

Особенности физических процессов в трансформаторно-выпрямительных устройствах с многоканальным преобразующим трактом

МЫЦЫК Г.С., СИЗЯКИН А.В., СО НЕ НЕ ХЕЙН, ТИН АУНГ ЗО

Рассматриваются новые решения трансформаторно-выпрямительных устройств (ТВУ-М) двух типов, которые реализуют ресурсосберегающий принцип многоканального преобразования энергетического потока. Повышение уровня преобразуемой мощности при одновременном улучшении показателей электромагнитной и электроэнергетической эффективности достигается увеличением числа каналов M преобразования. Рассматривается только класс ТВУ-М с суммированием токов каналов. Традиционные (современные) их решения в определённых применениях не обеспечивают равномерного распределения токов между каналами. Идея синтеза новых решений ТВУ-М заключается в принудительном выравнивании токов в M каналах одним из двух способов: применением трансформаторов тока в одноимённых по фазе каналах (при использовании одного общего трансформатора напряжения); последовательным пофазным соединением первичных обмоток M трансформаторов (при использовании M трансформаторов в M раз меньшей мощности). В обоих случаях M выпрямительных мостов соединяют параллельно. Новые ТВУ-М характеризуются нетрадиционными (сложными) физическими процессами, что, во-первых, затрудняет формирование модельного их описания и процедуру проектирования на этой основе, а во-вторых, делает невозможной сопоставительную оценку альтернативных вариантов с целью обоснованного выбора наиболее рационального решения в конкретном случае их применения. Цель работы — решение (в первой версии — при принятых допущениях) выше сформулированных задач. В качестве средства решения используется имитационное компьютерное моделирование. Полученные результаты позволили создать в минимально необходимом для проектирования объёме информационно-методическое обеспечение для выполнения этой процедуры. Результаты представлены в виде осциллограмм рабочих процессов, таблиц и моделей взаимосвязи постоянной составляющей выпрямленного напряжения с сетевым напряжением.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трёхфазный трансформатор напряжения, трансформатор тока, трёхфазный выпрямительный мост, M -канальное преобразование тока, принудительное распределение тока между каналами, имитационное компьютерное моделирование, информационно-методическое обеспечение проектирования

Трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ) широко используются для преобразования (чаще всего) трёхфазного напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока при одновременном согласовании уровней входного и выходного напряжений. С ростом преобразуемой мощности схемы ТВУ соответствующим образом усложняются. В [1] рассмотрена серия решений, в которых реализуется (сформулированный позже в [2]) принцип многоканального преобразования (МКП) энергетического потока (ЭП). В соответствии с ним ЭП разбивают на M частей (каналов) одинаковой мощности, полученные разбиением части подвергают преобразованию со сдвигом между собой последовательно по фазе (на частоте сетевого напряжения) на угол $\delta = \frac{\pi}{3M}$. Затем M частей ЭП суммируют в выходной цепи по схемам суммирования напряжений (т.е. выходы L каналов соеди-

няют последовательно) или токов (выходы каналов соединяют параллельно с помощью уравнивательных реакторов [1], обозначаемых также трансфильтрами — ТФ [3]). Заметим, что физике работы ТФ и вопросам их проектирования [3] в известных публикациях уделено недостаточно внимания. Варианты ТВУ с МКП без ТФ и с ТФ в дальнейшем будем обозначать как ТВУ-М при суммировании его M напряжений и как ТВУ-М+ТФ — при суммировании его M токов. В статье рассматриваются только предложенные в последнее время решения, реализующие принцип МКП и относящиеся к классу ТВУ-М с суммированием токов, причём как с ТФ, так и без них.

Общая характеристика ТВУ-М. Увеличение числа каналов M характеризуется улучшением электромагнитной (ЭМС) и электроэнергетической совместимости (ЭЭС) ТВУ-М как по их выходу,

так и по входу. Число пульсаций $m_{1\varnothing}$ выпрямленного напряжения $u_d(t)$ (его пульсность) связано с числом фаз сети m_1 :

$$m_{1\varnothing} = 2m_1M. \quad (1)$$

С ростом параметра $m_{1\varnothing}$ уровень пульсаций ΔU_d понижается (при увеличении в M раз их частоты), одновременно при этом снижаются искажения потребляемого ТВУ- M тока, а содержание постоянной составляющей напряжения U_{d0} возрастает.

Таблица 1

Показатели	$m_1=2$	3	3	3	3
	$M=2$	1	2	3	6
$m_{1\varnothing} = 2m_1M$	4	6	12	18	36
$U_{d0}^* = U_{d0} / U_{dm}$	0,9003	0,9549	0,9886	0,9949	0,9987
$K_{r(i)}$	0,5	0,31	0,15	0,10	0,052
$\Delta U_d^*, \%$	32,55	14,03	1,153	0,513	0,381

Показатели качества ТВУ- M для $m_1=2$ и 3 при различных значениях M приведены в табл. 1.

Приняты обозначения: U_{d0} , U_{dm} – постоянная составляющая и максимальное значение выпрямленного напряжения; ΔU_d^* – относительное значение пульсаций напряжения $u_d(t)$;

$$\Delta U_d^* = [(U_{dm} - U_{d\min}) / U_{d0}] \cdot 100\%; \quad (1)$$

$K_{r(i)}$ – коэффициент гармоник потребляемого ТВУ- M тока. Этот ток имеет форму сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) и равно-временными интервалами квантования (РВИК), причём уровни ступеней соответствуют условию оптимизации сигнала по минимуму его коэффициента гармоник $K_{r(j)}$ [11]. В [2] показано, что для $m_1=3$ с точностью не менее 2% этот параметр через число каналов M определяется следующей простой моделью:

$$K_{r(I)} = 0,31 / M. \quad (2)$$

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что наибольший скачок в улучшении показателей качества достигается при переходе от одноканального варианта ТВУ к двухканальному, что в настоящее время получило пока наибольшее распространение. Необходимо отметить, что независимо от структуры выходной цепи ТВУ- M при одних и тех же условиях по параметрам m_1 и M приведенные показатели остаются одними и теми же. Однако форма токов во вторичных обмотках при этом в зависимости от структуры этой цепи может быть разной. При этом чем больше искажения тока в этих обмотках трансформатора, тем хуже они используются по току и тем больше оказывается габаритная мощность трансформатора.

Об одном способе улучшения свойств ТВУ- M +ТФ.

Повышение пульсности выпрямленного напряжения достигается увеличением числа фаз (фазности) сетевого напряжения. Решается этот вопрос использованием дополнительных вторичных обмоток трансформатора и формированием с их помощью дополнительных трёхфазных систем напряжений, сдвинутых по фазе относительно сетевого напряжения на угол $\delta = \pi / 3M$. Практически эта задача решается применением в общей сложности четырёх топологий соединения обмоток разных фаз: звезда, треугольник, прямой зигзаг, обратный зигзаг [1]. При одновременном использовании первых двух топологий обмоток или одной из первых двух с одной или двумя последними топологиями приходится выполнять обмотки с разными значениями чисел витков, различающимися между собой иррациональным значением числа (например, в $\sqrt{3} = 1,732... \text{ раз}$). При относительно высокой частоте, например 400Гц, и пониженном значении выходного напряжения ТВУ- M (примерно 30 В) число витков вторичных обмоток оказывается малым, так что теоретически заданное соотношение между ними выполнить не удаётся. В результате в ТВУ- M возникает значительная разбалансировка значений токов в каналах, приводящая к превышению температуры одного канала и ухудшению качества напряжения $u_d(t)$ [3]. Используемый при этом в выходной цепи ТФ не может устранить этот недостаток [5].

