

## Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения

ГУСЕНКОВ А.В., ЛЕБЕДЕВ В.Д., СОКОЛОВ А.М., ШАДРИКОВ Т.Е., СТРАХОВ А.С.

*Актуальность создания и применения высоковольтных установок переменного тока с нетрадиционными параметрами токов и напряжений требует всесторонней технико-экономической оценки возможности и целесообразности использования таких устройств на практике. Практической реализации таких устройств должен предшествовать этап математического моделирования и расчета. Рассматривается методика применения частотного анализа для расчета электрических цепей с несинусоидальными переменными токами и напряжениями на примере работы высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей напряжения, при нормальных и аварийных режимах. Показано, что совместное использование теории комплексных чисел и разложения в ряд Фурье переменных несинусоидальных напряжений и токов представляет собой удобное и эффективное средство расчёта электрических цепей, источником питания которых является транзисторный преобразователь напряжения. В процессе циклического расчета с помощью специально разработанной программы в среде MathLab проводится построение расчетных осциллограмм напряжений и токов в заданных точках схемы с учетом различных факторов (изменение величины активных сопротивлений из-за скин-эффекта, расчет потерь в магнитопроводе и пр.). Предложен оригинальный способ учета изменения параметров транзисторов (их внутреннего сопротивления), входящих в силовой полупроводниковый преобразователь, в зависимости от частоты гармоники разложения в ряд Фурье. Выполнена экспериментальная проверка результатов вычислений.*

**Ключевые слова:** высоковольтная кабельная электропередача, переменное напряжение, повышенная частота, полупроводниковый преобразователь напряжения, частотный анализ, преобразование Фурье

Перспектива создания и применения высоковольтных кабельных электропередач и электрических сетей переменного тока с нетрадиционными параметрами токов и напряжений (повышенная или пониженная частота напряжения, трапецеидальная форма напряжения) [1, 2] требует определения показателей и характеристик нормальных и аварийных режимов работы подобных установок. В современной электроэнергетике для решения таких задач широко используется вычислительная техника с применением методов расчёта электрических цепей с синусоидальными токами на основе теории комплексных чисел. Однако для электроустановок с нетрадиционными параметрами переменных токов и напряжений эти методы малоприменимы, так как они предполагают синусоидальный характер изменения указанных величин во времени. Поэтому в настоящее время весьма актуальной становится задача разработки теории и методов расчёта электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения, в которых используются несинусоидальные переменные токи и напряжения.

Известно, что весьма удобным и эффективным способом расчёта электрических цепей при перио-

дических несинусоидальных напряжениях и токах является методика частотного анализа, когда воздействующее на электрическую цепь напряжение раскладывается в ряд Фурье [3, 4]:

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos(k\omega_1 t) + B_k \sin(k\omega_1 t)] \quad (1)$$

или

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(k\omega_1 t + \gamma_k), \quad (2)$$

где  $k$  – номер гармоники;  $\omega_1 = 2\pi / T = 2\pi f_1$  – угловая частота первой гармоники (частота воздействующего напряжения);  $U_0$  – нулевая гармоника (постоянная составляющая);  $A_k, B_k$  – постоянные коэффициенты определяются по формулам [3, 4]:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \dot{U}(t) \cos(k\omega_1 t) dt; \\ B_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \dot{U}(t) \sin(k\omega_1 t) dt; \end{aligned} \quad (3)$$

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \quad \gamma_k - \text{фаза } k\text{-й гармоники.}$$

Затем выполняется расчёт токов и напряжений электрической цепи для каждой гармоники в отдельности существующими методами расчёта электрических цепей для синусоидальных токов и напряжений. Напряжения и токи в различных точках цепи определяются при суммировании результатов расчёта по всем гармоникам.

В качестве объекта применения частотного анализа целесообразно рассмотреть вариант высоковольтной кабельной электропередачи, предназначенной для питания установки электротермической обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты [2]. Электрическая схема силовой части такой электропередачи приведена на рис. 1. Питание электропередачи осуществляется от шин постоянного напряжения, полученного посредством выпрямления переменного напряжения питающей сети 220/380 В, 50 Гц без применения сетевого трансформатора (выпрямитель на схеме не показан). Постоянное напряжение подается на транзисторный преобразователь напряжения ( $VT_1 - VT_4$ ), преобразующий постоянное напряжение в переменное повышенной частоты, осциллограмма которого близка к прямоугольной (рис. 2).

