
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 631.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_93

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КПД ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В.А. Тихомиров

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
vat45.tikhomirov@yandex.ru

Е.В. Бычков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
fae_nir@nntu.ru

Энергетические характеристики и показатели качества электроэнергии современных электротехнических систем во многом определяются свойствами преобразовательных устройств, входящих в состав этих систем. Для количественной оценки влияния преобразователей на электротехнические системы необходимо иметь высококачественный инструмент изучения протекающих в преобразовательном устройстве электромагнитных процессов, а также несложную и достоверную методику расчета показателей энергоэффективности. Представлены методологические основы расчета энергетических показателей различных преобразовательных устройств с использованием персонального компьютера и программных средств схемотехнического моделирования. В отличие от существующих аналитических методов расчета энергетических показателей, используемых на практике, предлагается методика расчета КПД с помощью современного пакета схемотехнического моделирования *MicroCap*.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, методика расчета, преобразовательные устройства, схемотехническое моделирование, энергетические показатели.

Для цитирования: Тихомиров В.А., Бычков Е.В. Компьютерный анализ КПД преобразовательных устройств // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 93-109. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_93

COMPUTER ANALYSIS OF CONVERTER DEVICES EFFICIENCY

V.A. Tikhomirov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
vat45.tikhomirov@yandex.ru

E.V. Bychkov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
fae_nir@nntu.ru

Abstract. Energy characteristics and power quality indicators of modern electrical systems are largely dependent and determined by the properties of converting devices that are part of these systems. It is necessary to have a high-quality tool for studying the electromagnetic processes occurring in the converter, as well as a simple and reliable method for calculating energy efficiency indicators, for a quantitative assessment of an impact on the electrical systems from the converters. This article is devoted to the development of methodological foundations for calculating the energy indicators of various converting devices using a personal computer and software for circuit simulation. In contrast to the existing analytical methods for calculating energy indicators used in practice, the authors propose a method for calculating the efficiency using a modern circuit simulation package MicroCap.

Keywords: calculation methodology, circuit simulation, computer modeling, converter, energy indicators.

For citation: V.A. Tikhomirov and E.V. Bychkov, “Computer analysis of converter devices efficiency”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 93-109, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_93

I. Введение

Современные электроустановки для питания различных устройств и систем электропривода, как правило, включают преобразовательные устройства (ПУ). В процессе функционирования в ПУ протекают сложные электромагнитные процессы, которые могут приводить к нежелательным явлениям (прерывистый характер тока нагрузки, несинусоидальность входных и выходных сигналов силовой части). Это, в свою очередь, оказывает существенное и, как правило, негативное влияние на энергетические характеристики и показатели ПУ и электроустановки в целом. Исходя из этого, необходимо принимать во внимание следующие важные требования, предъявляемые к ПУ в процессе их проектирования и эксплуатации:

- устройство должно удовлетворять запросам потребителя как по величине выходного напряжения (или тока), так и по его качественным показателям, среди которых особое значение имеют гармонический состав напряжений и токов на выходе преобразователя;
- преобразователь не должен оказывать негативного воздействия на питающую сеть и иметь высокие энергетические показатели, важнейшими из которых являются:
 - 1) гармонический состав тока на входе преобразователя (т.е., тока, потребляемого из питающей сети);
 - 2) полная мощность, потребляемая из сети и ее составляющие (активная мощность P , реактивная мощность Q , мощность искажения T);
 - 3) коэффициент мощности K_m , $\cos\varphi$, коэффициент искажения $K_{\text{и}}$;
 - 4) устройство должно обладать максимальным коэффициентом полезного действия (КПД) и надежностью.

Целью статьи является качественная и количественная оценка КПД преобразовательных устройств. При этом последовательно решаются следующие задачи:

- построение точных моделей, максимально учитывающих свойства реальных элементов и схемотехнику преобразовательных устройств;
- подготовка и приведение расчетного материала к виду, необходимому для его обработки стандартной программой гармонического Фурье анализа с помощью пакета схемотехнического моделирования *MicroCap*.

Определение основных энергетических показателей ПУ с помощью пакета схемотехнического моделирования *MicroCap* (мощностные составляющие S , P , Q , K_m , $K_{\text{и}}$, $\cos\varphi$ и гармонический состав сетевого тока) было рассмотрено в [1-4]. Эти показатели характеризуют взаимодействие ПУ с питающей сетью. Эффективность преобразования энергии питающей сети в энергию на нагрузке с помощью ПУ характеризует другой важнейший энергетический показатель – КПД.