Применительно к ТВУ-2 в [4] было предложено решение, выравнивающее значения токов в каналах за счёт введения в одноимённые по фазе обмотки каналов двухобмоточного трансформатора тока ($TT_A \div TT_C$), как показано на рис. 1. Это решение кардинально видоизменило физику работы ТВУ-2+3ТТ. Причём первый положительный признак – улучшение формы тока (т.е. уменьшение его искажений) во всех обмотках трансформатора – свидетельствует о том, что габаритная мощность его трансформатора $P_{TV(r)}$ должна уменьшиться. Результаты ИКМ, представленные в табл. 2, подтвердили этот вывод: она уменьшилась с 1,037 до 1,020 (см. вторую и третью строки). В первой строке приведены показатели самого простого варианта ТВУ-2 при параллельном включении мостов без ТФ. Габаритная мощность трансформатора при этом больше, чем при использовании двух более совершенных вариантов (с ТФ и 3ТТ). Показатель $\Delta[\%]$ характеризует точность полученных результатов ИКМ относительно известных из [3].

Примечание: при моделировании в среде OrCAD PSpice Schematics требуется задание значений индуктивностей обмоток. В качестве исходного значения индуктивности первичной обмотки определялась по току холостого хода I_V из условия равенства его

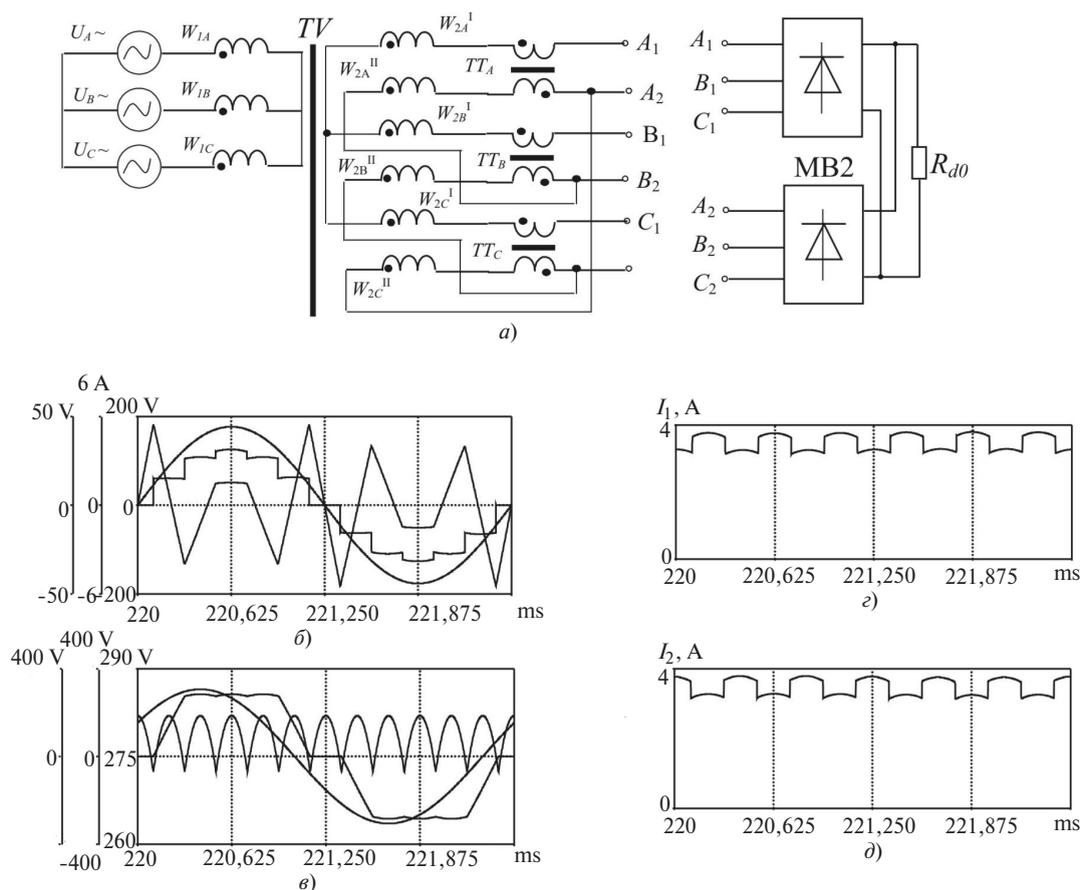


Рис. 1. ТВУ-2+3ТТ (с параметрами $U_A=125$ В; $f=400$ Гц; $U_{d0} \approx 280$ В): а — схема; типовые осциллограммы процессов; б — $u_{W_{TTA}I}$; $i_{W_{TTA}I}$; $u_{W_{2A}I}$ — напряжение на обмотке $W_{TTA}I$ ТТ_А (в виде фрагментов треугольной и трапецидальной формы) и её ток, а также фазное напряжение на обмотке $W_{2A}I$ 1-го канала ТВ; в — два линейных напряжения до и после ТТ_А (в одном канале) и выпрямленное напряжение $u_d(t)$; г, д — токи на выходе 1-го и 2-го мостов

сначала 5 % номинального тока, а затем 2,5%. На результаты это не повлияло. На первом этапе ИКМ проведено для идеального ТВ без учёта индуктивности рассеяния его обмоток.

Сравнение габаритной мощности ТВУ-12 с параметрами $U_1=125$; $f_2=400$ Гц; $P_{d0}=2,1$ кВт;

$U_{d0}=280$ В в двух вариантах: с $I_{xx} = 5\%I_n(I)$ и $I_{xx} = 2,5\%I_n(II)$ показано в табл. 2.

Новый класс ТВУ-М(II). Разработан новый класс ТВУ-М(II), который характеризуется использованием не одного, а М трансформаторов при том же числе выпрямительных мостов (ВМ) [4–7]. Структурная особенность этих решений заключает-

Таблица 2

Варианты	Методы		$\frac{P_{\Gamma(TV)}}{P_{d0}}$		$\frac{P_{\Gamma(TT)}}{P_{d0}}$		$\frac{P_{\Gamma(TV+3TT)}}{P_{d0}}$	
				$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$
ТВУ-12	По [3]		1,26300	—	—	—	1,26300	—
	ИКМ	I	1,22877	-2,710	—	—	1,22877	-2,710
		II	1,22891	-2,699	—	—	1,22891	-2,699
ТВУ-12+ТФ	По [3]		1,03030	—	0,00324	—	1,03354	—
	ИКМ	I	1,03734	+0,683	0,00329	1,543	1,04063	+0,686
		II	1,03717	+0,667	0,00329	1,543	1,04046	+0,669
ТВУ-12+3ТТ	По [3]		1,00452	—	0,01752	—	1,02204	—
	ИКМ	I	1,02026	+1,567	0,01481	1,546	1,03507	+1,275
		II	1,02009	+1,549	0,01477	1,569	1,03486	+1,254

ся в том, что каждый из M каналов выполняется в виде последовательно соединённых трансформатора и ВМ. При этом первичные (или вторичные) обмотки M трансформаторов выполняются с одинаковой топологией, а вторичные (или первичные) — с разной, которая должна обеспечить фазовый сдвиг между фазными напряжениями каналов на угол $\delta = \pi/3M$. Одинаковую топологию, например вторичных обмоток, целесообразно использовать в тех случаях, когда они работают при меньшем значении напряжения, чем на входе ТВУ- $M(\Pi)$. Таким образом удаётся значительно снизить возможные отрицательные издержки (в худшем случае они крайне малы — примерно 1%), которые связаны с иррациональным значением числа соответствующих коэффициентов трансформации. Первичные обмотки M трансформаторов при этом соединяются пофазно последовательно и подключаются к сети, а выходы ВМ между собой соединяются параллельно. В качестве примера рассматриваются два варианта: ТВУ-2(П) — рис. 2 и ТВУ-3(П) — рис. 4. Модельное описание рабочих процессов (в

традиционном аналитическом виде), необходимое при проектировании ТВУ- $M(\Pi)$, сегодня отсутствует по причине чрезвычайной сложности, поэтому данная задача решается здесь на основе использования ИКМ.