На выходе преобразователя установлен повышающий трансформатор  $Tr_1$ , высокое напряжение  $U_1$  вторичной обмотки которого подается в кабельную линию длиной  $l_k$ . В конце кабельной линии установлен понижающий трансформатор  $Tr_2$ , а напряжение его вторичной обмотки приложено к нагрузке  $R_H$  (например, это электрическое сопротивление железобетонного изделия при его электротермической обработке). В начале кабельной линии может быть установлен реактор  $L_p$  для компенсации зарядной мощности кабеля в режиме ми-

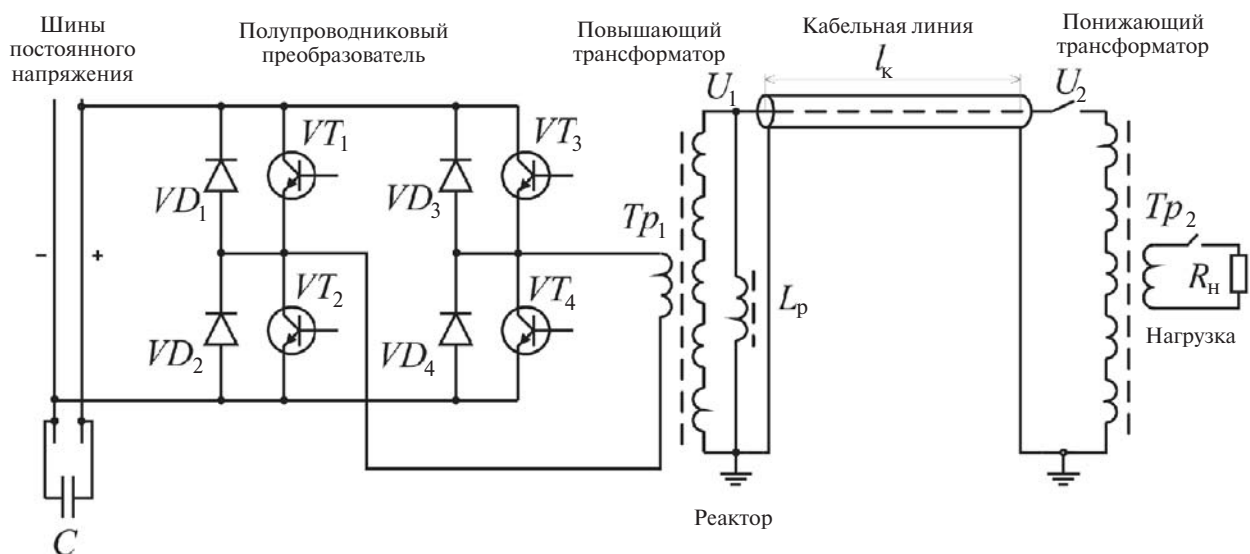
нимальных нагрузок и холостого хода. Выбор такого объекта (рис. 1) применения частотного анализа обусловлен не только его практической значимостью, но и наличием в электрической цепи реактивных элементов (индуктивность линии и емкость ее изоляции), которые могут варьироваться по значению в широких пределах и существенно влияют на режим работы установки, как подтвердили экспериментальные исследования [2], что делает его весьма удобным для проверки правильности расчетной методики.

Напряжение (рис. 2), получаемое с выхода транзисторного преобразователя (рис. 1), имеет разложение в ряд Фурье [5]:

$$U(t) = \frac{4U_m}{\rho} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(kw_1 t)}{k} = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(w_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t), \quad (4)$$

где  $U_k = 4U_m / \rho k$  – амплитуда  $k$ -й гармоники;  $f_k = kf_1 = k / T_1$  и  $w_k = 2\pi f_k$  – частота и угловая частота  $k$ -й гармоники;  $k = 1, 3, 5, 7, \dots$  – кратность гармоники (присутствуют только нечетные гармоники).

На рис. 3 представлена схема замещения исходной высоковольтной установки повышенной частоты. Особенностью этой схемы является то, что в составе традиционной Т-образной схемы замещения силовых трансформаторов наряду с активными и индуктивными элементами обязательно учитываются емкости обмоток относительно земли. Высоковольтная кабельная линия представлена П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами, что вполне допустимо из-за небольшой длины таких кабельных линий в производственных условиях (не более 50–100 м) [6]. Все элементы



**Рис. 1.** Электрическая схема высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты:  $C$  – емкость на шинах постоянного тока для сглаживания пульсаций;  $VT_1 - VT_4$ ,  $VD_1 - VD_4$  – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно;  $Tr_1$ ,  $Tr_2$  – повышающий и понижающий силовые трансформаторы;  $l_k$  – длина кабельной линии электропередачи;  $L_p$  – реактор

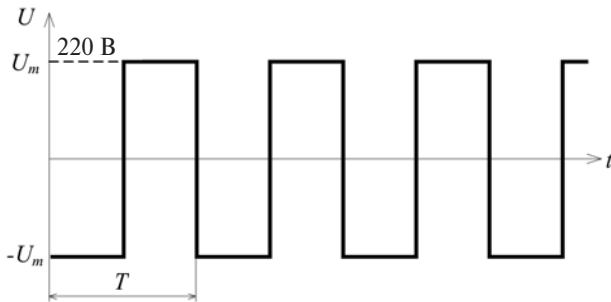


Рис. 2. Стилизованная осциллограмма и параметры напряжения на выходе транзисторного преобразователя напряжения  $U(t)$

