

# Анализ качества выходного тока автономных инверторов на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями

ЧЕРЕВКО А.И., КУЗЬМИН И.Ю., МУЗЫКА М.М.

*Разложением в ряды Фурье ступенчатых кривых графика выходного напряжения автономного инвертора, аппроксимирующей эталонную синусоиду, получены коэффициенты ряда для четного и нечетного числа секций круговой обмотки. С использованием этих коэффициентов рассчитаны коэффициенты гармоник выходного напряжения и тока инвертора с трансформатором с вращающимся магнитным полем и построены их графические зависимости в функции числа секции круговой обмотки и добротности активно-емкостной нагрузки. Качество выходного тока такого АИ существенно зависит не только от числа секций круговой обмотки, но и от добротности нагрузки. При увеличении добротности RC-нагрузки с 1,0 до 10,0 коэффициент гармоник по току увеличивается в 5–7 раз как при четном, так и при нечетном числе пар силовых ключей. При малой добротности нагрузки (0,1 и меньше) в случае неудачного включения перенапряжение на конденсаторной батарее может превысить номинальное напряжение на 70% и более.*

**Ключевые слова:** автономный инвертор, трансформатор с вращающимся магнитным полем, круговая обмотка, добротность активно-емкостной нагрузки, качество выходного напряжения и тока инвертора

Анализ качества выходного напряжения автономных инверторов (АИ), построенных по трехфазным мостовым схемам на базе классических трансформаторов с пульсирующими магнитными полями (ТПМП), обычно проводится для случая работы АИ на активную и активно-индуктивную нагрузку [1–3], причем без аналитической оценки качества выходного тока [4]. Оценки качества выходного напряжения и тока АИ с ТПМП и АИ, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП), при активно-емкостной нагрузке в отечественных работах практически нет [4–8].

Цель настоящей работы – получение аналитической оценки качества выходного тока АИ с ТВМП при известных законах формирования ступенчатой кривой (СК) выходного напряжения [7], различном числе секций круговой обмотки (КО) в составе ТВМП или числе пар ( $N$ ) силовых ключей (СКЛ) и различной добротности активно-емкост-

*By expanding the stepped curves of the output voltage waveform produced by a self-commutated inverter (which approximate the reference sine wave) into the Fourier series, we obtained the coefficients of the components in the series for even and odd numbers of sections in the circular winding. The obtained coefficients were used for calculating the coefficients for the harmonic components of the output voltage and current of the inverter equipped with a transformer with rotating magnetic field, and their graphic dependences as functions of the number of sections in the circular winding and the quality factor of a resistive-capacitive load were constructed. The quality of the output current of such self-commutated inverter depends not only on the number of sections in the circular winding, but also on the load quality factor. As the RC load quality factor increases from 1.0 to 10.0, the harmonic distortion coefficient of the current increases by a factor of 5–7 with both even and odd number of the pairs of power switches. With a low load quality factor (0.1 or less), the overvoltage arising across the capacitor bank in the case of its switching at an inappropriate moment may exceed the nominal voltage by 70% or more.*

**Key words:** self-commutated inverter, transformer with rotating magnetic field, circular winding, quality factor of an RC load, quality of inverter output voltage and current

ной нагрузки в установившемся и пусковом режимах.

Рассмотрим качество выходного напряжения и тока АИ с ТВМП при нечетном числе секций КО, например при девяти секциях, или, что то же самое, при девяти парах СКЛ, так как в этом случае коэффициент гармоник выходного напряжения АИ при RC-нагрузке не превышает 10% [8], что соответствует требованиям ГОСТ 13109–97 и российского морского регистра судоходства. При RC-нагрузке схема АИ с ТВМП будет иметь вид, представленный на рис. 1.

В общем случае график выходного напряжения АИ имеет форму СК [1–3]. При этом наиболее высокое качество выходного напряжения  $u_{AI}(t)$  достигается, когда СК равномерно накладывается на эталонную синусоиду (ЭС) (рис. 2) в случае квантования  $u_{AI}(t)$  по времени [6]. Если СК представить в виде бесконечного сходящегося функционального ряда Фурье, то можно получить аналити-

ческие зависимости выходного фазного напряжения АИ в функции числа пар СКЛ, а через фазные напряжения определить характер изменения линейных напряжений.

Так как СК обладает комбинированной симметрией первого и третьего рода (рис. 2), то ее разложение в ряд Фурье будет содержать только нечетные синусоидальные гармонические составляющие:

$$u(t) = U_m \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(k\omega t), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитудное, или максимальное, значение ЭС;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота ЭС;  $k = 1, 3, 5, \dots$  – нечетные числа натурального ряда.

В [8] показано, что при нечетном числе пар СКЛ происходит улучшение качества выходного напряжения АИ (приблизительно в 2 раза). Так при трех парах СКЛ в составе коммутатора АИ с ТВМП достигается такое же качество выходного напряжения АИ, как и при шести парах; при пяти парах СКЛ качество выходного напряжения такое же, как и при десяти парах СКЛ, и т.д.

