

Спектральный анализ электродвижущей силы электроустановки повышенной частоты

ГУСЕНКОВ А.В., ЛЕБЕДЕВ В.Д., СОКОЛОВ А.М., ШАДРИКОВ Т.Е., ТАНКОЙ АБЕЛЬ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению спектрального состава ЭДС полупроводникового преобразователя напряжения в электротехническом комплексе повышенной частоты (ЭТКПЧ), предназначенном для создания локальных систем электропитания электротехнологических установок, при расчетах токов и напряжений с применением частотного анализа. Проведено исследование спектрального состава передаваемой активной мощности. Выполнено сравнение опытных и расчетных значений мощности, выделяемой в нагрузку, КПД ЭТКПЧ и осциллограмм напряжения в высоковольтной кабельной линии ЭТКПЧ. Представлена методика определения значений амплитуды гармоник, погрешностей вычисления технических параметров ЭТКПЧ при заданном числе гармоник. Установлено, что для достоверного определения при расчете электрических параметров и характеристик такого устройства необходимо использовать вариант представления осциллограммы ЭДС в виде «трапеции» с паузой. Получено также, что при передаче активной мощности с использованием несинусоидальных токов и напряжений на первую гармонику приходится не менее 90% ее значения, а для расчетного определения этого параметра с погрешностью менее 0,0001% требуется учитывать первые 30 гармоник.

Ключевые слова: кабельная линия, переменное напряжение, преобразователь напряжения, повышенная частота, частотный анализ

Теоретические и экспериментальные исследования [1–3] однозначно подтвердили техническую возможность создания и высокие показатели энергетической эффективности высоковольтных кабельных ЭТКПЧ, предназначенных для построения локальных систем электроснабжения различных потребителей. Целесообразность создания таких установок была теоретически обоснована в [4]. При этом была предложена методика расчета электрических характеристик и параметров установившихся режимов работы этих устройств, основанная на применении принципов частотного анализа с использованием разложения Фурье [2]. Однако в

процессе практического использования этой методики было установлено, что нередко наблюдаются заметные расхождения результатов расчета и эксперимента. Это обстоятельство явилось причиной проведения дополнительных исследований по определению влияния различных факторов на результаты вычислений в целях дальнейшего уточнения и развития расчетной методики. Такие исследования удобно осуществить на примере высоковольтного кабельного ЭТКПЧ, выполненного на основе полупроводникового преобразователя напряжения, который был рассмотрен в [2] и электрическая схема которого представлена на рис. 1. При этом

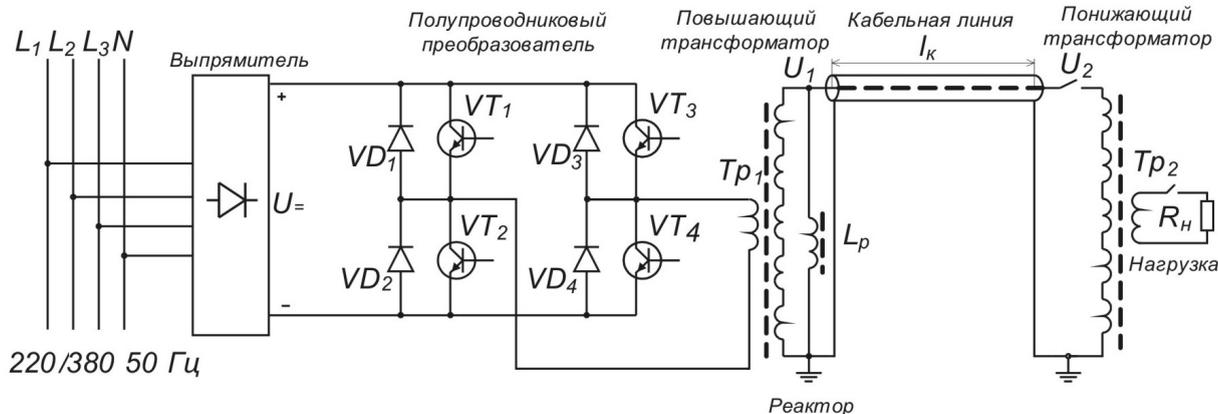


Рис. 1. Электрическая схема ЭТКПЧ: VT1–VT4, VD1–VD4 – силовые транзисторы IGBT типа IRG4PSH71UDPBF и диоды полупроводникового преобразователя соответственно (встроены в транзисторы); T_{p1} , T_{p2} – повышающий и понижающий силовые трансформаторы (коэффициент трансформации $K_T = 5$); l_k – длина кабельной линии электропередачи; L_p – реактор; R_n – сопротивление нагрузки (один, два или три параллельно включенных нагревательных элемента мощностью ≈ 1 кВт каждый)

предполагается, что наиболее перспективным направлением широкого применения таких ЭТКПЧ является электроснабжение установок электротепловой обработки железобетонных изделий на предприятиях строительной отрасли [5]. Это означает, что нагрузка (обрабатываемое изделие) может быть представлена чисто активным сопротивлением R_H (рис. 1) при значении потребляемой мощности 0,5–6 кВт, а характерные значения длины кабельной линии l_k будут колебаться в пределах от 10 до 100 м [5]. Причем кабельная линия выполняется из коаксиального кабеля типа КВСП-М, который специально предназначен для передачи электрической энергии переменным током на высоком напряжении (2 кВ) и повышенной частоте [3].

При использовании этой методики ЭДС источника (преобразователя напряжения повышенной частоты) $U(t)$, осциллограмма которой близка к прямоугольной форме (рис. 2), может быть представлена как сумма гармоник [2]:

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t), \quad (1)$$

где U_k – амплитуда k -й гармоники; $f_k = kf_1 = \frac{k}{T_1}$ и

$\omega_k = 2\pi f_k$ – частота и угловая частота k -й гармоники; $k = 1, 3, 5, \dots$ – кратность гармоники (т.е. спектр дискретный и присутствуют только нечетные гармоники, так как кривая напряжения симметрична относительно оси времени [2]); f_1 – частота первой гармоники (частота воздействующего напряжения).