схемы замещения приведены к первичной стороне силового трансформатора  $Tr_1$  через коэффициент трансформации  $K_{Tr}$ . На вход схемы замещения подается напряжение, соответствующее параметрам  $k$ -й гармоники разложения (4):

$$U_k(t) = U_k \sin(\omega_k t). \quad (5)$$

Другой важной особенностью схемы замещения рис. 3 является зависимость от частоты гармоники значений содержащихся в ней активных сопротивлений, обусловленная различными причинами. Например, значение активных сопротивлений обмоток силовых трансформаторов и жилы кабельной линии  $R_T$  и  $R_L$  может возрасти с увеличением частоты вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости [4, 7]. Как известно, это явление характеризуется эквивалентной глубиной проникновения электромагнитной волны в проводник при протекании по нему переменного тока высокой частоты [4]:

$$d_e = \sqrt{\frac{\gamma_M}{\rho k f_1 \mu_0}}, \quad (6)$$

где  $\gamma_M$  – удельное сопротивление материала проводника (меди);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость материала проводника (равна магнитной проницаемости вакуума).

Значения упомянутых выше активных сопротивлений в этом случае определяются по [6]:

$$R_{T(L)} = \frac{4lr_M}{Npd^2} \text{ при } d_e \geq \frac{d}{2}; \quad (7)$$

$$R_{T(L)} = \frac{lr_M}{Np(dd_e - d_e^2)} \text{ при } d_e < \frac{d}{2},$$

где  $l$  – длина провода обмотки трансформатора или длина кабеля  $l_k$ ;  $N^3$  – число отдельных проводников в составе провода обмотки или жилы кабеля;  $d$  – диаметр отдельного проводника.

Значение активного сопротивления, отражающего потери в магнитопроводе силового трансформатора, можно определить по [3]:

$$R_m = \frac{U_k^2}{P_{ck}}, \quad (8)$$

где мощность потерь в магнитопроводе для  $k$ -й гармоники в случае применения ферритовых сердечников находится с использованием соотношения [6]

$$P_{ck} = P_{уд} m = 1,64 \times 10^{-3} f_k^{1,31} B_k^{2,49} dV, \quad (9)$$

где  $m = dV$ ,  $d$  и  $V$  – масса, плотность материала и объём магнитопровода;  $P_{уд}$  – удельные потери в магнитопроводе на  $k$ -й гармонике;  $B_k$  – индукция магнитного поля в магнитопроводе для  $k$ -й гармоники определяется с использованием методики [6] по известному значению амплитуды напряжения этой гармоники  $U_k$  (4), обмоточным данным и параметрам магнитопровода силового трансформатора.

Наиболее сложной задачей является определение влияния частоты на значение внутреннего сопротивления  $Z_{вн}$  источника напряжения (рис. 3). Учитывая, что в схеме электропередачи рис. 3 к шинам постоянного напряжения подключена емкость  $C$ , предназначенная для сглаживания пульсаций, можно сделать вывод, что для всех гармоник выходного напряжения (рис. 2) значение  $Z_{вн}$  будет определяться сопротивлением транзисторов полупроводникового преобразователя, находящихся в открытом состоянии [7]. Известно, что параметры транзистора зависят от частоты переменного тока, протекающего через транзистор, что обусловлено,

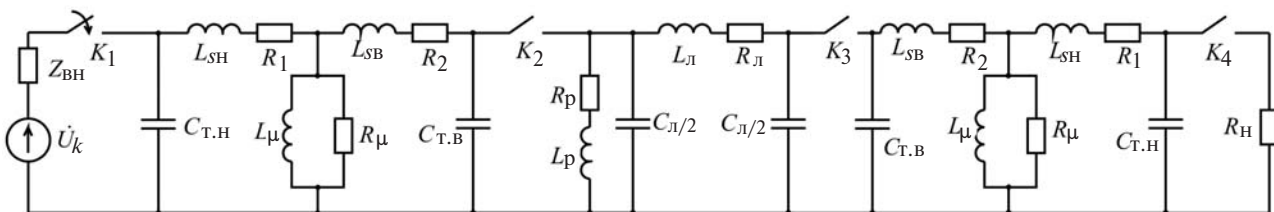


Рис. 3. Схема замещения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты (рис. 1):  $U_k$  – источник напряжения  $k$ -й гармоники;  $Z_{вн}$  – внутреннее сопротивление источника напряжения;  $C_{Т.Н}$  и  $C_{Т.В}$  – емкость обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно;  $L_{SH}$  и  $L_{SB}$  – индуктивность рассеивания обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно;  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно;  $R_P$  – активное сопротивление реактора;  $L_P$  – индуктивность реактора;  $C_L$ ,  $L_L$ ,  $R_L$  – емкость,