Для упрощения гармонического анализа примем, что ЭС, по отношению к которой формируется СК, имеет единичную амплитуду  $U_m = 1$ , тогда в общем случае коэффициенты ряда Фурье будут определяться как

$$b_k = \frac{1}{\rho} \int_0^{2\rho} f(q) \sin(kq) dq = \frac{2}{\rho} \int_0^{\rho} f(q) \sin(kq) dq, \quad (2)$$

где  $q = \omega t$ ;  $f(q)$  – функция, описывающая СК на первом полупериоде ЭС.

Согласно свойству аддитивности определенного интеграла от сложной функции  $f(q)$  [9] интеграл (2) можно разбить на  $N/2$  определенных интегралов от простых функций, описывающих каждую из ступеней СК в отдельности. Поскольку значение высоты каждой ступени постоянно (ступень параллельна оси абсцисс), то, следовательно, описывающие их функции не будут зависеть от переменной интегрирования  $q$ , поэтому основной их параметр – высоту, или ординату, – можно вынести за знак интеграла.

Для СК, равномерно наложенной на ЭС (рис. 2), шаг квантования по оси абсцисс составляет  $Dq = 2\rho / N$ . При этом коэффициенты ряда  $b_k$  вычисляются согласно (2). Особенность аналитического описания СК, равномерно наложенной на ЭС, состоит в наличии общей формулы для любого четного (3) либо нечетного (4) числа  $N$ , что связано с возможностью однозначного определения значения ординат всех ступеней на всем полупериоде ЭС в зависимости от времени.

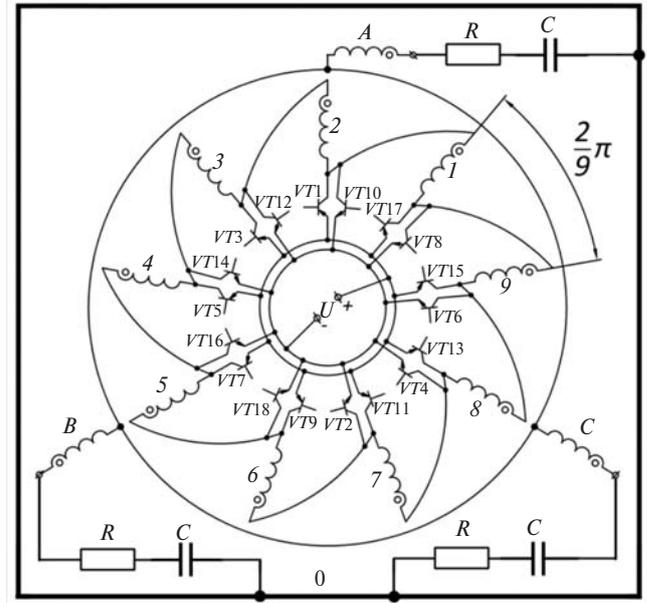


Рис. 1. Схема АИ с ТВМП на девять секций круговой обмотки или на девять пар СКЛ

Для всех четных чисел пар СКЛ (4, 6, 8, 10, ...):

$$b_k = \frac{4}{\rho k} \sin \frac{\pi q_1 k}{2} \sum_{i=1}^{N/2} U_i \sin \frac{\pi(q_i + q_{i-1})k}{2} \quad (3)$$

$$i = 1, \frac{N}{2}; q_i = \frac{2\rho i}{N}; U_i = \sin \frac{\pi(q_i + q_{i-1})}{2}$$

Для всех нечетных чисел пар СКЛ (3, 5, 7, 9, ...):

$$b_k = \frac{4}{\rho k} \sin \frac{\pi q_1 k}{2} \sum_{i=1}^{N/2} U_i \sin \frac{\pi(q_i + q_{i-1})k}{2} \quad (4)$$

$$i = 1, N; q_i = \frac{\rho i}{N}; U_i = \sin \frac{\pi(q_i + q_{i-1})}{2}$$

После определения коэффициентов ряда Фурье по формулам (3), (4) коэффициент гармоник по напряжению можно вычислить следующим образом:

$$K_{\Gamma U} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} b_k^2}{b_1} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Ниже приведены результаты расчета коэффициентов гармоник выходного напряжения АИ с ТВМП, а на рис. 3 – графические зависимости  $K_{\Gamma U}$  в функции числа пар СКЛ  $K_{\Gamma U} = f(N)$  для четного и нечетного числа секций КО, которое численно равно числу пар СКЛ ( $N$ ):