Затем после представления рассматриваемого устройства (рис. 1) эквивалентной схемой замещения, в которой отражаются как основные, так и паразитные параметры элементов этого устройства, а для описания кабельной линии используются уравнения длинной линии [2, 3, 6], поочередно для ка-

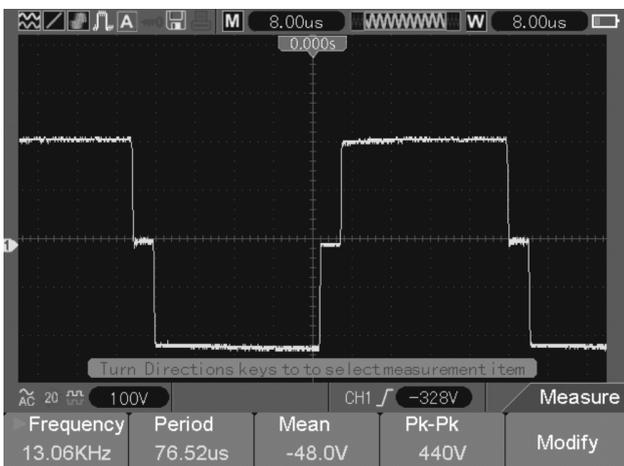


Рис. 2. Характерная экспериментальная осциллограмма ЭДС транзисторного преобразователя напряжения

ждой гармоники выполняется расчет амплитудных значений напряжений $U_{k,j}$ и токов $I_{k,j}$ в элементах этой схемы (j – номер элемента) существующими методами ТОЭ для синусоидальных токов и напряжений. После преобразования из комплексной формы в тригонометрическую проводилось построение графиков изменения во времени напряжений и токов во времени (расчетных осциллограмм) с использованием выражений [2, 3, 6]:

$$U_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} U_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + \varphi_{kj}); \quad (2)$$

$$I_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} I_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + \phi_{kj}),$$

где j – индекс соответствующего напряжения или тока в рассматриваемой точке схемы замещения; φ_{kj} и ϕ_{kj} – фаза напряжения и тока в этой точке.

Результаты расчетов также позволяют определить активную мощность, передаваемую в нагрузку, соответствующую каждой гармонике по формуле [3, 6–8]:

$$P_{kH} = \frac{U_{kH}^2}{2R_H}, \quad (3)$$

где U_{kH} – амплитуда напряжения k -й гармоники на сопротивлении нагрузки.

Полная мощность, потребляемая нагрузкой, определяется посредством суммирования мощности всех гармоник [3, 6–8]:

$$P_H = \sum_{k=1}^{\infty} P_{kH} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_{kH}^2}{2R_H}. \quad (4)$$

Опыт применения расчетной методики [2] показал, что при хорошем качественном согласовании результатов расчета и эксперимента, выполненного с использованием действующего макета высоковольтного электротехнического комплекса (рис. 1) повышенной частоты [1], наблюдаются заметные расхождения в количественных показателях. Анализ этих результатов позволил высказать предположение, что принятая в расчетах [2] осциллограмма ЭДС источника напряжения (транзисторного преобразователя напряжения) в виде периодического сигнала с осциллограммой прямоугольной формы представляет собой чрезмерно упрощенное, идеализированное, представление реальной осциллограммы (рис. 2).

Для определения влияния способа представления ЭДС в расчетах по методике [2] были проведены сравнительные вычисления с использованием

трех вариантов описания кривой изменения ЭДС во времени, представленные на рис. 3. Аналитическое выражение для расчета амплитуды k -й гармоники по первому варианту (рис. 3,а) из [2, 7]:

$$U_k = 4U_m / \pi k. \quad (5)$$

Второй вариант (рис. 3,б) качественно лучше соответствует реальной осциллограмме (рис. 2), а также имеет известное [7] и достаточно простое аналитическое выражение для определения амплитуды k -й гармоники разложения Фурье:

$$U_k = \frac{4U_m}{\pi \omega_1 (2t_1 + t_2)} \frac{\sin[k\omega_1 (2t_1 + t_2)]}{k^2}, \quad (6)$$

где t_1 и t_2 – временные параметры (рис. 3,в).

Для кривой трапецидальной формы с паузой (рис. 3,в) готового аналитического выражения не существует. Поэтому при выполнении вычислений в программном комплексе Matlab расчет амплитуды каждой гармоники проводился численным интегрированием с использованием общего выражения [7] для определения амплитуды гармоники разложения Фурье:

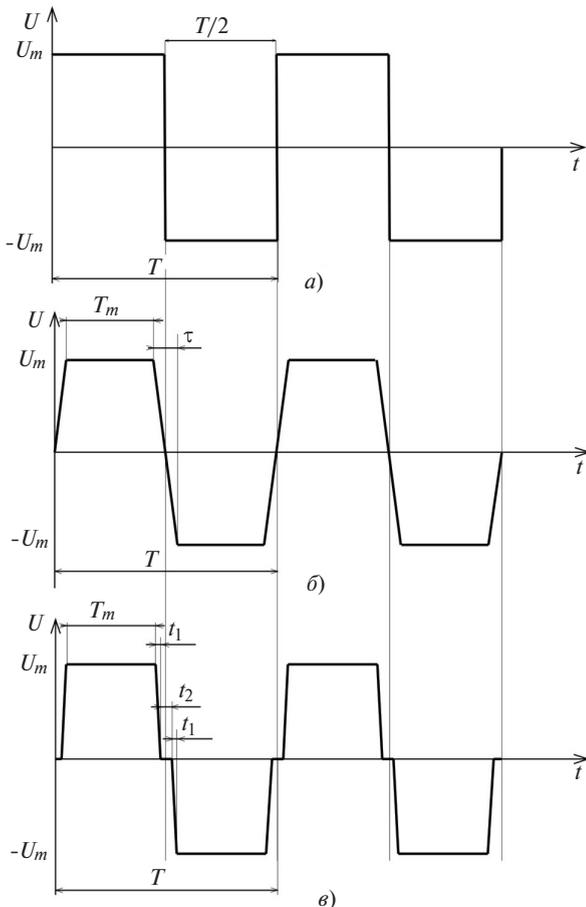


Рис. 3. Стилизованная осциллограмма и параметры ЭДС трансформатора напряжения $U(t)$: а – осциллограмма прямоугольной формы; б – трапецидальной, $T_m = (T - 2\tau)/2$; в – «трапеция с паузой», $T_m = (T - 2\tau)/2$

$$\begin{aligned}
 U_k &= \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(k\omega_1 t) dt = \\
 &= 2U_m f_1 \int_0^{t_2/2} \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{t_2/2}^{t_2/2+t_1} \left(\frac{t - \frac{t_2}{2}}{t_1} \right) \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{t_2/2+t_1}^{t_2/2+t_1+t_m} \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{t_2/2+2t_1}^{t_2/2+2t_1+t_m} \left(\frac{1 - \left(t - \left(t_1 + \frac{t_2}{2} + t_m \right) \right)}{t_1} \right) \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{t_2/2+2t_1+t_m}^{3t_2/2+2t_1+t_m} \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{3t_2/2+2t_1+t_m}^{3t_2/2+3t_1+t_m} \left(-1 \frac{t - \left(2t_1 + \frac{3t_2}{2} + t_m \right)}{t_1} \right) \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{3t_2/2+3t_1+t_m}^{3t_2/2+3t_1+2t_m} (-1) \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{3t_2/2+4t_1+2t_m}^{3t_2/2+4t_1+2t_m} \left(\frac{t - 3t_1 - \frac{3t_2}{2} - 2t_m}{t_1} - 1 \right) \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt + \\
 &+ \int_{3t_2/2+4t_1+2t_m}^{t_2+4t_1+2t_m} \sin(2\pi(2k-1)f_1 t) dt. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Формула (7) получена, как интеграл функции $U(t)$ вида рис. 3,в, имеющей точки разрыва [9]. Вполне очевидно, что последний вариант осциллограммы (рис. 3,в) в наилучшей степени соответствует реальной осциллограмме ЭДС (рис. 2). Однако его применение на практике осложняется необходимостью выполнения расчетов с помощью формулы (7), что приводит к заметному снижению производительности вычислений.