прежде всего, относительно медленным процессом диффузного распространения неосновных носителей заряда от эмиттерного к коллекторному переходу [8]. Это приводит к запаздыванию появления тока коллектора по отношению к току эмиттера, а при высоких частотах и к уменьшению амплитуды тока коллектора. Дополнительный вклад в ухудшение частотных показателей транзисторов вносят паразитные ёмкости [8]. Связь между током коллектора  $I_K$  и током эмиттера  $I_Э$  определяется соотношением [8]:

$$I_K = a I_Э, \tag{10}$$

где  $a$  – коэффициент передачи по току, при протекании постоянного тока и токов низкой частоты приближается к единице и получил название статического коэффициента  $a_0 < 1$ ; по мере увеличения частоты значение этого коэффициента постепенно уменьшается вплоть до нуля, сама зависимость описывается соотношением [8]:

$$a(\omega) = \frac{a_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_a}} = \frac{a_0}{1 + j \frac{f}{f_a}}, \tag{11}$$

где  $\omega_a = 2\pi f_a$  – предельная частота усиления по току (обычно указывается в паспортных характеристиках транзистора), при которой модуль коэффициента передачи уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со статическим значением:

$$\left| \frac{a(\omega_a)}{a_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}. \tag{12}$$

Важными паспортными параметрами силовых транзисторов являются также падение напряжения на переходе эмиттер–коллектор в открытом состоянии  $DU_T$  и значение постоянного тока коллектора

$$I_{K0} = a_0 I_Э, \tag{13}$$

при котором определяется это падение напряжения. Знание этих параметров позволяет определить значение сопротивления транзистора в открытом состоянии в статическом режиме, т.е. при протекании через транзистор постоянного тока или переменного низкой частоты ( $f \ll f_a$ ):

$$Z_{вн0} = \frac{DU_T}{I_{K0}}. \tag{14}$$

Значение  $DU_T$  определяется конструктивным выполнением транзистора, параметрами применяемых при этом полупроводниковых материалов, свойствами коллекторного и эмиттерного переходов [9]. Можно предположить, что значение этого параметра при изменении частоты протекающего

тока не будет изменяться, в то время как значение тока коллектора будет зависеть от частоты согласно (10) и (11). Эти соображения дают основание по аналогии с выражением (14) и с учетом соотношений (10), (11) и (13) определить значение внутреннего сопротивления транзистора при произвольном значении частоты следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_{вн}(\omega) &= \frac{DU_T}{I_K} = \frac{DU_T}{a(\omega)I_Э} = \frac{DU_T a_0}{a_0 I_Э} \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_a}} \\ &= Z_{вн0} \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_a}} \end{aligned} \tag{15}$$

Применение комплексной формы записи для выражений (11) и (15) отражает запаздывание тока коллектора, т.е. его сдвиг по фазе по отношению к току эмиттера при высоких частотах [8]. Однако такая форма описания внутреннего сопротивления транзистора не соответствует физическому смыслу применения теории комплексных чисел для расчета цепей переменного тока, когда мнимая часть комплексного выражения отражает реактивные параметры (емкостное и индуктивное сопротивление, реактивная мощность) [3]. Транзистор не содержит реактивных элементов, способных повлиять на режим работы электрической цепи (рис. 3), а протекание через него тока независимо от сдвига по фазе сопровождается потерями энергии. Использование (15) в расчетах может привести к серьезным ошибкам. Высказанные соображения дают основание полагать, что внутреннее сопротивление источника питания в схеме замещения (рис. 3) должно быть представлено активным сопротивлением, значение которого равно модулю комплексного выражения (15). Тогда, учитывая, что в соответствии с принципом действия мостового преобразователя (рис. 1) в каждый момент времени последовательно с нагрузкой включены два транзистора [7, 8], внутреннее сопротивление источника (рис. 3) для  $k$ -й гармоники разложения (4) определится по формуле

$$\begin{aligned} Z_{внк} &= 2 |Z_{вн}(\omega_k)| = 2 \left| \frac{DU_T a_0}{a_0 I_Э} \frac{1}{1 + j \frac{\omega_k}{\omega_a}} \right| \\ &= 2 Z_{вн0} \sqrt{1 + \left( \frac{\omega_k}{\omega_a} \right)^2}. \end{aligned} \tag{16}$$

Сопротивления реактивных элементов схемы замещения (рис. 3) для  $k$ -й гармоники определяются известными соотношениями [4]:

$$\begin{aligned} jX_{Li} &= j\omega_k L_i = j2\pi k f_1 L_i; \\ jX_{Ci} &= \frac{1}{j\omega_k C_i} = \frac{1}{j2\pi k f_1 C_i}, \end{aligned} \tag{17}$$

где  $i$  – индекс соответствующего элемента этой схемы.

