

Об эффективности использования трансфильтров и сглаживающих дросселей в структурах преобразователей с многоканальным преобразованием

ХЛАИНГ МИН У, МЫЦЫК Г.С.

В структурах статических преобразователей с многоканальным преобразованием энергетического потока суммирование токов каналов может осуществляться с использованием либо трансфильтров (ТФ), либо сглаживающих дросселей. В статье решается задача сопоставления этих двух альтернативных вариантов по массогабаритному показателю с учетом влияния их на показатели всего преобразователя. В качестве статического преобразователя рассматривается трансформаторно-выпрямительное устройство с двухканальным преобразованием энергетического потока с пульсностью выпрямленного напряжения 12 (ТВУ-12). В качестве средств решения поставленной задачи используются имитационное компьютерное моделирование и известные методики расчета массы трансформаторов, трансфильтров и сглаживающих дросселей. Показано, что при равных условиях по заданным показателям качества однозначное и убедительное преимущество имеет вариант с использованием трансфильтров. Вывод распространяется на все классы статических преобразователей с многоканальным преобразованием энергетического потока.

Ключевые слова: статический преобразователь, трансформаторно-выпрямительное устройство, многоканальное преобразование, суммирование токов каналов, трансфильтры, сглаживающие дроссели, сопоставление вариантов

Для преобразования параметров электроэнергии значительной мощности в силовой преобразовательной технике широко применяется способ, который в [1] получил обобщенную формулировку и распространен практически на все известные классы статических преобразователей (СП) [1–4]. Он назван способом многоканального преобразования (МКП) энергетического потока (ЭП). Суть его заключается в разбиении потока на L равных частей, преобразовании их по соответствующему алгоритму, последовательном фазовом сдвиге алгоритмов на угол $d = 2\pi / L$ между собой и в суммировании этих частей ЭП в выходной цепи СП по одной из двух схем: либо напряжений (СН), либо токов (СТ). Схему СН целесообразно применять при повышенных значениях выходного напряжения, а схему СТ – при повышенных значениях выходного тока. Известными достоинствами способа МКП являются: улучшение электромагнитной и электроэнергетической совместимости (как по выходу СП, так и по его входу) при увеличении числа каналов L [1], а также возмож-

ность (и целесообразность) преобразования значительных мощностей при располагаемой элементной базе ограниченной мощности. Использование принципа МКП, например при синтезе вентильных генераторов, позволяет значительно улучшить их показатели качества [3, 4].

В структурах преобразователей с СТ для повышения эффективности преобразования ЭП токи в выходной цепи суммируются с помощью электромагнитного узла, который ранее назывался уравнительным реактором (и катушкой Кюблера); в последующем [2, 4] его обоснованно предложено называть трансфильтром (словосочетание из слов – трансформатор и фильтр). Нужно заметить, что в [5] применительно к импульсным регуляторам с МКП электромагнитный узел назван автотрансформатором. Общим в двух новых названиях этого узла является существенный функциональный и проектный признак, указывающий, что он работает и рассчитывается, по сути, как трансформатор. Что касается фильтрующего свойства электромагнитно-

8. Skopintsev V.A. *Kachestvo elektroenergeticheskikh sistem: nadezhnost', bezopasnost', ekonomichnost', zhivuchest'* (Quality of electric power systems: reliability, security, efficiency, survivability). Moscow, Publ. "Energoatomizdat", 2009, 332 p.

9. Spravochnik *po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu elektricheskikh setei* (A Handbook for Repair and Maintenance of

Electric Networks / Edit. by K.M. Antipov and I.E. Banduilov. Moscow, Publ. "Energoatomizdat", 1987.

10. *Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 28.10.09. No. 846. Ob utverzhenii pravil rassledovaniya prichin avarii v elektroenergetike* (RF Government Decree No. 846 dated October 28, 2009 "On Approval of Rules for Investigating Causes of Accidents in the Electric Power Industry").

го узла, то оно будет рассмотрено ниже. В последующем будем придерживаться термина «трансфильтр» (однофазный или трехфазный), который наиболее адекватно отражает его функциональные свойства и расчетные особенности. Итак, в структурах СПТ с СН трансфильтр (ТФ) не требуется, а структуры СПТ с СТ содержат этот узел и применяются чаще.

Статья посвящена рассмотрению вопросов, связанных с проектированием трансфильтра, а также сопоставлению его с функционально альтернативным вариантом в виде сглаживающих дросселей в каналах (рис.1,б и з).

О функциональных свойствах и особенностях трансфильтра. На рис. 1,а показан простейший пример применения однофазного ТФ (ОТФ) в трансформаторно-выпрямительном устройстве (ТВУ-12) с двухканальным преобразованием ($L=2$) и с пульсностью выпрямленного напряжения $m_3=12$. Спектр выпрямленного напряжения 1-го канала (до ОТФ) с пульсностью выпрямленного напряжения $m_3=6$ имеет известное выражение:

$$u_d^I(t) = U_{d0}^I + \sum_{k=1}^{\infty} U_{d(6k)m} \cos 6k\omega t, \quad (1)$$

где

$$U_{d0}^I = U_{d0}^{II} = U_{d0} \frac{3}{\rho} U_{лm} \quad (2)$$

– постоянная составляющая напряжений $u_d^I(t)$ и $u_d^{II}(t)$ каналов; $k=1, 2, 3, \dots$ – любое целое число;

$$U_{d(6k)m} = \frac{6(-1)^{k+1}}{\rho(6k)^2 - 1} U_{лm} \quad (3)$$

– амплитуда гармоники с номером $6k$; $U_{лm}$ – амплитуда линейного напряжения на входе моста (падениями напряжения на диодах пренебрегаем); ω – угловая частота сетевого напряжения.