Формулы (5)–(7) позволяют проанализировать гармонический состав ЭДС полупроводникового преобразователя напряжения для различных вари-

антов представления реальной осциллограммы (рис. 3). Результаты расчета амплитуды гармоник (т.е. спектр сигнала) при частоте переменного напряжения на выходе преобразователя (частоте первой гармоники) $f_1 = 13000$ Гц, амплитуде ЭДС $U_m = 235$ В и $N_k = 3000$ (число учитываемых гармоник при вычислениях, позволяющее устранить эффект Гиббса [2]) в абсолютных и относительных значениях представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 позволяет сделать вывод, что почти отсутствует различие между вариантами осциллограммы ЭДС (рис. 3) по амплитуде первой гармоники, значение которой заметно (на 27–29%) превышает амплитуду ЭДС. Однако, начиная со следующей (3-й) гармоники и далее, различие между вариантами начинает нарастать и лишь после 31-й гармоники, когда амплитуда гармоник становится меньше 1–2% амплитуды ЭДС, происходит сближение спектров. При этом максимально быстрое уменьшение амплитуды гармоники с увеличением ее кратности наблюдается для трапецидальной осциллограммы ЭДС (рис. 3,б), а в случае осциллограммы прямоугольной формы (рис. 3,а)

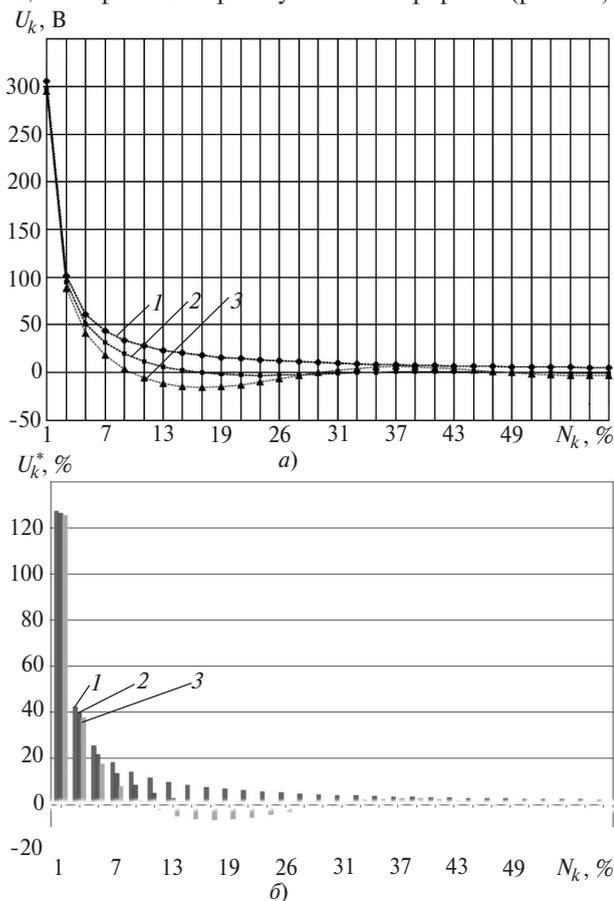


Рис. 4. Спектр ЭДС преобразователя (т.е. зависимость амплитуды гармоники U_k от ее кратности): а – в абсолютных значениях для различных вариантов осциллограммы ЭДС (рис. 3); б – в относительных значениях: $U_k^* = (U_k / U_m) 100\%$; 1 – осциллограмма прямоугольной формы; 2 – трапецидальной; 3 – «трапеция с паузой»

амплитуда высших гармоник имеет заметно большее значение во всем рассмотренном диапазоне частот.

Одновременно следует отметить, что гармоники, ближайшие к основной, независимо от вида осциллограммы вносят значительный вклад в формирование кривой ЭДС. Например, 3-я гармоника имеет амплитуду около 40% амплитудного значения ЭДС; 5-я – 18–25%, 7-я – 10–19% (рис. 4,б).

Знание спектрального состава ЭДС (рис. 4) позволяет при расчете токов и напряжений в различных точках ЭТКПЧ (рис. 1) по упомянутой методике [2] и с помощью формул (3) и (4) определить спектральный состав мощности, передаваемой в нагрузку. Вполне очевидно, что такая характеристика представляет наибольший практический интерес, так как активная мощность – важнейший параметр установившегося режима работы любой системы электроснабжения [10,11]. Безусловно, при изучении режимов работы высоковольтных ЭТКПЧ (рис. 1) большое значение имеет знание не только активной и реактивной, но и полной мощности, что является темой отдельных исследований.

На рис. 5 представлены зависимости активной мощности, передаваемой в нагрузку на соответствующей гармонике, от кратности гармоники в относительных значениях:

$$P_{кН}^* = \frac{P_{кН}}{P_H} 100\%. \quad (8)$$

Сравнение рис. 4,б и 5 позволяет сделать вывод, что спектральная характеристика мощности (рис. 5) отличается заметно большей неравномерностью, чем аналогичная характеристика ЭДС

