

*А.А. Шавёлкин, канд. техн. наук*

*(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)*

## **ПРИНЦИП НЕСИММЕТРИИ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Создание систем частотно-регулируемого электропривода среднего напряжения (до 10кВ) связано с применением преобразователей частоты (ПЧ) соответствующего класса напряжения.

В этом классе напряжений при больших мощностях привода применяются многоуровневые преобразователи частоты (МПЧ), напряжение которых в ступенчатом виде аппроксимирует синусоидальный закон. При этом ряд фирм – изготовителей (Mitsubishi Electric, ASIRobicon и др.) отдает предпочтение каскадным схемам МПЧ с последовательным соединением нескольких однофазных автономных инверторов напряжения (АИН) в выходных фазах. Такие преобразователи обеспечивают наилучшие энергетические показатели, однако схемы их содержат большое число ключей, сложны, громоздки и, как результат, имеют более высокую стоимость в сравнении с другими типами ПЧ.

В последнее время МПЧ посвящено большое количество публикаций, имеются попытки систематизации [1]. Следует отметить наметившуюся тенденцию к минимизации силовых цепей [1- 4] при сохранении качества выходного напряжения с использованием комбинированных схем и применением асимметричных преобразователей с целью уменьшения количества изолированных источников постоянного тока и ключей для их коммутации. Реальность таких решений связана с появлением ключей на более высокие напряжения.

Внедрение частотного электропривода 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 МПЧ.

**Цель работы:** исследование принципов многоуровневого формирования выходного напряжения МПЧ при различных топологиях схем и возможностей их минимизации с использованием принципов несимметрии.

Основным элементом каскадного МПЧ является мостовая однофазная схема АИН, представляющая собой симметричный коммутатор на четырех ключах с изолированным источником постоянного напряжения  $E$  в диагонали постоянного тока. Каждая фаза МПЧ включает  $n$  последовательно соединенных инверторов (рис.1,а). Снижение напряжений отдельных источников в  $\sqrt{3}$  раз достигается за счет соединения фаз МПЧ по схеме «звезда» (рис.1,б).

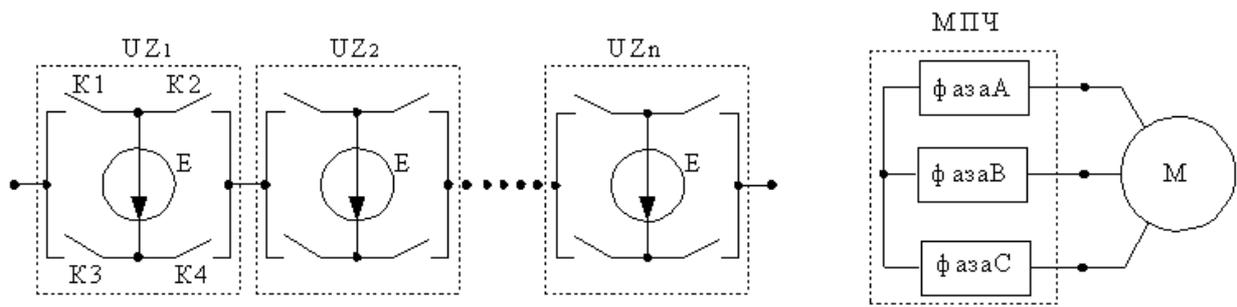


Рис.1. Принцип реализации силовых цепей каскадного МПЧ

Такой вариант построения МПЧ при одинаковых напряжениях источников следует отнести к строго симметричным (рис.1,а). В каждом из АИН (например,  $UZ_1$ ) всегда открыты и проводят ток два ключа. При этом имеют место следующие значения выходного напряжения: замкнуты ключи  $K_1, K_2$  или  $K_3, K_4$  (в зависимости от направления тока) выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = 0$ ; замкнуты ключи  $K_1, K_4$  –  $U_{ВЫХ} = +E$ ; замкнуты ключи  $K_2, K_3$  –  $U_{ВЫХ} = -E$ .