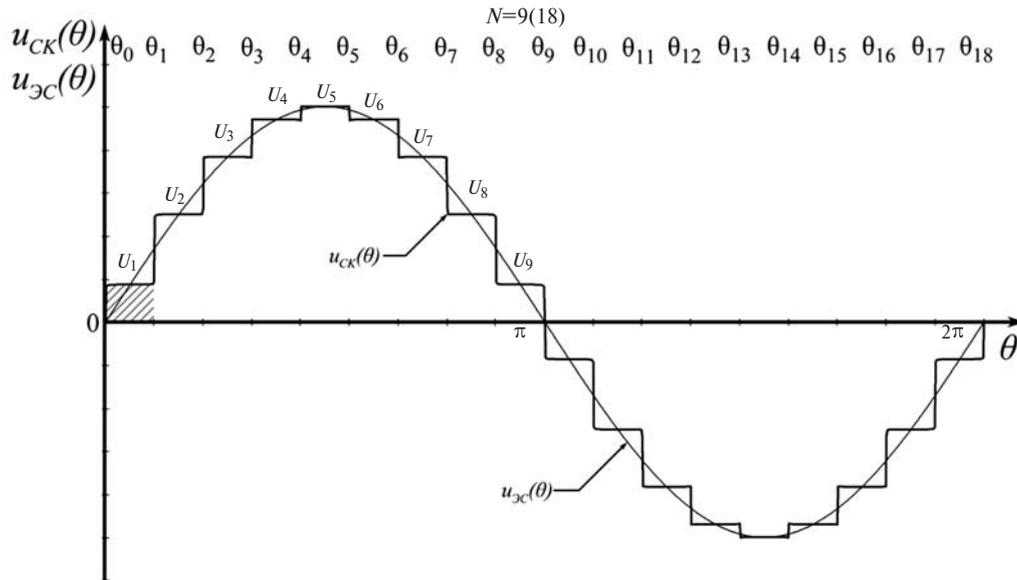


Рис. 2. Ступенчатая кривая, равномерно наложенная на ЭС, при 9 (или при 18) парах СКЛ

<i>N</i>	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{rU}, \%$	31,06	48,32	18,29	31,06	12,99	23,00	10,08	18,29
<i>N</i>	11	12	13	14	15	16	17	18
$K_{rU}, \%$	8,23	15,19	6,96	12,99	6,02	11,35	5,31	10,08
<i>N</i>	19	29	21	22	23	–	–	–
$K_{rU}, \%$	4,75	9,06	4,29	8,23	3,92	–	–	–

Из данных расчета следует, что показатели качества выходного напряжения АИ с ТВМП с тремя парами силовых ключей, который эквивалентен классическому трехфазному мостовому АИ, построенному на базе ТПМП, более чем в 3 раза хуже, чем требуется ГОСТ 13109–97 и российским морским регистром судоходства.

Найдем аналитическую зависимость формы кривой тока на выходе АИ с ТВМП от числа секций КО и постоянной времени  $t$  активно-емкостной  $RC$ -нагрузки переменного тока (рис. 1). Предположим, что в начальный момент времени ( $t=0$ ) энергии в электрическом поле конденсаторной батареи нет, тогда в цепи при замыкании ключа под воздействием ступенчатой кривой напряжения  $u(t)$  (рис. 2) возникает переходный процесс при нулевых начальных условиях.

При воздействии ступенчатой кривой напряжения  $u(t)$  на  $RC$ -цепь ее состояние согласно второму закону Кирхгофа можно описать следующим уравнением:

$$u(t) = u_R(t) + u_C(t), \tag{6}$$

где  $u(t)$  – несинусоидальное ступенчатое выходное напряжение АИ с ТВМП (1);  $u_R(t) = Ri(t)$  и  $u_C(t)$  –

мгновенные падения напряжений на активном и емкостном сопротивлении соответственно, причем  $i(t) = i_R(t) = i_C(t)$  из-за последовательного соединения (рис. 1), тогда с учетом  $i_C(t) = C[du_C(t)/dt]$  уравнение (6) преобразуется к линейному неоднородному дифференциальному уравнению (ЛНДУ) первого порядка:

$$u(t) = RC \frac{d}{dt} u_C(t) + u_C(t). \tag{7}$$

Решение ЛНДУ (7) в общем случае имеет вид:

$$u(t) = u_{Cпр}(t) + u_{Cсв}(t).$$

Свободную составляющую  $u_{Cсв}(t)$  определим из решения линейного однородного дифференциального уравнения (ЛОДУ), получаемого из (7):

$$RC \frac{d}{dt} u_{Cсв}(t) + u_{Cсв}(t) = 0. \tag{8}$$

Характеристическое уравнение для (8) имеет вид

$$RCl + 1 = 0, \tag{9}$$

откуда корень уравнения (9)

$$l = - (1/RC), \tag{10}$$

тогда фундаментальная система решений уравнения (8) содержит всего одну функцию-решение:

$$f_1(t) = \exp(lt) = \exp(- (1/RC)t) = \exp(- 1/t), \tag{11}$$

где  $t = RC$  – постоянная времени  $RC$ -цепи.