II. Анализ КПД преобразовательных устройств

Коэффициент полезного действия обычно обозначается буквой η . Для любого преобразователя КПД может быть определен по формуле [5]:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – среднее значение мощности на выходе преобразователя (активная мощность на выходе); $P_{\text{вх}}$ – среднее значение мощности на входе преобразователя (активная мощность, потребляемая из питающей сети).

Выполнить достоверный расчет энергетических характеристик и провести полноценный качественный анализ полученных данных можно по

результатам цифрового математического моделирования. Из всего имеющегося многообразия программных пакетов и систем моделирования предпочтение было отдано пакету программ схемотехнического имитационного моделирования *MicroCap (MC)* [6-8].

Пакет моделирования *MicroCap* использует подробные, с высокой степенью детализации, модели полупроводниковых элементов, максимально отражающие и учитывающие их реальные физические свойства. Это подтверждается вольтамперными и выходными характеристиками различных элементов, полученными с помощью вычислительных экспериментов в программной среде *MC*. Ниже приведены схемы замещения моделей самых распространенных полупроводниковых элементов, используемых в преобразовательных устройствах, а также их характеристики.

III. Моделирование вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода

Схемы для моделирования вольтамперной характеристики полупроводникового диода и полученная с помощью модели ВАХ показаны соответственно на рис. 1 и 2.

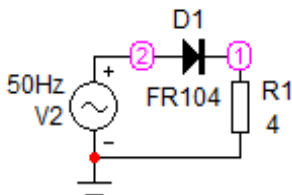


Рис. 1. Схема модели для получения ВАХ диода

Fig. 1. Model circuit for obtaining the current-voltage characteristic of the diode

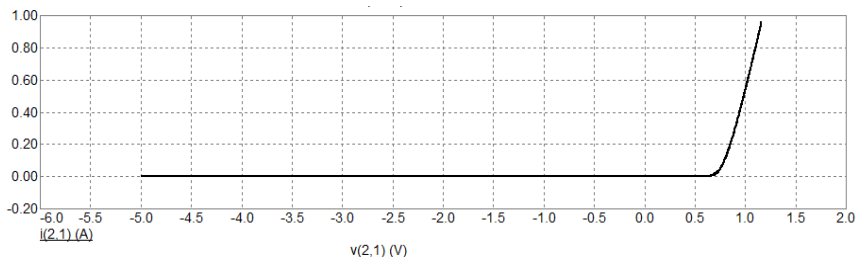


Рис. 2. Вольтамперная характеристика диода

Fig. 2. Current-voltage characteristic of the diode

Для получения вольтамперной характеристики были установлены параметры вычислительного процесса путем заполнения соответствующих полей специализированной формы «Установки анализа переходных процессов» (рис. 3).

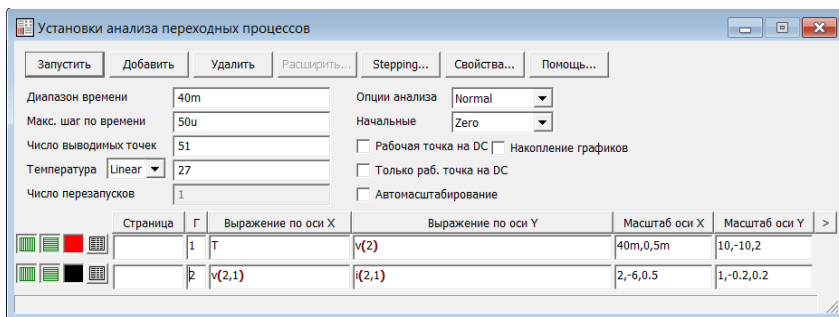


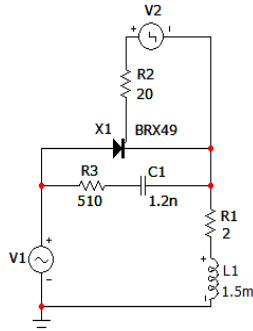
Рис. 3. Установки анализа для получения ВАХ диода