Поскольку при последовательном соединении напряжения отдельных АИН суммируются получаем значения выходного напряжения фазы МПЧ  $U_{ВЫХ} = \{0; \pm E; \pm 2E; \dots \pm nE\}$ , а общее количество уровней в кривой фазного напряжения МПЧ (включая нулевой):  $N = (2n + 1)$ . Число ключей на фазу МПЧ  $\kappa = 4n$ .

Рассмотренная структура силовых цепей (рис.1) может быть изменена введением между двумя соседними инверторами ( $UZ_1$  и  $UZ_2$ ) дополнительного источника постоянного тока, который имеет обратную полярность по отношению к источникам инверторов. Таким образом, используя за основу два АИН, получаем схему с тремя источниками (рис.2). Соответствующая принципиальная схема приведена на рис.3. Аналогичным образом может быть получена схема с любым нечетным числом источников на фазу. При этом число ключей на фазу МПЧ:  $\kappa = 2(n + 1)$ .

В отличие от схемы на рис.1, где каждый источник снабжен своими независимыми от других источников ключами, что позволяет свободно манипулировать их напряжениями в процессе формирования выходного фазного напряжения, предлагаемая схема несимметрична, и предполагает детерминированное включение ключей связывающих соседние источники.

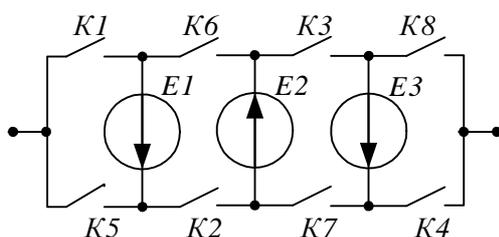


Рис.2. Принцип реализации МПЧ с несимметрией силовых цепей

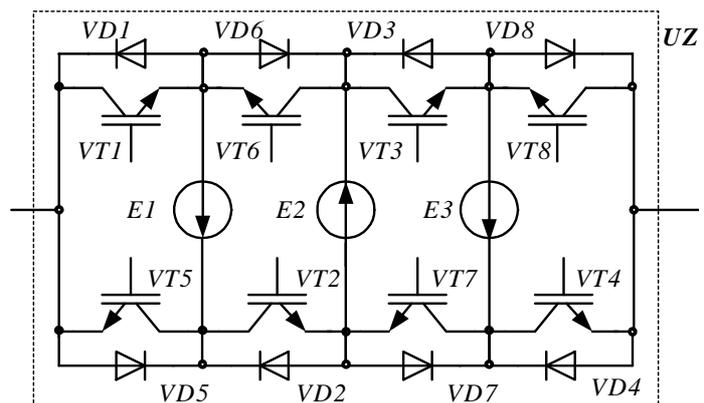


Рис.3. Схема фазы МПЧ с тремя источниками

Следует отметить, что совмещение функций ключей соединяющих соседние источники (К2, К6, К7, К3) обуславливает удвоенное напряжение на них, поскольку источники в контуре коммутации соединены последовательно и согласно. В то же время пары ключей (К1, К5 и К4, К8), образующие выходные зажимы фазы МПЧ коммутируют напряжение одного источника.

Комбинации включения ключей в схеме с тремя источниками при различных уровнях напряжения фазы МПЧ приведены в табл.1. Следует отметить, что число возможных комбинаций (табл.1) в отличие от исходной схемы (рис.1) несколько меньше (суммируются напряжения только соседних источников и др.).