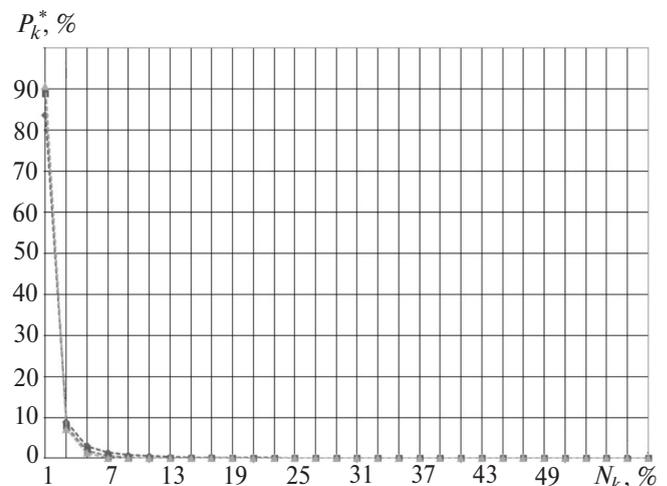


Рис. 5. Зависимость относительного значения активной мощности, передаваемой в нагрузку на отдельной гармонике, от кратности этой гармоники при $f_1 = 13000$ Гц; $U_m = 235$ В; $I_k = 30$ м; $N_k = 3000$ (рис. 1) для трех видов осциллограмм, упомянутых ранее (см. рис. 3)

(рис. 4,б). Например, доля мощности, соответствующая первой гармонике, мало зависит от вида осциллограммы ЭДС (рис. 3) и составляет 84–90% полной мощности (наибольшее значение соответствует кривой рис. 3,в, наименьшее – рис. 3,а, а оставшиеся 10–16% приходятся на все остальные гармоники. Одновременно, заметно меньше по сравнению с амплитудой гармоник ЭДС (рис. 4) различаются значения мощности высших гармоник, соответствующих различным вариантам осциллограммы ЭДС (рис. 5). Такой результат объясняется тем, что показатели активной мощности определяются как в абсолютных, так и в относительных значениях пропорционально не амплитудному значению гармоник напряжения, а квадрату этого значения согласно (3) и (4).

Для определения минимально необходимого числа учитываемых гармоник для достоверного расчета значений активной мощности в установках повышенной частоты (рис. 1) были получены зависимости относительного значения суммарной активной мощности от числа учитываемых гармоник (см. рис. 6):

$$P_{\Sigma H}^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} P_{kH}}{P_H} \cdot 100\% \quad (9)$$

Эти зависимости свидетельствуют о заметном влиянии формы осциллограммы ЭДС (рис. 3), принятой в расчетах, на спектральный состав суммарной мощности. Причем, если характеристики для вариантов рис. 3,б и в достаточно близки, то для случая рис. 3,а полученная зависимость заметно отличается от первых двух. В целях более точной оценки необходимого числа учитываемых гармоник в ходе расчетов определялось значение по-

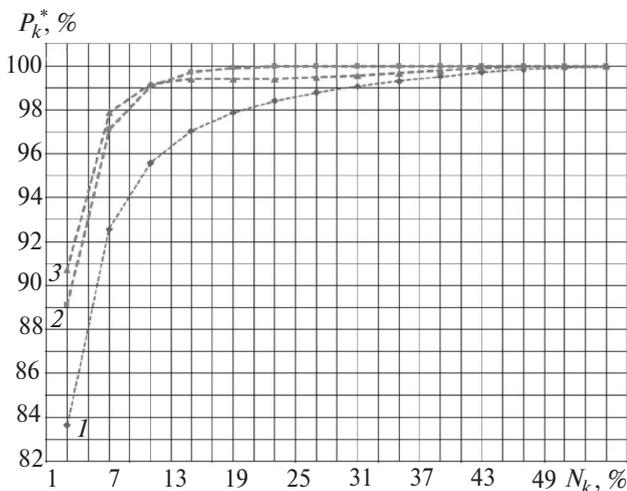


Рис. 6. Зависимости относительного значения суммарной активной мощности от числа учитываемых гармоник ($P_H \approx 3$ кВт); 1–3 – см. рис. 4

грешности вычисления суммарной мощности по формуле

$$dP = \frac{|(P_H^{N_k} - P_H^{3000})|}{P_H^{3000}} \cdot 100\% \quad (10)$$

где P_H^{3000} – расчетное значение активной мощности, полученное при числе учитываемых гармоник $N_k = 3000$; $P_H^{N_k}$ – расчетное значение активной мощности, полученное при $1 \leq N_k \leq 3000$.

Результаты вычислений с использованием формулы (10) приведены на рис. 7. Представленные зависимости (рис. 7) позволяют сделать вывод, что при учете в вычислениях первых 30 гармоник (с кратностью от 1 до 59) независимо от формы рас-

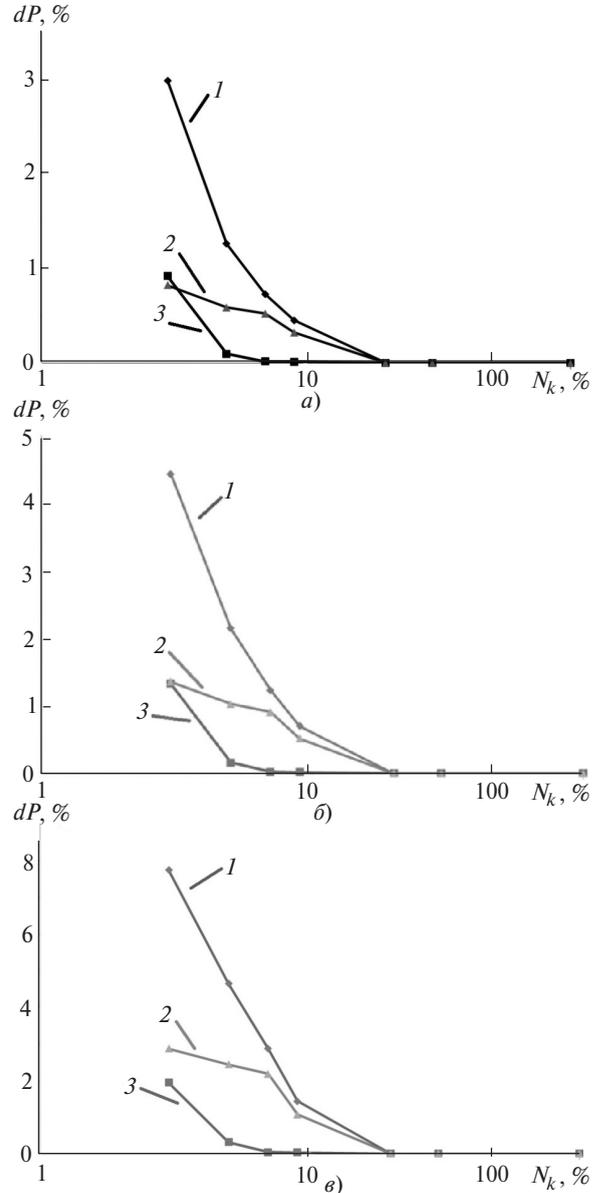


Рис. 7. Зависимости погрешности определения расчетного значения активной мощности P_H от числа учитываемых гармоник: а – $P_H \approx 1$ кВт; б – ≈ 2 кВт; в – ≈ 3 кВт

четной осциллограммы (рис. 3) погрешность dP определения мощности становится практически равной нулю (в расчетах менее 0,0001%). Одновременно наблюдается заметное влияние выбора формы осциллограммы ЭДС (рис. 3), а также абсолютного значения активной мощности P_H на значение dP в области малых значений N_k : наименьшая погрешность соответствует осциллограмме рис. 3,б (трапеция), наибольшая – рис. 3,а (прямоугольная), а увеличение передаваемой мощности (P_H) приводит к увеличению погрешности для всех вариантов осциллограммы ЭДС (рис. 3).

