

Синтез трехфазных инверторов напряжения повышенной мощности с амплитудно-импульсной модуляцией выходного напряжения

МЫЦЫК Г.С., ТИН АУНГ ЗО, ХЕЙН ЗО ХТЕТ

Проблема создания инверторов напряжения повышенной мощности (до единиц мегавольт-ампер) связана с решением задач электромагнитной совместимости, включая проблему помехоизлучения. Такие электронные устройства востребованы, например, в малой энергетике при использовании энергии ветра, воды и солнца. Одним из перспективных направлений решения указанных проблем является синтез электронных устройств на основе использования принципа многоканального преобразования (МКП). Отличительными особенностями рассматриваемой в статье структуры трёхфазного инвертора напряжения (ТИН) с МКП комбинированного типа (ТИН-Ц-М×L) являются: 1) возможность реализации инвертирования повышенного уровня мощности при ограниченных по мощности и частоте возможностях располагаемой полупроводниковой элементной базы; 2) минимально возможная частота преобразования (равная лишь удвоенной частоте выходного напряжения ТИН-Ц-М×L) за счёт использования энергосберегающего алгоритма регулирования напряжения в каналах; 3) низкий уровень квантования выходного напряжения, достигаемый использованием для его формирования не ШИМ, а амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), которая способствует улучшению КПД, электромагнитной совместимости, в том числе снижению уровня помехоизлучений. Предложен способ селективного подавления ближайших по частоте к основной гармонике высших гармоник, обеспечивающий улучшение массогабаритных показателей выходного фильтра. Дано модельное описание напряжения с АИМ с селективно подавленными высшими гармониками, обеспечивающее проектирование выходного фильтра. Целесообразная область применения ТИН-Ц-М×L – стационарные генерирующие электротехнические комплексы для малой энергетики (ветро- и гидроэнергетические установки, солнечные электростанции).

К л ю ч е в ы е с л о в а: трёхфазный инвертор напряжения, повышенная мощность, многоканальное преобразование энергетического потока, высшие гармоники напряжения, селективное подавление, фильтрация напряжения, имитационное компьютерное моделирование

При синтезе инверторов повышенной мощности приходится решать задачу согласования их структурно-алгоритмической организации (САОр) с возможностями (по мощности и частоте) располагаемой полупроводниковой элементной базы при одновременном выполнении заданных ограничений на искажения выходного напряжения. Одним из эффективных средств решения этой задачи является использование принципа многоканального преобразования (МКП) энергетического потока [1]. В [2] рассмотрены особенности САОр трёхфазных инверторов напряжения (ТИН) децентрализованного типа с МКП – ТИН-ДЦ-М (при выходных параметрах $U_{2(1)} = \text{var}$ и $f_{2(1)} = \text{var}$), которые предназначены для мощных частотно управляемых электроприводов [3]. При этом для формирования выходного напряжения, которое здесь имеет форму сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (с АИМ, а не с ШИМ, как в [3]), используется энергосберегающий алгоритм вектор-векторного формирования (ВВФ), реализуемый на выходной частоте

f_2 [2]. Выходные напряжения M каналов при этом сдвигают относительно друг друга на угол $\delta = \pi/3M$, а токи каналов суммируют с помощью трансфильтров (ТФ). В данном применении высшие гармоники выходного тока ТИН-ДЦ-М ослабляются индуктивностью рассеяния обмоток двигателя, так что установка на его выходе дополнительного фильтра не требуется.

В статье рассматривается ТИН с таким же принципом САОр, как и в [2], но централизованного типа (ТИН-Ц-М), т.е. при неизменных выходных параметрах $U_{2(1)} = \text{const}$ и $f_{2(1)} = \text{const}$. В этом случае выходной фильтр с необходимостью должен использоваться, поскольку нагрузкой ТИН-Ц-М могут быть потребители различной физической природы, в том числе не терпящие значительных искажений напряжения. В таком применении ТИН-Ц-М спектр его выходного напряжения может быть дополнительно улучшен, что позволит уменьшить массу выходных фильтров. Покажем это.

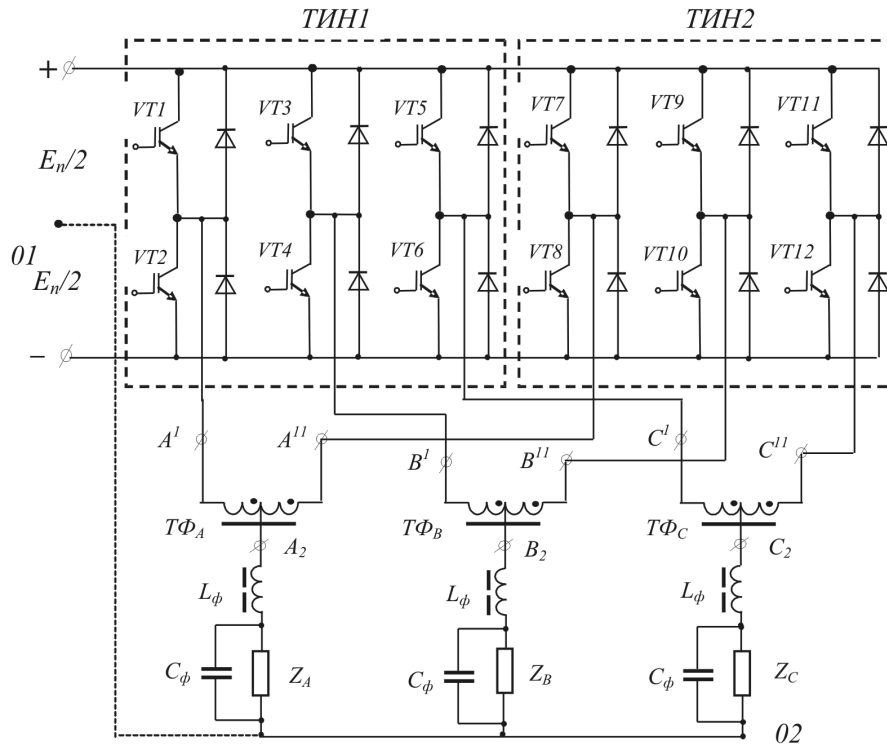


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовой части ТИН-Ц-2 с суммированием токов каналов посредством ТФ и с выходным Г-образным LC-фильтром