Основной отличительный признак всех вариантов ТВУ- M (при одном и том же значении параметра M) заключается в одинаковой форме потребляемого из сети тока (а также и во всех обмотках трансформаторов) — он имеет форму сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) с РВИК [11], при этом число интервалов квантования тока a [11] на его периоде равно пульсности $m_{1\varnothing}$ выпрямленного напряжения ($a = m_{1\varnothing}$).

Результаты определения на основе ИКМ необходимых для проектирования параметров ТВУ-2(П) по схеме на рис. 2 при фазном напряжении сети $U_{1j(c)} = 220$ В (действующее значение) представлены в табл. 3.

Принятые обозначения: $j = A, B, C$ — фазовый индекс, $U_{1j(1)m}, I_{1(1)jd}$ — амплитудное значение 1-й гармоники фазного напряжения на первичной об-

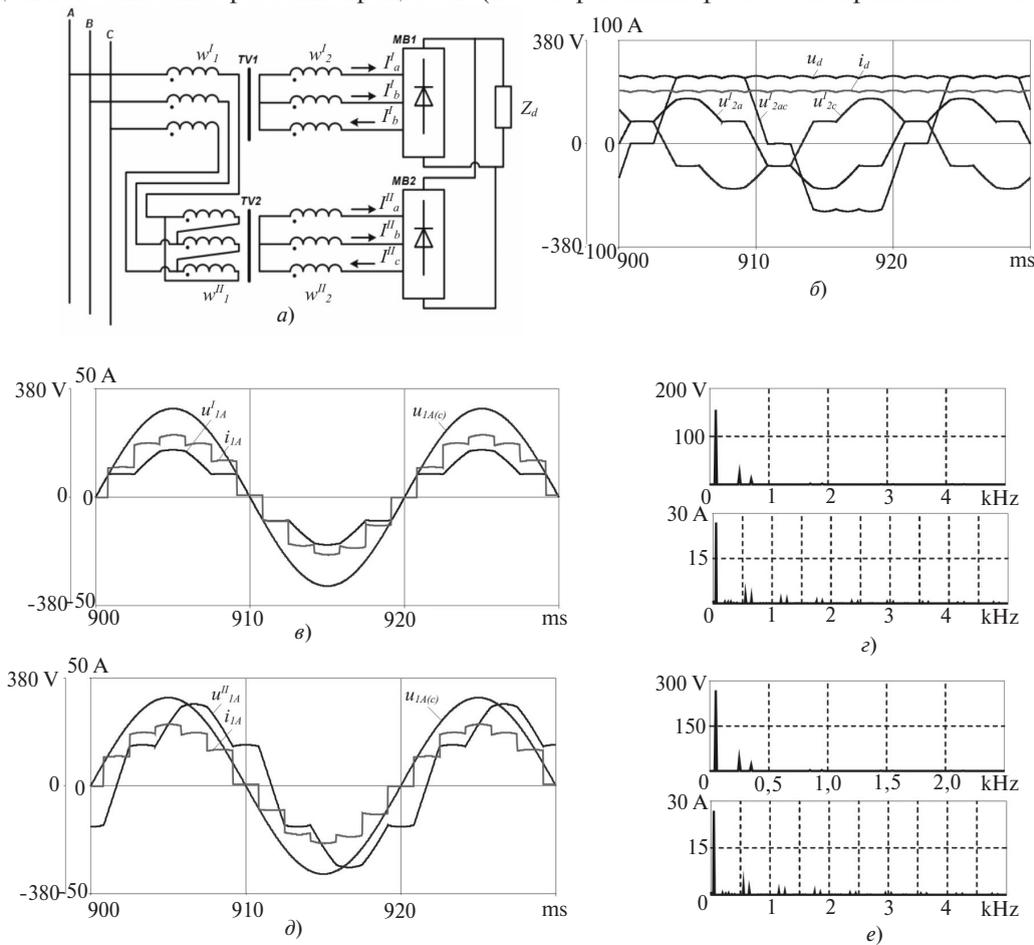


Рис. 2. Трехфазное ТВУ-2(П) с пульсностью выпрямленного напряжения $m_{1\varnothing} = 12$: а — принципиальная электрическая схема; осциллограммы основных процессов в нём; б — два фазных напряжения u_{2a}^I, u_{2b}^I на входе моста МВ1 и линейное напряжение $u_{2ab}^I = u_{2a}^I - u_{2b}^I$, а также напряжение u_d и ток i_d на его выходе; в, д — сетевое фазное напряжение u_{1A}^I и потребляемый фазный ток i_{1A}^I , а также фазные напряжения на первичных обмотках 1-го и 2-го трансформаторов u_{1A}^I и u_{1A}^{II} ; з, е — спектрограммы напряжений и токов на первичных обмотках 1-го и 2-го трансформаторов

Таблица 3

Параметры	W_{1A}^I	W_{1B}^I	W_{1C}^I	W_{2a}^I	W_{2b}^I	W_{2c}^I	Нагрузка
$U_{1j(1)m}$, В	155,576	155,575	155,576	155,036	155,036	155,036	–
$I_{1(1)jd}$, А	19,085	19,071	19,071	19,078	19,064	19,064	–
U_{1jcp} , В	102,725	102,725	102,725	102,555	102,555	102,555	–
U_{1jd} , В	111,490	111,499	111,499	111,123	111,123	111,123	–
U_{1jmax} , В	166,670	166,685	166,686	166,124	166,130	166,131	–
$U_{1jполка}$, В	-83,350	-83,338	-83,338	-83,068	-83,068	-83,068	–
U_{1jmin} , В	-166,672	-166,684	-166,685	-166,115	-166,135	-166,136	–
I_{1jd} , А	19,292	19,292	19,292	19,289	19,289	19,289	–
S_{1j} , ВА	2150,865	2151,039	2151,039	2143,452	2143,452	2143,452	–
Кф	1,085	1,085	1,085	1,084	1,084	1,084	–
U_{dmax} , В	–	–	–	–	–	–	249,205
U_{dmin} , В	–	–	–	–	–	–	240,762
U_{d0} , В	–	–	–	–	–	–	246,366
I_{d0} , А	–	–	–	–	–	–	50,902
P_{d0} , Вт	–	–	–	–	–	–	12540,5
$2S_{1(3TV)}$, ВА	12883,35 – габаритная мощность двух трансформаторов						
$2P_{1(3TV)(1)}$, Вт	12582,6 – активная мощность, потребляемая ТВУ-2(П) из сети по основной гармонике						
$K_3 = 2S_{1(3TV)}/P_{d0}$	1,0273 – коэффициент эффективности схемы по показателю габаритная мощность						