Выражение для спектра выпрямленного напряжения 2-го канала записывается аналогично, но с учетом фазового сдвига на частоте сетевого напряжения на угол $\varphi = \frac{\rho}{6}$:

$$u_d^{II}(t) = U_{d0}^{II} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{d(6k)m} \cos \left(6k\omega t + \frac{\rho}{6} \right) \quad (4)$$

Благодаря действию ОТФ напряжение $u_d(t)$ с пульсностью $m_3=12$ (рис. 1,б) на выходе ТВУ-12 содержит уже значительно меньшее число гармоник, причем ближайшей из них является 12-я:

$$u_d(t) = U_{d0} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{d(12k)m} \cos 12k\omega t. \quad (5)$$

Из сравнения моделей (1) и (5) следует, что в спектре (5) отсутствуют гармоники с частотами $6\omega, 18\omega, 30\omega, 42\omega$, т.е. гармоники, описываемые следующим рядом Фурье:

$$u_{dТФ}(t) = \sum_{p=1}^{\infty} U_{d6(2p-1)m} \cos 6(2p-1)\omega t, \quad (6)$$

где согласно (3)

$$U_{d6(2p-1)m} = \frac{6}{\rho} \frac{1}{6^2(2p-1)^2 - 1} U_{лm}, \quad (7)$$

$p=1,2,3,\dots$ – любое целое число.

Выполнив с помощью компьютерных средств процедуру суммирования гармоник в соответствии с моделью (6), после вывода на печать результата в графической форме можно убедиться в том, что функция $u_{dТФ}(t)$ имеет вид периодического сигнала практически треугольной формы с частотой 6ω (рис. 1,в). Такая же форма напряжения на обмотке ТФ была получена также и на основе имитационного компьютерного моделирования ТВУ-12 (рис. 1,б). Данная информация понадобится для проектирования ОТФ. Таким образом, исследование показало, что ОТФ препятствует прохождению в нагрузку спектра гармоник напряжения вида (6), т.е. для них он выполняет функцию заграждающего фильтра. Этот факт, в частности, и был использован при введении термина «трансфильтр». Физический процесс фильтрации может быть пояснен на примере ближайшей 6-й гармоники напряжения в 1- и 2-м каналах, которая определяется из (1) и (4) при $k=1$ как

$$u_{d(6)}^I(t) = U_{d(6)m} \cos 6\omega t; \quad (8)$$

$$u_{d(6)}^{II}(t) = U_{d(6)m} \cos(6\omega t + \rho) = -U_{d(6)m} \cos 6\omega t. \quad (9)$$

Как следует из (8) и (9), эта гармоника по отношению к напряжениям $u_d^I(t)$ и $u_d^{II}(t)$ находится в противофазе. Это означает, что напряжения (8) и (9) приложены к обмоткам ОТФ (магнитосвязанным и включенным согласно-последовательно – рис. 1,а) с одинаковой полярностью, а обусловленный ими намагничивающий ток протекает через обмотки и мосты $TBM1, TBM2$, минуя нагрузку R_d . Аналогично проявляют себя и остальные гармоники спектра (6). Сохранение трансфильтром своих функциональных свойств обеспечивается до того минимального (критического) значения тока нагрузки, при котором ток через его обмотки сохраняет безразрывный (непрерывный) характер. Критическое значение сопротивления нагрузки $R_{d(кр)}$ выражается через напряжение U_{d0} и амплитудное значение тока холостого хода трансфильтра – $I_{ТФ(хх)m}$:

$$R_{d(кр)} = \frac{U_{d0}}{I_{ТФ(хх)m}}$$

Что касается гармоник напряжения из спектра (5), то по отношению к напряжениям $u_d^I(t)$ и $u_d^{II}(t)$ (на выходе мостов $TBM1$, $TBM2$) они имеют не разную, а одинаковую полярность, а значит, по отношению к обмоткам ОТФ действуют с разной полярностью, т.е. относительно этих гармоник обмотки включены бифилярно, не препятствуя прохождению их в нагрузку. Не оказывают влияния (подмагничивающего действия) на магнитопровод

ОТФ и постоянные составляющие напряжений каналов U_{d0}^I и U_{d0}^{II} , которые приложены к обмоткам также с разной полярностью. То же можно сказать и о токах I_{d0}^I и I_{d0}^{II} каналов, каждый из которых равен половине тока нагрузки I_{d0} и магнитные потоки от которых, действуя в противоположных направлениях, компенсируют друг друга. Таким образом, ОТФ обеспечивает независимую друг от друга работу каналов (что следует, например, из осциллограмм токов на входе мостов – рис.1,б) и выполняет при этом две функции – суммирования токов

