

## ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КАСКАДНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Шавёлкин А.А., Уланов Р.В.

Донецкий национальный технический университет

Sha@dgtu.donetsk.ua

В настоящее время все большее применение в регулируемом электроприводе переменного тока большой мощности среднего напряжения (6кВ) находят каскадные многоуровневые преобразователи частоты (КМПЧ), которые обеспечивают наилучшие показатели вход-выход. При этом близкий к стандарту гармонический состав выходного напряжения фазы КМПЧ обеспечивается суммированием напряжений  $n$  (при напряжении 6кВ  $n=5$  или 6) последовательно соединенных однофазных автономных инверторов напряжения (АИН) с изолированными источниками постоянного тока (ИПТ). ИПТ – трехфазный выпрямитель, питающийся от отдельного комплекта вторичных обмоток многообмоточного входного трансформатора. Использование ИПТ с одинаковыми напряжениями в сочетании с мультиплексорной ШИМ, когда все АИН в фазе работают идентично, обеспечивает равномерную загрузку источников. При многофазной эквивалентной схеме выпрямления достигается эффективное подавление во входном токе высокочастотных гармоник и субгармоник. Сложность схемы КМПЧ обуславливает высокую его стоимость. Большое количество ключей в инверторном блоке приводит к значительным потерям на нагрев.

Вопросы минимизации силовых цепей КМПЧ в последнее время связывают [1-3] с использованием принципа несимметрии. Несимметричные КМПЧ используют ИПТ с различными, кратными минимальному значению, напряжениями. Это позволяет уменьшить количество АИН на фазу до 3 и, соответственно, количество ключей в инверторном блоке практически вдвое. Количество уровней в полуволне выходного напряжения фазы при максимальной амплитуде  $n=(U_1+U_2+U_3)/U_1$ , где:  $U_1$  – минимальное напряжение. Использование таких решений стало реальным с появлением полупроводниковых ключей на достаточно высокие напряжения (5,5кВ). Вместе с тем, использование различных напряжений предполагает решение ряда проблем, которые должны рассматриваться в комплексе. Это касается как выбора соотношения напряжений и соответствующего принципа формирования выходного напряжения, так и структуры звена постоянного тока с заданием загрузки и режима работы ИПТ, при сохранении качества входного тока КМПЧ. Вопросы взаимосвязанные и практически не нашли отображения в публикациях. Без их решения практическая реализация несимметричных КМПЧ затруднительна.

**Цель работы:** исследование принципов реализации КМПЧ с несимметрией напряжений с позиции минимизации схемных решений при сохранении характеристик вход-выход.

При этом необходимо решить ряд взаимосвязанных вопросов: исследовать принципы формирования выходного напряжения в зависимости от соотношения напряжений ИПТ и количества уровней напряжения; исследовать загрузку и режимы работы ИПТ, а также принципы воздействия на их работу; определить структуру звена постоянного тока для эффективного подавления гармоник входного тока.

**Основные результаты работы.** Процесс формирования выходного напряжения при разных напряжениях ИПТ предполагает использование различных их комбинаций (сложение, вычитание). При этом источники имеют различную нагрузку, в том числе и по продолжительности. И сразу же возникает вопрос, как реализовать ИПТ с разными напряжениями. Использование различных напряжений вторичных обмоток трансформатора позволяет упростить структуру звена постоянного тока – уменьшить количество обмоток и выпрямителей. Однако, если не применять выпрямители с активным формированием входного тока, такой вариант отпадает (в обычных применениях КМПЧ без рекуперации энергии в сеть используются выпрямители на диодах). При различной загрузке ИПТ они должны обеспечивать независимо друг от друга потребление синусоидального тока с эффективным подавлением высших и субгармонических составляющих. Это возможно при использовании составных многофазных схем выпрямления [4] с последовательным соединением выпрямителей, количество их определяется кратностью напряжений ИПТ. Таким образом, структура звена постоянного тока в целом сохраняется, и минимизация силовых цепей КМПЧ касается только инверторного блока. Открытым остается вопрос с ИПТ, напряжение которого минимально. Также следует исключить изменение направления передачи энергии ИПТ.