Сущность алгоритма вектор-векторного формирования (ВВФ) напряжения на выходной частоте. Особенности реализации алгоритма вектор-векторного формирования (ВВФ) подробно описаны, например в [1, 2]. В простейшем случае при числе каналов $M=2$ (рис. 1) для каждой фазы нагрузки формируют два последовательно сдвинутых между собой по фазе на угол $\delta=\pi/6$ напряжения прямоугольной формы «меандр», а затем выходные токи этих каналов суммируют с помощью ТФ (рис. 2). В итоге в нагрузке получают результирующее напряжение трёхступенчатой формы с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), причём в модификации с трёхуровневыми и одновременными интервалами квантования [3–5]. Нужно заметить, что рассматриваемый алгоритм ВВФ выходного напряжения эффективен только при симметричной трехфазной нагрузке, когда нет необходимости в нулевом проводе НП (связь 01–02). При отсутствии связи 01–02 форма фазного напряжения на нагрузке, соединенной в «звезду», видоизменяется, так как при этом отсутствуют условия для протекания гармоник тока нулевой последовательности (ГНП) – $3u_{\Sigma(3)}$ (рис. 2). Фазное напряжение с формой «меандр» при этом преобразуется в напряжение трехступенчатой формы (с уровнями ступеней: $E_n/3, E_n/2, 2E_n/3$ и с паузой в один интервал квантования при его переходе через нуль), а его коэффициент гармоник уменьшается с 0,483 до 0,168. Обозначим этот класс ТИН-Ц-М с АИМ.

Модель выходного напряжения ТИН-Ц-М с АИМ. Модельное описание выходного напряжения ТИН с МКП (в варианте без НП) было получено в [2] на основе использования модели выходного напряжения одного канала и коэффициента геометрического суммирования для $(2k+1)$ -х гармоник напряжений M числа каналов в виде:

$$u_{2M}(t) = U_m \sum_{k=0}^{\infty} b_{(2k+1)} k_{sM(2k+1)} \sin[(2k+1)(\omega t - \beta_{sM})], \tag{1}$$

где

$$b_{(2k+1)} = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{1}{2k+1} \left[\sin \left[(2k+1) \frac{\pi}{6} \right] \sin \left[(2k+1) \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \cos \left[(2k+1) \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right] \right\} \tag{2}$$

– коэффициент Фурье, определяющий форму напряжения одного канала;

$$k_{sM(2k+1)} = \frac{\sin \left[(2k+1) \frac{M\delta_M}{2} \right]}{M \sin \left[(2k+1) \frac{\delta_M}{2} \right]} \tag{3}$$

– коэффициент геометрического суммирования $(2k+1)$ -й гармоники;

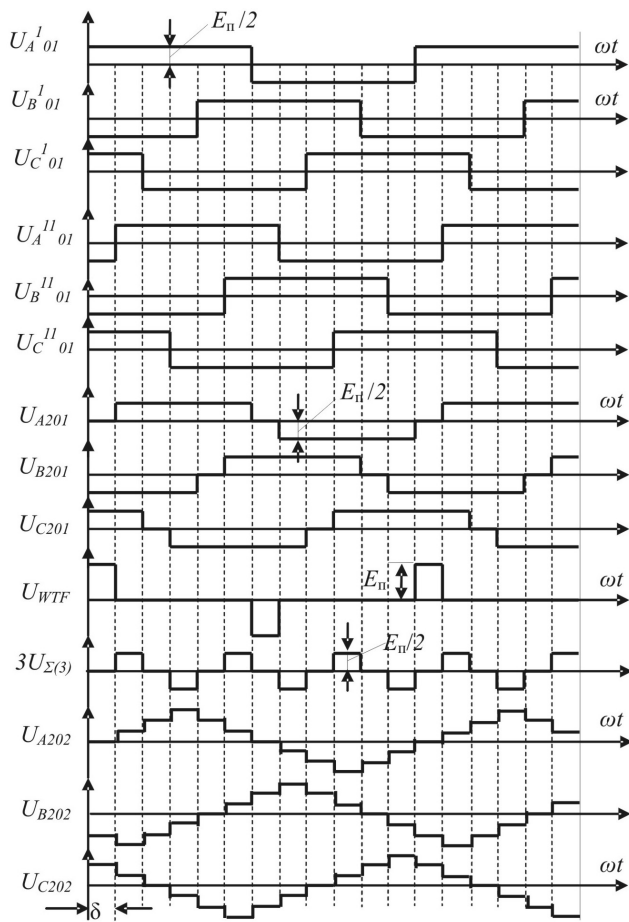


Рис. 2. Временные диаграммы процессов в ТИН-Ц-2 с суммированием токов каналов в выходной цепи посредством ТФ при угле $\delta = 30^\circ$: $u_{A01}^I, u_{B01}^I, u_{C01}^I, u_{A01}^{II}, u_{B01}^{II}, u_{C01}^{II}$ – фазные напряжения с формой «меандр» на выходах 1-го и 2-го каналов соответственно при наличии нулевого провода (НП); $u_{A201}, u_{B201}, u_{C201}$ – результирующие фазные напряжения на нагрузке при наличии НП; u_{WTF} – напряжение на полной обмотке ТФ; $3u_{\Sigma(3)}$ – сумма гармоник нулевой последовательности частоты $3f_2$, содержащихся в трёх напряжениях с формой «меандр»; $u_{A202}, u_{B202}, u_{C202}$ – напряжения на трехфазной нагрузке (с коэффициентом гармоник $K_{r(u)} = 0,168$) при отсутствии НП