мотке первого трансформатора (ТВ) и действующее значение 1-й гармоники тока его j -й фазы; U_{1jd} , U_{1jcp} – действующее и среднее значения напряжения j -й фазы первого ТВ; U_{1jmax} , U_{1jmin} , $U_{1jполка}$ – параметры, характеризующие форму фазного напряжения первого ТВ: его максимальное и минимальное значения в 1-й и 2-й полупериоды (при установившемся режиме они равны по модулю), а также уровень промежуточной его «полки»; I_{1jd} – действующее значение фазного тока, потребляемого из сети; $S_{1(3TV)}$ ($2S_{1(3TV)}$) – полная мощность, потребляемая из сети одним трансформатором (и двумя); K_f – коэффициент формы напряжения на обмотках первого трансформатора; U_{dmax} , U_{dmin} , U_{d0} – максимальное и минимальное значения выпрямленного напряжения и его постоянная составляющая; I_{d0} – постоянная составляющая выпрямленного тока; $P_{d0} = U_{d0} I_{d0}$ – выходная мощность ТВУ-2(П) по основной гармонике (нулевой частоты); S_{1j} ($S_{1(3TV)}$) – полная мощность одной фазы ТВ (и трёх его фаз); $S_{1(1)}$ ($S_{1(3TV)(1)}$) – полная (габаритная) мощность одной фазы ТВ (и трёх его фаз) по основной гармонике; $2P_{1(3TV)(1)}$ – активная мощность по основной гармонике, потребляемая ТВУ-2(П) из сети.

При анализе (на первом этапе) с целью получения упрощённого модельного описания процессов в первом канале принято условие $W_{1j} = W_{2j}$, а также используется идеализация рабочих процессов,

которая заключается в принятии следующих допущений: активное сопротивление каждой из обмоток ТВ близко к нулю ($r_W = 0,001$ Ом), их индуктивное сопротивление рассеяния $L_s = 0$, потерями в стали магнитопровода (по сути и в обмотках ТВ) пренебрегаем. С учётом допущений фазовый сдвиг между сетевым напряжением и потребляемым ТВУ-2(П) током как по полным значениям, так и по их основным гармоникам равен нулю, а полная мощность одного ТВ ($S_{1(3TV)}$) равна активной мощности ($P_{1(3TV)}$), т.е. справедливо равенство $S_{1(3TV)} = P_{1(3TV)}$. Такое же равенство имеет место и по основным гармоникам $S_{1(3TV)(1)} = P_{1(3TV)(1)}$. Разница между показателями $S_{1(3TV)}$ и $P_{1(3TV)(1)}$ характеризует мощность искажений.

Определение взаимосвязи между выходным и входным напряжением ТВУ-2(П). Отметим общее функциональное свойство всех типов ТВУ с МКП: преобразуемая мощность должна распределяться равномерно по M каналам, а показатели потребляемого из сети тока и их выходного напряжения должны удовлетворять сформулированным выше признакам МКП. В частности, при выполнении этих условий рабочие процессы в выпрямительных мостах (ВМ) должны быть идентичными. С учётом этого при исследовании можно ограничиться одним, в данном случае первым каналом, который не сложен по структуре и имеет более простое модельное описание.

Первый отличительный признак данной структуры ТВУ-М(П) заключается в том, что при коэффициенте трансформации K_{TV} , равном 1 (в первом канале с одинаковой топологией обмоток $W_{1j}=W_{2j}$), значение постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_{d0} , казалось бы, должно быть меньше максимального значения сетевого линейного напряжения примерно в M раз. Наша задача – определить это точно.

Упрощённый способ решения задачи. При принятии условия $W_{1j}=W_{2j}$ амплитудное значение 1-й гармоники напряжения на этих обмотках одинаково и практически равно:

$$U_{1(1)jm} = U_{1(1)jm} / 2 \approx 110\sqrt{2} = 155,56 \text{ В.}$$

Если предположить далее, что выпрямленное напряжение формируется из фрагментов линейного напряжения (по 1-й гармонике) в области максимального его значения U_{dm} , то искомое его значение должно быть равно:

$$U_{dm} = \sqrt{3} \cdot U_{1(1)jm} = \sqrt{3} \cdot 155,56 \approx 269 \text{ В.}$$

Иной результат даёт ИКМ (см. табл. 3): $U_{dm} = 249,205 \text{ В}$. Поскольку упрощенный способ даёт ошибку 8%, то его нельзя считать приемлемым.

Уточнённый способ решения. Второй отличительный признак ТВУ-М(П) в том, что фазное напряжение на обмотках трансформаторов является искажённым – в нём содержатся практически только 1, 5 и 7-я гармоники с амплитудами $U_{(1)m}$, $U_{(5)m}$ и $U_{(7)m}$, так что результирующее напряжение

$$U_{1a}(\omega t) = U_{1a(1)m} \sin \omega t + U_{1a(5)m} \sin 5\omega t + U_{1a(7)m} \sin 7\omega t. \quad (3)$$

Значения амплитуд этих трёх гармоник получены на основе ИКМ процессов на входе моста первого канала (см. рис. 2,б) и представлены в табл. 4. Графическое представление модели (3) показано на рис. 3. При этом установлено, что 1-я гармоника напряжения на обмотке W_{1j} по амплитуде равна (с точностью 1,3%) половине значения сетевого напряжения.

На основе полученной информации с учетом рис. 2,б найдём взаимосвязь искомой величины U_{dm} с 1-й гармоникой фазного напряжения на входе ВМ₁. Из рис. 2,б следует, что её можно определить как разность двух фазных напряжений $u_{2ac}(\omega t) = u_{2a}(\omega t) - u_{2c}(\omega t)$ в точке $\omega t = \pi/2$ или как сумму двух значений напряжений фазы a в точках $\omega t = \pi/6$ и $\omega t = \pi/2$:

$$U_{1a}\left(\frac{\pi}{6}\right) = U_{1a(1)m} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + U_{1a(5)m} \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) +$$

$$+ U_{1a(7)m} \sin\left(\frac{7\pi}{6}\right) = 0,5U_{1a(1)m} + 0,5U_{1a(5)m} - 0,5U_{1a(7)m}; \quad (4)$$

$$U_{1a}\left(\frac{\pi}{2}\right) = U_{1a(1)m} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + U_{1a(5)m} \sin\left(\frac{5\pi}{2}\right) +$$

$$+ U_{1a(7)m} \sin\left(\frac{7\pi}{2}\right) = U_{1a(1)m} + U_{1a(5)m} - U_{1a(7)m}. \quad (5)$$

С учётом (4), (5)

$$U_{dm} = U_{1a}\left(\frac{\pi}{6}\right) + U_{1a}\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1,5U_{1a(1)m} + 1,5U_{1a(5)m} - 1,5U_{1a(7)m}. \quad (6)$$

В относительной форме (6) приобретает вид:

$$U_{dm}^* = 1,5 + 1,5U_{1a(5)m}^* - 1,5U_{1a(7)m}^*; \quad (7)$$

где $U_{dm}^* = \frac{U_{dm}}{U_{1a(1)m}}$, $U_{1a(5)m}^* = \frac{U_{1a(5)m}}{U_{1a(1)m}}$,

$$U_{1a(7)m}^* = \frac{U_{1a(7)m}}{U_{1a(1)m}}; \quad (7a)$$

для j -й фазы

$$U_{1j(1)m} = \frac{U_{1(c)m}}{M}. \quad (7б)$$

В общем случае при $W_{1j} \neq W_{2j}$ параметр $U_{1j(1)m}$ в (7,а и б) нужно заменить на $U_{2j(1)m} = U_{1j(1)m} / K_{TV}$, где K_{TV} – понижающий коэффициент трансформации.