Приведенные соотношения позволили выполнить расчеты изменения токов и напряжений во времени схемы рис. 3 для различных режимов ее работы. Вычисления проводились с помощью специально разработанной программы в среде MathLab для параметров высоковольтной кабельной электропередачи, результаты испытания которой представлены в [2]. При этом было использовано разложение воздействующего напряжения (4), в котором учитывались гармоники с кратностью до  $k_{max} = 5999$ , что позволило с высокой точностью воспроизвести требуемую форму этого напряжения (рис. 2) и обеспечить достоверность расчётов. В расчетной программе организовано циклическое изменение по времени  $t$  от 0 до  $4T_1$  с шагом, который, как минимум, в 100 раз меньше периода колебания наивысшей гармоники (4). В каждый момент времени проводится расчет токов и напряжений схемы рис. 3 в комплексной форме для всех гармоник разложения (4) с использованием традиционной процедуры, представленной в таблице. В этом случае осуществляется последовательное преобразование исходной схемы (рис. 3) к простейшему виду и наоборот, что упрощает программирование, ускоряет вычисления, делает более удобным пошаговый анализ протекающих процессов, а также обеспечивает наглядность расчета в случае использования методики в учебном процессе. После преобразования из комплексной формы в тригономет-

рическую проводилось построение графиков изменения во времени напряжений и токов с использованием выражений [4]:

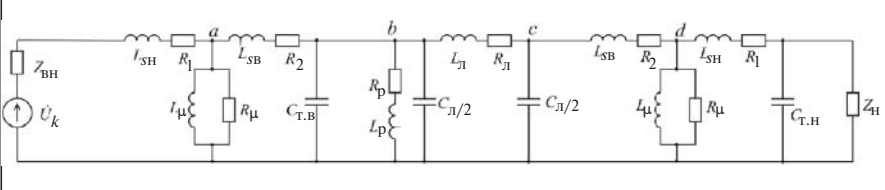
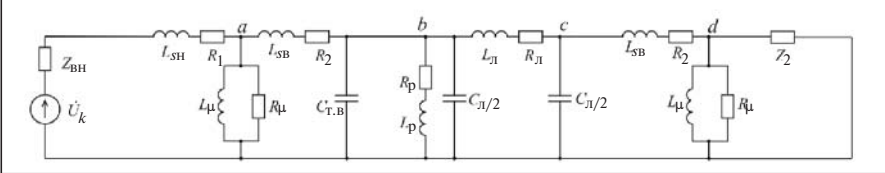
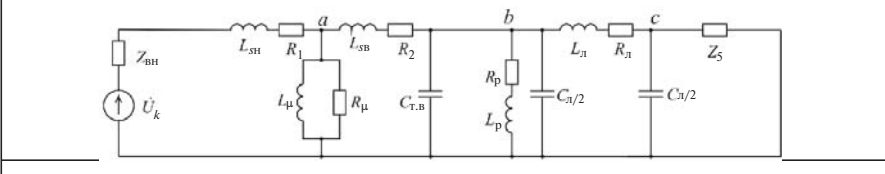
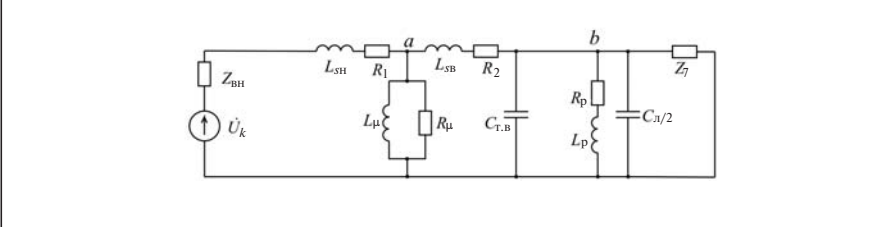
$$U_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \hat{a}_{kj} U_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + j_{kj});$$

$$I_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \hat{a}_{kj} I_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + f_{kj}),$$
(18)

где  $j$  – индекс соответствующего напряжения или тока в схеме рис. 3.

На рис. 4–6 представлены опытные и расчетные осциллограммы высокого напряжения в конце кабельной линии под нагрузкой, при значении передаваемой мощности около 1 кВт (ключи  $K_1$ – $K_4$  замкнуты – рис. 3) и в режиме холостого хода (ключи  $K_3$  и  $K_4$  – разомкнуты), соответственно.

На рис. 4 представлены также расчётные осциллограммы воздействующего напряжения  $U(t)$ , в которых благодаря большому числу гармоник разложения в ряд Фурье ( $N_k = 3000$ ) практически полностью удалось избавиться от эффекта Гиббса [4] (прослеживается в виде небольших кратковременных всплесков напряжения в момент изменения полярности напряжения). Анализ полученных результатов дает основание для вывода о хорошем согласовании результатов расчета и эксперимента за исключением одного обстоятельства. Амплитуда высокочастотной составляющей кривой напряже-

Схема замещения	Расчетные формулы
	$Z_1 = \frac{-jX_{CT.Hk} Z_m}{-jX_{CT.Hk} + Z_H}$
	$Z_2 = Z_1 + jX_{SHk} + R_1; \quad Z_3 = \frac{jX_m R_m}{jX_m + R_m};$ $Z_4 = \frac{Z_3 Z_2}{Z_3 + Z_2}$
	$Z_5 = Z_4 + j \frac{X_{SBk}}{k_m^2} + \frac{R_2}{k_m^2}$
	$Z_7 = Z_6 + j \frac{X_{lk}}{k_m^2} + \frac{R_l}{k_m^2},$ $- j \frac{X_{Clk}}{k_m^2} Z_5$ <p>где <math>Z_6 = \frac{X_{Clk}}{-j \frac{X_{Clk}}{k_m^2} + Z_5}</math></p>