$$\beta_{sM} = (M-1) \frac{\pi}{3M} \quad (4)$$

– результирующий фазовый угол $M(2k+1)$ -й гармоники выходного напряжения M -ТИН, обусловленный фазовым сдвигом её M составляющих в каналах относительно друг друга на угол:

$$\beta_{(2k+1)} = (2k+1)\delta_M. \quad (5)$$

К исходной модели (1) целесообразно добавить следующее методологическое замечание. Как отмечено выше, в данном случае суммируются не напряжения, а токи каналов, поэтому содержание всех гармоник в выходном спектре напряжения ТИН- M определяется только двумя коэффициентами $b_{(2k+1)}$ и $k_{sM(2k+1)}$ (т.е. без коэффициента M). При суммировании же напряжений каналов (кото-

рые в этом случае должны быть гальванически развязаны) их выходы соединяются последовательно, а содержание всех гармоник в спектре выходного напряжения ТИН- M возрастает при этом в M раз, так что в этом варианте в модель (1) должен быть добавлен ещё и множитель M . Однако форма выходного напряжения и его относительный спектральный состав в этих двух вариантах организации выходной цепи ТИН остаются одинаковыми.

Дополнительные возможности уменьшения искажения выходного напряжения ТИН- M с АИМ. Цель настоящей статьи – выявление дальнейших возможностей улучшения спектрального состава выходного напряжения инверторов этого класса при сохранении структурно-алгоритмической организации и сущности алгоритма формирования напряжения.

Используя (2), а также результаты, полученные в [2], можно убедиться, что ближайшая 5-я гармоника напряжения в спектре напряжения одного канала (1) присутствует во всём диапазоне изменения угла регулирования α , причём её содержание при $\alpha = 0$ составляет 20% (в долях основной гармоники). Обратимся теперь к коэффициенту геометрического суммирования (3) и рассмотрим самый простой случай, когда число каналов $M=2$ и значение угла δ_M согласно принципу МКП равно $\pi/6$. При этом для 1-й и 5-й гармоник получим следующие значения коэффициентов суммирования: $k_{s2(1)} = 0,966$, $k_{s2(5)} = 0,2588$. Решим обратную задачу: какое значение должен иметь угол $\delta_M = \delta_{2(5)0}$, чтобы содержание напряжения 5-й гармоники в спектре (1) стало равным нулю? Это условие выполняется при $k_{s2(5)} = 0$:

$$k_{sM(2k+1)} = \frac{\sin \left[(2k+1) \frac{M\delta_{M(5)0}}{2} \right]}{M \sin \left[(2k+1) \frac{\delta_{M(5)0}}{2} \right]} \Bigg|_{\substack{k=2 \\ M=2}} = 0, \quad (6)$$

откуда следует:

$$k_{s2(5)} = \frac{\sin \left[(5) \frac{2\delta_{2(5)0}}{2} \right]}{2 \sin \left[(5) \frac{\delta_{2(5)0}}{2} \right]} = 0; \quad (6a)$$

$$\sin \left[(5) \frac{2\delta_{2(5)0}}{2} \right] = 0; \quad (6b)$$

$$5\delta_{2(5)0} = 180^\circ; \quad (6в)$$

$$\delta_{2(5)0} = 36^\circ. \quad (6г)$$

Таким образом, для подавления 5-й гармоники в спектре напряжения (1) при $M=2$ фазовый угол δ_M необходимо задавать равным $\delta_M = \delta_{2(5)0} = 36^\circ$ (вместо 30°).

В следующей структуре ТИН-Ц-М с $M=3$ и $\delta_M = 20^\circ$ 5-я гармоника в спектре (1) по-прежнему присутствует (хотя и с меньшим содержанием, равным 4,88%). Для её подавления аналогичным способом угол δ_M необходимо задавать уже равным $\delta_M = \delta_{3(5)0} = 24^\circ$ (вместо 20°). Заметим, что с увеличением числа M и значения угла δ_M изменяется содержание всех гармоник напряжения в спектре (1), включая основную гармонику. Ниже показано изменение коэффициента геометрического суммирования $K_{sM(2k+1)0}$ от числа каналов M и номера гармоники (1-й и ближайших 5-й и 7-й):

M		1	2		3		6	
δ_M	$\delta_{M(5)0}$	0	30°	36°	20°	24°	10°	12°
$K_{sM(1)}$	$K_{sM(1)0}$	1	0,9659	0,9511	0,9598	0,9424	0,9561	0,9372
$K_{sM(5)}$	$K_{sM(5)0}$	1	0,2588	0	0,2176	0	0,1972	0
$K_{sM(7)}$	$K_{sM(7)0}$	1	0,2588	0,5878	0,1774	0,3188	0,1453	0,2369