Рассмотрим вопрос минимизации существующих технических решений КМПЧ фирм ASIRobicon (серия «Perfect Harmoni», «New Baby Harmoni») и Toshiba Mitsubishi Electric («TMdrive – MV») на напряжение 6кВ. КМПЧ идентичны по характеристикам, количество АИН на фазу, соответственно, 5 и 6. При этом инверторный блок включает в себя 60 и 72 IGBT. Сохранение качества выходного напряжения при 3 АИН на фазу предполагает использование соотношений напряжений ИПТ  $U_1:U_2:U_3=1:1:3$  ( $n=5$ ) и  $U_1:U_2:U_3=1:2:3$  ( $n=6$ ).

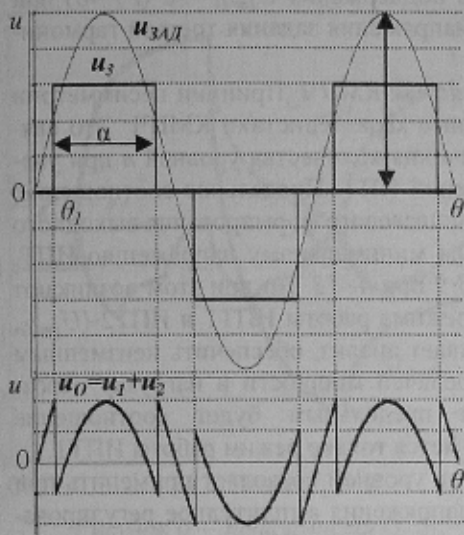


Рисунок 1 – Принцип квантования

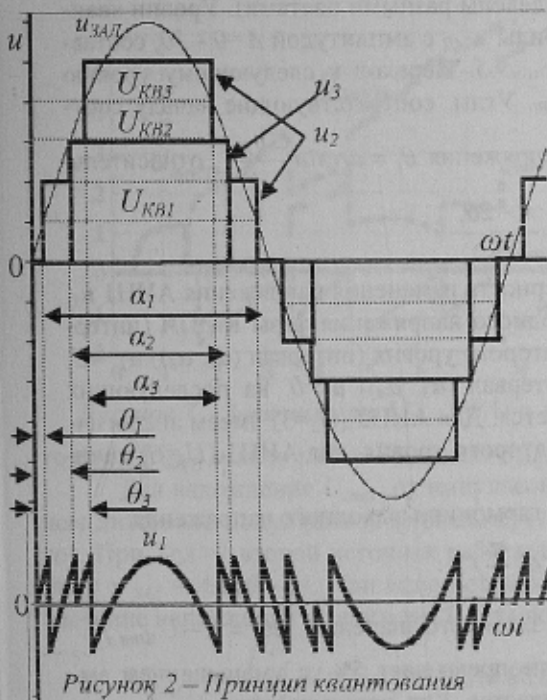


Рисунок 2 – Принцип квантования

Для формирования выходного напряжения фазы КМПЧ наиболее просто реализуется квантование заданной синусоиды по уровню с обработкой ошибки квантования методом ШИМ [3]. Данный принцип иллюстрирует рис.2, где заданное напряжение  $u_{зад}$  аппроксимируется ступенчатой кривой, а разница между ними  $u_1$  – ошибка квантования. Ступенчатая кривая формируется из напряжений  $U_2$  и  $U_3$ , ошибка квантования обрабатывается методом ШИМ из напряжений  $U_1$ . При этом  $u_1$  периодически изменяет знак, что не исключает изменение направления передаваемой АИН1 мощности.