Общее решение ЛОДУ (8) для  $k$ -й гармоники состоит из линейной комбинации функций-реше-

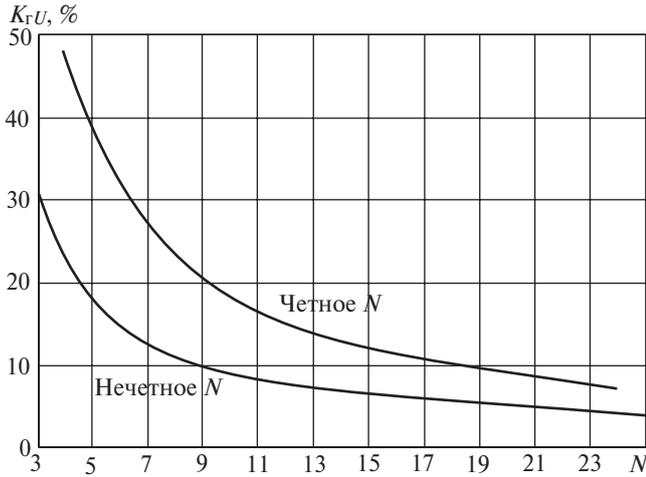


Рис. 3. Зависимость коэффициента гармоник по напряжению от числа секций КО

ний (11), входящих в фундаментальную систему решений:

$$u_{C_{свк}}(t) = M_k \exp(-t/\tau), \quad (12)$$

где  $M_k$  – постоянная для  $k$ -й гармоники напряжения, определяемая ниже из условия  $u_{Ck}(0) = u_{C_{свк}}(0) + u_{C_{прk}}(0) = 0$ , чем учитывается запрет скачка напряжения в емкостном элементе в момент коммутации.

Левая часть ЛНДУ (7) состоит из суммы гармоник (1), имеющих в полной форме вид так называемых квазиполиномов [9], что значительно упрощает поиск принужденной составляющей, так как решение ЛНДУ при произвольном виде левой части методом вариации произвольных постоянных Лагранжа достаточно сложно.

Общий вид квазиполинома при неопределённых параметрах представим как [9]

$$\exp(at)P_R(t)\sin(bwt) + Q_M(t)\cos(bwt). \quad (13)$$

Чтобы привести (13) к виду правой части уравнения (1), когда в кривой напряжения содержится только одна гармоника, необходимо чтобы коэффициенты  $a$  и  $b$  принимали следующие значения:  $a = 0$ ,  $b = k$ . Тогда выражение (13) преобразуется к виду

$$P_R(t)\sin(kwt) + Q_M(t)\cos(kwt). \quad (14)$$

Полином  $P_R(t)$  при синусной составляющей в выражении (14) согласно (1) имеет нулевую степень  $P_R(t) = b_k$ ;  $R = 0$ . Полином  $Q_M(t)$  при косинусной составляющей равен нулю. Следовательно, принужденную составляющую напряжения для одной  $k$ -й гармоники необходимо искать в виде

$$u_{C_{прk}}(t) = P_W(t)\sin(kwt) + Q_W(t)\cos(kwt), \quad (15)$$

где  $W = \max\{R; M\}$ ;  $P_W(t)$ ,  $Q_W(t)$  – полиномы с неопределёнными коэффициентами; поскольку полиномы  $P_R(t)$  и  $Q_M(t)$  имеют нулевую степень, то  $W = 0$ . В этом случае полиномы с неопределёнными коэффициентами  $P_R(t)$  и  $Q_M(t)$  представляют собой постоянные величины:  $P_W(t) = A$ ;  $Q_W(t) = B$ ; в результате выражение (15) преобразуется к виду

$$u_{C_{прk}}(t) = A\sin(kwt) + B\cos(kwt). \quad (16)$$

Подставляя правую часть уравнения (16) в (7) вместо  $u_C(t)$ , опуская амплитудное значение ЭС как постоянный множитель перед функциональным рядом [9] и учитывая только одну  $k$ -ю гармонику, получаем:

$$RC \frac{d}{dt}(A\sin(kwt) + B\cos(kwt)) + (A\sin(kwt) + B\cos(kwt)) = b_k \sin(kwt). \quad (17)$$

Дифференцируя по времени (17) и группируя подобные слагаемые, имеем:

$$(A - BRCKw)\sin(kwt) + (ARCKw + B)\cos(kwt) = b_k \sin(kwt). \quad (18)$$

Сопоставляя левую и правую части уравнения (18), получаем систему линейных уравнений, состоящую из двух тождеств:

$$\begin{cases} A - BRCKw = b_k \ddot{y} \\ ARCKw + B = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Решая систему уравнений (19), находим постоянные коэффициенты  $A$  и  $B$ :

$$\begin{aligned} A &= \frac{b_k}{1 + k^2 w^2 R^2 C^2} \ddot{y} \\ B &= \frac{b_k k w R C}{1 + k^2 w^2 R^2 C^2} \dot{y} \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя значения коэффициентов  $A$  и  $B$  в (16), определяем принужденную составляющую напряжения на конденсаторной батарее для  $k$ -й гармоники:

$$u_{C_{прk}}(t) = \frac{b_k}{1 + k^2 w^2 R^2 C^2} \sin(kwt) - \frac{b_k k w R C}{1 + k^2 w^2 R^2 C^2} \cos(kwt). \quad (21)$$