Несложно убедиться, что при подавлении 5-й гармоники подавляются также и гармоники, кратные ей (25-я, 35-я и т.д.). Улучшенный таким образом спектр напряжения при числе каналов $M=3$ может быть представлен в том же виде, что и (1), но с модифицированным коэффициентом (3) путём замены в нём значения угла δ_M на значение $\delta_{M(5)0}$ (и с заменой M на число 3):

$$k_{sM(2k+1)} = \frac{\sin\left[(2k+1)\frac{M\delta_{M(5)0}}{2}\right]}{M \sin\left[(2k+1)\frac{\delta_{M(5)0}}{2}\right]} = \frac{\sin\left[(2k+1)\frac{3 \cdot 24^\circ}{2}\right]}{3 \sin\left[(2k+1)\frac{24^\circ}{2}\right]} \quad (3a)$$

Серия численных экспериментов показала также, что при сохранении той же стратегии структурно-алгоритмического синтеза (САС) с увеличением числа каналов, например до $M=6$ (и при подавлении всё той же 5-й гармоники), ближайшей достаточно заметной гармоникой остается 7-я гармоника (с $K_{s6(7)} = 0,2369$). Для её подавления при $M=6$ и той же стратегии САС потребуется угол $\delta_{M(7)0} = 8,57^\circ$, однако содержание 5-й гармоники при этом оказывается значительным, поскольку её коэффициент суммирования $K_{s6(5)} = 0,3568$, что делает такой вариант фактически неприемлемым по критерию массогабаритных показателей фильтра.

Оказывается, что при использовании того же числа каналов $M=6$ одновременно можно подавить 5-ю и 7-ю гармоники, если несколько видоизме-

нить стратегию САС следующим образом: сформировать два ($L=2$) трехканальных (с $M=3$) инверторных модуля (ИМ-3) с подавленной в их напряжениях 5-й гармоникой, а затем для подавления 7-й гармоники напряжения этих двух ИМ-3 сдвинуть между собой по фазе на угол $\delta_{M \times L(7)0} = 25,71^\circ$ (с последующим суммированием токов или напряжений ИМ-3). Полученную таким образом структуру обозначим как комбинированную многоканальную (КМК) структуру размерностью $M \times L$ (в данном примере 3×2).

Спектр напряжения для структуры ТИН-Ц- $M \times L$ с подавленными гармониками, кратными 5-й и 7-й, при этом приобретает следующий (общий) вид:

$$u_{2M}(t) = U_m \sum_{k=0}^{\infty} b_{(2k+1)} k_{sM(2k+1)} k_{sL(2k+1)} \times \sin[(2k+1)(\omega t - \beta_{sM} - \beta_{sL})], \quad (7)$$

где $k_{sM(2k+1)}$ – коэффициент, ранее определённый в (3) при $M=3$, а для $L=2$:

$$k_{sL(2k+1)} = \frac{\sin\left[(2k+1)\frac{L\delta_{M(7)0}}{2}\right]}{L \sin\left[(2k+1)\frac{\delta_{M(7)0}}{2}\right]} = \frac{\sin\left[(2k+1)\frac{2 \cdot 25,71^\circ}{2}\right]}{2 \sin\left[(2k+1)\frac{25,71^\circ}{2}\right]} \quad (8)$$

– коэффициенты геометрического суммирования для числа каналов $M=3$ и $L=2$ соответственно, обеспечивающие исключение из спектра выходного напряжения ТИН-Ц- $M \times L$ гармоник, кратных соответственно 5-й и 7-й. При этом коэффициент Фурье $b_{(2k+1)}$ остаётся тем же.

В качестве недостатка рассмотренного способа САС можно указать на некоторое снижение основной гармоники напряжения: с ростом числа $M \times L$ (в данном примере её коэффициент $k_{s3 \times 2(1)} = 0,9187$, что, в конечном счёте, означает уменьшение (на $\approx 9\%$) коэффициента использования напряжения источника питания такого ТИН. Однако уменьшение искажений (при формировании квазисинусоидального напряжения бесфильтровым путём) в принципе всегда сопровождается уменьшением содержания основной гармоники относительно её содержания в исходном напряжении канала. Можно показать, что это известное аксиоматическое положение – неизбежная закономерность перехода одних (количественных) показателей одного качества в другие (количественные) показатели другого качества. Ниже приведены значения коэффициентов геометрического суммирова-

ния, обеспечивающие подавление в комбинированной шестиканальной структуре ТИН-6(3×2) гармоник напряжения, кратных 5-й и 7-й:

$M=3$ при $\delta_{m(5)0}=24^\circ$		$L=2$ при $\delta_{L(7)0}=25,71^\circ$		$M \times L=3 \times 2$ Комбинированная структура ТИН	
$K_{sM(1)0}$	0,9424	$K_{sL(1)0}$	0,9749	$K_{sM(1)0} \times K_{sL(1)0}$	0,9187
$K_{sM(5)0}$	0	$K_{sL(5)0}$	0,4340	$K_{sM(5)0} \times K_{sL(5)0}$	0
$K_{sM(7)0}$	0,3188	$K_{sL(7)0}$	0	$K_{sM(7)0} \times K_{sL(7)0}$	0

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена информация, полученная на основе ИКМ, которая даёт представление о достигаемом качестве инвертированного напряжения. Результаты получены при предварительно заданных значениях параметров фильтра. Коэффициент гармоник напряжения до фильтра $K_{\Gamma(U_2)}=9,42\%$, а после него – $0,5\%$. Очевидно, фильтр здесь переразмерен. Уменьшение его параметров до значений $L=12$ мГн, $C=12$ мкФ даёт приемлемое значение $K_{\Gamma(U_2)}=6,44\%$. Параметры фильтра должны оптимизироваться при конкретно заданных условиях применения ТИН-Ц-6(3×2), что не является целью настоящей статьи.