При принятых допущениях найденная взаимосвязь является инвариантной к частоте и уровню мощности. Взаимосвязь параметра U_{dm} с постоянной составляющей выпрямленного напряжения традиционная:

$$U_{d0} = \frac{m_{1\text{э}}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_{1\text{э}}} U_{dm}.$$

Подставив из табл. 4 значения параметров $U_{1(k)m}^*$ в (7), найдем:

$$U_{dm}^* = 1,5 + 1,5 \cdot 0,1474 - 1,5 \cdot 0,0745 = 1,609; \quad (7в)$$

$$U_{dm} = 155,6 \text{ В} \cdot 1,546 = 250,41 \text{ В.}$$

Результат отличается от более точного значения (249,205 В), полученного на основе ИКМ (см. табл. 3) на 0,5%. Для инженерных расчётов точность вполне достаточная.

При снятии выше упомянутых допущений модель (7) должна быть уточнена с использованием той же методики её получения.

Таблица 4

Параметры	$k=1$	5	7	1	5	7	1	5	7
	W_{1A}^I			W_{1B}^I			W_{1C}^I		
$U_{1(k)m}$, В	155,6	22,94	11,59						
$U_{1(k)m}^*$	1,0	0,1474	0,0745						
$U_{1(k)m}'$				155,5	22,98	11,5			
$U_{1(k)m}^{*}$				1,0	0,1478	0,0739			
$U_{1(k)m}''$							155,5	22,98	11,5
$U_{1(k)m}^{*}$							1,0	0,1478	0,0739

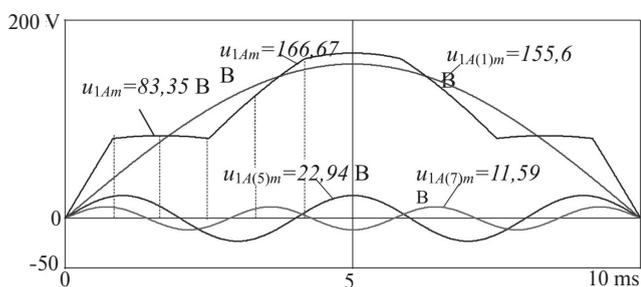


Рис. 3. Синтезированная модель фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора ТВУ-2(П) первого канала (по рис. 2,а) на основе суммирования трёх гармоник с частотами f , $5f$, $7f$, содержание которых получено на основе ИКМ и представлено для трёх фаз в табл. 4

Таким образом, искомая взаимосвязь параметра выпрямленного напряжения U_{dm} с основной гармоникой фазного напряжения сети с достаточной точностью определяется моделью (7).

Сравнение ТВУ-2+ЗТТ и ТВУ-2(П). При сопоставительном анализе используем характерное для ТВУ- M аксиоматическое положение о том, что «чем больше искажения тока в обмотках трансформатора (ТВ), тем больше его габаритная мощность». Эта же аксиома распространяется и на напряжения на обмотках ТВ. С учётом этого следует ожидать, что коэффициент эффективности схемы по рис. 2,а должен быть принципиально несколько хуже, поскольку по сравнению с вариантом схемы по рис. 1,а при равных искажениях токов в обмотках ТВ напряжение на них в варианте по рис. 2,а имеет искажения, характеризуемые $K_{\Gamma(U)} \approx 0,14$. По коэффициенту эффективности K_{Σ} трансформаторного узла решение ТВУ-2(П) немного (на 0,8%) уступает ТВУ-2+ЗТТ, однако с учётом трёх ТТ (в последнем) немного (на 0,7%) его превосходит. При этом дополнительные его преимущества — также в технологической области: во-первых, не требуется изготовления и монтажа трёх ТТ; во-вторых, наряду с этим каждый из двух трансформаторов ТВУ-2(П) из-за меньшего числа обмоток и их выводов в большей степени удовлетворяет также и условию унификации; в-третьих, наличие двух транс-

форматоров половинной мощности вместо одного полной мощности создаёт более благоприятные условия для компоновки узлов при конструировании; наконец, в-четвёртых, решение ТВУ-2(П) целесообразно использовать при более высоких уровнях сетевого напряжения, что открывает более предпочтительные области его применения по сравнению с ТВУ-2+ЗТТ.

Результаты исследования ТВУ-3(П). Увеличение числа каналов $M > 2$ позволяет улучшить показатели ЭМС и ЭЭС, однако достигается это при топологии обмоток «прямой» и «обратный зигзаг», что несколько ухудшает их использование как и коэффициент эффективности схемы. Количественное определение этого ухудшения — одна из целей исследования. Другая цель заключается в синтезе модели параметрической взаимосвязи, аналогичной (7). Методика решения этой задачи такая же, как в предыдущем случае.

На рис. 4 и в табл. 5 представлены результаты ИКМ ТВУ-3(П) с выходной мощностью $P_{d0} \approx 8400$ Вт при сетевом фазном напряжении (синусоидальной формы) $U_{1j} = 125$ В частотой 400 Гц. Из анализа спектрограмм напряжений на первичных обмотках трансформаторов следует, что при разных формах этих напряжений их спектральные составы одинаковы — в них также содержатся практически только 1, 5 и 7-я гармоники. Поэтому отличие спектров напряжений 1-го и 3-го каналов относительно спектра 2-го канала заключается лишь в фазовом сдвиге на угол δ в 1-ом канале в сторону отставания, а в 3-м канале — в сторону опережения 1, 5 и 7-й гармоник. С учётом идентичности рабочих процессов в $MВ_1 \div MВ_3$ и с целью упрощения искомую модель целесообразно синтезировать на основе анализа процессов в $MВ_2$, где в модельном описании они более простые. При этом напряжение на обмотке W_{2a}^{II} имеет вид:

$$W_{2a}^{II}(\omega t) = U_{2a(1)m}^{II} \sin \omega t + U_{2a(5)m}^{II} \sin 5\omega t + U_{2a(7)m}^{II} \sin 7\omega t.$$