Сумма свободной (12) и принужденной (21) составляющих для  $k$ -й гармоники имеет вид

$$u_{Ck}(t) = M_k \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + \frac{b_k}{1 + k^2 w^2 R^2 C^2} \sin(kwt) -$$

$$- \frac{b_k k \omega R C}{1 + k^2 \omega^2 R^2 C^2} \cos(k \omega t). \quad (22)$$

Постоянная величина  $M_k$  определяется исходя из условия:

$$u_{Ck}(0) = u_{Cвк}(0) + u_{Cпрk}(0) = M_k - \frac{b_k k \omega R C}{1 + k^2 \omega^2 R^2 C^2} = 0$$

$$\Rightarrow M_k = \frac{b_k k \omega R C}{1 + k^2 \omega^2 R^2 C^2},$$

следовательно,

$$M_k = \frac{b_k k \omega t}{1 + k^2 \omega^2 t^2}. \quad (23)$$

Преобразуя (21) в соответствии с тригонометрическим соотношением [9]

$$A \sin(x) + B \cos(x) = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(x + \arctg(B/A)) \quad (24)$$

и учитывая, что  $t = RC$ , получаем:

$$u_{Cпрk}(t) = \frac{b_k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 t^2}} \sin(k \omega t - \arctg(k \omega t)). \quad (25)$$

Конечное выражение для мгновенного напряжения на конденсаторной батарее получим путём суммирования (12) и (25) для всех гармоник:

$$u_C(t) = U_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k k \omega t}{1 + k^2 \omega^2 t^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{b_k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 t^2}} \sin(k \omega t - \arctg(k \omega t)). \quad (26)$$

здесь амплитуда ЭС  $U_m$  добавляется как постоянный множитель перед всем функциональным рядом [9].

Применяя к (26) почленное дифференцирование, можно осуществить следующие преобразования [9]:

$$\frac{d}{dt} u_C(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{dt} u_{Ck}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{dt} u_{Ck}(t). \quad (27)$$

Дифференцируя (26) по времени согласно (27) и учитывая, что  $i(t) = C[du_C(t)/dt]$ , получаем аналитическое выражение для мгновенного значения тока в RC-цепи с учетом переходного процесса, связанного с подключением нагрузки:

$$i(t) = U_m \omega C \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k k}{1 + k^2 \omega^2 t^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{b_k k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 t^2}} \cos(k \omega t - \arctg(k \omega t)). \quad (28)$$

В том случае, если переходный процесс не представляет интереса и важно лишь оценить форму кривой тока в установившемся режиме, выражение (28) упрощается:

$$i_{пр}(t) = U_m \omega C \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 t^2}} \cos(k \omega t - \arctg(k \omega t)), \quad (29)$$

где значения  $b_k$  вычисляются согласно (3) и (4) для интересующего числа пар СКЛ N.

Вводя новую переменную величину, характеризующую коэффициенты функционального ряда для тока при RC-нагрузке,

$$f_k = \frac{b_k k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 t^2}}, \quad (30)$$

определяем коэффициент гармоник по току:

$$K_{ГI} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} f_k^2}}{f_1}. \quad (31)$$

Число пар СКЛ N	Значение коэффициента гармоник по току $K_{ГI}$ при добротностях $Q_C$ (и постоянных $t$ , мс) RC-нагрузки, равных				
	0,1(31,83)	0,5(6,37)	1,0(3,18)	5,0(0,64)	10,0(0,32)
3	31,21	34,63	43,45	131,64	206,68
4	48,54	53,60	66,34	175,43	262,82
5	18,38	20,43	25,78	86,43	147,39
6	31,21	34,63	43,45	131,64	206,68
7	13,06	14,52	18,34	63,63	114,26
8	23,11	25,68	32,34	104,67	171,93
9	10,13	11,27	14,24	50,13	92,78
10	18,38	20,43	25,78	86,43	147,39
11	8,27	9,20	11,64	41,28	77,80
12	15,27	16,97	21,43	73,38	128,85
13	6,99	7,78	9,84	35,06	66,82
14	13,06	14,52	18,34	63,63	114,26
15	6,05	6,74	8,52	30,44	58,48
16	11,41	12,69	16,03	56,10	102,48
17	5,34	5,94	7,51	26,89	51,93
18	10,13	11,27	14,24	50,13	92,78
19	4,77	5,31	6,71	24,08	46,67
20	9,11	10,13	12,81	45,29	84,67
21	4,31	4,80	6,07	21,79	42,36
22	8,27	9,20	11,64	41,28	77,80
23	3,94	4,38	5,54	19,90	38,77
24	7,58	8,43	10,66	37,92	71,91
25	3,62	4,03	5,09	18,30	35,73

С помощью программного продукта MathCAD по зависимости (29) были рассчитаны и построены кривые тока в установившемся режиме для некоторого произвольно выбранного числа пар СКЛ, например  $N=3(6)$  и  $N=9(18)$ , при трех, существенно отличающихся значениях добротности  $RC$ -нагрузки (рис. 4, *a* и *б*). Здесь под добротностью  $RC$ -цепи понимается следующее соотношение:  $Q_C = X_C(1) / R = 1 / (\omega_1 RC)$ .