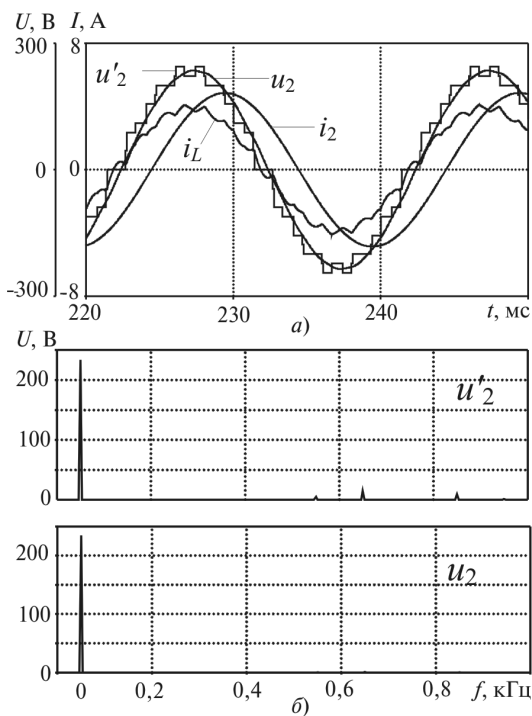


Рис. 3. Осциллограммы рабочих процессов в ТИН-Ц-6(3×2) (с параметрами: $E_{\Pi}=400$ В, $S_{2(1)}=3000$ ВА, $U_{2(1)} \approx 200$ В, $f_2=50$ Гц, $\cos \varphi_{2(1)}=0,8$, $L_{\Phi}=20$ мГн, $C_{\Phi}=45$ мкФ) при $\delta_{m(5)0}=25,71^\circ$, $\alpha=0$, $K_{\Gamma(U_2)}=0,5\%$: а – выходные напряжение и токи до и после фильтра при $\alpha=0$; б – спектрограммы выходного напряжения до и после фильтра

С использованием данной стратегии улучшения качества выходного напряжения ТИН-Ц- $M \times L$ подавление следующей ближайшей (11-й) гармоники в спектре (1) возможно путём последующего удвоения числа каналов, если взять для этого в качестве инверторного модуля (ИМ-6) шестиканальный ТИН-Ц-6(3×2). В этом варианте его обозначение будет ТИН-Ц-12(6×2).

Результаты имитационного компьютерного моделирования. Визуализация процессов преобразования параметров электроэнергии является одним из наглядных и удобных критериев проверки результатов САС на соответствие их проектному замыслу и (при принятых допущениях) как следствие – критерию адекватности. Для решения поставленной задачи использовалось уже получившее широкое распространение имитационное компьютерное моделирование (ИКМ), в данном случае в среде OrCAD PSice Schematics.

Для сравнения в табл. 1 представлены результаты сравнения спектральных составов выходного напряжения двух трёхканальных ТИН ДЦ-типа и Ц-типа при одних и тех же значениях параметров фильтра. Из таблицы видно, что коэффициент гармоник выходного напряжения при оптимальном угле $\delta_{3(5)0}=24^\circ$ в зависимости от значения угла α оказывается меньше в 2÷5 раз. Заметим также, что для разных значений параметров числа каналов (канальности) M и L угол $\delta_{3(5)0}$ имеет разные значения.

Очевидный положительный эффект от использования оптимального угла $\delta_{3(5)0}$ для примера в табл. 2 оценён нами количественно. Для ТИН с $M=2$ выигрыш по массе активных материалов фильтра составляет примерно 27%. Для оперативной оценки массы активных материалов дросселя фильтра переменного тока использовалась предложенная в [6] её зависимость от энергии, которая для диапазона энергии 0,1÷10 Дж представлена следующей полиномиальной функцией:

$$G_L = -0,3445 \cdot W_L^2 + 4,4979 \cdot W_L - 0,2595.$$

Для оценки влияния на искажения выходного напряжения (после фильтра) напряжения питания в диапазоне его изменения $\pm 10\%$ номинального значения при его стабилизации за счёт угла его регулирования α^* для варианта ТИН с $M=2$ в табл. 3 и 4 и на рис. 4 и 5 приведены результаты исследования, полученные на основе ИКМ. Видно, что при заданном возмущающем воздействии коэффициент гармоник выходного напряжения изменяется незначительно.

Таблица 1

Результаты сопоставительного анализа спектрального состава выходного напряжения ТИН-Ц-3 с традиционным углом $\delta_3 = \pi/9$ и с $\delta_{3(5)0} = \pi/7,5$ при регулировании напряжения

Выходное напряжение	Частота f , Гц				Коэффициент K_r , %
	50	250	360	550	
$\alpha = 0$					
$U_{2(k)}$ ($\delta_3 = 20^\circ$)	245,422	10,85	2,05	0,43	4,506
U_2 ($\delta_{3(5)0} = 24^\circ$)	241,095	0	3,691	0,64	1,634
$\alpha = \pi/12$ ($\alpha^* = 0,25$)					
U_2 ($\delta_3 = 20^\circ$)	187,76	20,087	1,557	0,8	10,74
U_2 ($\delta_{3(5)0} = 24^\circ$)	184,412	0	2,804	1,178	2,015
$\alpha = \pi/6$ ($\alpha^* = 0,50$)					
U_2 ($\delta_3 = 20^\circ$)	126,957	20,984	3,95	0,22	16,805
U_2 ($\delta_{3(5)0} = 24^\circ$)	124,7014	0	7,115	0,33	5,78
$\alpha = \pi/4$ ($\alpha^* = 0,75$)					
U_2 ($\delta_3 = 20^\circ$)	64,031	13,243	3,265	0,85	21,402
U_2 ($\delta_{3(5)0} = 24^\circ$)	62,991	0	5,862	1,277	10,275