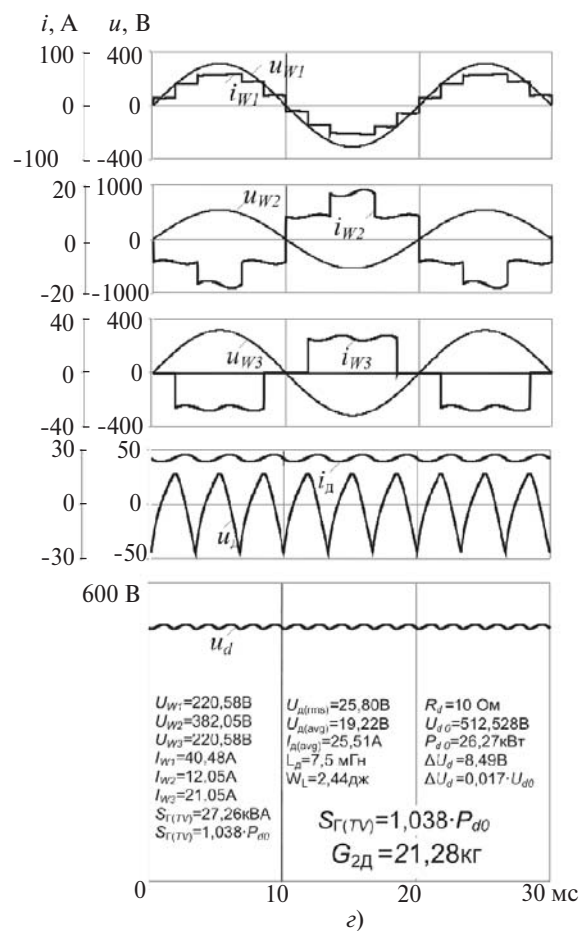
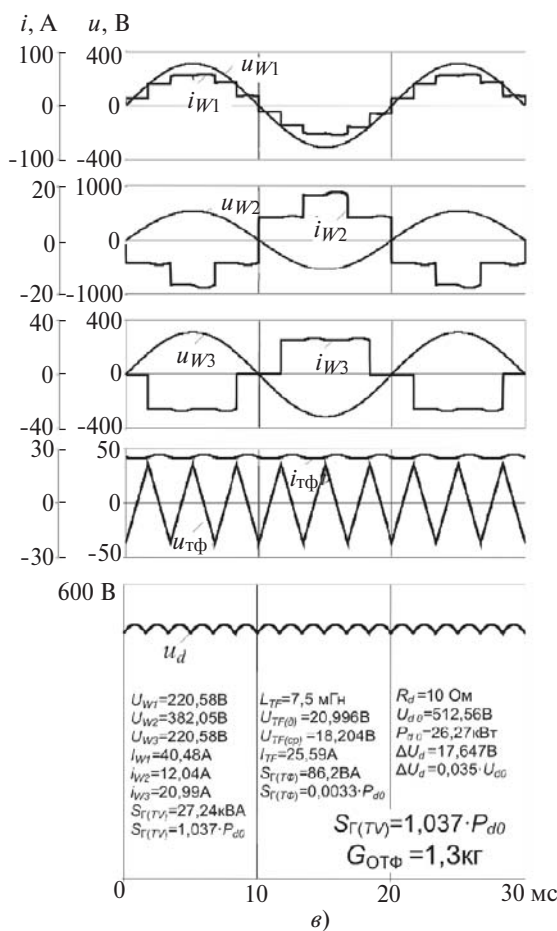
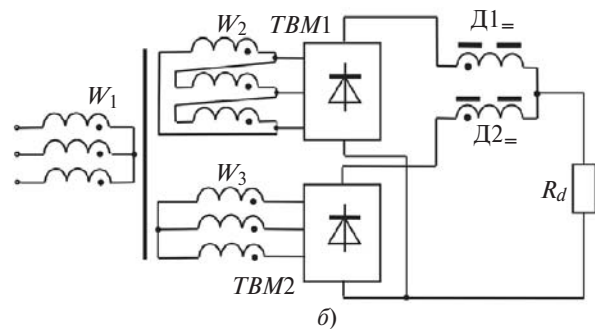
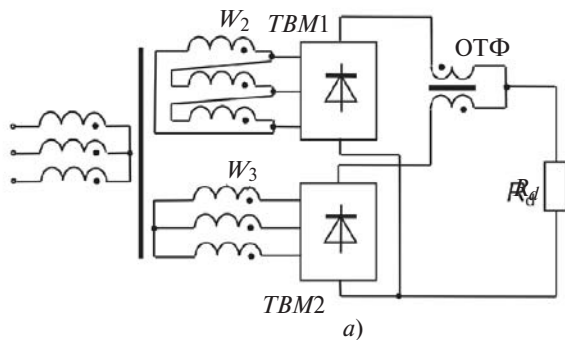


Рис. 1. Результаты ИКМ и сопоставительного анализа двух вариантов ТВУ-12: а – с выходным трансформатором (ОТФ); б – с двумя дросселями ($2D_{\pm}$) при $U_1 = 220,58 В$; $f_1 = 50 Гц$, $P_{d0} = 26,27 кВт$; $U_{d0} = 512,5 В$; $R_d = 10 Ом$ и использовании одинакового значения индуктивности обмоток ОТФ и D_{\pm} ($L = 7,5 мГн$): в и з – осциллограммы, поясняющие рабочие процессы в двух ТВУ-12 по схемам а и б, где u_{W1} – напряжение на первичной обмотке и i_{W1} – ток через неё; u_{W2} , i_{W2} , u_{W3} , i_{W3} – напряжения на вторичных обмотках «треугольник» и «звезда» и токи через них; $u_{ТФ}$ – напряжение на обмотке ОТФ и $i_{ТФ}$ – ток через неё; $u_{др}$ – напряжение на обмотке D_{\pm} и $i_{др}$ – ток через неё; u_d – выходное напряжение ТВУ-12

каналов и улучшения спектрального состава выпрямленного напряжения (и тока) ТВУ-12.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод: с точки зрения электромагнитной нагрузки ОТФ работает как трансформатор в режиме холостого хода, препятствуя прохождению в нагрузку противофазных гармоник (6) из спектров напряжений $u_d^I(t)$ и $u_d^{II}(t)$ каналов, а с точки зрения нагрузки электрической пропускает в нагрузку синфазные гармоники (5) этих напряжений (и тока), включая постоянную составляющую напряжения (тока). Следовательно, при проектировании сечение обмоток ОТФ должно рассчитываться на половину значения тока нагрузки (с учетом тока холостого хода ОТФ), а число их витков должно определяться из условия перемагничивания магнитопровода переменным напряжением треугольной формы частоты 6ω (рис. 1, в). Именно эта проектная особенность характерна и для расчета трансформаторов.