Fig. 3. Analysis setup for obtaining the current-voltage characteristic of diode

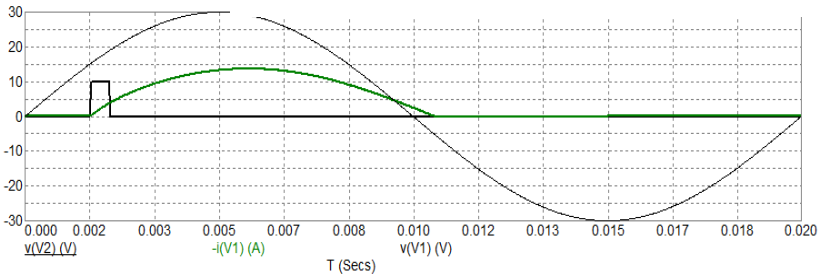
Из рис. 2 следует, что в схемах исследуемых преобразователей используется математическая модель диода, которая воспроизводит реальную характеристику с падением напряжения около 1,0 В на прямой ветви характеристики и пренебрежимо малым обратным током на участке обратной ветви. Таким образом, при анализе энергетических показателей будут учтены реальные потери от протекающего по диоду тока.

IV. Моделирование вольтамперной характеристики тиристора

Схемы для моделирования ВАХ тиристора и полученная с помощью модели характеристика представлены соответственно на рис. 4 и 5. Компьютерная модель тиристора обладает реальной характеристикой с падением напряжения около 1,7 В на прямой ветви характеристики и пренебрежимо малым обратным током на обратной ветви. Таким образом, при анализе энергетических показателей также будут учтены потери от протекающего по тиристорному току.



(a)



(б)

Рис. 4. Схема модели для получения ВАХ тиристора (а); процессы в схеме (б)

Fig. 4. Model circuit for obtaining the current-voltage characteristic of the thyristor (a); processes in the circuit (b)

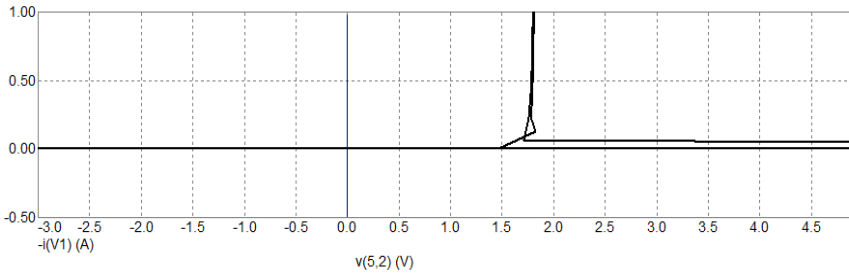


Рис. 5. Вольтамперная характеристика тиристора

Fig. 5. Current-voltage characteristic of the thyristor

V. Моделирование выходных характеристик IGBT транзистора

Схема для моделирования выходных характеристик IGBT транзистора и полученные с помощью модели характеристики представлены соответственно на рис. 6 и 7.

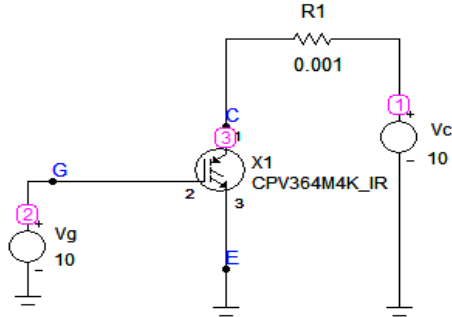


Рис. 6. Схема модели для получения выходных характеристик IGBT транзистора

Fig. 6. Schematic of the model for obtaining the output characteristics of the IGBT transistor