Следует отметить, что возможны и другие варианты, например, если на интервале  $(\theta_1, \theta_2)$  использовать напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , а на интервале  $(\theta_2, \theta_3)$  напряжения  $U_2$  и  $U_3$  при регулировании напряжений обоих источников методом ШИМ, но в этом случае отсутствует возможность регулирования  $U_{1m(1)}$ . Анализ загрузки ИПТ исходя из значения амплитуд первых гармоник выходного напряжения АИН. Напряжения АИН2 и АИН3 имеют прямоугольную форму, для них можно использовать стандартное разложение в ряд Фурье. Тогда в соответствии с рис.2:

$$U_{2m(1)} = \frac{2 \cdot 4}{\pi} (\sin(\alpha_1 \frac{\pi}{2}) - \sin(\alpha_2 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_3 \frac{\pi}{2})), \quad U_{3m(1)} = \frac{3 \cdot 4}{\pi} \sin(\alpha_2 \frac{\pi}{2}), \quad U_{1m(1)} = A - U_{2m(1)} - U_{3m(1)}$$

где:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы соответствующие уровням квантования (в о.е.)  $U_{КВ1}=1, U_{КВ2}=3, U_{КВ3}=4$  (см. рис.2).

Зависимости первых гармоник напряжений АИН фазы МПЧ в функции  $A$  приведены на рис.3. В диапазонах значений амплитуды выходного напряжения  $A=(1.11 - 2.3)$  и  $A=(4.2 - 5.2)$   $U_{1m(1)}$  принимает отрицательные значения, что недопустимо и предполагает определенные корректировки алгоритма управления с перераспре-

Соотношение  $U_1:U_2:U_3=1:1:3$ . Сохранение характеристик КМПЧ позволяет обеспечить управление с использованием мультиплексорной ШИМ для первых двух ИПТ (рис.1). Заданное напряжение  $u_{зад}$  с амплитудой  $A$  формируется как сумма напряжений  $u_3$  третьего ИПТ (включается при  $A>2$ ) и  $u_0=(u_1+u_2)=(u_{зад}-u_3)$ , которое обрабатывается методом ШИМ из напряжений источников  $U_1$  и  $U_2$  (используется система относительных единиц -  $U_1=U_2=1$ ). При этом нагрузка на  $U_1$  и  $U_2$  делится пополам. Активная мощность, потребляемая от ИПТ, определяется первой гармоникой выходного напряжения соответствующего АИН. Т.е. нагрузка источников распределяется в соответствии со значениями первой гармоники выходного напряжения соответствующих инверторов. Амплитуда первой гармоники  $u_3$ :

$$U_{3m(1)} = \frac{3 \cdot 4}{\pi} \sin(\alpha \frac{\pi}{2}), \quad \text{где: } \alpha = \frac{\pi - 2\theta_1}{\pi}, \quad \theta_1 = \arcsin \frac{2}{A}$$

Тогда амплитуда первой гармоники  $u_0$ :

$$U_{0m(1)} = A - U_{3m(1)}$$

Анализ зависимости амплитуды первых гармоник напряжений  $u_3$  и  $u_0$  от амплитуды  $A$  фазного напряжения МПЧ показал, что ИПТ работают с передачей мощности в нагрузку во всем диапазоне  $A$ . При  $0 \leq A < 2$  функции формирования выходного напряжения выполняются инверторами с источниками  $U_1$  и  $U_2$ , при этом  $u_{0(1)}=A$ .

Некоторые особенности имеет реализация ШИМ для источников  $U_1$  и  $U_2$ . Соответствующие АИН работают в режиме однополярной ШИМ. Для них используются двухполярные модулирующие напряжения треугольной формы, сдвинутые друг относительно друга на четверть периода. За счет этого эффективная частота коммутации напряжения в 4 раза больше частоты модулирующего напряжения. Структура звена постоянного тока при этом следующая: выпрямители ИПТ1 и ИПТ2 образуют 12ти-фазную схему выпрямления, ИПТ3 содержит три последовательно соединенных выпрямителя, образуя 18ти- фазную схему выпрямления.