Таблица 2

Массогабаритные показатели фильтра ТНИ-Ц-2 с углом $\delta = \pi/6$ и $\delta_{\text{опт}} = \pi/5$ ($\alpha = 0$). Дроссель фильтра: тип магнитопровода ШЛ из стали Э330; силовой конденсатор типа МКР АС, В32361 [7]

Значение угла	Массогабаритные показатели							$G_{\Sigma 1}/G_{\Sigma 2}$
	L , мГн	$I_{L(1)}$, А	G_L , кг	C , мкФ	$U_{C(1)}$, В	G_C , кг	$G_{\Sigma(1,2)}$, кг	
$\delta = 30^\circ$	20	3,98	0,444	60	224,72	0,4	0,844	1,37 (27,4%)
$\delta_{\text{опт}} = 36^\circ$	14	3,89	0,213	60	219,188	0,4	0,613	

Таблица 3

Результаты ИКМ ТИН-Ц-2 при угле $\delta_{\text{опт}} = \pi/5$ при: $S_{2(1)} = 3000$ ВА; $f_2 = 50$ Гц; $L_\phi = 10$ мГн; $C_\phi = 60$ мкФ

Значения E_p^*	α^*	Выходное напряжение			Коэффициент K_r , %
		$U_{2(1)}$, В	$U_{2(1)}^*$, В	U_2 , В	
0,9	0	195,906	1	196,16	5,1
	0,95	206,81	1,05	207,077	5,1
1,0	0,05	197,36	1,007	197,526	4,1
	0	217,712	1,11	217,994	5,1
1,05	0,1	197,657	1,008	197,772	3,41
	0	228,616	1,167	228,912	5,1
1,1	0,15	196,813	1,004	196,934	3,51
	0	239,52	1,222	239,83	5,1
	0,2	194,808	0,994	195,01	4,53

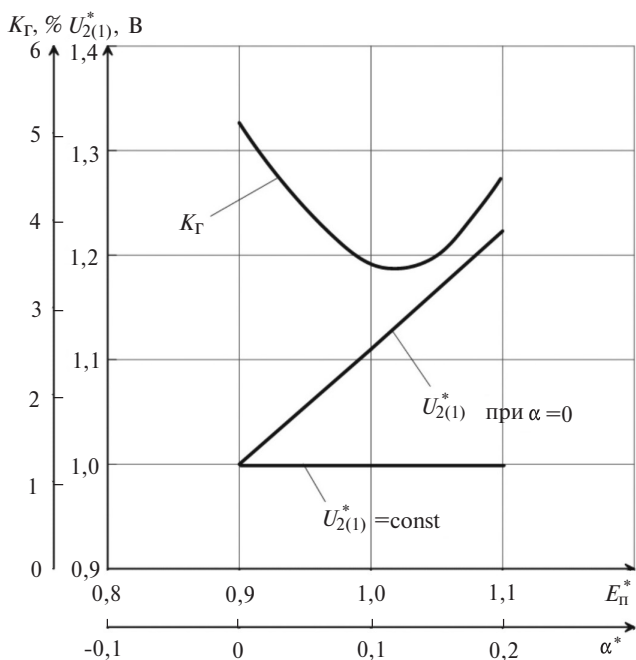


Рис. 4. Зависимости показателей качества напряжения ТИН-Ц-2 от напряжения питания и угла регулирования при стабилизации выходного напряжения

Для удобства анализа четырех исследуемых величин (напряжений и токов на входе и выходе фильтра), в частности их фазовой взаимосвязи, на осциллограммах целесообразно представлять их совместно — на одной общей оси времени. По синфазности напряжений на входе и выходе фильтра

Таблица 4

Изменение содержания первых трёх высших гармоник выходного напряжения в ТИН-Ц-2 и его искажений (до и после фильтра) при изменении напряжения питания E_{Π} и стабилизации выходного напряжения за счёт регулирования угла α^*

$(2k+1)$, где $k=0;3;5;6$	1	7	11	13	$U_{2(1)}$, В	$K_{\Gamma(u_2)}$, %	
$f_k = (2k+1)50$, Гц	50	350	550	650			
$E_{\Pi}^* = 0,9; \alpha^* = 0$	$U'_{2(k)m}$ [В]	271,819	24,042	24,803	12,99	195,134	16,98
	$U_{2(k)m}$ [В]	277,053	13,375	4,093	1,458	196,16	5,1
$E_{\Pi}^* = 1; \alpha^* = 0,1$	$U'_{2(k)m}$ [В]	274,242	8,404	49,018	4,556	200,271	24,92
	$U_{2(k)m}$ [В]	279,53	4,679	8,089	0,511	197,774	3,41
$E_{\Pi}^* = 1,1; \alpha^* = 0,2$	$U'_{2(k)m}$ [В]	270,286	12,207	60,141	23,588	200,441	30,62
	$U_{2(k)m}$ [В]	275,501	6,788	9,926	2,65	195,008	4,53

