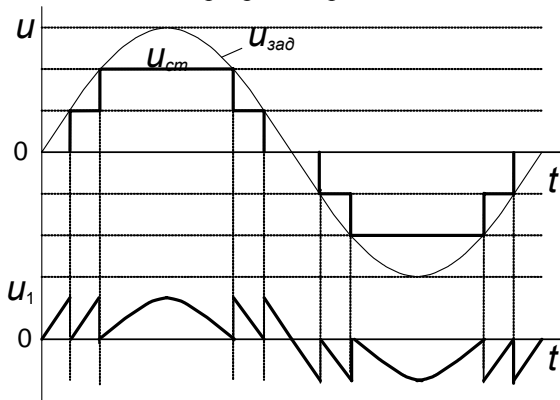


Рис.3. Квантование синусоиды с ошибкой

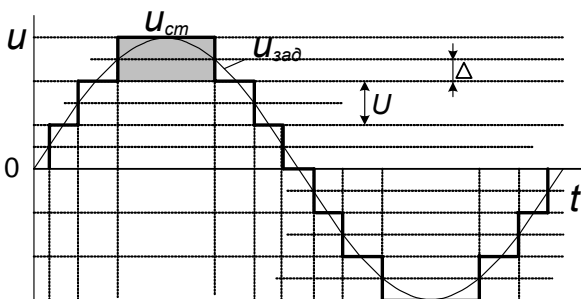


Рис.4. Квантование синусоиды с усреднением

работают как переключатели с частотой основной гармоники. Соответственно снижаются и потери в них. Метод ШИМ вообще можно исключить, используя более точный принцип квантования по уровню из

условия равенства на интервале квантования площадей синусоиды и аппроксимирующего ее прямоугольника (рис.4). При упрощении – замене на интервале квантования участка синусоиды на прямую линию, этот метод может быть достаточно просто реализован сдвигом уровней квантования на  $\Delta=U/2$ .

Для оценки возможности применения такого метода квантования был произведен гармонический анализ  $U_{\text{вых}}$  для ПЧ с 13 уровнями напряжения и, соответственно, 6 уровнями квантования для максимального напряжения ( $U_{\text{зад}}=6$ ) и в процессе регулирования его амплитуды, когда число уровней уменьшается. Исследования (табл.1) проводились для двух вариантов – ПЧ с нулевым проводом и без него (индекс 3) при  $f_{\text{вых}}=50\text{Гц}$  и  $\cos\varphi=0.8$ . Аналогичные данные для ПЧ, использующего квантование с ШИМ приведены в табл.2. Здесь следует отметить, что отсутствие нулевого провода оказывает благотворное влияние на гармонический состав напряжения, что отражает и изменение его формы. На рис.5 приведены осциллограммы заданного синусоидального (максимальному значению соответствует – 6 делений) и выходного напряжений фазы ПЧ при относительной амплитуде 4.4 - (а) и 4.6 - (в). Как видно из данных табл.1, ошибка по основной гармонике  $U_{m(1)}$  практически во всем диапазоне регулирования составляет несколько процентов, что вполне допустимо. Благприятным является и заметное снижение THD в сравнении с методом использующим ШИМ.

Таблица 1

Результаты гармонического анализа

$U_{\text{зад}}, \text{о.е.}$	6	5.80	5.60	5.50	5.2	5.1
$U_{m(1)}, \text{о.е.}$	6	5.87	5.6	5.37	5.15	5.12
THD, %	4.8	4.9	6.24	5.4	5.53	7.74
$U_{m(1)3}, \text{о.е.}$	5.98	5.89	5.62	5.38	5.16	5.12
THD3, %	4.3	3.55	5.06	4.84	5.03	7.22

5.00	4.60	4.40	4.00	3.70	3.30	3.00
5.04	4.63	4.26	4.04	3.79	3.19	3.03
7.67	7.2	7.16	5.21	8.52	9.72	7.55
5.04	4.62	4.26	4.04	3.77	3.2	3.03
7.32	6.47	5.99	4.17	7.56	7.98	6.3

2.6	2.2	2	1.8	1.3	1	0.8
2.53	2.16	2.02	1.86	1.19	1.12	0.97
13.3	14.2	12.3	17.4	25.5	21.5	34
2.53	2.15	2	1.87	1.19	1.12	0.97
10.5	14.4	11.8	11.2	13.3	21.5	24.3

Таблица 2

Квантование напряжения с ШИМ

$U_{\text{зад}}, \text{о.е.}$	6	3	1
$U_{m(1)3}, \text{о.е.}$	5.97	2.97	0.997
THD3, %	8.73	15	49.7

Общее число уровней в кривой  $U_{\text{вых}}$  фазы ПЧ (включая 0) при наибольшем его значении:  $N=2n+1$ .

При этом напряжения всех источников  $U_n=U$ , максимальное значение выходного напряжения  $U_m=nU$ , дискретность его изменения равна  $U$ .