Таблица 1  
Комбинации замыкания ключей для схемы МПЧ с тремя источниками на фазу

№	U <sub>вых</sub>	Замкнуты ключи			
		К5	К2	К7	К4
1	0	К5	К2	К7	К4
2	E1	К1	К2	К7	К4
3	E2	К5	К2	К3	К8
4	E3	К1	К6	К3	К4
5	E1+E2	К1	К2	К3	К8
6	E2+E3	К5	К2	К3	К4
7	E1+E2+E3	К1	К2	К3	К4
8	E1 – E3	К1	К2	К7	К8
9	0	К1	К6	К3	К8
10	- E1	К5	К6	К3	К8
11	- E2	К1	К6	К7	К4
12	- E3	К5	К2	К7	К8
13	- E1- E2	К5	К6	К7	К4
14	- E2 – E3	К1	К6	К7	К8
15	- E1- E2- E3	К5	К6	К7	К8
16	E3 – E1	К5	К6	К3	К4

Важным моментом является переход с одного уровня напряжения на другой. Так при переходе с нулевого уровня (комбинация №1) на первый (положительный) можно использовать комбинации №2, №3, №4, однако переход к комбинации №2 предполагает переключение ключей только одной пары (К5, К1), в других случаях получаем переключение в двух и трех парах ключей соответственно. Очевидно, что с точки зрения уменьшения количества коммутаций и снижения потерь в ключах при переходе с уровня на уровень, особенно при использовании метода ШИМ следует использовать комбинации №1 и №2. При отрицательном выходном напряжении – комбинации №9 и №10. Однако тогда на нулевом уровне неизбежен переход с комбинации №1 на №9, где коммутация осуществляется во всех парах ключей.

Рассмотрим процессы при переключении более чем одной пары ключей. Вопрос состоит в том, что переключение транзисторов в парах ключей соединяющих источники между собой и внешним выводом фазы МПЧ

осуществляется с некоторой задержкой ( $\Delta t$  – «мертвое время») для исключения к.з., кроме того, временные характеристики ключей неидентичные.

Остановимся на переходе с первого уровня ( $U_{ВЫХ}=E1$ - комбинация №2) на второй ( $U_{ВЫХ}=E2+E3$  – комбинация №6). Процессы в схеме определяются направлением тока, поскольку от этого зависит – проводит ток транзистор или диод ключа (рис.3).

При положительном направлении тока открыты и проводят ток VT1, VT2, VD7, VT4 ( $U_{ВЫХ}=E1$ ). Переход происходит в два этапа:

- снимаются импульсы управления с выходящих из работы ключей К1, К7 и транзистор VT1 запирается, ток подхватывает диод VD5 (VD7 остается открытым). В течение интервала времени  $\Delta t$  напряжение фазы МПЧ  $U_{ВЫХ}=0$ ;

- подаются импульсы управления на входящие в работу ключи К5, К3 – VT3 отпирается и с этого момента времени  $U_{ВЫХ}=E2+E3$ .

При отрицательном направлении тока открыты и проводят ток VT7, VD1, VD2, VD4 ( $U_{ВЫХ}=E1$ ). Переход также осуществляется в два этапа:

- снимаются импульсы управления с выходящих из работы ключей К1, К7 – VT7 запирается и ток подхватывает диод VD3 (VD1 остается открытым). В течение интервала времени  $\Delta t$  напряжение фазы МПЧ  $U_{ВЫХ}=E1+E2+E3$ ;

- подаются импульсы управления на входящие в работу ключи К5, К3 – VT5 отпирается и с этого момента времени  $U_{ВЫХ}=E2+E3$ .

Таким образом, при совпадении направлений напряжения и тока имеем на интервале переключения «провал» в напряжении фазы МПЧ на один уровень, при различных направлениях тока и напряжения «выброс» на два уровня.

Аналогичным образом можно проанализировать варианты переходов с переключением трех и более ключей – получаем на интервале переключения соответствующее увеличение искажения формы напряжения. Это особенно проявляется при использовании метода ШИМ, когда переключение с уровня на уровень осуществляется на всех участках кривой выходного напряжения. Таким образом, возникает вопрос о необходимости применения соответствующего выходного фильтра (форма напряжения улучшится, но число коммутаций и потери сохранятся), или разработки специального алгоритма с выбором соответствующих комбинаций обеспечивающих минимум переключений.