Соотношение  $U_1:U_2:U_3=1:2:3$ . В данном случае возникает проблема с первым ИПТ. Исключить его искажающее влияние на входной ток в диапазоне регулирования амплитуды выходного напряжения  $A$  от 1 до 6 (о. е.) можно если обеспечить режим его работы с минимальной передаваемой активной мощностью ( $P_1 \rightarrow 0$ ), т.е. перераспределением его нагрузки на два других ИПТ. Необходимость регулирования его загрузки следует также из соображений, речь о которых пойдет ниже.

делением загрузки источников. Исследования подтвердили возможность поддержания  $U_{1m(1)} \rightarrow 0$  ( $P_I \rightarrow 0$ ) при регулировании уровня квантования  $U_{KB2}$  и предварительной модуляции напряжения задания третьей гармоникой  $u_{3AL} = A \sin \theta + A_3 \sin 3\theta$ . Полученные зависимости приведены на рис. 4.

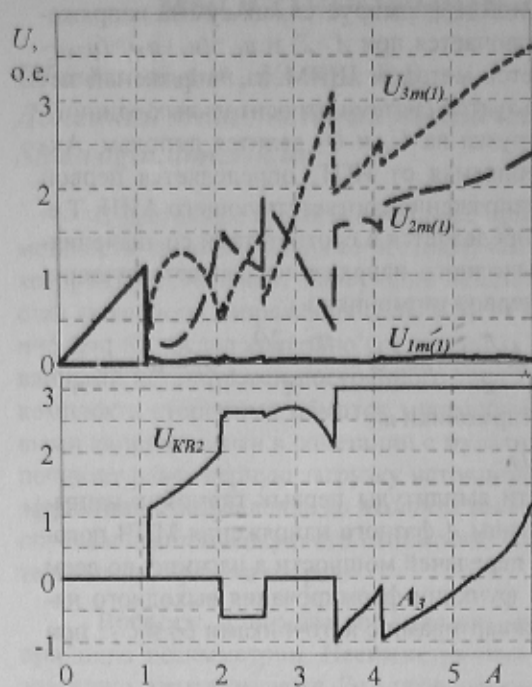


Рисунок 4 – Зависимости параметров КМПЧ в функции от A

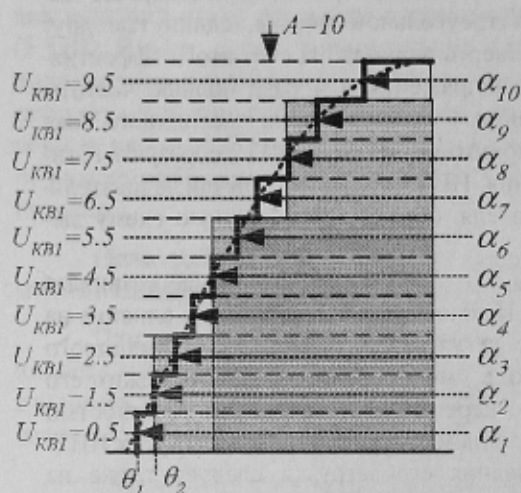


Рисунок 5 – Квантование с усреднением

Однако спектр гармоник при снижении амплитуды выходного напряжения смещается в область низких частот. Поэтому следует оценить значение низкочастотных гармоник. Амплитуда пятой и седьмой гармоник выходного напряжения:

$$U_{\Phi m(5)} = \frac{4}{5\pi} \sum \sin(5\alpha_i \frac{\pi}{2}),$$

$$U_{\Phi m(7)} = \frac{4}{7\pi} \sum \sin(7\alpha_i \frac{\pi}{2}).$$

Расчеты показывают, что при  $A < 3$  относительное значение амплитуды 5ой и 7ой гармоник превышает 3%, что нежелательно. Оценим загрузку источников при амплитудном регулировании. При прямоугольной форме выходного напряжения каждого из трех АИН значения амплитуды первой гармоники для них составля-