В порядке систематизации альтернативных вариантов решения задачи суммирования токов в структурах с МКП здесь рассматривается также функционально более простой вариант – введение на выходе каждого канала сглаживающего дросселя D_+ (рис. 1, б и г).

Целью настоящего исследования является сопоставительный анализ двух вариантов решения одной и той же задачи по критерию массогабаритного показателя. При решении использовались: имитационное компьютерное моделирование (ИКМ); методика расчета габаритной мощности и массы ОТФ; методика расчета габаритной мощности и массы сглаживающего дросселя [6, 7].

Алгоритм исследования. Исследование проводится на конкретном примере ТВУ-12 при следующих исходных данных: параметры сетевого напряжения – $U_{1\phi}/U_{1л} = 220,58/381,0$ В; $f_1 = 50$ Гц; параметры нагрузки – $P_{d0} = 26,27$ кВт; $U_{d0} = 512,5$ В; $R_d = 10$ Ом. Для проведения ИКМ необходимо задать значение индуктивности L обмоток ОТФ. Задача может быть решена при известном (ранее найденном) значении напряжения на обмотке ОТФ и задаваемом значении тока холостого хода, например, $I_{хх} = 0,03I_{ТФ(ном)}$, где $I_{ТФ(ном)}$ – номинальное значение тока через обмотку ОТФ. Несложно показать, что при этом значение индуктивности обмотки $L = 7,5$ мГн.

1. На первом этапе исследование двух вариантов ТВУ-12 (на рис. 1, а, б) было проведено при одинаковом значении индуктивностей обмоток ОТФ и двух дросселей ($2D_+$) со значением $L = 7,5$ мГн. Результаты ИКМ представлены осциллограммами основных процессов на рис. 1, в, г.

Используя их, можно сделать вывод, что при одинаковом значении параметра $L = 7,5$ мГн уровень пульсаций напряжения на нагрузке во втором варианте (рис. 1, б) уменьшился примерно в 2 раза по сравнению с первым вариантом ($DU_d = 8,49$ В против $DU_d = 17,647$ В). Однако расчеты показали, что суммарная масса двух дросселей при этом увеличивалась в 16,4 раза по сравнению с массой трансфилтра в первом варианте ($G_{2д} = 21,28$ кг против $G_{ТФ} = 1,3$ кг). Расчеты приведены ниже. Это различие определяется принципиальным отличием в работе узлов (ОТФ и D_+) и значительной разницей их габаритных мощностей S_r : для ОТФ $S_{r(ТФ)} = 86$ ВА, а для двух дросселей $S_{r(2д)} = 1000$ ВА.

2. На втором этапе исследование проведено при условии одинакового значения уровня пульсаций выходного напряжения – такого, как в первом варианте ($DU_d = 17,647$ В). Требуемое значение индуктивности в этом случае оказалось равным $L = 0,9$ мГн, суммарная масса $2D_+$ уменьшилась до $G_{2д} = 2,02$ кг, а превосходство ОТФ по массе также значительно снизилось ($G_{2д} = 2,02$ кг против $G_{ТФ} = 1,3$ кг). Однако при этом оказалось, что достигнутый эффект снижения массы дросселей сопровождается увеличением искажений токов в обмотках трансформатора, что в данном примере привело к ухудшению его габаритной мощности на 10% ($S_{r(ТВ)} = 1,138P_{d0}$ против $S_{r(ТВ)} = 1,037P_{d0}$ – см. рис. 2, а). Если принять во внимание удельную массу трансформатора $g \gg 10$ кг/кВт, то несложно убедиться, что полученный результат нельзя признать приемлемым.

3. На третьем этапе с целью улучшения показателя $S_{r(ТВ)}$ во втором варианте ТВУ-12 было проведено компьютерное моделирование с увеличенным значением параметра $L = 3$ мГн. При этом значение габаритной мощности трансформатора оказалось близким к значению первого варианта. Однако суммарная масса двух дросселей при этом возросла в 8,4 раза по сравнению с первым вариантом ТВУ-12 (с ОТФ и $L = 7,5$ мГн): $G_{2д} = 10,88$ кг против $G_{ТФ} = 1,3$ кг.

4. Полученные для второго варианта ТВУ-12 результаты ИКМ на рис. 2, б систематизированы в виде графических зависимостей исследуемых показателей качества $G_{2д}$, $S_{r(ТВ)}$ и DU_d в функции индуктивности сглаживающего дросселя L .

Определение массы дросселя постоянного тока (D_+ при $L = 7,5$ мГн). Поставленная задача решается на основе методики расчета сглаживающих дросселей на заданное превышение температуры [6, 7]. Исходными данными являются значения индуктивности $L = 7,5$ мГн и тока подмагничивания $I_0 = 25,51$ А.

Алгоритм расчета массы дросселя [6, 7].