Уменьшить количество изолированных источников и соответственно АИН можно, используя источники с различными по величине напряжениями [2 – 4]. Значения их по отношению к наименьшему напряжению кратны, например,  $U_1=U$ ,  $U_2=2U$ ,  $U_3=3U$ . В дальнейшем будем рассматривать формирование напряжения с равномерным шагом, когда разность  $\Delta U$  между соседними уровнями выходного напряжения постоянна на всем периоде выходного напряжения.

При этом, используя только два АИН с напряжениями источников  $U_1=U$ ,  $U_2=2U$  получаем 7 уровней выходного напряжения фазы МПЧ:  $U_{ВЫХ}=\{0, \pm U, \pm 2U, \pm 3U\}$ . Если  $U_1=U$ ,  $U_2=3U$  с учетом комбинации  $\pm (U_2 - U_1)$  число уровней 9:  $(U_{ВЫХ}=\{0, \pm U, \pm 2U, \pm 3U, \pm 4U\})$ . Таким образом, используя два АИН получаем максимальное значение выходного напряжения  $U_m=4U$ , что равноценно  $n=4$  в симметричном МПЧ – число ключей и источников уменьшилось вдвое.

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

$$N = 2 \cdot \left( \frac{\sum_{n=1}^n U_n}{U_1} \right) + 1,$$

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

Еще большие возможности имеет вариант схемы МПЧ с тремя инверторами на фазу. При этом в зависимости от соотношения напряжений можно получить самые различные значения  $N$  [4]. Так, при соотношении напряжений 1:3:9 число уровней составит  $N=27$ .

Число уровней  $N$  автоматически связано с увеличением количества (частоты) переключений ключей схемы. Это особенно проявляется в преобразователе с различными напряжениями в звене постоянного тока. В симметричной схеме МПЧ переход на каждый последующий уровень сводится к коммутации одного источника. При использовании несимметрии каждый уровень напряжения определяется комбинацией напряжений одного, двух или трех источников, которые при переходе переключаются одновременно. Это обуславливает дополнительные переключения и увеличение фактической частоты переключений. Таким образом, возникает противоречие – улучшение качества выходного напряжения достигается увеличением числа уровней, что влечет за собой увеличение частоты переключений ключей схемы. Для разрешения этого противоречия представляется целесообразным при выборе соотношения напряжений исходить из критерия достаточности.

С этой целью был произведен гармонический анализ фазного напряжения нагрузки трехфазного МПЧ при различных значениях  $N$  и использовании разных методов формирования напряжения [4]: квантования синусоиды с отработкой ошибки квантования методом ШИМ; квантования с усреднением (без использования ШИМ). Для оценки качества определялся общий коэффициент нелинейных искажений  $THD$  (*total harmonic distortion*), определяемый отношением действующего значения  $n$  – высших гармоник к действующему значению основной (первой) гармоники напряжения:

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

Зависимость  $THD$  от  $N$  приведена на рис.4. Характер зависимости нелинейный: вначале имеет место резкое уменьшение  $THD$ , но уже при  $N=15-17$  наступает «насыщение» –  $THD$  изменяется незначительно. Это дает основание говорить о нецелесообразности увеличения числа уровней (свыше 15).

Так при переходе от значения  $N=15$  к значению  $N=17$  при использовании ШИМ  $THD$  уменьшается на 1.4%, при квантовании соответственно на 0.5%.

Важным моментом, который необходимо учитывать при выборе соотношения напряжений является переход с уровня на уровень, когда происходит переключение источников в схеме.