$$U_{1m(1)} = \frac{4}{\pi} [(\sin(\alpha_1 \frac{\pi}{2}) - 2\sin(\alpha_2 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_3 \frac{\pi}{2})) + (\sin(\alpha_4 \frac{\pi}{2}) - 2\sin(\alpha_5 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_6 \frac{\pi}{2})) + \dots],$$

$$U_{2m(1)} = \frac{3 \cdot 4}{\pi} [\sin(\alpha_2 \frac{\pi}{2}) - \sin(\alpha_5 \frac{\pi}{2}) + \sin(\alpha_8 \frac{\pi}{2})], \quad U_{3m(1)} = \frac{6 \cdot 4}{\pi} \sin(\alpha_5 \frac{\pi}{2}).$$

Улучшение характеристик КМПЧ. Принцип несимметрии позволяет улучшить выходные характеристики КМПЧ. Это связано с возможностью увеличения количества уровней  $n$  при увеличении кратности напряжений ИПТ. Предельное соотношение, из условия обеспечения равношагового формирования выходного напряжения с шагом равным минимальному напряжению ИПТ, составляет [3]  $U_1:U_2:U_3=1:3:9$  при  $n=13$ . Но при этом возникают проблемы с обеспечением режима работы ИПТ1 и ИПТ2 ( $U_{1m(1)}, U_{2m(1)}$  на рис.6). Как показывает анализ, обеспечить неизменным режим работы ИПТ2 с передачей мощности в нагрузку невозможно. С этой позиции предельным будет соотношение  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$ , когда изменяется только режим работы ИПТ1.

Увеличение количества уровней позволяет применить при формировании выходного напряжения амплитудное регулирование. Принцип квантования с усреднением [3] иллюстрирует рис.4 для соотношения напряжений ИПТ  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$  (напряжения  $U_1, U_2, U_3$ , из которых осуществляется выходное напряжение вазы КМПЧ  $u_{\Phi}$  на рис.4 выделены разными цветами). Уровни квантования заданной синусоиды  $u_{3AL}$  с амплитудой  $A=0-10$ , составляют:  $U_{KB1}=0.5; 1.5; 2.5; \dots 9.5$ . Переход к следующему уровню происходит при  $u_{3AL} \geq U_{KB1}$ . Углы, соответствующие началу соот-

ветствующей ступени напряжения  $\theta_i = \arcsin \frac{U_{KB1}}{A}$ , относительная ее длительность  $\alpha_i = \frac{\pi - 2\theta_i}{\pi}$ .

Отметим закономерность изменения напряжения АИН1  $u_i$ : для первого уровня выходного напряжения фазы КМПЧ (интервал  $(\alpha_1, \alpha_2)$ )  $u_1 = +U$ , для второго уровня (интервал  $(\alpha_2, \alpha_3)$ )  $u_1 = -U$ , для третьего уровня (интервал  $(\alpha_3, \alpha_4)$ )  $u_1 = 0$ , на последующих уровнях картина повторяется. Для АИН2 ( $U_2=3$ ) имеем аналогичную картину начиная со второго уровня, для АИН3 ( $U_3=6$ ) начиная с  $5=(2+3)$  уровня.

Амплитуда первой гармоники выходного напряжения:

$$U_{\Phi m(1)} = \frac{4}{\pi} \sum \sin(\alpha_i \frac{\pi}{2}).$$

Ошибка отработки заданного значения:  $\Delta U = A - U_{\Phi m(1)}$ .

При  $A > 4$  ошибка не превышает 5%, с уменьшением амплитуды ошибка увеличивается. Как показывает анализ при амплитудном регулировании коэффициент гармоник напряжения (ТНД) ниже, чем при использовании ШИМ.