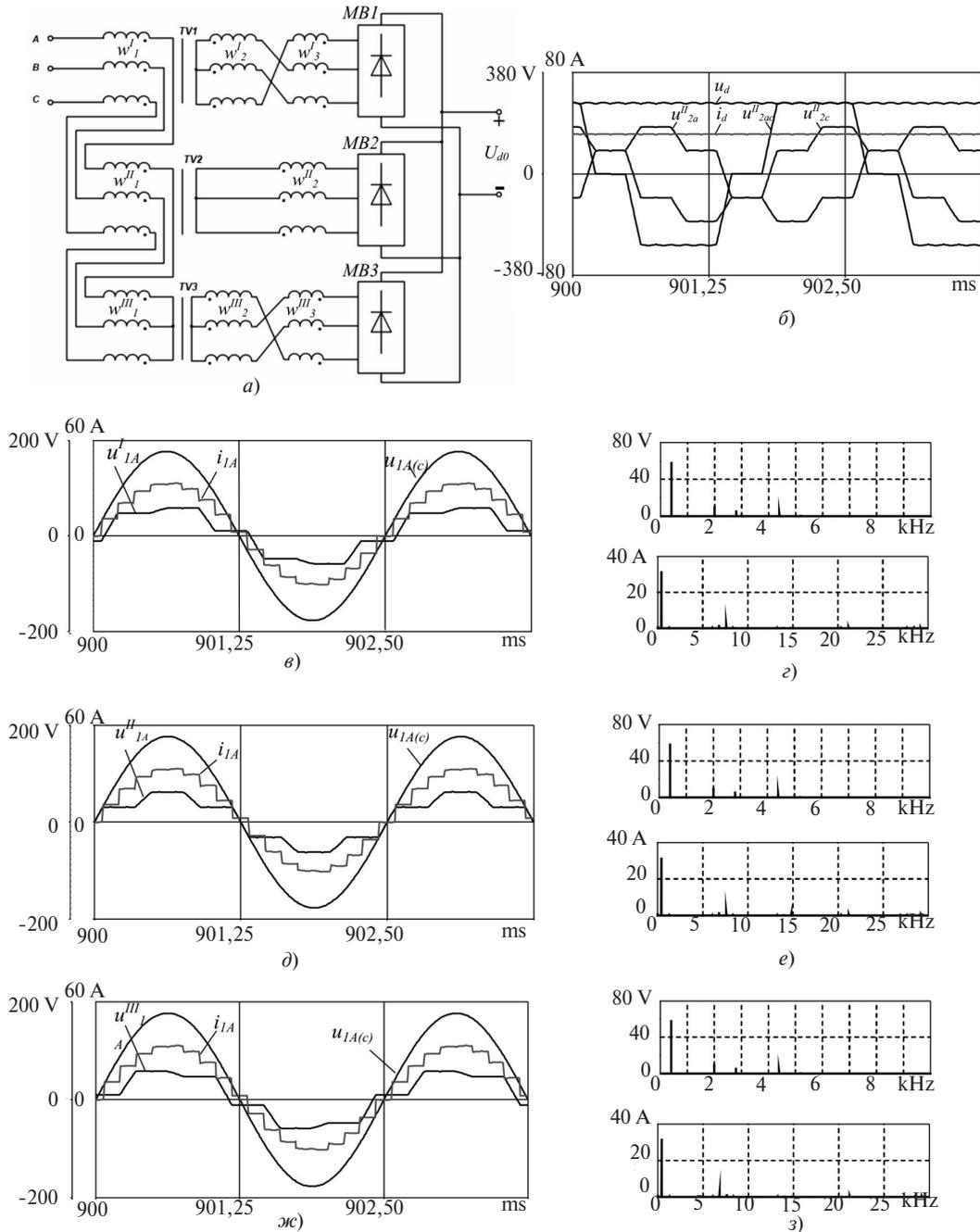


Рис. 4. Трехфазный ТУ-3(П) с пульсностью выпрямленного напряжения $m_{1\varnothing}=18$: а – Принципиальная электрическая схема и осциллограммы основных процессов в нём; б – два фазных напряжения u_{2a}^I, u_{2c}^I на входе моста МВ1 (с $K_{r(U)} \approx 9\%$), линейное напряжение $u_{2ac}^I = u_{2a}^I - u_{2c}^I$, а также напряжение и ток на его выходе; в, д, ж – сетевое фазное напряжение $u_{1A(c)}$, потребляемый фазный ток i_{1A} , фазное напряжение $u_{1A}^I, u_{1A}^{II}, u_{1A}^{III}$; з, е, ж – спектрограммы напряжений и токов вторичных обмоток 1, 2, 3-го трансформаторов

Как и ранее, искомый параметр U_{dm} определяется или как разность двух фазных напряжений $u_{2ac}^{II}(\omega t) = u_{2a}^{II}(\omega t) - u_{2c}^{II}(\omega t)$, например, в точке $\omega t = 4\pi/9$ (рис. 4,б, при отсчёте от нуля фазы а), или же как сумма двух значений напряжений фазы а в двух точках $\omega t = \pi/9$ и $\omega t = 4\pi/9$ (что для расчёта проще):

$$U_{dm} = U_{2a}^{II}\left(\frac{\pi}{9}\right) + U_{2a}^{II}\left(\frac{4\pi}{9}\right), \quad (8)$$

где

$$U_{2a}^{II}\left(\frac{\pi}{9}\right) = U_{2a(1)m}^{II} \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) + U_{2a(5)m}^{II} \sin\left(\frac{5\pi}{9}\right) + U_{2a(7)m}^{II} \sin\left(\frac{7\pi}{9}\right) = 0,34202U_{2a(1)m}^{II} + 0,98481U_{2a(5)m}^{II} + 0,64279U_{2a(7)m}^{II}; \quad (9)$$

$$U_{2a}^{II}\left(\frac{4\pi}{9}\right) = U_{2a(1)m}^{II} \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) + U_{2a(5)m}^{II} \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) +$$

Таблица 5

Параметры	W_{1A}^I	W_{1B}^I	W_{1C}^I	W_{2a}^I	W_{2b}^I	W_{2c}^I	Нагрузка
$U_{1j(1)m}$, В	58,943	58,943	58,943	168,481	168,480	168,481	–
$U_{1j(1)}$, В	41,679	41,679	41,679	119,134	119,133	119,134	
$I_{1j(1)д}$, А	22,528	22,373	22,479	7,856	7,821	7,870	
$S_{1j(1)}$, ВА	938,944	932,484	936,902	935,917	931,739	937,585	–
U_{1jcp} , В	37,892	37,894	37,892	113,274	113,278	113,273	–
$U_{1jд}$, В	42,627	42,627	42,627	121,845	121,847	121,846	–
U_{1jmax} , В	58,604	58,603	58,605	178,249	178,259	178,259	–
$U_{1jполка}$, В	47,755	47,767	47,762	89,120	89,122	89,126	–
U_{1jmin} , В	-58,605	-58,604	-58,605	-178,259	-178,252	-178,259	–
$I_{1jд}$, А	22,559	22,591	22,584	7,886	7,884	7,895	–
S_{1j} , ВА	961,622	962,987	962,688	960,882	960,678	961,938	–
K_{ϕ}	1,125	1,125	1,125	1,076	1,076	1,076	
U_{dmax} , В	–	–	–	–	–	–	267,388
U_{dmin} , В	–	–	–	–	–	–	263,366
U_{d0} , В	–	–	–	–	–	–	266,024
I_{d0} , А	–	–	–	–	–	–	31,632
P_{d0} , Вт	–	–	–	–	–	–	8415,10
$2S_{1(3TV)}$, ВА	8656,17 – габаритная мощность трёх трансформаторов						
$2P_{1(3TV)(1)}$, Вт	8420,36 – активная мощность, потребляемая ТВУ-3(П) из сети по основной гармонике						
$K_{\xi} = 2S_{1(3TV)}/P_{d0}$	1,0286 – коэффициент эффективности схемы по показателю габаритной мощности						
$K_{\xi 6} = P_{d0}/2P_{1(3TV)(1)}$	0,9994 – критерий энергетического баланса выполнен						

$$+U_{2a(7)m}^{II} \sin 7\left(\frac{4\pi}{9}\right) = 0,98481U_{2a(1)m}^{II} + 0,64279U_{2a(5)m}^{II} - 0,34202U_{2a(7)m}^{II} + 0,30077 \cdot 18,497 = 277,27 \text{ В}, \quad (8b)$$