Причем, что характерно для рассмотренных вариантов несимметричных МПЧ переход связан с необходимостью переключения двух и более источников. Как отмечено выше, это приводит к искажению формы напряжения МПЧ на интервалах коммутации. Для схемы с несимметрией силовых цепей (рис.3) искажения практически можно исключить, используя специальный алгоритм с выбором комбинаций ключей и введением промежуточных переходных состояний схемы при переключении. При несимметрии напряжений искажения исключить нельзя. Эти искажения будут проявляться тем больше, чем больше разница между напряжениями источников, например, когда соотношение напряжений 1:3:9. Так переход с уровня 4 (напряжения первого и второго источников суммируются 3+1) на уровень 5 (9-3-1) осуществляется в несколько этапов. Вначале первый и второй источники переключаются на нулевой уровень в течение интервала времени  $\Delta t$  (задержка на переключение третьего источника с нулевого уровня) затем на интервале  $\Delta t$  (задержка на переключение первого и второго источника с нулевого уровня на отрицательный) имеем выброс до 9 (на 5 уровней).

Положительным моментом является то, что упомянутые искажения в значительной степени выражены в напряжении нагрузки, чем в напряжении фазы МПЧ, особенно при близких соотношениях напряжений, что подтверждают диаграммы напряжений фазы МПЧ и нагрузки (рис.5) при соотношении напряжений 1:2:3 (используется квантование с

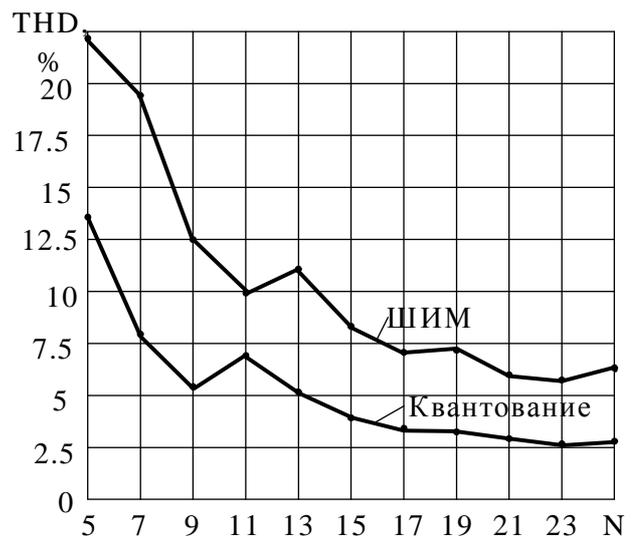


Рис.4. Зависимость  $THD$  от числа уровней напряжения МПЧ

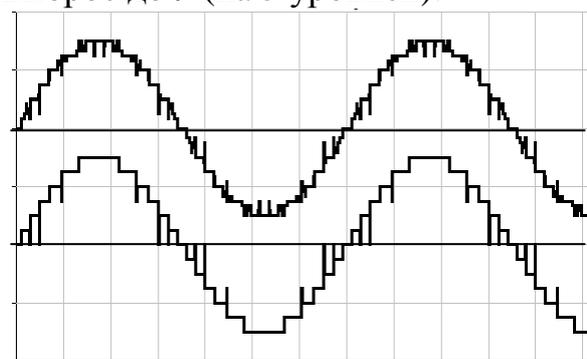


Рис.5. Диаграммы напряжений фазы МПЧ и нагрузки

усреднением).

### **Выводы:**

- Использование предложенной схемы МПЧ с несимметрией силовых цепей позволяет уменьшить количество ключей в схеме с  $4n$  до  $2(n+1)$ .

- Уменьшения количества ключей и изолированных источников в схеме МПЧ можно достигнуть при использовании источников с различными напряжениями. При этом для уменьшения количества переключений в схеме и обеспечения минимального искажения формы напряжения при достаточно высоком его качестве можно ограничить значение количества уровней  $N=15$ .

- Наиболее полно возможности минимизации силовых цепей МПЧ реализуются в несимметричной схеме при различных напряжениях источников. В силу несимметрии схемы формирование напряжения с равномерным шагом возможно только при соотношении  $E1:E2:E3 = 1:3:2$ .

### **Список литературы**

1. Josй 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.
4. А.А. Шавёлкин. Несимметричный каскадный многоуровневый преобразователь частоты// Праці ЛВ МАІ №1 (10) – 2005р., с.174 -178.