	$Z_9 = \frac{\frac{\infty R_p}{C_m k_m^2} + j \frac{X_{pk}}{k_m^2} \frac{\ddot{\omega}}{\ddot{\omega}} Z_8}{\frac{R_p}{k_m^2} + j \frac{X_{pk}}{k_m^2} + Z_8} - j \frac{X_{Cлk}}{k_m^2} Z_7$ <p>где <math>Z_8 = \frac{X_{Cлk}}{k_m^2} + Z_7</math></p>
	$Z_{11} = Z_{10} + j \frac{X_{SBk}}{k_m^2} + \frac{R_2}{k_m^2} - j \frac{X_{CB.T}}{k_m^2} Z_9$ <p>где <math>Z_{10} = \frac{X_{CB.T}}{k_m^2} + Z_9</math></p>
	$Z_{13} = Z_{12} + jX_{шк} + R_1 + R_{yn}$ <p>где <math>Z_{12} = \frac{Z_3 Z_{11}}{Z_3 + Z_{11}}; I_1 = \frac{E}{Z_{13}}</math></p>
	$U_a = I_1 Z_{12};$ $I_2 = \frac{U_a}{Z_{11}}; U_b = I_2 Z_{10}$
	$I_3 = \frac{U_b}{Z_7}; U_c = I_3 Z_6$
	$I_4 = \frac{U_c}{Z_5}; U_d = I_4 Z_4$
	$I_5 = \frac{U_d}{Z_2}; U_n = I_5 Z_1$

ния по результатам расчёта имеет большее значение, чем значение, полученное в экспериментах. Требуется проведение с использованием рассмотренной методики дополнительных исследований влияния различных вариантов представления воздействующего напряжения и разложения его в ряд Фурье на результаты расчета.

Расчётные зависимости (рис. 6), полученные в предположении неизменного значения активных сопротивлений схемы замещения (рис. 3), соответствующей низкой частоте, демонстрируют существенное расхождение с результатами эксперимента (рис. 4 и 5). Это свидетельствует о необходимости обязательно учитывать в ходе применения частот-

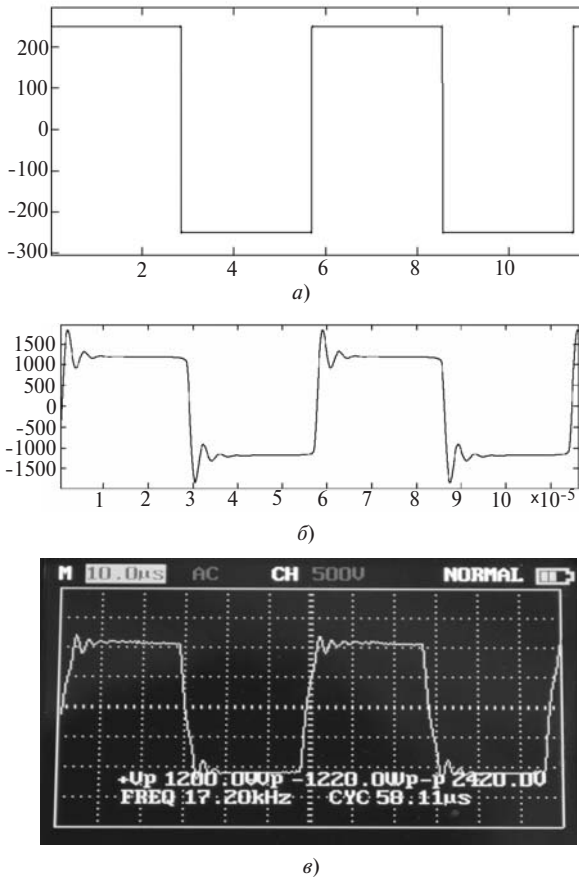


Рис. 4. Расчётные (а) и (б) и экспериментальная (в) осциллограммы напряжения при работе под нагрузкой (1 кВт); а – возмущающее напряжение  $U(t)$ , б и в – в конце линии (точка с – см. таблицу)

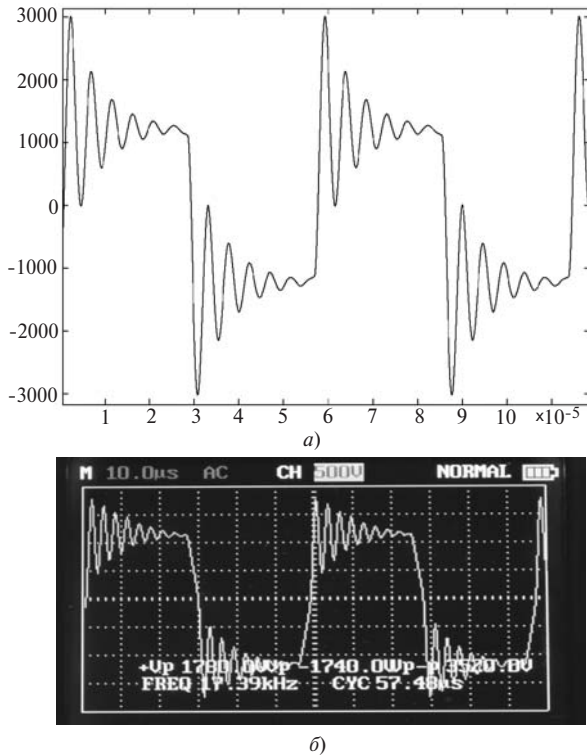


Рис. 5. Расчётная (а) и экспериментальная (б) осциллограммы напряжения в конце линии (точка с – см. таблицу) в режиме холостого хода