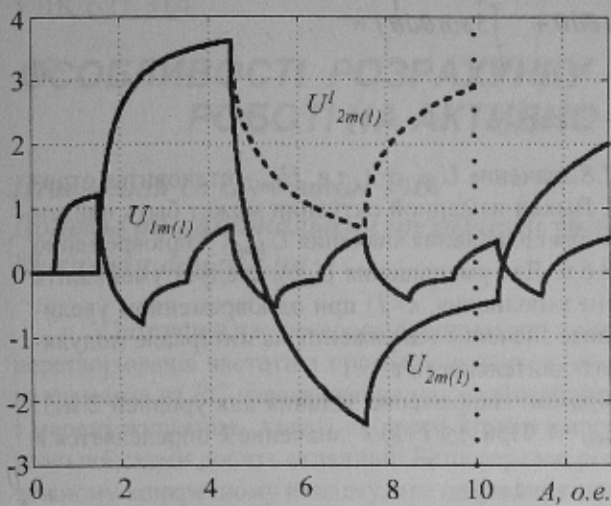


Рисунок 6 – Зависимости  $U_{1m(1)}=f(A)$

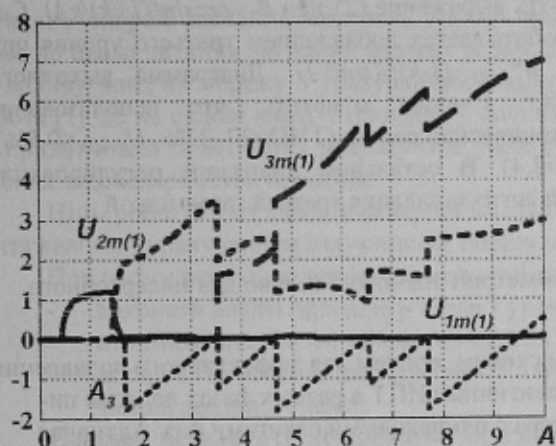


Рисунок 7 – Зависимости  $U_{1m(1)}=f(A)$  и  $A_3=f(A)$

точника  $U_{2m(1)}$  можно найти  $U_{1m(1)}$  как:  $U_{1m(1)}=A-U_{2m(1)}$ .

Для нахождения  $U_{2m(1)}$  от импульсов перейдем к непрерывной функции  $u_{2CP}(t)$ , значение которой на каждом интервале модуляции ( $T_M$ ) равно среднему значению и определяется коэффициентом заполнения импульсов. При  $2 \geq A > 1$  второй источник работает на интервале  $(\theta_1, (\pi - \theta_1))$ ,  $\theta_1 = \arcsin(1/A)$ ,  $u_{2CP}$  сравнивается по уровню с  $u_{3AL}^* = (A \sin \theta - 1)$ . При использовании относительных единиц  $u_{2CP}(t) = 3(A \sin \theta - 1)$ , где: 3 – относительное значение напряжения второго ИПТ. Для полученной функции амплитуда первой гармоники:

$$U_{2m(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} 3(A \sin \theta - 1) \sin \theta d\theta = \frac{2 \cdot 3}{\pi} \left[ \frac{A}{2} ((\pi - 2\theta_1) + \sin 2\theta_1) - 2 \cos \theta_1 \right]. \quad (1)$$