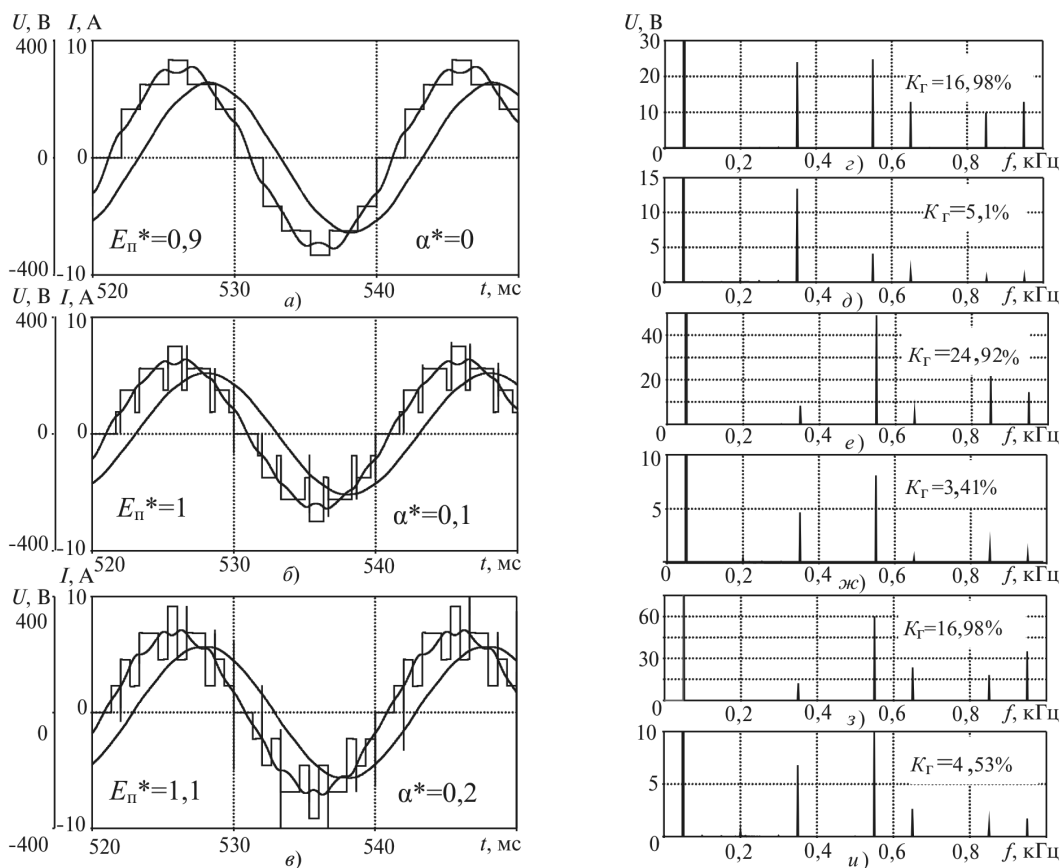


Рис. 5. Осциллограммы рабочих процессов в ТИН-Ц-2 при угле $\delta_{\text{опт}}$ (для $S_{2(1)} = 3000$ ВА, $f_2 = 50$ Гц, $U_{2(1)} \approx 200$ В, $\cos\varphi_{2(1)} = 0,8$, $E_{\Pi} = 500$ В, $L_{\Phi} = 10$ мГн, $C_{\Phi} = 60$ мкФ): напряжения и токи до и после фильтрации при различных значениях напряжения питания и угла регулирования α : а – $E_{\Pi}^* = 0,9, \alpha^* = 0$; б – $E_{\Pi}^* = 1, \alpha^* = 0,1$; в – $E_{\Pi}^* = 1,1, \alpha^* = 0,2$; z – u – спектрограммы напряжения до и после фильтра (K_{Γ} – коэффициент гармоник напряжения после фильтра)

можно судить о степени переразмеривания фильтра. На всех осциллограммах (кроме рис. 3) синфазность этих величин достаточно высокая, что свидетельствует о значениях параметров фильтра, достаточно близких к оптимальным.

Использование комбинированной многоканальности КМК (с размерностью $M \times L = 3 \times 2$) позволяет получить лучшие результаты по искажениям выходного напряжения во всём диапазоне угла регу-

лирования напряжения по сравнению с традиционным решением. Нужно сказать, что если при использовании ТИН-Ц- $M \times L$ по своему прямому назначению такого широкого диапазона регулирования напряжения не требуется, то значения параметров фильтра и их масса могут быть соответственно уменьшены.

Выводы 1. Отличительными особенностями рассмотренной в работе структуры трёхфазного ин-

вертора с многоканальным преобразующим трактом комбинированного типа (ТИН-Ц- $M \times L$) являются: возможность реализации инвертирования повышенного уровня мощности при ограниченной по мощности (и частоте) имеющейся полупроводниковой элементной базы; минимально возможная частота преобразования (равная удвоенной частоте выходного напряжения ТИН-Ц- $M \times L$) за счёт использования энергосберегающего алгоритма регулирования напряжения в каналах; низкий уровень квантования выходного напряжения, достигаемый использованием для его формирования амплитудно-импульсной модуляции (АИМ, не ШИМ), которая способствует улучшению электромагнитной совместимости, в том числе снижению уровня помехоизлучений.

2. В рамках используемого при синтезе известного способа вектор-векторного формирования напряжения с АИМ предложен способ селективного подавления ближайших по частоте к основной гармонике высших гармоник, обеспечивающий улучшение массогабаритных показателей выходного фильтра.

3. Предложенное модельное описание напряжения с АИМ с селективно подавленными ближайшими высшими гармониками обеспечивает исходные данные для проектирования выходного фильтра.

4. Целесообразная область применения ТИН-Ц- $M \times L$ – стационарные генерирующие электротехнические комплексы для малой энергетики (ветро- и гидроэнергетические установки, солнечные электростанции).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мыщык Г.С., Бериллов А.В., Михеев В.В. Поискное проектирование устройств силовой электроники (трансформаторно-полупроводниковые устройства): Учебное пос. М.: Издат. дом МЭИ, 2010, 284 с.