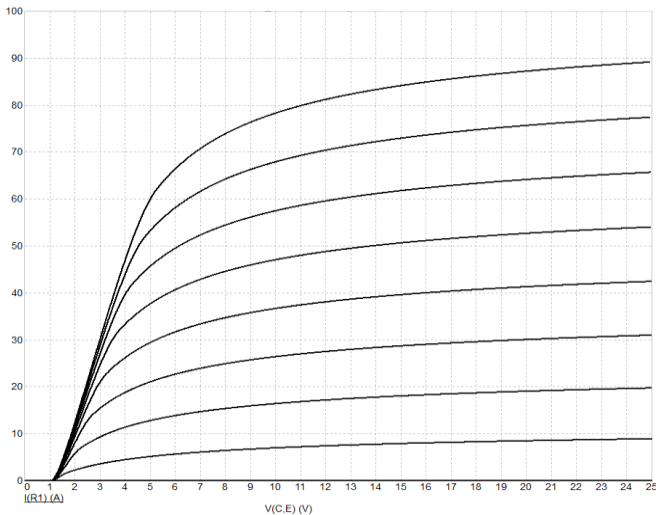


Рис. 7. Выходные характеристики IGBT транзистора

Fig. 7. Output characteristics of the IGBT transistor

Для получения семейства выходных характеристик были установлены параметры и выбраны уставки путем заполнения соответствующих полей специализированной формы «Установки анализа по постоянному току (DC)» (рис. 8). Полученные на модели выходные характеристики *IGBT* транзистора соответствуют реальным характеристикам этого полупроводникового прибора. В процессе моделирования преобразователей воспроизводится реальная картина поведения прибора с точки зрения оценки энергетических показателей различных преобразователей.

Согласно (1), для расчета КПД требуется определение активных мощностей на входе и выходе преобразовательного устройства. В соответствии с [9], активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период от мгновенной мощности:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \cdot dt.$$

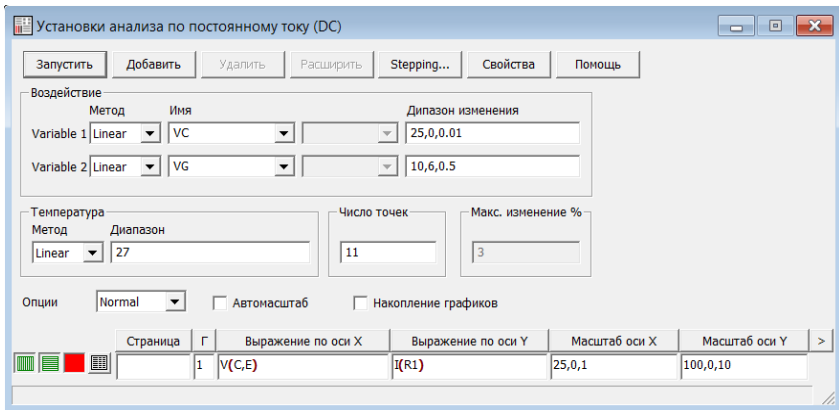


Рис. 8. Установки *DC* анализа для получения выходных характеристик *IGBT* транзистора

Fig. 8. *DC* analysis settings to obtain the output characteristics of the *IGBT* transistor

В [3] для расчета энергетических показателей было предложено использовать офисный пакет *Microsoft Excel*, с помощью которого обрабатывались результаты моделирования преобразовательных устройств, полученные в программе *MicroCap*. Поскольку для расчета КПД требуется вычисление только активных мощностей на входе и выходе преобразовательного устройства, можно отказаться от использования пакета *Microsoft Excel* и все расчеты проводить непосредственно в программе *MicroCap*, используя воз-

возможности встроенной функция *harm*. Эта функция позволяет получить гармонический ряд Фурье для кривой мгновенной мощности. Разложение в ряд Фурье – это способ представления сложной функции с помощью бесконечной суммы гармонических функций синуса и косинуса.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t)). \quad (2)$$

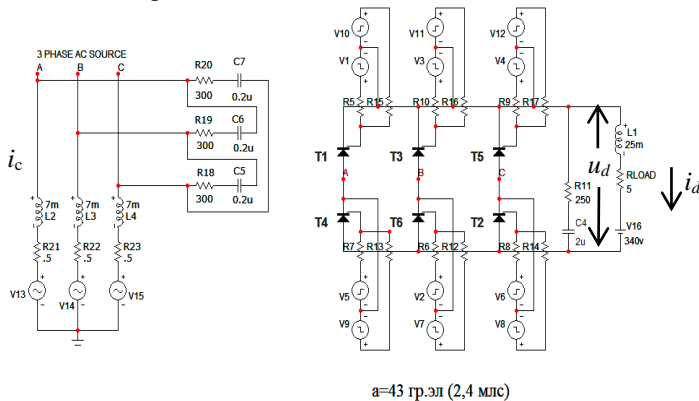
Здесь a_0 , a_n и b_n – коэффициенты Фурье; n – порядковый номер гармонической составляющей. Коэффициент a_0 – постоянная составляющая исходной функции, т.е., ее среднее значение. Внутри диапазона от 0 до T коэффициент a_0 определяется следующим выражением:

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot dt. \quad (3)$$

Применительно к задаче определения КПД ПУ, именно постоянная составляющая, полученная в результате гармонического анализа функции мгновенной мощности, позволяет определить активную мощность на входе и выходе преобразовательной схемы.