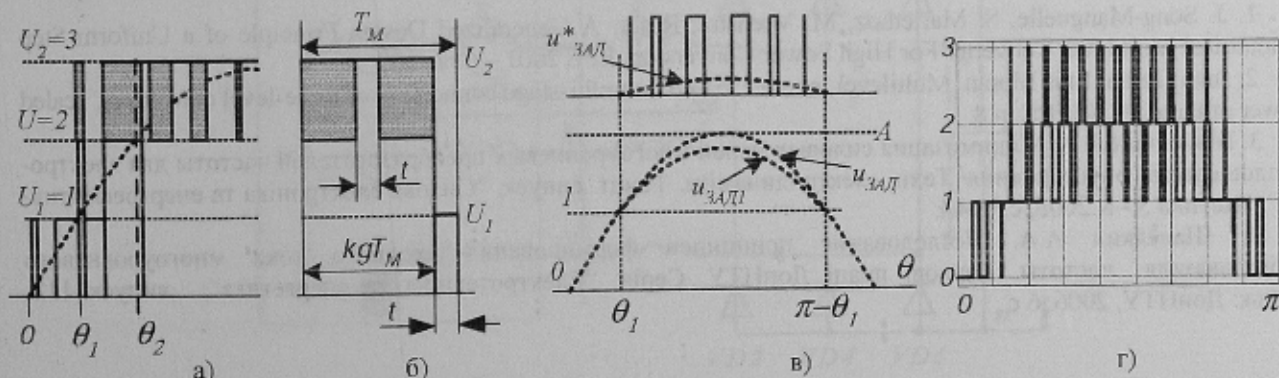


Рисунок 8 – Принцип формирования выходного напряжения с использованием ШИМ

При  $3 > A > 2$  ИПТ2 работает в режиме ШИМ на интервале  $(\theta_1, (\pi - \theta_1))$  значение  $u_{2CP}(t) = 3(A \sin \theta - 1)$ , на интервале  $(\theta_2, (\pi - \theta_2))$  источник постоянно включен - значение  $u_{2CP}(t) = 3$ ,  $\theta_1 = \arcsin(1/A)$ ,  $\theta_2 = \arcsin(2/A)$ . Отсюда:

Для соотношения 1:3:6 изменяется полярность первой гармоники только для АИН1. Зависимости  $U_{1m(1)}$  и  $U_{2m(1)}$  в функции от амплитуды  $A$  для соотношений 1:3:9 и 1:3:6 приведены на рис.6. Зависимость  $U_{1m(1)}$  для обоих соотношений общая,  $U_{2m(1)}$  для соотношения 1:3:6 показана пунктиром.

Исследования показали, что обеспечение режима работы ИПТ1 с передачей энергии в нагрузку возможно корректировкой принципа формирования выходного напряжения КМПЧ с использованием предварительной модуляции задания третьей гармоникой (рис.7)

Проблема, связанная с ухудшением гармонического состава напряжения в зоне малых значений  $A$ , может быть решена при использовании комбинированного управления с переходом от амплитудного управления при больших значениях напряжения на ШИМ в области малых напряжений ( $A < 3$ ). Реализация управления с использованием ШИМ имеет свои особенности, поскольку напряжения ИПТ различные, и предполагает одновременное переключение АИН1 и АИН2. Принцип реализации ШИМ регулирования иллюстрирует рис.8. Результирующая диаграмма выходного напряжения приведена на рис.8,г. Для управления АИН используется многоуровневая ШИМ. При этом модулирующие напряжения  $u_{TRi}$  треугольной формы (частота модуляции  $f_M = 1/T_M$ ) имеют единичную амплитуду (в о.е.) и смещены по уровню вниз и вверх относительно оси абсцисс. Особенность в том, что напряжение второго уровня  $U=2$  (рис.8,а) формируется как разность  $(U_2 - U_1)$ , т.е. напряжение АИН1 периодически изменяет знак, что может привести к изменению знака его первой гармоники  $U_{1m(1)}$ . Выходное напряжение фазы КМПЧ представляет собой сумму напряжений АИН1 и АИН2, которые имеют характер импульсов. Зная амплитуду первой гармоники второго источ-

$$U_{2m(1)} = \frac{2}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} 3(A \sin \theta - 1) \sin \theta d\theta + \int_{\pi-\theta_2}^{\pi-\theta_1} 3(A \sin \theta - 1) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{\pi-\theta_2} 3 \sin \theta d\theta =$$

$$= \frac{2 \cdot 3}{\pi} \left[ \frac{A}{2} (2(\theta_2 - \theta_1) + \sin(2\theta_1) - \sin(2\theta_2)) + 4 \cos \theta_2 - 2 \cos \theta_1 \right]. \quad (2)$$