которое оказалось больше значения, приведённого в табл. 5, на 3,7%, что для инженерной практики приемлемо. Однако небезынтересно заметить, что если с целью выяснения причины такого расхождения искомого значения U_{dm} определить, используя ИКМ:

После подстановки (9), (10) в (8) получим:

$$U_{dm} = 0,34202U_{2a(1)m}^{II} + 0,98481U_{2a(5)m}^{II} + 0,64279U_{2a(7)m}^{II} + 0,98481U_{2a(1)m}^{II} + 0,64279U_{2a(5)m}^{II} - 0,34202U_{2a(7)m}^{II} = 1,32683U_{2a(1)m}^{II} + 1,62760U_{2a(5)m}^{II} + 0,30077U_{2a(7)m}^{II} \quad (8a)$$

$$U_{dm} = U_{dmax} + U_{damin} = 178,175 + 88,942 = 267,117 \text{ В}, \quad (8b)$$

(что тоже верно – рис. 5, но не в том виде, как нам требуется), то оно совпадает с результатом из

В результате ИКМ получены следующие значения амплитуд трёх гармоник (рис. 5): $U_{2a(1)m}^{II} = 168,417 \text{ В}$, $U_{2a(5)m}^{II} = 29,642 \text{ В}$, $U_{2a(7)m}^{II} = 18,497 \text{ В}$. Подставив эти значения в (8a), получим значение U_{dm} по синтезированной модели (8a):

$$U_{dm} = 1,32683 \cdot 168,417 + 1,62760 \cdot 29,642 +$$

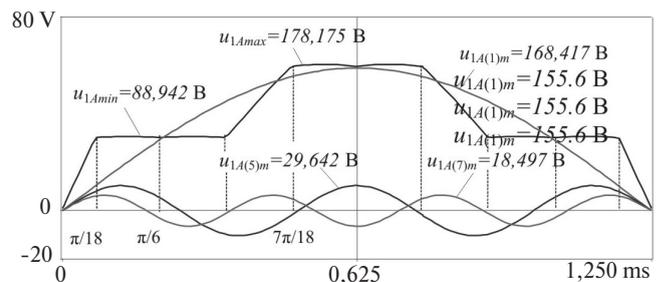


Рис. 5. Осциллограмма фазного напряжения ($K_{r(U)} \approx 9\%$) на вторичной обмотке трансформатора ТВУ-3(П) 2-го канала (по рис. 4,а) и три ближайших его гармоники с частотами f , $5f$, $7f$, содержание которых получено на основе ИКМ

табл. 5 с точностью до 0,1%. Несложно придти к выводу, что для повышения точности в данном случае необходимо учесть, по крайней мере, ещё одну гармонику в напряжении $u_{2a}^{II}(t)$ на рис. 4,б. Её амплитуда оказалась равной $U_{2am}^{II} = 7,40$ В, тогда модель (8б) должна быть дополнена ещё одним членом:

$$U_{dm} = 277,27 + \left(\sin 11 \frac{\pi}{6} + \sin 11 \frac{\pi}{2} \right) 7,40 = \\ = 277,27 - 11,1 = 266,17 \text{ В.} \quad (8г)$$

Полученный результат отличается от взятого за истинный в табл. 5 на 0,4%. В относительном виде искомая модель имеет вид:

$$U_{dm}^* = \frac{U_{dm}}{U_{2j(1)m}} = \frac{267,117}{168,43} = 1,568, \quad (10)$$

$$\text{где } U_{2j(1)m} = \frac{U_{2(1)m}}{M} K_{TV} = \frac{125 \cdot 2,8584 \sqrt{2}}{3} = 168,43.$$

Сравнение ТВУ-3(П) с ТВУ-2(П). Как и предполагалось, коэффициент эффективности схемы по показателю габаритной мощности трансформаторного узла оказался несколько хуже — 1,0286 против 1,0273 в ТВУ-2(П). Однако искажения потребляемого из сети тока уменьшились с 15 до 10%. Ближайшие высшие гармоники в этом токе: в ТВУ-2(П) — 11-я (2,6 %) и 13-я (1,9%), а в ТВУ-3(П) — 17-я (2%) и 19-я (1,5%). Однозначно можно считать, что положительные показатели ТВУ-3(П) превышают отрицательные.

Использование принципа синтеза ТВУ-М(П) с повышенным числом каналов целесообразно использовать в большой энергетике (например, при мощностях более единиц мегаватт), где особенно важны высокие показатели ЭМС и ЭЭС, причём особенно целесообразно при выпрямлении высоковольтного сетевого напряжения (в десятки киловольт) [10]. При этом за счёт увеличения числа каналов до М во столько же раз снижается и напряжение на первичных обмотках трансформаторов, что упрощает технологию их изготовления и снижает материалоемкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы. М.: Высшая школа, 1967, 527 с.
2. Мыщык Г.С. Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов: Автореф. дис.... доктора техн. наук. М.: МЭИ, 2001, 41 с.
3. Мыщык Г.С., Михеев В.В. Многоканальное преобразование — эффективная концепция для синтеза малоискажающих устройств силовой электроники. Сб. статей «Электротехнические комплексы автономных объектов». М.: Изд. Московского энергетического института, 2001, с. 58–76.
4. Пат. РФ на изобретение № 2280311. Трёхфазное трансформаторно-выпрямительное устройство с двухканальным преобразованием (варианты)/С.Ф. Коняхин, В.В. Михеев, Г.С. Мыщык, В.А. Цишевский. — БИ, 2006, № 20.
5. Пат. РФ на изобретение № 2280312. Трёхфазное трансформаторно-выпрямительное устройство с двухканальным преобразованием/ С.Ф. Коняхин, В.В. Михеев, Г.С. Мыщык, Цишевский. — БИ, 2006, № 20.
6. Пат. РФ на изобретение № 2290741. Устройство для выпрямления трёхфазного напряжения с трёхканальным преобразованием энергетического потока (варианты)/С.Ф. Коняхин, В.В. Михеев, Г.С. Мыщык, В.А. Цишевский. — БИ, 2006, № 36.
7. Пат. РФ на изобретение № 2282298. Устройство для выпрямления трёхфазного напряжения с четырёхканальным преобразованием энергетического потока (варианты)/С.Ф. Коняхин, В.В. Михеев, Г.С. Мыщык, В.А. Цишевский. — БИ, 2006, № 23.
8. Мыщык Г.С., Тин Аунг Зо. Об особенностях практической реализации трёхфазного трансформаторно-выпрямительного устройства с пульсностью выпрямленного напряжения $m_{1\varnothing} = 12$. Международ. научно-техн. конф. «Возобновляемая энергетика, энерго- и ресурсосбережение» (4–6 октября 2018 г.). Изд. IEEE Xplore [Электрон. ресурс] <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (дата обращения 03.05.2019).
9. Мыщык Г.С., Берилев А.В., Михеев В.В. Поискное проектирование устройств силовой электроники (трансформаторно-полупроводниковые устройства). М.: Изд. дом МЭИ, 2010, 284 с.
10. Мыщык Г.С., Хлаинг Мин У. Трансформаторно-выпрямительные устройства повышенной мощности с высоковольтным входом и улучшенной электромагнитной и электроэнергетической совместимостью. Управление качеством электрической энергии. Сб. трудов Международ. научно-практ. конф. Москва, (23–25 ноября 2016 г.). М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2017, с.185–193.
11. Мыщык Г.С., Шевякова Н.Б., Пикулин В.П. Анализ и оценка форм выходного напряжения преобразователей с амплитудно-импульсной модуляцией. — Электричество, 1979, № 5, с. 25–30.