С помощью программного продукта MathCAD по зависимостям (30) и (31) вычислены и в таблице приведены зависимости значений коэффициента гармоник по току (в процентах) от числа пар СКЛ и добротности  $RC$ -цепи.

По численным данным таблицы построены графические зависимости коэффициента гармоник по току для добротностей  $RC$ -цепи, равных  $Q_{C1} = 0,1$ ,  $Q_{C2} = 5$ ,  $Q_{C3} = 10$  от числа секций в составе КО, или числа пар СКЛ в случае четного (рис. 5, *a*) и нечетного (рис. 5, *б*) их количества.

В соответствии с (26) и (28) для трех (или шести) на рис. 6, *a* и *б* и для девяти (или 18) на рис. 6, *в* и *г* пар СКЛ (секций КО) в программной среде MathCAD были построены графики переходных процессов для выходного напряжения на конденсаторной батарее  $RC$ -цепи и выходного тока АИ с ТВМП в пусковом режиме АИ для существенно отличающихся добротностей:  $Q_{C1} = 0,1$ ,  $Q_{C2} = 1,0$ .

Анализ временных диаграмм на рис. 6 показывает, что при добротности  $Q_{C1} = 0,1$  переходный процесс завершается всего лишь за три периода, причем в случае «неудачного включения», когда кривая выходного напряжения проходит через нуль (рис. 2), перенапряжение на конденсаторной батарее может составить 70% и более (рис. 6, *a* и *в*), вместе с тем импульс тока включения будет отсутствовать.

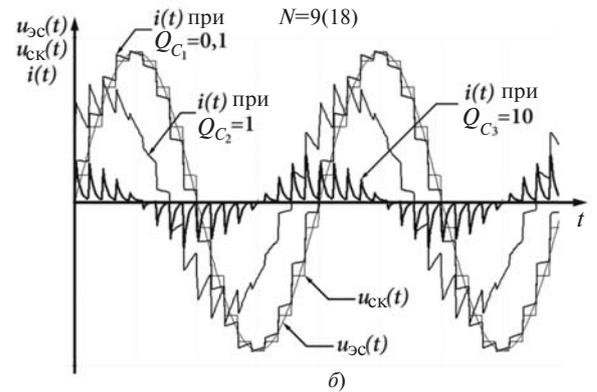
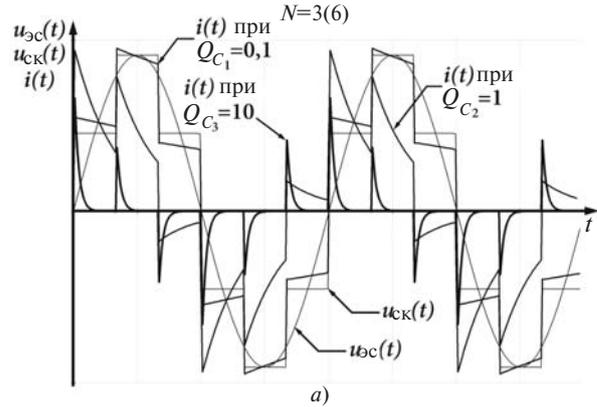


Рис. 4. Напряжение эталонной синусоиды  $u_{эс}(t)$ , ступенчатой кривой  $u_{ск}(t)$  и выходного тока  $i(t)$  АИ при различных значениях добротности нагрузки  $Q_C$  в случае: *a* – 3(6) пар СКЛ; *б* – 9(18)

При высокой добротности  $Q_{C2} = 1,0$  и более переходный процесс завершается в течение десятых долей периода и перенапряжение на конденсаторной батарее составляет не более 3%, однако при этом кривая выходного тока АИ сильно искажается (рис. 4 и 6). Длительность переходного процесса при этом оказывается прямо пропорциональна

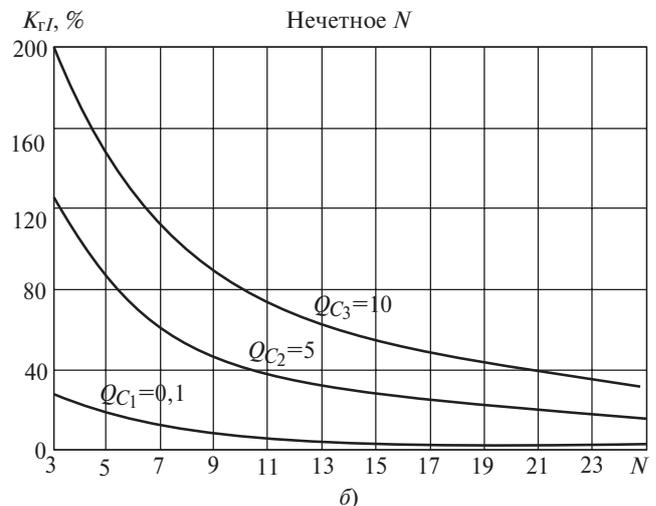
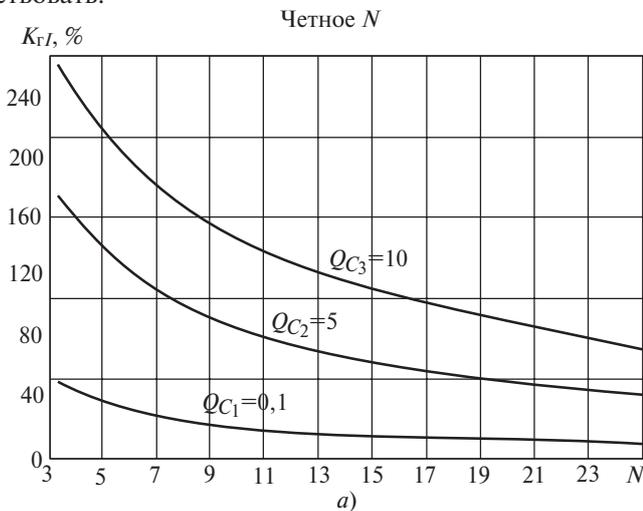