Анализ полученных выражений показывает, что при  $A > 1,8$  значение  $U_{2m(1)} > A$ , т.е.  $U_{1m(1)}$  становится отрицательным и, соответственно, изменяется режим работы ИПТ1. Выход из данной ситуации может быть найден следующим образом. Уменьшаем значение  $U_{2m(1)}$  до значения  $A$ , для сохранения значения  $U_{dm(1)}$ , одновременно следует увеличить  $U_{1m(1)}$ . Данный принцип иллюстрирует рис.8,б,в. Для уменьшения  $U_{2m(1)}$  следует уменьшить продолжительность включения ИПТ2 ( $\gamma T_M$ , где  $\gamma$  - коэффициент заполнения,  $k < 1$ ) при одновременном увеличении продолжительности включения ИПТ1 ( $\tau$ ). Сохранить среднее значение напряжения на интервале модуляции  $T_M$  можно добавив третий уровень напряжения при той же его длительности  $\tau$ .

Практическая реализация осуществляется следующим образом. Напряжение задания для уровней 2 и 3:  $u_{3дл1} = k(A \sin \theta - 1)$ , где значение  $k$  рассчитывается из условия  $U_{2m(1)}^i = A$ . При  $A \leq (1+k)/k$  значение  $k$  определяется в соответствии с (1):

$$A = \frac{2 \cdot 3k}{\pi} \left[ \frac{A}{2} ((\pi - 2\theta_1) + \sin 2\theta_1) - 2 \cos \theta_1 \right].$$

При  $A > (1+k)/k$  аналогичным образом следует использовать выражение (2) при  $\theta_2 = \arcsin((1+k)/kA)$ . Соответственно, разница ( $U_{2m(1)} - A$ ) на интервале  $(\theta_1, (\pi - \theta_1))$  обрабатывается добавлением третьего уровня при нулевом значении напряжения АИН1. Задание при этом  $u_{3дл1}^* = (1-k)(A \sin \theta - 1)$ . Диаграмма выходного напряжения фазы МПЧ при  $A=2.2$  приведена на рис.8,г. Следует отметить, что использование модифицированного алгоритма ШИМ несколько ухудшает гармонический состав ( $\text{THD} = 27-33\%$ ,  $U_{dm(5)} \leq 0,5\%$ ). Поэтому, его использование ограничено диапазоном  $A = (1.8-2.4)$ . В остальном диапазоне регулирование значения  $U_{1m(1)} \rightarrow 0$  обеспечивается предварительной модуляцией сигнала задания третьей гармоникой.

#### Выводы:

- Минимизация КМПЧ при использовании принципа несимметрии возможна только для инверторного блока.
- Источники постоянного тока выполняются по составным схемам, причем для эффективного подавления постоянной и субгармонических составляющих входного тока идентичные ИПТ в разных фазах должны питаться от комплектов вторичных обмоток входного трансформатора с одинаковыми сдвигами фаз. Активная мощность ИПТ минимальной кратности должна быть сведена к минимуму.
- Каждому соотношению напряжений ИПТ в фазе КМПЧ соответствует определенный алгоритм управления и структура звена постоянного тока.
- Исключение циркуляции энергии в схеме КМПЧ возможно при ограничении соотношения напряжений ИПТ значением  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$  и использовании предложенных алгоритмов.
- Наилучшие возможности улучшения выходных характеристик КМПЧ достигаются при соотношении  $U_1:U_2:U_3=1:3:6$  с комбинированным формированием выходного напряжения. Однако реализация предполагает некоторое усложнение звена постоянного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Juan Dixon, Luis Morán. Multilevel inverter, based on multi-stage connection of three-level converters, scaled in power of three. 2003 IEEE, p.8.
3. Шавёлкин А.А. Минимизация силовых цепей многоуровневых преобразователей частоты для электроприводов среднего напряжения/ Техн. електродинаміка. Темат. випуск. "Силова електроніка та енергоефективність", Частина 3. - К.2005, с.38-44.
4. Шавёлкин А.А. Исследование принципов формирования входного тока многоуровневого преобразователя частоты. Наукові праці ДонНТУ. Серія: "Електротехніка та енергетика", випуск 112: Донецьк: ДонНТУ, 2006, 6 с.