1. При заданных значениях параметров L и I_0 определяем

$$LI_0^2 = 4,88 \text{ Гн}\cdot\text{А}^2. \quad (1)$$

2. По рекомендуемой в [6, 7] зависимости активного объема стали магнитопровода $V_{\text{ст.акт}}$ от значения LI_0^2 определяем $V_{\text{ст.акт}} = 1000 \text{ см}^3$.

3. Из табл. П2-1 в [7] выбираем предварительно магнитопровод ШЛ40'80, у которого

$$V_{\text{ст.акт}} = V_{\text{ст.табл}} k_{\text{ст}} = 1095 \cdot 0,91 = 997 \text{ см}^3.$$

4. Введем вспомогательную величину M – удельную электромагнитную нагрузку сердечника,

т.е. значение электромагнитной энергии на единицу объема стали:

$$M = \frac{LI_0^2}{V_{\text{ст.акт}}} = \frac{4,88}{997} = 4,985 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}\cdot\text{А}^2/\text{см}^3. \quad (2)$$

5. По найденному значению M , пользуясь графиками [6, 7], определяем относительные значения эффективной магнитной проницаемости $\mu_{\text{эфф}} = 90 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}/\text{см}$ и длины воздушного зазора $l_3 = 1,17\%$.

6. Плотность тока в обмотке дросселя согласно [6, 7] зависит от типоразмера его магнитопровода $V_{\text{ст.акт}}$; для данного случая $j = 1,65 \text{ А}/\text{мм}^2$.

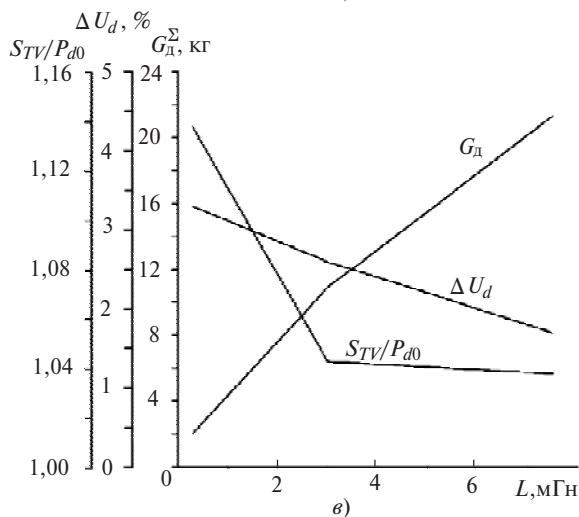
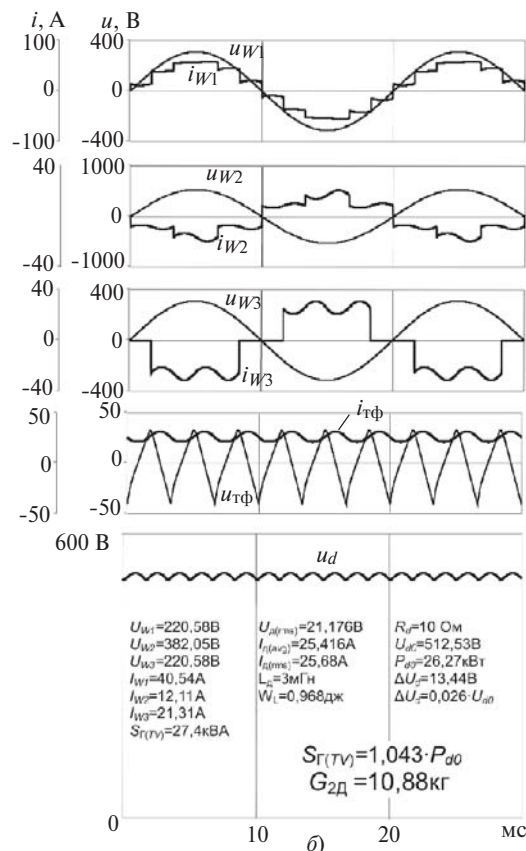
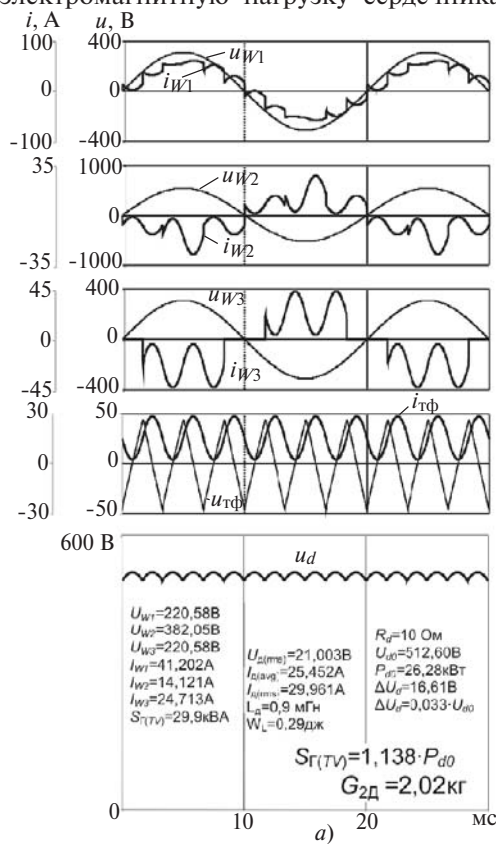