[15.05.2019]

А в т о р ы: Мыщык Геннадий Сергеевич — доктор техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» — НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2001 г.

Сизякин Алексей Вячеславович — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2010 г.

Со Не Не Хейн окончил магистратуру НИУ «МЭИ» в 2016 г., аспирант (Союз Мьянма).

Тин Аунг Зо — аспирант НИУ «МЭИ» (Союз Мьянма).

Features of physical processes in Transformer-Rectifier Devices with a Multichannel Conversion Path

MYTSYK Gennady S. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

SIZYAKIN Aleksey V. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

SO NE NE HEIN (Union M'yanma) — Ph. D.-student of NRU «MPEI»

TIN AUNG ZAW (Union M'yanma) — Ph. D.-student of NRU «MPEI»

The article considers a new solution for two types of transformer-rectifier devices (TRD-M) which implement the resource saving principle of multichannel conversion of an energy flow. An increased level of converted power and simultaneous improvement of electromagnetic and electric power efficiency indicators are achieved by increasing the number M of conversion channels. The analysis is confined to consideration of the class of TRD-M involving addition of channel currents. In some applications, their conventional (modern) solutions do not ensure uniform distribution of currents among the channels. The idea of synthesizing new TRD-M solutions is that the currents in M channels are forcedly equalized using one of two methods: by using current transformers in the channels of the same phase (in using one common voltage transformer; by means of series phase-wise connection of the primary windings of M transformers (in using M transformers with M times smaller capacity). In both cases, M rectifier bridges are connected in parallel. The new TRD-M are characterized by nonconventional (complex) physical processes. This adds difficulty to making their model description and design procedure on this basis, and, second, it becomes impossible to carry out a comparative assessment of alternative versions with a view to make a sound choice of the most rational solution in the case of using them. The aim of the study is so solve the problems formulated above (in the first version, subject to the adopted assumptions). Simulation on a computer is used as the solution tool. The obtained results made it possible to develop information and methodical support for fulfilling this procedure in the minimal scope necessary for designing. The results are presented in the form of working process oscillograms, tables and models showing interrelation between the rectified voltage DC component and network voltage.

Key words: three-phase voltage transformer, current transformer, three-phase rectifying bridge, M -channel current conversion, forced distribution of current among channels, computer simulation, information and methodical support of designing

REFERENCES

1. Razmadze Sh.M. *Preobrazovatel'nye Skhemy i sistemy* (Transformating diagrams and systems). Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 527 p.
2. Mytsyk G.S. *Metodologiya strukturno-algoritmicheskogo sinteza i analiza maloiskazhayushchikh ustroystv silovoi elektroniki dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov avtonomnykh ob'ektov* (Methodology of structural-algorithmic synthesis and low-distortion power electronic devices for the electrical systems of self-contained facilities): Author's abstract diss.... Dr. Sci. (Eng.). Moscow Power Engineering Institute, 2001, 41 p.
3. Mytsyk G.S., Mikheyev V.V. *Elektrotekhnicheskiye komplekсы avtonomnykh ob'ektov — in Russ. (Electrotechnical complexes of autonomous objects)*. Collection of articles. Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 2001, pp. 58–76.
4. Pat. RF na izobreteniyе No. 2280311. *Trekhfaznoe transformatorno-vypriyatel'noe ustroystvo s dvukhkanal'nym preobrazovaniyem (varianty)* (RF Patent for Invention No. 2280311). A three-phase transformer-rectifier device with two-channel conversion (versions)/V.V. Mikheyev, S.F. Konyakhin, G.S. Mytsyk, V.A. Stishevskiy. Bulletin of inventions, 2006, No. 20.
5. Pat. RF na izobreteniyе No. 2280312. *Trekhfaznoe transformatorno-vypriyatel'noe ustroystvo s dvukhkanal'nym preobrazovaniyem (varianty)* (RF Patent for Invention No. 2280311). A three-phase transformer-rectifier device with two-channel conversion (versions)/S.F. Konyakhin, V.V. Mikheyev, G.S. Mytsyk, V.A. Stishevskiy. Bulletin of inventions, 2006, No. 20.
6. Pat. RF na izobreteniyе No. 2290741. *Ustroystvo dlya vypriyameniya trekhfaznogo napryazheniya s trekhkanal'nym preobrazovaniyem energeticheskogo potoka (varianty)* (RF Patent for Invention no. 2290741). A device for rectifying three-phase voltage with three-channel conversion of energy flow (versions)/S.F. Konyakhin, V.V. Mikheyev, G.S. Mytsyk, V.A. Stishevskiy. Bulletin of inventions, 2006, No. 36.
7. Pat. RF na izobreteniyе No. 2282298. *Ustroystvo dlya vypriyameniya trekhfaznogo napryazheniya s trekhkanal'nym preobrazovaniyem energeticheskogo potoka (variant)* (RF Patent for Invention no. 2290741). A device for rectifying three-phase voltage with three-channel conversion of energy flow (versions)/S.F. Konyakhin, V.V. Mikheyev, G.S. Mytsyk, V.A. Stishevskiy. Bulletin of inventions, 2006, No. 23.
8. Mytsyk G.S., Tin Aung Zo. *Ob osobennostyakh prakticheskoi realizatsii trekhfaznogo transformatorno-vypriyatel'nogo ustroystva s pul'snost'yu vypriyamnennogo napryazheniya $m_{1\sigma}=12$. Mezhdunarod. nauchno-tekhn. konf. «Vozobnovlyayemaya energetika, energo- i resursoberezheniye» (4–6 oktyabrya 2918 g.)* (On the features of the practical implementation of a three-phase transformer-rectifier device with a pulse frequency of the rectified voltage $m_{1e} = 12$. International scientific and technical conference «Renewable Energy, Energy and Resource Saving» (October 4–6, 2018). Publ. IEEE Xplore (Electron. resource] <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (Data of appeal 03.05.2019).
9. Mytsyk G.S., Berilov A.V., Mikheyev V.V. *Poiskovoe proektirovaniye ustroystv silovoi elektroniki (transformatorno-poluprovodnikovye ustroystva)* (Search designing of power electronics devices (transformer-semiconductor devices). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2010, 284 p.
10. Mytsyk G.S., Khlaing Min U. *Sb. trudov Mezhdunarod. nauchno-prakt. konf. «Upravleniye kachestvom elektricheskoi energii»* (Control of electric power quality. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference). Moscow, 23–25 November 2016. Moscow, TSC «Centre of printing services «Raduga», 2017, pp. 185–193.
11. Mytsyk G.S., Shevyakova N.B., Pikulin V.P. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1979, No. 5, pp. 25–30.