IV. Пример расчета КПД тиристорного преобразователя

В качестве примера для расчета КПД тиристорного преобразователя рассмотрена схема модели [4], в которой его анализ выполнен с учетом реальных пульсаций выпрямленного тока. Для расчета КПД компьютерная модель была дополнена сетевыми реакторами и RC цепями, которые практически всегда имеются в реальном ПУ. Схема модели в окончательном виде представлена на рис. 9.



$a=43$ гр.эл (2,4 мкс)

Рис. 9. Схема модели трехфазного управляемого выпрямителя для анализа его КПД

Fig. 9. Schematic model of a three-phase controlled rectifier for efficiency analysis

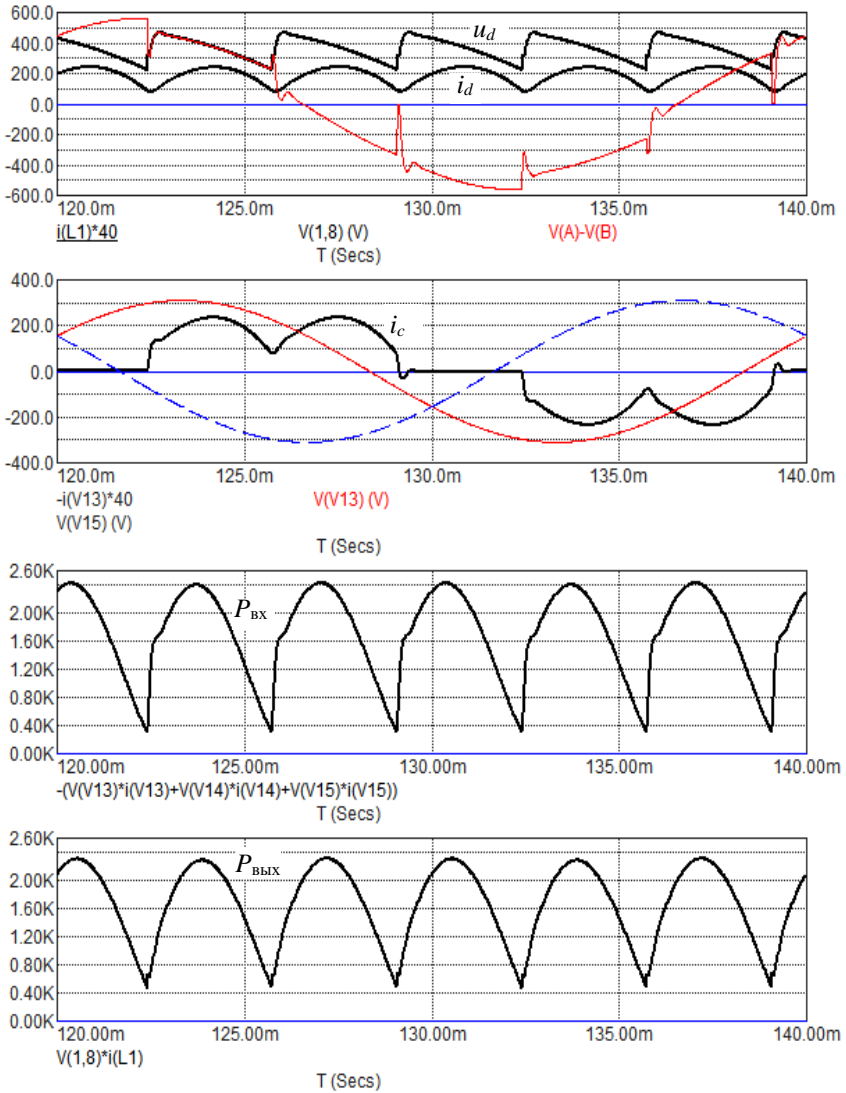


Рис. 10. Результаты моделирования трехфазного управляемого выпрямителя при реальных пульсациях выпрямленного тока

Fig. 10. Results of modeling a three-phase controlled rectifier with real ripple of the rectified current