Рис. 2. Результаты исследования ТВУ-12 со сглаживающими индуктивностями L в каналах при двух её значениях: осциллограммы, поясняющие рабочие процессы при $L=0,9 \text{ мГн}$ (а) и $L=3 \text{ мГн}$ (б); е – зависимость относительного значения габаритной мощности $TV - S_{ТВ}/P_{d0}$, уровня пульсаций выходного напряжения ΔU_d и массы двух дросселей $G_{2д}$ от значений индуктивности L

7. Определяем базовый линейный размер магнитопровода дросселя:

$$a_6 = \sqrt[5]{\frac{2k_T}{(mn)^2 l} \frac{LI_0^2}{1,26m_{\text{эфф}}(jk_{0k})^2 k_{\text{ст}}}} = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 4,5}{(2,5 \cdot 1)^2 (1,26 \cdot 90 \cdot 10^{-8}) \cdot (1,65 \cdot 10^2 \cdot 0,33)^2 \cdot 0,91}} = 3,868, 4,444 \text{ см}, \quad (3)$$

где m, n, l – оптимальные геометрические соотношения дросселя, однозначно задаются отношениями высоты окна h , ширины окна c и ширины ленты b к ширине среднего ядра a магнитопровода: $m = \frac{h}{b} = \frac{10}{4} = 2,5$; $l = \frac{b}{a} = \frac{4,8}{4} = 1,2$; $n = \frac{c}{a} = \frac{4}{4} = 1$, коэффициент k_T для бронзового типа магнитопровода равен 4,5; j – в А/см².

8. Окончательно выбираем типоразмер магнитопровода ШЛ40'80, у которого $V_{\text{ст.акт}} = 997 \text{ см}^3$, сечение окна магнитопровода $S_{\text{ок}} = hc = 40 \text{ см}$, средняя длина магнитной силовой линии $l_{\text{ст}} = 4,2 \text{ см}$, активная площадь сечения магнитопровода $V_{\text{ст.акт}} = V_{\text{ст.табл}} k_{\text{ст}} = 29,12 \text{ см}^2$, масса стали магнитопровода $G_{\text{ст}} = 7,54 \text{ кг}$.

9. Определяем суммарный немагнитный зазор в магнитопроводе и толщину немагнитной прокладки:

$$l_{3,\text{опт}} = \frac{l_3}{100} l_{\text{ст}} = 0,4 \text{ см}; \quad (4)$$

$$D_3 = \frac{l_{3,\text{опт}}}{2} = 0,2 \text{ см}. \quad (5)$$

10. Число витков обмотки дросселя

$$W = \sqrt{\frac{LI_{\text{ст}}}{1,26m_{\text{эфф}} S_{\text{ст.акт}}}} = \sqrt{\frac{7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 34,2}{1,26 \cdot 90 \cdot 10^{-8} \cdot 29,12}} = 88, \quad (6)$$

где L [Гн], $l_{\text{ст}}$ [см], $S_{\text{ст.акт}}$ [см²].

11. Сечение провода

$$S_w = \frac{I_0}{j} = \frac{25,51}{1,65} = 15,45 \text{ мм}^2. \quad (7)$$

12. Из табл. П1-1 в [7] выбираем ближайшее расчетное сечение провода $S_{w1} = 15,90 \text{ мм}^2$ (с номинальным диаметром $d_{\text{ном}} = 4,5 \text{ мм}$ и наибольшим наружным диаметром $d_{\text{из}} = 4,88 \text{ мм}$) и уточняем окончательное значение плотности тока:

$$j = \frac{I_0}{S_{w1}} = \frac{25,51}{15,9} = 1,6 \text{ А/мм}^2. \quad (8)$$

13. Находим число витков в одном слое обмотки:

$$W_c = \frac{h - 2Dk}{k_{y1} d_{\text{из}}} = \frac{100 - 2 \cdot 4,5}{1,13 \cdot 4,88} = 17, \quad (9)$$

где k_{y1} – коэффициент укладки провода в осевом направлении, определяемый в зависимости от диаметра провода $d_{\text{из}}$ по рекомендуемой кривой.

14. Число слоев обмотки

$$N = \frac{W}{W_c} = \frac{88}{17} = 5. \quad (10)$$

15. Средняя длина витка обмотки

$$l_{\text{ср.в}} = \frac{e}{e} 2(a + b + 2Dk) + 2 \rho_c \frac{\pi N d_{\text{из}} D_{\text{из}}}{2} \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}} = \frac{e}{e} 2(4 + 8 + 2 \cdot 4,5) + 2 \rho_c \frac{\pi \cdot 5 \cdot 0,488 \cdot 0,024}{2} \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}} = 24,78 \text{ см}, \quad (11)$$

где Dk – толщина каркаса ($Dk = 1,5 \text{ мм}$); $D_{\text{из}}$ – толщина междуслойной изоляции.

16. Масса обмотки

$$G_M = l_{\text{ср}} W g_M \cdot 10^{-3} = 0,2478 \cdot 88 \cdot 142 \cdot 10^{-3} = 3,1 \text{ кг}, \quad (12)$$

где g_M [г] – масса 1 м провода (по табл. П1-1 в [4]); $l_{\text{ср}}$ [м].