2. Мыщык Г.С., Тин Аунг Зо. Многоканальное преобразование постоянного напряжения в трехфазное квазисинусоидальное напряжение с использованием энергосберегающего алгоритма его регулирования. – Электричество, 2018, № 7, с. 37–46.

3. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Терещенков В.В. Моделирование системы электродвижения судна с многотактными инверторами и двигателем на постоянных магнитах. – Труды V Международ. (XVI Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2007). Санкт-Петербург, 18–21 сентября 2007, с. 377–381.

4. Мыщык Г.С. Основы теории структурно-алгоритмического синтеза источников вторичного электропитания: Учебное пос. для вузов. М.: Московский энергетический институт, 1989, 108 с.

5. Мыщык Г.С., Пикулин В.П., Шевякова Н.Б. Анализ и оценка форм выходного напряжения преобразователей с амплитудно-импульсной модуляцией. – Электричество, 1979, № 11, с. 25–30.

6. Хлаинг Мин У. Взаимосвязь массы дросселей индуктивности фильтров переменного и постоянного тока от их энергии. – Практическая силовая электроника, 2015, № 57, с. 21–24.

7. Краткий обзор продукции компании EPCOS. Пленочные и силовые конденсаторы для промышленного применения [Электрон. ресурс] <http://www.epcos.com>, www.tdk.com. (дата обращения 14.12.2018).

[04.02.2018]

А в т о р ы: Мыщык Геннадий Сергеевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) – ныне Национальный исследовательский университет НИУ «МЭИ» в 1964 г. Защитил в МЭИ в 2001 г. докторскую диссертацию «Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электрических комплексов автономных объектов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ».

Тин Аунг Зо окончил магистратуру НИУ «МЭИ». Аспирант НИУ «МЭИ».

Хейн Зо Хтет окончил магистратуру НИУ «МЭИ». Аспирант НИУ «МЭИ».

Synthesis of Large-Capacity Three-Phase Voltage Inverters with Pulse-Amplitude Modulation of the Output Voltage

MYTSYK Gennadiy S. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor

TIN AUNG ZAW (Union M'yanma) – Ph. D. Student, NRU «MPEI»

HEIN ZAW HTET (Union M'yanma) – Ph. D. Student, NRU «MPEI»

The problem of designing large-capacity voltage inverters (up to a few MVA) involves the need to settle matters concerned with electromagnetic compatibility, including the interference radiation problem. Such electronic devices are required, e.g., for small-scale power-generating installations that use wind, water, and solar energy. One promising line of solving such problems implies synthesizing electronic devices based on using the multichannel conversion (MCC) principle. The structure of a combined three-phase voltage

inverter (TVI) with MCC (TVI-C-MxL) is considered, which has the following distinctive features. (1) It offers the possibility of inverting an increased power level while using the available semiconductor devices with limited power and frequency ratings. (2) The considered structure makes it possible to use the minimum possible conversion frequency (equal to as low as twice the TVI-C-MxL output voltage frequency) owing to the use of an energy-saving voltage control algorithm in the channels. (3) The considered structure implies a low output voltage quantization level, which is achieved by shaping the voltage using by means of pulse-amplitude modulation (PAM) instead of PWM. The use of PAM helps improve the efficiency and electromagnetic compatibility, in particular, due to a reduced interference radiation level. A method for selectively suppressing the higher harmonic components with frequencies closest to that of the fundamental harmonic component is proposed, which makes it possible to improve the output filter's overall mass and dimension indicators. The article presents a model description of the voltage with PAM with selectively suppressed higher harmonic components, which can be used for designing the output filter. The advisable application field of a TVI-C-MxL is for stationary electric power generating systems for small-scale power installations (wind and hydro power installations, and solar power plants).

Key words: three-phase voltage inverter, increased power capacity, multichannel power flow conversion, higher harmonic voltage components, selective suppression, voltage filtration, computer simulation

REFERENCES

1. **Mytsyk G.S., Berilov A.V., Mikheyev V.V.** *Poiskovoe proektirovaniye ustroystv silovoy elektroniki (transformatorno-poluprovodnikovye ustroystva)* (Search design of power electronics (transformer-solid state devise)). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2010, 384 p.
2. **Mytsyk G.S., Tin Aung Zo.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 7, pp. 37–46.
3. **Pronin M.V., Vorontsov A.G., Tereshchenkov V.V.** *Trudy V Mezhdunarod. (XVI Vserossiyskoy) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2007)* (Proc. of V International (XVI All-Russian) conf. automated actuator (AEP-2007)). St. Petersburg, 18–21 September 2007, pp. 377–381.
4. **Mytsyk G.S.** *Osnovy teorii strukturno-algoritmicheskogo sinteza istochnikov vtorichnogo elektropitaniya* (Fundamentals of the theory of a structural-algorithmic synthesis of secondary electric power supply sources). Moscow, Moskow Power Engineering Institute, 1989, 108 p.
5. **Mytsyk G.S., Pikulin V.P., Shevyakova N.B.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1979, pp. 25–30.
6. **Khlaing Min U.** *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electrical Engineering)*, 2015, No. 57, pp. 21–24.
7. **Kratkii obzor produktsii kompanii EPCOS. Plenochnye i silovye kondensatory dlya promyshlennogo primeneniya** (A brief review of products manufactured by the EPCOS company. Film and power capacitors for industrial applications) [Electron. Resurs] [http. www. epcos.com](http://www.epcos.com). www.tdk.com. (Data obrashcheniya 14.12.2018).

[04.02.2018]