Анализ зависимостей на рис. 5–7 позволяет сделать заключение, что предложенное ранее [2] значение учитываемых гармоник $N_k = 3000$, выбранное из соображений устранения эффекта Гиббса в результатах вычислений, с большим запасом обеспечивает достоверное определение активной мощности в нагрузке P_H при любом варианте расчетной осциллограммы ЭДС (рис. 3) и применительно к рассматриваемому объекту (рис. 1). Вместе с тем представленные ранее результаты еще не позволяют сделать однозначный вывод о наиболее приемлемом варианте расчетной осциллограммы ЭДС из приведенных на рис. 3.

Для решения такой задачи целесообразно сравнить расчетные значения активной мощности в нагрузке P_H по абсолютному значению, полученные при одинаковых условиях для различных вариантов расчетной осциллограммы ЭДС (рис. 3) с результатами эксперимента. Кроме того, такое сравнение целесообразно выполнить и для другого важного параметра – КПД установки, значение которого несложно определить по формуле [3, 7, 8]:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P + \Delta P_H}, \quad (11)$$

где ΔP – мощность потерь энергии в активных сопротивлениях силовых трансформаторов и в кабельной линии (рис. 1), создаваемых всеми гармониками; ΔP_H – мощность потерь энергии в преобразователе напряжения (рис. 1), обусловленная всеми гармониками тока в транзисторах; указанные параметры определяются расчетом или при эксперименте по методике [3, 6, 8, 12].

На рис. 8 и 9 представлены характерные результаты определения мощности P_H и КПД установки, соответственно, расчетным и экспериментальным способами [3] при различной нагрузке, т.е. различном числе одновременно включенных нагрузочных элементов (рис. 1). При этом расчетные значения определены для всех трех вариантов расчетной осциллограммы ЭДС (рис. 3).

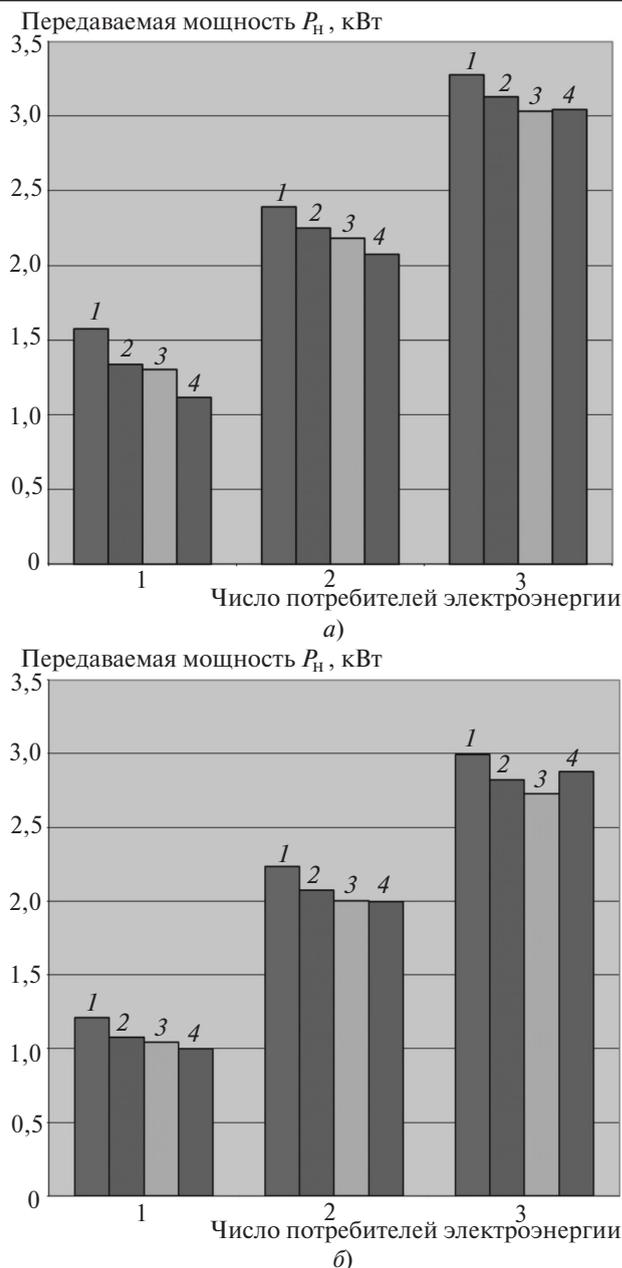


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных значений активной мощности в нагрузке (частота рабочего напряжения $f = 13$ кГц): а – кабельная линия РК-75, $l_k = 30$ м; б – РК-50, $l_k = 39$ м: 1 – осциллограмма по рис. 3,а; 2 – рис. 3,б; 3 – рис. 3,в; 4 – эксперимент

Анализ полученных результатов (рис. 8 и 9) показывает, что выбор формы осциллограммы ЭДС (рис. 3) практически не влияет на результаты расчета КПД установки (рис. 9) при хорошем согласовании расчетных и экспериментальных значений, что лишней раз подтверждает достоверность применяемых расчетных и экспериментальных методов [1–3, 7, 8, 12].