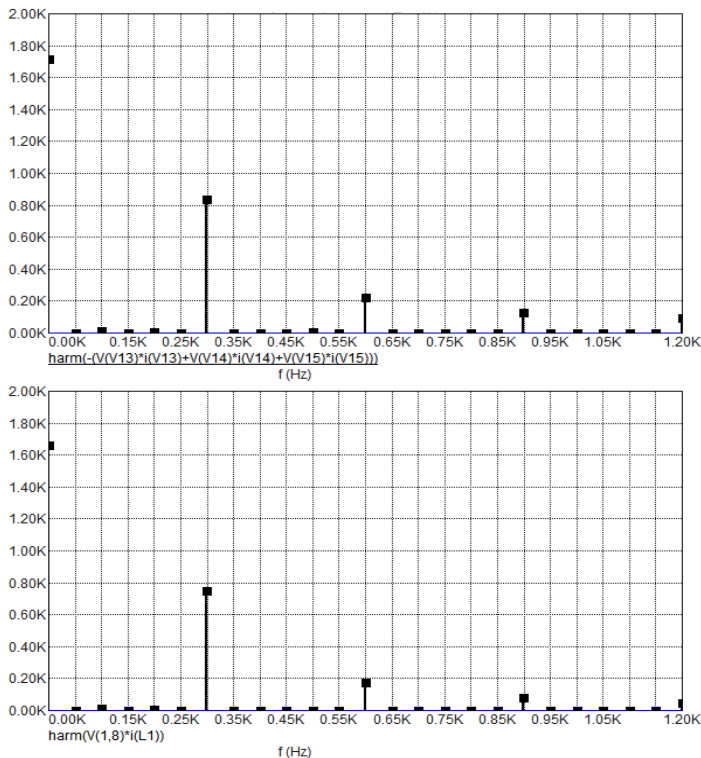


Рис. 11. Гармонический состав функций мгновенных значений мощности на входе и выходе тиристорного преобразователя

Fig. 11. Harmonic composition of functions of instantaneous power values at the input and output of the thyristor converter

Осциллограммы электромагнитных процессов, полученные компьютерным моделированием в программном пакете *MicroCap*, приведены на рис. 10. На первом графике (в порядке расположения) приведены диаграммы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d . На втором графике показан ток питающей сети i_c . На третьем и четвертом графиках представлены осциллограммы мгновенных значений мощности соответственно на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$ преобразователя, которые необходимы для расчета КПД. Для этих функций с помощью *harm* выполнено разложение в ряд Фурье. Результаты представлены на рис. 11.

С помощью Фурье-анализа в модели были рассчитаны значения мощностей и рассчитано КПД с использованием (1):

```
f harm(- (V(V13) *i(V13)+V(V14) *i(V14)+V(V15) *i(V15))) harm(V(1,8) *i(L1))
(Hz)
0.0 1715.1558 1664.1165
```

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{1664,1165}{1715,1558} = 0,9702 \approx 97\%.$$

В результате применения предложенной методики получено значение КПД, равное 97 %, что соответствует типовым значениям для тиристорных преобразователей.

КПД управляемых преобразовательных устройств значительным образом зависит от их режимов работы (частоты питающего напряжения, напряжения на выходе) и от тока нагрузки. Предлагаемая методика расчета позволяет выполнить многовариантный анализ энергетических показателей при всех возможных режимах работы и нагрузках. По результатам анализа появляется возможность построения зависимости КПД от режимных параметров (например, при изменении тока нагрузки или при регулировании выпрямленного напряжения U_d за счет изменения угла управления α).

В качестве примера многовариантного анализа можно рассмотреть влияние тока нагрузки на КПД тиристорного преобразователя. Для этого достаточно изменять величину ЭДС двигателя. Например, уменьшение ЭДС приводит к увеличению тока. Это равносильно увеличению нагрузки на валу двигателя постоянного тока, при этом ЭДС снижается. Окно задания ступенчатого изменения ЭДС в программе *MicroCap* изображено на рис. 12.