Рис. 5. График  $K_{TL}$ , %, при равномерно наложенной СК на ЭС для случая: *a* – четного и *б* – нечетного числа пар СКЛ

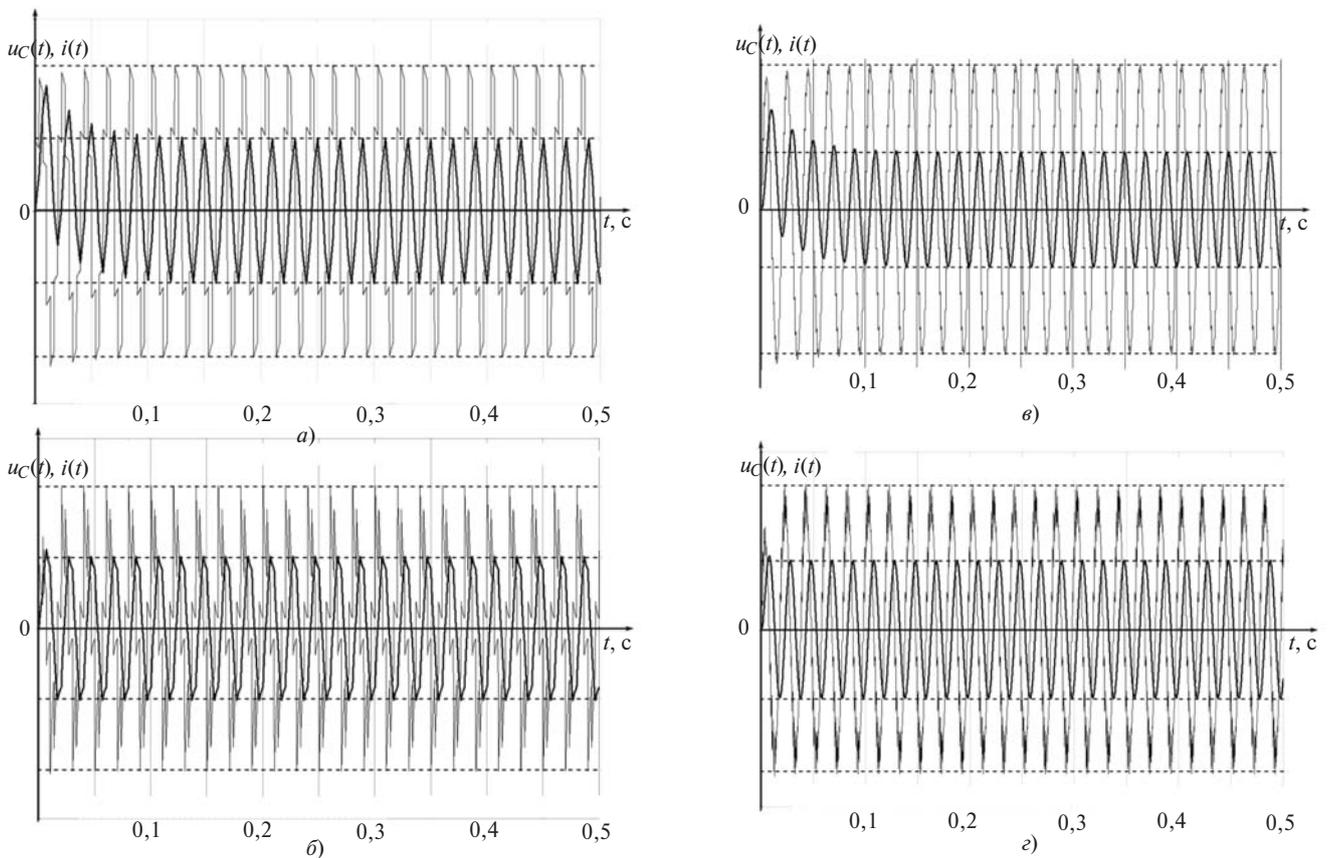


Рис. 6. Временные диаграммы тока и напряжения при включении на АИ с ТВМП  $RC$ -нагрузку (... –  $i(t)$ ; — —  $u_C(t)$ ); а –  $N=3(6)$ ,  $Q_{C1} = 0,1$ ; б –  $N=3(6)$ ,  $Q_{C2} = 1,0$ ; в –  $N=9(18)$ ,  $Q_{C1} = 0,1$ ; г –  $N=9(18)$ ,  $Q_{C2} = 1,0$

ёмкости конденсаторной батареи, т.е. обратно пропорциональна добротности  $RC$ -нагрузки.