Однако при определении абсолютного значения активной мощности в нагрузке, как следует из рис. 8, пренебрегать влиянием варианта представления осциллограммы ЭДС (рис. 3) уже нельзя. Вполне очевидно, что наилучшее согласование ре-

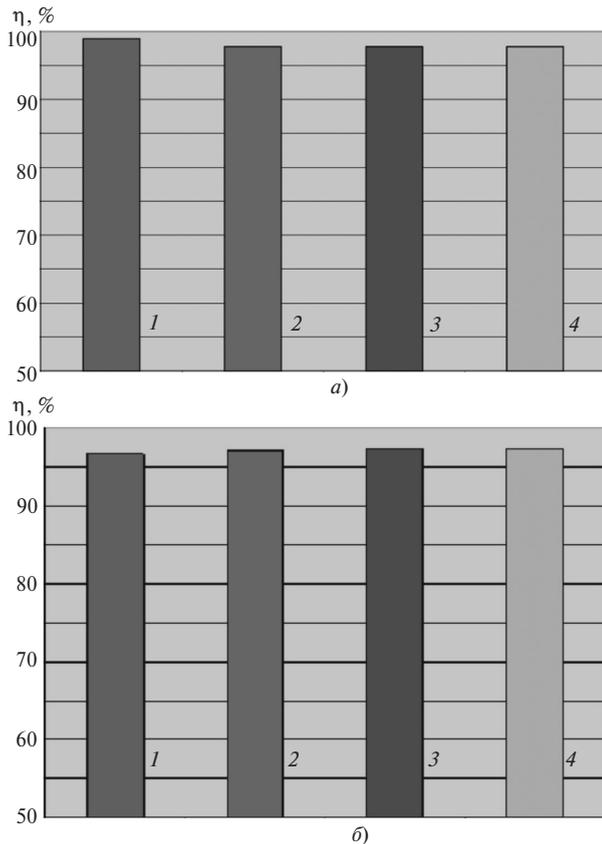


Рис. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных значений КПД установки (частота рабочего напряжения $f = 13$ кГц): а – кабельная линия РК-75, $l_k = 30$ м, $P_H \approx 2$ кВт; б – то же РК-50, $l_k = 39$ м, $P_H \approx 3$ кВт: 1 – эксперимент; 2 – расчет, рис. 3,а; 3 – то же рис. 3,б; 4 – то же рис. 3,в

зультатов расчета и эксперимента в этом случае достигается при использовании в расчетах варианта осциллограммы ЭДС, представленного на рис. 3,в («трапеция с паузой»). В остальных вариантах получаются недопустимо завышенные результаты расчета (рис. 8).

Другим важным преимуществом такого варианта (рис. 3,в) является то, что его применение позволяет исследовать режимы работы ЭТКПЧ (рис. 1) при использовании управления им посредством ШИМ, т.е. изменением длительности паузы в кривой ЭДС (рис. 2 и 3,в).

Обращают на себя внимание сравнительно высокие значения КПД (рис. 9) ЭТКПЧ, получившие экспериментальное подтверждение [3], которые опровергают весьма распространенное заблуждение о высоких потерях мощности в полупроводниковых преобразовательных устройствах повышенной частоты, выполненных с применением силовых IGBT транзисторов и модулей. Значительный прогресс в сфере таких электронных компонентов привел к существенному улучшению показателей их энергетической эффективности. Для примера можно отметить транзистор типа IRG7PH46UDPbF, получивший широкое применение

на практике, основные паспортные показатели которого приведены далее:

Параметр	Значение
Максимальное напряжение эмиттер–коллектор $U_{К-Э}$	1200 В
Максимальный длительный ток коллектора I_K	108 А ($T=25$ °С)
Номинальный ток коллектора $I_{К,ном}$	40 А
Напряжение коллектор–эмиттер в открытом состоянии $U_{К-Э}$	1,7 В (при $I_K = 40$ А; $U_{К-Э} = 600$ В)
Типовое значение суммарных коммутационных потерь энергии $E_{сум}$	$4,455 \cdot 10^{-3}$ Дж (при $I_K = 40$ А; $U_{К-Э} = 600$ В; $P=24$ кВт; $T=25$ °С)

Используя эти сведения, нетрудно определить, что при характерном значении повышенной частоты $f=13$ кГц сумма коммутационных потерь ($E_{сум}f$) и нагрузочных потерь ($0,5 \cdot \Delta U_{К-Э} I_{К,ном}$ – транзистор находится в открытом состоянии в течение полупериода переменного напряжения) в силовом транзисторе равна около 90 Вт. Это означает, что доля потерь в транзисторе относительно передаваемой мощности $P=24$ кВт составляет $\approx 0,38\%$, т.е. КПД транзистора $\eta_T = 99,62\%$. Значительный вклад в снижение потерь вносят силовые трансформаторы повышенной частоты Tr_1 и Tr_2 (рис. 1), которые, как показано в [3, 12], имеют приблизительно на порядок меньшее значение потерь энергии по сравнению с трансформаторами промышленной частоты 50 Гц при одинаковой номинальной мощности (в диапазоне значений этого параметра 1–20 кВт).

Методика электрического расчета цепей с полупроводниковыми преобразователями напряжения, а также ее программно-алгоритмическая реализация в среде Matlab [2] позволяют наряду с определением рассмотренных параметров выполнять построение и анализ расчетных осциллограмм изменения во времени токов и напряжений в установившемся режиме в любой точке объекта (рис. 1). Очевидно, представляет интерес определение влияния формы осциллограммы ЭДС (рис. 3) на результаты расчета осциллограмм. На рис. 10 представлены характерные расчетные для разных вариантов представления кривой ЭДС (рис. 3) и экспериментальная осциллограммы, полученные при одинаковых условиях. Эти результаты свидетельствуют о том, что расчетные осциллограммы незначительно различаются и хорошо согласуются с осциллограммой, полученной в эксперименте как качественно, так и количественно, например, по значению установившегося (т.е. после затухания высокочастотной составляющей) амплитудного значения. Заметные расхождения имеют место лишь по значению высокочастотной составляющей, которая