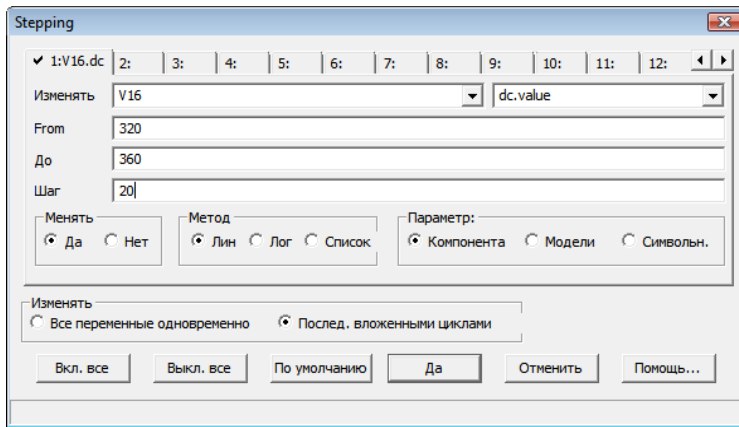


Рис. 12. Интерфейс формирования ступенчатого изменения ЭДС в диапазоне от 320 В до 360 В с шагом 20 В

Fig. 12. Interface for the formation of a step change in EMF in the range from 320 V to 360 V with a step of 20 V

Изменяемая в модели величина $V16$ – это ЭДС двигателя. Моделирование производится при трех значениях ЭДС. Это: 360 В, 340 В и 320 В соответственно. Осциллограммы, иллюстрирующие влияния ЭДС на ток двигателя, изображены на рис. 13.

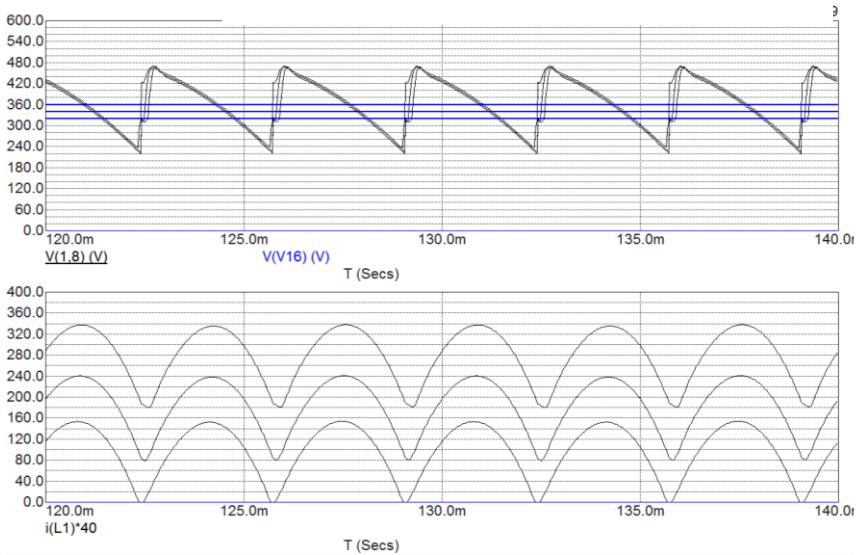


Рис. 13. Осциллограммы выходного напряжения и тока преобразователя для примера многовариантного анализа

Fig. 13. Oscillograms of the output voltage and current of the converter for an example of multivariate analysis

С уменьшением амплитуды выпрямленного тока в форме выходного напряжения преобразователя наблюдается заметное сокращение длительности интервала коммутации.

Гармонический состав мощностей на входе и выходе преобразователя, полученный в результате выполнения Фурье анализа при разных ЭДС, представлен на рис. 14. Постоянная составляющая a_0 функции мгновенной мощности уменьшается с уменьшением тока нагрузки. Для каждого из трех значений гармоник на нулевой частоте могут быть определены соответственно три значения КПД.