17. Суммарная масса активных материалов сглаживающего дросселя

$$G_L = G_{\text{ст}} + G_M = 7,54 + 3,1 = 10,64 \text{ кг}. \quad (13)$$

18. Суммарная масса двух дросселей

$$G_L^S = 2G_L = 21,28. \quad (14)$$

19. Проверим значение индуктивности при вычисленных значениях параметров дросселя и зазора, используя для этого известную модель (15), и сравним с исходным её значением:

$$L = \frac{0,4 \rho W^2 S_{\text{ст}} k_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}} \frac{1}{m_d} + \frac{l_{3,\text{опт}}}{l_{\text{ст}}} \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}}}, \quad (15)$$

где m_d – динамическая магнитная проницаемость материала сердечника, равная $9 \cdot 10^4$ Гн/см; подставив это значение в (15), получим

$$L = 7,457 \cdot 10^{-3} \text{ мГн}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что полученный результат практически совпадает с заданным значением индуктивности $L = 7,5 \text{ мГн}$, что свидетельствует о корректности выполненного расчета.

Аналогично рассчитываются массы дросселей при $L = 0,9$ и 3 мГн .

Определение габаритной мощности ОТФ. В расчетном плане и по физическим особенностям работы однофазный трансфильтр (ОТФ) можно представить как двухобмоточный трансформатор с одинаковым числом витков, т.е. с коэффициентом трансформации, равным единице. Для оценки суммарной габаритной мощности TU и ОТФ необходимо привести габаритную мощность ОТФ, работающего на повышенной частоте (здесь $f_{отф} = 6f_1$ – см. рис. 1, а и в), к габаритной мощности TU , работающего при синусоидальном напряжении на частоте $f_1 = 50$ Гц. Для этого действующее значение напряжения $U_{тф.д}$ необходимо разделить на коэффициент приведения по частоте и по форме:

$$K_{п(f, \phi)} = K_{п(f)} K_{п(\phi)} = \frac{f_{тф}}{f_1} \frac{k_{\phi(u_{тф})}}{k_{\phi(u_1)}} = \frac{6f_1}{f_1} \cdot \frac{1,1534}{1,11} = 6,2346, \quad (17)$$

где $K_{п(f)}$ – коэффициент приведения по частоте; $K_{п(\phi)}$ – коэффициент приведения по форме; $f_{отф}$ – рабочая частота напряжения на обмотке ТФ; f_1 – частота напряжения сети; $k_{\phi(u_{тф})}$, $k_{\phi(u_1)}$ – коэффициенты формы напряжения на обмотке ТФ и сетевого напряжения с синусоидальной формой ($k_{\phi(u_1)} = 1,11$) соответственно. Параметр

$$k_{\phi(u_{тф})} = \frac{U_{тф.д}}{U_{тф.ср}} = \frac{20,996}{18,204} = 1,1534, \quad (18)$$

где $U_{тф.д}$, $U_{тф.ср}$ – действующее и среднее значения напряжения на обмотке трансфильтра.

Приведенная габаритная мощность ОТФ:

$$S_{г.тф} = \frac{1}{K_{п(f, \phi)}} U_{тф.д} I_{тф.д} = \frac{1}{6,2346} 20,996 \times 25,59 = 86,18 \text{ ВА}. \quad (19)$$

Заметим, что приведение габаритной мощности ТФ к габаритной мощности TU целесообразно не только для оценки суммарного их значения (для TU и ТФ), важного при сопоставлении альтернативных вариантов СП (ТВУ в данном случае), но и удобно при проектировании, поскольку дает возможность значительно упростить расчет ОТФ, используя информацию о стандартном ряде магнитопроводов для частоты 50 и 400 Гц, которая приведена, например, в [6, 7].

Определение массы трансфильтра ОТФ. 1. Зная из (19) габаритную мощность ОТФ и используя табл. П2-2 в [7], выбираем предварительно типоразмер магнитопровода ШЛ20'40, у которого $V_{ст.акт} = 137 \text{ см}^3$, $S_{ок} = hc = 10 \text{ см}$, $l_{ст} = 17,1 \text{ см}$,

$S_{ст.акт} = S_{ст.табл} k_{ст} = 7,28 \text{ см}^2$, масса стали магнитопровода $G_{ст} = 0,94 \text{ кг}$.

2. Находим число витков обмотки ТФ:

$$W_1 = W_2 = \frac{U_{тф}}{4,44 f_{тф} B_m S_{ст.акт}} = 22. \quad (20)$$

3. Сечение провода

$$S_W = \frac{I_{тф}}{j} = 7,31 \text{ мм}^2. \quad (21)$$

4. Из табл. П1-1 в [7] выбираем сечение провода:

$$S_{W1} = 7,306 \text{ мм}^2 \quad (d_{ном} = 3,05 \text{ мм}, d_{из} = 3,42 \text{ мм}).$$

5. Число витков в одном слое

$$W_c = \frac{h - 2Dk}{k_{y1} d_{из}} = 12. \quad (22)$$

6. Число слоев обмоток

$$N = \frac{W}{W_c} = 4. \quad (23)$$

7. Средняя длина витка обмотки

$$l_{ср.в} = \frac{\pi}{2} (2(a + b + 2Dk) + 2Dk) + 2 \frac{\pi N d_{из}}{2} \frac{D_{из}}{2} = 12,7 \text{ см}, \quad (24)$$

где Dk – толщина каркаса ($Dk = 1,5 \text{ мм}$); $D_{из}$ – толщина междуслойной изоляции.

8. Масса обмотки

$$G_M = l_{ср} W g_M \times 10^{-3} = 0,363 \text{ кг}, \quad (25)$$

где g_M [г] – масса 1 м провода (по табл. П1-1 в [1]).