Уменьшить число АИН ( $n$ ) можно используя источники с различными по величине напряжениями [2,3]. Значения их по отношению к наименьшему кратны, например,  $U_1=U$ ,  $U_2=2U$ ,  $U_3=3U$ . Таким образом, используя три АИН получаем максимальное значение выходного напряжения  $U_m=\sum U_n=6U$ , что равноценно  $n=6$  в симметричном ПЧ.

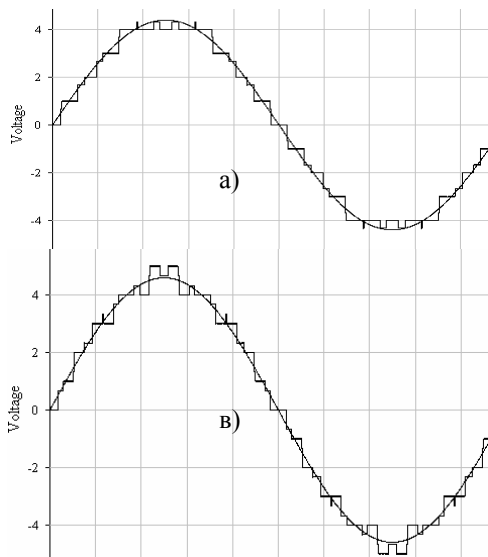


Рис.5. Осциллограммы заданного и фактического выходного напряжения фазы ПЧ

Общее число уровней в кривой выходного напряжения фазы ПЧ при наибольшем его значении:

$$N = 2 \cdot \left( \sum_1^n U_n / U_1 \right) + 1,$$

где напряжения источников  $U_n$  связаны соотношением:  $U_1 \leq U_2 \leq \dots \leq U_n$ .

При этом, используя только три инвертора можно получить самые различные  $N$  (см. табл.3).

Таблица 3

Соотношения для схемы ПЧ с тремя источниками

$U_1$ (о. е.)	$U_2$ (о. е.)	$U_3$ (о. е.)	$N$	принцип квантования $U_{вых}$
1	1	1	7	с ШИМ1
1	1	2	9	с ШИМ1
1	1	3	11	с ШИМ1
1	2	2	11	с ШИМ1
1	1	4	13	
1	2	3	13	с ШИМ1
1	1	5	15	
1	2	4	15	с ШИМ1
1	3	3	15	
1	1	6	17	
1	2	5	17	с ШИМ1
1	3	4	17	
1	2	6	19	с ШИМ1
1	3	5	19	
1	2	7	21	
1	3	6	21	
1	4	5	21	

Определенные особенности управления ПЧ имеют место в зависимости от соотношения напряжений источников. Безусловно, применимым для всех соотношений является метод квантования без использования ШИМ. Квантование с отработкой ошибки

ШИМ инвертором, имеющим наименьшее напряжение источника  $U_1=U$  возможно только для определенных соотношений напряжений, которые можно сформулировать следующим образом (в относительных единицах):

- 1) записываем в порядке возрастания числа соответствующие сумме или разности возможных выходных напряжений ( $+U_n, 0, -U_n$ ) второго и третьего АИН.
- 2) интервал между соседними числами не должен превышать единицу.

Например, напряжения источников  $U_1=1$ ,  $U_2=2$ ,  $U_3=5$ , что соответствует  $U_m=8U$  ( $N=17$ ). В соответствии с 1) имеем очередность чисел: 0 / 2 / 3 / 5 / 7.

Таким образом, условие 2) выполняется.

Значению  $U_m=8U$  также соответствует соотношение напряжений  $U_1=1$ ,  $U_2=3$ ,  $U_3=4$ , для которого имеем очередность чисел: 0 / 1 / 3 / 4 / 7.

Как видим между четвертым и пятым числами отсутствуют два значения 5 и 6. Таким образом, между 5 и 6 уровнями квантования формирование  $U_{вых}$  осуществляется в режиме ШИМ двумя АИН - первым и вторым, причем первый работает в режиме двухполярной ШИМ в противофазе со вторым АИН. Это существенно усложняет реализацию управления и увеличивает потери на коммутацию. В табл. 3 варианты, где возможно квантование с ШИМ только для первого АИН отмечены как ШИМ1. Следует отметить, что варианты ШИМ1 более предпочтительны и с той позиции, что второй и третий АИН работают с большими напряжениями и малой частотой переключения, что позволяет использовать высоковольтные тиристоры взамен транзисторов.

## ВЫВОДЫ

Использование в МПЧ методов квантования по уровню позволяет уменьшить потери переключения в схеме и несколько улучшить гармонический состав выходного напряжения.

Минимизация схемы КПЧ возможна при использовании различных напряжений источников АИН.

На основе анализа и систематизации имеющихся схемных решений ПЧ получено новое решение для КПЧ позволяющее сократить количество ключей в силовых цепях от 1/3 до практически 1/2 в зависимости от числа уровней. При этом число ключей на фазу  $k=2(n+1)$ . В настоящее время это решение проходит всестороннюю проверку и исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] José Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 49, № 4, AUGUST 2002, p.724- 738.
- [2] J. Song - Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, 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.

Поступила 27.08.2004