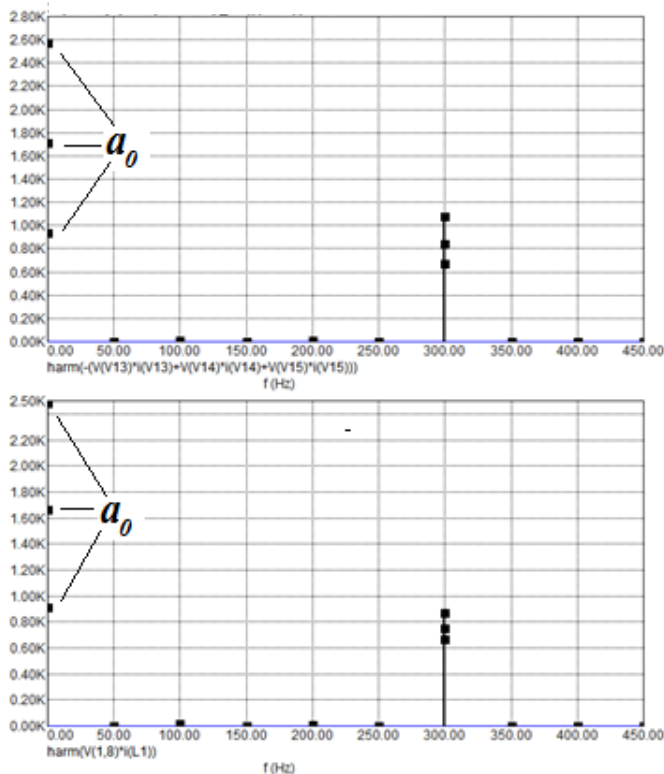


Рис. 14. Результаты Фурье анализа мгновенных мощностей преобразователя при разных ЭДС для примера многовариантного анализа

Fig. 14. Results of Fourier analysis of instantaneous power of the converter at different EMF for an example of multivariate analysis

VII. Заключение

Компьютерные программы предоставляют широкие возможности как для изучения рабочих процессов в электроустановках, так и для расчета энергетических показателей электрооборудования. Для изучения рабочих процессов была использована программа схемотехнического моделирования электронных устройств *MicroCap*. С помощью этой программы был выполнен компьютерный анализ КПД одного из распространенных преобразовательных устройств.

При применении мощных преобразовательных устройств необходимо уделять пристальное внимание анализу их энергетических показателей (в частности, КПД), чтобы иметь возможность оценить их энергетическую эффективность.

По результатам многовариантного анализа полученных количественных характеристик могут быть предложены практические рекомендации по усовершенствованию структуры и параметров ПУ.

© Тихомиров В.А., 2021

© Бычков Е.В., 2021

Поступила в редакцию 26.01.2021

Received 26.01.2021

Библиографический список

- [1] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [2] Тихомиров В.А., Хватов С.В. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2011. № 3 (90). С. 204-214.
- [3] Тихомиров В.А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2018. № 3 (122). С. 92-106. DOI: 10.46960/1816-210X_2018_3_92.
- [4] Тихомиров В.А., Бычков Е.В. Компьютерный анализ энергетических показателей преобразовательных устройств. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2020. – 89 с.
- [5] Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2001. – 199 с.
- [6] Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью *Micro-CAP 7*. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.
- [7] Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования *Micro-CAP 8*. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
- [8] Коротков А.С. Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС. СПб.: СПб ГПУ, 2004. – 68 с.
- [9] Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.

References

- [1] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Khvatov, “Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83), pp. 190-204, 2010.
- [2] V.A. Tikhomirov and S.V. Khvatov, “Benchmark analysis of the harmonic composition of the network current of the controlled rectifiers and frequency converters”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (90), pp. 204-214, 2011.

- [3] V.A. Tikhomirov, "Method of calculation of energy indicators of conversion devices", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 3 (122), pp. 92-106, 2018. DOI: 10.46960/1816-210X_2018_3_92.
- [4] V.A. Tikhomirov and E.V. Bychkov, *Komp'yuternyj analiz energeticheskikh pokazatelej preobrazovatel'nyh ustrojstv [Computer analysis of energy indicators of converting devices]*. Nizhny Novgorod: NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2020 (in Russian).
- [5] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoy elektroniki [Fundamentals of power electronics]*. Novosibirsk: NSTU, 2001 (in Russian).
- [6] V.D. Razevig, *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie s pomoshch'yu Micro-CAP 7 [Schematic modeling using Micro-CAP 7]*. M.: Hotline - Telecom, 2003 (in Russian).
- [7] M.A. Amelina and S.A. Amelin, *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-CAP 8 [Schematic simulation program Micro-CAP 8]*. M.: Hotline - Telecom, 2007 (in Russian).
- [8] A.S. Korotkov, *Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya i modelirovaniya RES [Fundamentals of computer design and modeling of radio electronic devices]*. SPb: SPb GPU, 2004 (in Russian).
- [9] V.S. Rudenko, V.I. Senko and I.M. Chizhenko, *Preobrazovatel'naya tehnika [Conversion technology]*. Kiev: Vishcha school, 1983 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тихомиров Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir A. Tikhomirov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бычков Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Evgeny V. Bychkov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.