9. Суммарная масса активных материалов ТФ

$$G_{тф} = G_{ст} + G_M = 0,94 + 0,363 = 1,3 \text{ кг}. \quad (26)$$

Вывод. Сопоставительное исследование эффективности использования в структуре ТВУ-12 ($P_{d0} \gg 26 \text{ кВт}$, $U_{d0} = 512 \text{ В}$) с двухканальным преобразованием энергетического потока двух альтернативных вариантов суммирования токов каналов с применением однофазного трансфильтра (ОТФ) или двух сглаживающих дросселей ($2D_{=}$) показало, что при одинаковом в ТВУ-12 уровне пульсаций выпрямленного напряжения (тока) и примерно равной габаритной мощности трансформатора масса двух сглаживающих дросселей ($2D_{=}$) оказалась больше массы ОТФ в 8,4 раза. Качественно аналогичный результат следует ожидать и в статических преобразователях других классов. Для суммирования токов каналов целесообразно применять не сглаживающие дроссели, а трансфильтр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мыщк Г.С., Михеев В.В.** Многоканальное преобразование — эффективная концепция синтеза малоискажающих устройств силовой электроники. — Сб. статей кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» Московского энергетического института — М.: Изд-во МЭИ, 2001, с. 58–73.

2. **Михеев В.В., Мыщк Г.С., Зуева Е.В.** Многофункциональные инверторы с многофазной широтно-импульсной модуляцией. — *Электричество*, 1992, № 7, с. 23–31.

3. **Патент РФ** № 81011, H02K 21/12. Система генерирования постоянного тока/ С.Ф. Коняхин, Г.С. Мыщк. — Бюллетень изобретений, 2009, № 8.

4. **Мыщк Г.С., Хлаинг Мин У.** Имитационное компьютерное моделирование как средство проектирования и решения изобретательских задач. — Труды Международной научно-методической конф. «Информатизация инженерного образования («Инфорино-14»), 2014, с. 443–446.

5. **Моин В.С.** Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986, 376 с.

6. **Китаев В.Е.** Проектирование источников электропитания устройств связи: Учебное пос., изд. 2-е. — М.: Связь, 1972, 200 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 7, pp. 37–44.

About the Effectiveness of Using Transfilters and Smoothing Chokes in the Structures of Converters Involving Multichannel Conversion

KHLAING MIN U and G. S. MYTSYK

In the structures of static converters involving multichannel power flow conversion, the currents of channels can be added using either transfilters (TFs) or smoothing chokes. The article is devoted to comparison of these two alternatives in terms of their combined mass and dimension indicator taking into account its influence on the performance characteristics of the entire converter. A transforming and rectifying device involving two-channel conversion of power flow with the DC voltage rectified according to a 12-pulse arrangement (TVU-12) is considered as the static converter. The formulated problem is solved using computer simulation and the well-known procedures for calculating the weight of transformers, transfilters, and smoothing chokes. It is shown that with the same conditions in regard of specified quality indicators, the version involving the use of transfilters is unambiguously and solidly superior to the other ones. This conclusion is valid to all classes of static converters with multichannel conversion of power flow.

Key words: static converter, transforming and rectifying device, multichannel conversion, adding of channel currents, transfilters, smoothing chokes, comparison of versions

REFERENCES

1. **Mytsyk G.S., Mikhayev V.V.** *Sbornik statei k 60-letiyu kafedry «Elektrotekhnicheskiye komplekсы avtonomnykh ob'ektov» Moskovskogo energeticheskogo instituta — in Russ.* (Collection of articles on the 60th anniversary of the department «Electrical systems of autonomous objects» of Moscow Power Engineering Institute (MPEI). Moscow, Publ. of the MPEI, 2011, pp. 58–73.

2. **Mikhayev V.V., Mytsyk G.S., Zuyeva E.V.** *Elektrichestvo — in Russ.* (Electricity), 1992, No. 7, pp. 23–31.

3. **Patent RF** No. 81011. *Sistema generirovaniya postoyannogo toka* (DC generation system)/S.F. Konyakhin, G.S. Mytsyk. Bulletin of invention, 2009, No. 8.

7. **Белопольский И.И.** Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности, изд. 2-е. — М.: Энергия, 1973, 400 с.

[22.01.15]

Авторы: Мыщк Геннадий Сергеевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1964 г. Защитил в МЭИ в 2001 г. докторскую диссертацию «Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Хлаинг Мин У (Союз Мьянма) защитил в МЭИ в 2009 г. кандидатскую диссертацию «Исследование эффективности использования промежуточного высокочастотного преобразования при построении статических преобразователей и систем на их основе». Докторант кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

4. **Mytsyk G.S., Khlaing Min U.** *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konf. «Informatizatsiya inzhenerno obrazovaniya»* (Proc. of the Intern. Scientific and methodical conf. «Informatization of Engineering Education», 2014, pp. 443–446.

5. **Moин V.S.** *Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli* (Stabilized transistor converters). Moscow, Publ. «Energoatomizdat», 376 p.

6. **Kitayev V.E.** *Proektirovaniye istochnikov elektropitaniya ustroystv svyazi* (Designing power supplies communication devices). Moscow, Publ. «Energoatomizdat», 376 p.

7. **Belopol'skii I.I.** *Raschet transformatorov i drosslei maloi moshchnosti, izd. 2* (Calculation of transformers and chokes low power, 2d publ.). Moscow, Publ. «Energiya», 1973, 400 p.

Authors: Mytsyk Gennadii Sergeyevich (Moscow, Russia) — Dr. Sci. (Eng.), Professor from the «Electrical complexes of autonomous objects» Department, Moscow Power Engineering Institute (MPEI).

Khlaing Min U. (Union M'yanma) — Cand. Sci. (Eng.), MPEI.