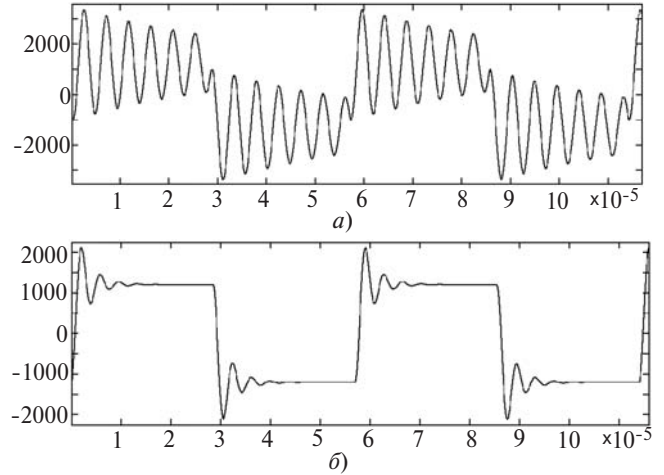


Рис. 6. Расчётные осциллограммы напряжения в конце линии (точка с – см. таблицу) в режиме холостого хода (а) и под нагрузкой (б) в случае, если не учитывается влияние частоты на значение активных сопротивлений электрической схемы (рис. 3)

ного анализа зависимость активных сопротивлений от частоты в соответствии с соотношениями (6)–(8), (16).

**Выводы.** 1. Частотный анализ с использованием разложения несинусоидальных токов и напряжений в ряд Фурье является эффективным и удобным инструментом для теоретических исследований процессов в электрических цепях (например электропередачах и электрических сетях) с нетрадиционными параметрами переменных токов и напряжений, выполненных на основе силовой полупроводниковой преобразовательной техники.

2. При использовании разложения в ряд Фурье несинусоидальных токов и напряжений в процессе расчета электрических цепей с полупроводниковыми преобразователями напряжения необходимо обязательно учитывать влияние частоты гармоник на значение активных сопротивлений и внутреннее сопротивление силовых полупроводниковых элементов (транзисторов) согласно методике, рассмотренной в статье.

3. Для повышения точности вычислений и расширения возможностей предложенной методики требуется продолжение исследований по применению частотного анализа на основе разложения в ряд Фурье для расчета электрических цепей, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения [10–12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики. – Энергетик, 2014, № 3, с. 46–49; № 4, с. 15–18.
2. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. О возможности и целесообразности физического моделирования электропередач с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений. – Энергетик, 2015, № 4, с. 29–33.

3. **Башарин С.А., Федоров В.В.** Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля: Учебное пос. для высш. учеб. заведений. — М.: Издат. центр «Академия», 2004, 304 с.

4. **Осипов Ю.М.** Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей. Учеб. пособие по курсам электротехники и ТОЭ. Ч. 2. — СПб: С. Петербургский ин-т точной механики и оптики (ТУ), 2002, 99 с.

5. **Александров Г.Н.** Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. — М.: Знак, 1998, 271 с.

6. **Шадриков Т.Е., Соколов А.М.** Методика оценки технико-экономических показателей высоковольтных силовых трансформаторов непромышленной частоты. — Материалы IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2014», т. 3, ч. 2, 206 с.

7. **Розанов Ю.К.** Основы силовой электроники. — М.: Энергоатомиздат, 1992, 296 с.

8. **Гуртов В.А.** Твердотельная электроника: Учебное пос. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2004, 312 с.

9. **Левченко А.В.** Моделирование параллельной работы двух статических преобразователей частоты, включенных по расщепленной схеме с уравнивающим реактором. — Электричество, 2014, № 8, с. 44—51.

10. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона. — Электричество, 2014, № 11, с. 58—62.

11. **Васин И.М., Махонин С.В., Скворцов Б.А.** Способ формирования высокого напряжения матричного каскадного преобразователя частоты. — Электричество, 2012, № 9, с. 51—55.

[27.07.15]

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 4–12.*

## Features of application of frequency analysis in the calculation of electric circuits with transistor voltage converters

**GUSENKOV Aleksei Vasil'yevich** (Ivanovo State Power Engineering University (ISPEU), Ivanovo, Russia)— Vice-Rector, Head of the Department in the ISPEU, Cand. Sci. (Eng.)