Таким образом, сопоставляя показатели качества выходного напряжения и тока АИ с ТВМП с тремя парами силовых ключей, который эквивалентен классическому трехфазному мостовому АИ, построенному на базе трансформатора с пульсирующими полями [10], с показателями качества выходного напряжения и тока АИ с ТВМП с большим числом секций (или пар силовых ключей), можно заключить, что классический АИ, построенный по трехфазной мостовой схеме, без применения выходных фильтров не может обеспечить качество выходного напряжения, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109–97 и российского морского регистра судоходства.

**Выводы.** 1. Анализ значений коэффициента  $K_{ГУ}$  АИ с ТВМП показал, что качество выходного напряжения АИ с ТВМП с тремя парами силовых ключей, который эквивалентен классическому трехфазному мостовому АИ, построенному на базе ТПМП, более чем в 3 раза хуже значения, требуемого ГОСТ 13109–97 и российским морским регистром судоходства.

2. Качество выходного напряжения АИ с ТВМП, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109–97 и российского морского регистра судоходства, может быть обеспечено при девяти секциях круговой обмотки или девяти парах силовых ключей для ступенчатой кривой напряжения, равномерно наложенной на эталонную синусоиду, что на 7 пар ключей меньше, чем при четном числе пар СКЛ.

3. Качество выходного тока АИ с ТВМП существенно зависит не только от числа секций КО (или числа пар СКЛ), но и от добротности  $RC$ -нагрузки. При увеличении добротности в 10 раз (от 1,0 до 10,0) значение  $K_{ГУ}$  увеличивается в 5–7 раз как при четном, так и при нечетном числе пар СКЛ.

4. С ростом числа секций КО (или числа пар СКЛ) значение  $K_{ГУ}$  уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному.

5. С ростом добротности  $RC$ -нагрузки искажение формы кривой тока возрастает, поэтому для улучшения качества выходного тока АИ необходимо использовать пассивные и/или активные фильтры переменного тока.

6. При добротности  $RC$ -нагрузки  $Q_C = 0,1$  в случае неудачного включения перенапряжение на конденсаторной батарее может составить 70% и более, что необходимо учитывать при проектировании АИ как с ТПМП, так и с ТВМП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мыщик Г.С., Пикулин В.П., Шевякова И.Б. Анализ и оценка форм выходного напряжения преобразователей с амплитудно-импульсной модуляцией. — Электричество, 1979.
2. Мыщик Г.С., Шевякова И.Б. Аппроксимация моногармонического сигнала по минимуму искажений. — Электричество, 1983.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
4. Лутидзе Ш.И., Михневич Г.В., Тафт В.А. Введение в динамику синхронных машин и машинно-полупроводниковых систем. — М.: Наука, 1973.
5. Дмитриев Б.Ф., Рябенький В.М., Черевко А.И. и др. Судовые полупроводниковые преобразователи. — СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2011.
6. Черевко А.И. Анализ качества выходного напряжения инвертора с трансформатором с вращающимся магнитным полем и квантованием его ступеней по времени. — Судостроение, № 4.
7. Черевко А.И. Полупроводниковые преобразователи автономных электроустановок с трансформаторами вращающегося магнитного поля, обладающие высоким качеством выходного напряжения. — Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005.
8. Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование качества выходного напряжения и тока и энергетических соотношений автономных инверторов с ТВМП. — Электротехника, 2009, № 2.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — СПб: Изд-во «Лань», 2010.

10. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. — Л.: Судостроение, 1990.

[12.04.12]

*Авторы: Черевко Александр Иванович окончил в 1971 г. Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Электрооборудование судов». Докторскую диссертацию защитил в 2006 г. в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ). Профессор кафедры «Судовая электроэнергетика и электротехника» филиала «СЕВМАШВТУЗ» СПбГМТУ в Северодвинске.*

*Кузьмин Илья Юрьевич окончил в 2011 г. филиал «СЕВМАШВТУЗ» по специальности «Системы электроэнергетики и автоматизации судов». Инженер-конструктор ОАО СПО «АРКТИКА»; аспирант филиала «СЕВМАШВТУЗ» СПбГМТУ.*

*Музыка Михаил Михайлович окончил в 2000 г. филиал «СЕВМАШВТУЗ» СПбГМТУ. Кандидатскую диссертацию «Совершенствование полупроводниковых преобразователей на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями для автономных электротехнических комплексов» защитил в 2008 г. в СПбГМТУ. Доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах» филиала «СЕВМАШВТУЗ» СПбГМТУ.*

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru