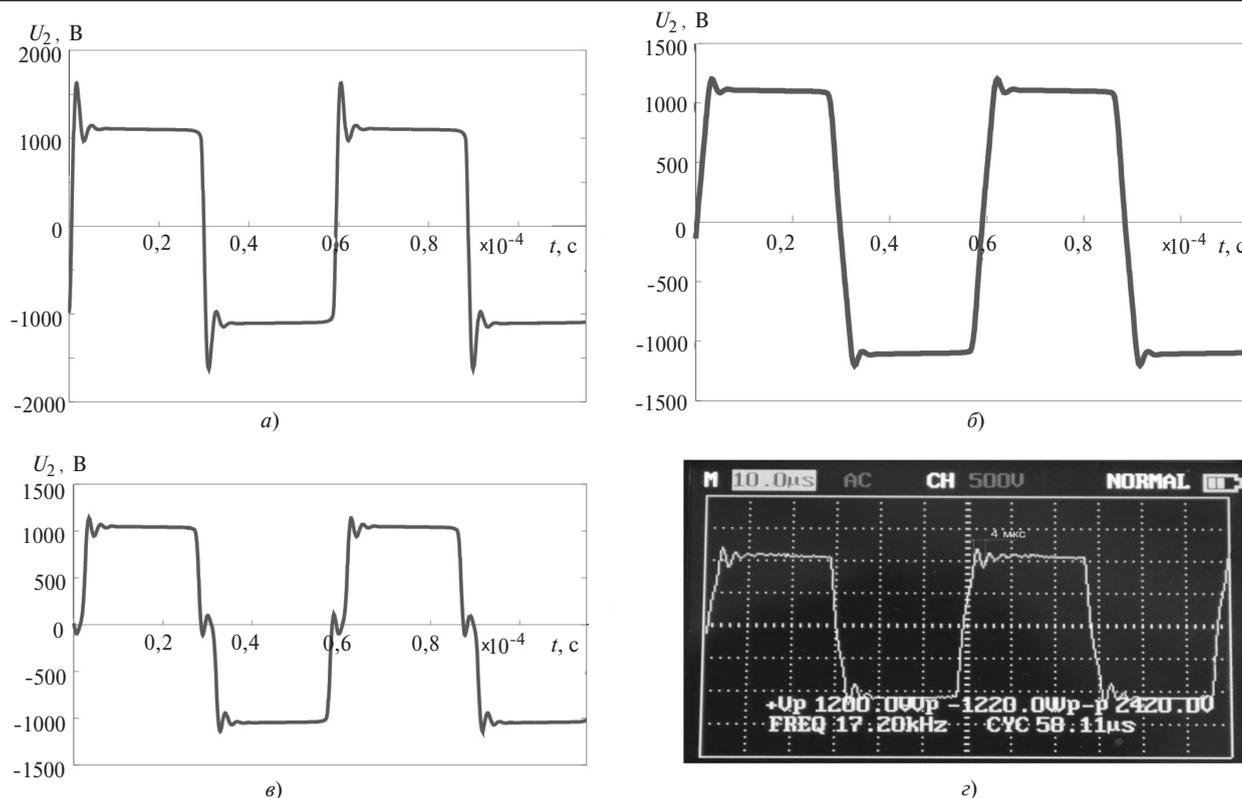


Рис. 10. Расчётные (а–в) и экспериментальная (г) осциллограммы напряжения $f = 17$ кГц при работе под нагрузкой (1 кВт) в конце кабельной линии U_2 , протяженностью $l_k = 12$ м ($z = 50$ Ом): а – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 3,а («прямоугольная» форма); б – рис. 3,б («трапецидальная»); в – рис. 3,в («трапецидальная с паузой»); г – эксперимент

определяет амплитуду перенапряжений на изоляции [1]. При использовании в расчетах осциллограммы рис. 3,а амплитуда высокочастотной составляющей получается завышенной по отношению к экспериментальному значению. Для осциллограммы рис. 3,б этот параметр имеет заниженное значение и лишь для осциллограммы рис. 3,в достигается практически полное согласование результатов расчета и эксперимента, т.е. амплитуда перенапряжений определяется достоверно.

Частота колебаний высокочастотной составляющей согласно рис. 10 равна 250–300 кГц. Как показали расчетные оценки с использованием параметров схемы замещения установки (рис. 1), рассмотренной в [2], она приблизительно соответствует частоте свободных колебаний последовательного контура, образованного индуктивностью рассеяния трансформатора Tr_1 и емкостью кабельной линии. Это означает, что высокочастотные колебания возникают в момент быстрой смены полярности переменного напряжения вследствие резонанса приблизительно на 19–23-й гармониках (рис. 4).

Результаты, представленные на рис. 10, хорошо коррелируются с характеристиками спектрального анализа ЭДС (см. рис. 4). Действительно, наибольшее значение амплитуды указанных гармоник наблюдается для осциллограммы вида рис. 3,а (пря-

моугольная форма) и этому варианту соответствует наибольшее значение амплитуды высокочастотной составляющей (рис. 10,а). Второе место по значению амплитуды этих гармоник и амплитуды высокочастотной составляющей (рис. 10,в) занимает вариант осциллограммы ЭДС вида рис. 3,в («трапеция» с паузой), и последнее место по этим показателям занимает вариант рис. 3,б («трапеция»). Вполне очевидно, что требуется дальнейшее изучение резонансных процессов в рассматриваемых устройствах, так как они способны приводить к заметным перенапряжениям на высоковольтной изоляции [1,2]. Этот вывод подтверждается повышенным вниманием к таким перенапряжениям и со стороны других исследователей [13].

Нельзя не отметить то обстоятельство, что даже в наилучшем варианте осциллограммы ЭДС – рис. 3,в («трапеция» с паузой) имеет место неполное соответствие результатов расчета и эксперимента (см. рис. 10,в и г). Оно проявляется в наличии высокочастотных колебаний вблизи нулевого значения напряжения в момент изменения полярности переменного напряжения на расчетной осциллограмме (рис. 10,в), которые отсутствуют в экспериментальной осциллограмме (рис. 10,г). Такое расхождение обусловлено, по-видимому, влиянием нелинейного характера реальной динамиче-

ской петли гистерезиса материала (феррита) магнитопроводов силовых трансформаторов (рис. 1), которое в расчетной методике в настоящее время не учитывается. Однако этот фактор практически не оказывает влияния на параметры установившегося рабочего режима установки. С другой стороны, в некоторых особых случаях, например в режиме холостого хода, игнорирование этого фактора может привести к погрешностям в вычислениях. Поэтому требуются дальнейшее развитие и уточнение расчетной методики [2].

Выводы. 1. При расчете установившихся режимов работы электрических цепей, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения, с применением разложения кривой изменения ЭДС источника во времени в ряд Фурье следует считать обязательным использование в расчетах варианта осциллограммы ЭДС вида рис. 3,в («трапеция» с паузой); использование других вариантов осциллограммы (рис. 3,а и б) недопустимо из-за значительной погрешности в расчетах (рис. 8, 10).

2. Спектр ЭДС и особенно передаваемой активной мощности имеет весьма неравномерный и убывающий характер; при этом, например для осциллограммы ЭДС вида рис. 3,в («трапеция» с паузой), на долю первой гармоники приходится не менее 90% передаваемой мощности, а для расчетного определения ее значение с погрешностью не более 0,0001% достаточно учитывать первые 30 гармоник (кратностью с 1 по 59) разложения Фурье; это означает: во-первых, принятое ранее [2] из соображений устранения эффекта Гиббса значение числа учитываемых гармоник $N_k = 3000$ с большим запасом обеспечивает вычисление режимных параметров с указанной погрешностью; во-вторых, свидетельствует о том, что достаточно распространенное мнение о сильном влиянии высших гармоник на режимы работы цепей с полупроводниковыми преобразователями не находит своего подтверждения.

3. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования токов и напряжений с несинусоидальной (трапецеидальной) формой осциллограммы для передачи электрической энергии: действительно, если для этого применить синусоидальное напряжение первой гармоники, то передаваемая мощность составит около 90%, амплитуда этой гармоники будет на $\approx 30\%$ выше амплитуды исходного напряжения, соответственно, будут выше затраты на высоковольтную изоляцию.

4. Необходимы дальнейшее развитие расчетной методики и продолжение исследований вопросов передачи электрической энергии с использованием переменных токов и напряжений с нетрадиционными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. О возможности и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений. — Энергетик, 2015, № 4, с. 29–32.
2. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е., Страхов А.С. Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения. — Электричество, 2016, № 1, с. 4–12.
3. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е., Танкой Абель, Бачурина А.Д. Показатели энергетической эффективности высоковольтного электротехнического комплекса повышенной частоты. — Энергетик, 2017, № 7, с. 6–12.
4. 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.
5. Федосов С.В., Бобылёв В.И., Соколов А.М. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. — Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2016, 336 с.
6. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. Материалы Международной научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»), 2015, т.1, с. 120–123.
7. Осипов Ю.М. Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей: Учеб. пос. по курсам электротехники и ТОЭ. Ч. 2. — СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002, 99 с.
8. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. Материалы Международной научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»), 2015, т.1, с. 132–136.
9. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. — М.: Наука, 1973, 872 с.
10. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. — М.: Знак, 1998, 271 с.
11. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Митькин Ю.А., Соколов А.М. Материалы Международной научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (17 Бенардосовские чтения), Иваново, 2012, с. 112–114.
12. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. Технично-экономические показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты. — Энергетик, 2015, № 2, с. 11–14.
13. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1–3. — Электричество, 2015, № 11, с. 33–40; № 12, с. 20–25; 2016, № 1, с. 20–24.

[25.10.2017]

А в т о р ы: Гусенков Алексей Васильевич окончил Ивановский энергетический институт (ИЭИ) (ныне Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина — ИГЭУ) в 1984 г. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию. Проректор по учебной работе, заведующий кафедрой ИГЭУ.

Лебедев Владимир Дмитриевич окончил ИГЭУ в 1993 г. В 1997 г. защитил кандидатскую диссертацию. Заведующий кафедрой ИГЭУ.

Соколов Александр Михайлович окончил ИЭИ в 1973 г. В 2012 г. защитил докторскую диссертацию. Доцент ИГЭУ.

Шадриков Тимофей Евгеньевич окончил ИГЭУ в 2013 г. Старший преподаватель ИГЭУ.

Танкой Абель окончил ИГЭУ в 2013 г. Аспирант ИГЭУ.

Spectral Analysis of the EMF in an Elevated-Frequency Electrical Installation

GUSENKOV Aleksei V. (Ivanovo State Power Engineering University (ISPEU), Ivanovo, Russia) – Vice Rector for Academic Affairs, Cand. Sci. (Eng.)

LEBEDEV Vladimir D. (ISPEU, Ivanovo, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

SOKOLOV Alexandr M. (ISPEU, Ivanovo, Russia) – Assistant Professor, Dr. Sci. (Eng.)

SHADRIKOV Timofei Ye. (ISPEU, Ivanovo, Russia) – Senior Lecturer

TANKOI ABEL' (ISPEU, Ivanovo) – Graduate student

The article presents the results obtained from theoretical and experimental investigations on determining the spectral composition of the EMF produced by the semiconductor voltage converter used as part of an elevated-frequency electrical system (EFES) intended for constructing local power supply systems for process electrical installations. Such information is obtained by calculating currents and voltages with using frequency analysis methods. The spectral composition of the transmitted active power is investigated. The experimental and calculated values of power releasing in the load, the EFES efficiency, and the oscillograms of voltage in the EFES high-voltage cable line are compared. A procedure for determining the amplitudes of harmonic components and the errors of determining the EFES technical parameters at the specified number of harmonic components is presented. It is found that in order to reliably determine the electrical parameters and characteristics of such device, its calculation should be carried out with presenting the EMF oscillogram in the form of a trapezoid with a pause. The study results have shown that in transmitting active power with the use of nonsinusoidal currents and voltages, the fundamental harmonic component accounts for no less than 90% of its value. It has also been shown that for calculating this parameter with an error of less than 0.0001%, the first 30 harmonic components must be taken into account.

Key words: cable line, AC voltage, voltage converter, elevated frequency, frequency analysis

REFERENCES

1. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2015, No. 4, pp. 29–32.
2. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye., Strakhov A.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 4–12.
3. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye., Tankoi Abel, Bachurina A.D. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2017, No. 7, pp. 6–12.
4. Fedosov S.V., Gusenikov 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.
5. Fedosov S.V., Bobylev V.I., Sokolov A.M. *Elektroteplovaya obrabotka betona tokami povyshennoi chastoty... (Electro-thermal treatment of concrete the currents of enhanceable frequency...)*. Ivanovo, Publ. Ivanovo State Energetic University), 2016, 336 p.
6. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» – «XVIII Benardosovskiye chteniya» (Proc. of Intern. Scientific and Technical Conf. «State and prospects for the development of electricity and heat technology» – (XVIII Benardos readings), 2015, vol.1, pp. 120–123.*
7. Osipov Yu.M. *Chastotnyi i vremennoi analiz stazionarnykh i perehodnykh kharakteristik lineinykh elektricheskikh tsepei: Uchebnoye posobiye... Ch. 2. (Frequency and time analysis of stationary and transient characteristics of linear electric circuits: Proc. on electrical engineering courses and TOE. Part 2.)*. SPb: SPb GITMO (TU), 2002, 99 p.
8. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.Ye. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» – XVIII Benardosovskiye chteniya» (Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf. «The State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technology» – (XVIII Benardos Readings), 2015, vol. 1, p. 132–136.*
9. Vygodskii M.Ya. *Spravochnik po vysshei matematike (Handbook of Higher Mathematics)*. Moscow, Publ. Nauka, 1973, p. 872.
10. Aleksandrov G.N. *Peredacha elektricheskoi energii peremennym tokom (Transmission of electrical energy by alternating current. 2nd ed.)* – Moscow, Publ. «ZNAK», 1998, 271 p.
11. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Mit'kin Yu.A., Sokolov A.M. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii. (17 Benardosovskiye chteniya)*. (Proc. of Intern. Scientific and Technical Conf. «The state and prospects of the development of electrotechnology» (17 Benardos readings)). Ivanovo, 2012, pp. 112–114.
12. Gusenikov A.V., Lebedev V.D., Shadrikov T.Ye., Sokolov A.M. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2015, No. 2, pp. 11–14.
13. Larin V.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 33–40; No. 12, pp. 20–25; 2016, No. 1, pp. 20–24.

[25.10.2017]