**LEBEDEV Vladimir Dmitriyevich** (ISPEU, Ivanovo, Russia) — Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**SOKOLOV Aleksandr Mikhailovich** (ISPEU, Ivanovo, Russia) — Associate Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**SHADRIKOV Timofei Yevgyen'yevich** (ISPEU, Ivanovo, Russia) — Post-Graduate student

**STRAKHOV Aleksandr Stanislavovich** (ISPEU, Ivanovo, Russia) — Master

*The actuality of the creation and application of high-voltage AC installations with non-traditional parameters of currents and voltages requires a comprehensive technical and economic evaluation of the possibilities and the feasibility of using these devices in practice. Mathematical modeling and calculation of such power devices is necessary condition. The technique of applying frequency analysis to the calculation of electric circuits with non-sinusoidal alternating currents and voltages of high voltage power cable high frequency, which made on the basis of semiconductor converters of the voltage. during normal and emergency modes of operation is considered. It is shown that the combined use of the theory of complex numbers and the expansion in a Fourier series variables are non-sinusoidal voltages and currents is a convenient and effective means of calculation of electric circuits, with a power transistor voltage Converter. During cyclic calculation with the help of specially designed programs in the environment of Mat Lab builds the calculated waveforms of voltages and currents at predetermined points of the circuit taking into account various factors (the change in resistance due to skin effect, the calculation of losses in the magnetic core, etc.). The original way of accounting for changes in the parameters of transistors (their internal*

*А в т о р ы : Гусенков Алексей Васильевич окончил Ивановский энергетический институт в 1984 г. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка комплекса средств селективной сигнализации однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ» в Новочеркасском государственном техническом университете. Проректор по учебной работе, заведующий кафедрой Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ).*

*Лебедев Владимир Дмитриевич окончил Ивановский энергетический университет в 1993 г. В 1997 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка магнитотранзисторных датчиков тока для систем защиты и измерений» в ИГЭУ. Заведующий кафедрой ИГЭУ.*

*Соколов Александр Михайлович окончил Ивановский энергетический институт в 1973 г. В 2012 г. защитил докторскую диссертацию «Научные основы процессов электротепловой обработки композиционных материалов в производстве конструкционного бетона» в Ивановском государственном архитектурно-строительном университете. Доцент ИГЭУ.*

*Шадриков Тимофей Евгеньевич окончил электро-энергетический факультет ИГЭУ в 2013 г. Аспирант ИГЭУ.*

*Страхов Александр Станиславович — магистрант ИГЭУ.*



resistance) included in the semiconductor power Converter, depending on the frequency of the harmonic decomposition of the Fourier series, is suggested. Experimental verification of calculated results is made too.

**Key words:** high voltage, power cable transmission, AC voltage, increased frequency, semiconductor voltage converter, frequency analysis, fourier transform

---

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Yu.N., Sokolov A.M. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2014, No. 3, pp. 46–49, No. 4, pp. 15–18.
2. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2015, No. 4, pp. 29–33.
3. Basharin S.A., Fedorov V.V. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Teoriya elektricheskikh tsepei i elektromagnitnogo polya.* (Theoretical foundations of electrical engineering. Theory electrical circuits and electromagnetic field). Moscow, Publ. Centre «Akademiya», 2004, 304 p.
4. Osipov Yu.M. *Chastotnyi i vremennoi analiz statsionarnykh i perekhodnykh kharakteristik lineinykh elektricheskikh tsepei. Ch. 2* (Frequency- and Time-Domain Analysis of Steady-State and Transient Characteristics of Linear Electric Circuits. A Handbook on the Courses of Electrical Engineering and Theoretical Principles of Electrical Engineering. Part 2. St. Petersburg Institute (Technical University) of Fine Mechanics and Optics).
5. Aleksandrov G.N. *Peredacha elektricheskoi energii peremennym tokom. 2-oe izd.* (Electric power transmission A.C. 2nd Edit.). Moscow, Publ. «Znack», 1998, 271 p.
6. Shadrikov T.Ye., Sokolov A.M. *Metodika otsenki tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei vysokovol'tnykh silovykh transformatorov nepromyshlennoi chastity* (A Procedure for Evaluating the Technical-Economic Indicators of High-Voltage Power Transformers for Noncommercial Frequency/ in Proceedings of the 9th International Scientific-Technical Conference of Students, Post-Graduate Students, and Young Scientists «Energy 2014»). Proc. IX Intern. Research and Tekhnical Conf. of Students, Ph.D. Students and Young Scientists «Energy 2014» vol. 3, ch. 2, 206 p.
7. Rozanov Yu.K. *Osnovy silovoi elektroniki* (Fundamentals of Power Electronics). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1992, 296 p.
8. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika* (Solid-State Electronic). – Petrozavodsk, Publ. Petrosavodsk State University, 2014, 312 p.
9. Levchenko A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 44–51.
10. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V., Mikheyev D.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 11, pp. 58–62.
11. Vasin I.M., Makhonin S.V., Skvortsov B.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, pp. 51–55.