

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ

Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров

Иркутский государственный университет путей сообщения, г Иркутск, Россия

Рассмотрена теория энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковыми преобразователями, которые получили широкое применение на предприятиях в различных отраслях экономики. Выполненным анализом известных технических решений по повышению энергетической эффективности и электромагнитной совместимости преобразовательной техники определены задачи исследования. В основу методологии исследования энергетической эффективности в электрических цепях с полупроводниковыми приборами приняты закон сохранения энергии, спектральный анализ несинусоидального напряжения и тока. Для разработки новых энергетических характеристик полупроводниковых преобразователей в статье использованы направления научных работ основателей фундаментальной электротехники. Исследованием доказано влияние непроводящего состояния силовых полупроводниковых приборов преобразователей на продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии и обоснована целесообразность учета спектра гармонических составляющих несинусоидального напряжения и тока. Для снижения потребляемого из сети тока предложено регулировать мощность преобразователями за счет изменения величины и обеспечивать активный характер их входного электрического сопротивления. Методом математического моделирования показана возможность улучшения энергетических показателей электропривода за счет применения электрического полупроводникового вариатора вместо управляемого выпрямителя. Разработанные энергетические характеристики полупроводниковых регуляторов мощности позволяют определить перспективные направления совершенствования преобразовательной техники устранять методологические противоречия в образовательном процессе подготовки специалистов.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, преобразователь, напряжение, мощность, входное электрическое сопротивление.

Введение

В настоящее время полупроводниковая преобразовательная техника получила широкое применение для реализации инновационных технологий и обеспечения энергосбережения в различных отраслях экономики. Современная разработка технических решений и производство полупроводниковой техники направлены на увеличение единичной мощности полупроводниковых преобразователей и на устранение их отрицательного влияния на работу электроэнергетической системы. Основой для оценки эффективности энергетических процессов с учетом сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии накопителями энергии магнитного и электрического поля является теорема Умова – Пойнтинга [1]. В нелинейных электрических цепях профессора К.А. Круг, Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан, Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, Г.И. Атабеков, К.М. Поливанов, Л.А. Бессонов, А.Е. Каплинский и другие ученые аналитически доказали влияние на энергетическую эффективность всего спектра гармонических составляющих несинусоидального напряжения и тока [2, 3].

Теория энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковыми приборами,

разработанная в 70-х годах прошлого века, применяется в образовательных учреждениях России и за рубежом. Известный баланс мощностей [4, 5] основан на выделении основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводниковых регуляторов мощности (ППМ) из спектра гармонических составляющих несинусоидального напряжения и тока. Разработаны инженерные расчеты коэффициента мощности преобразователей с использованием коэффициента сдвига первой гармоники тока относительно основной гармоники напряжения и коэффициента нелинейных искажений формы кривой тока [6, 7]. Для улучшения признаков качества энергетического процесса преобразования, регулирования электрической энергии научными работниками и специалистами разрабатываются компенсированные выпрямители [8, 9], устройства компенсации мощности сдвига, фильтры, устройства снижения углов коммутации силовых полупроводниковых приборов (СПП) [10–12]. Разработаны способы развертывающегося преобразования для создания элементов и систем управления полупроводниковыми преобразователями с повышенной помехоустойчивостью и способностью адаптироваться к изменяющимся параметрам источников электроснаб-

жения [13, 14]. Специалистами концерна *Siemens*, ВЭЛНИИ и ЮРГТУ разработан четырехквadrантный 4qS-преобразователь [15, 16] с широтно-импульсной модуляцией управления СПП для обеспечения угла сдвига по фазе огибающей синусоиды импульсного тока первой гармоники относительно синусоиды основной гармоники импульсного напряжения $\varphi_1 = 0$ в режиме потребления и $\varphi_1 = \pi$ в режиме рекуперации электроэнергии. Признания качества энергетических процессов успешно используются для оценки энергетической эффективности и электромагнитной совместимости полупроводниковой техники [17–19].

К сожалению, дальнейшему развитию важнейших научных направлений основателей теоретической электротехники при решении задач энергосбережения с помощью полупроводниковых преобразователей уделяется недостаточно внимания. Не учитывается сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии полупроводниковыми приборами [20]. Выделение основной гармоники напряжения и первой гармоники тока из спектра гармонических составляющих при анализе работы полупроводниковой преобразовательной техники вызывает методологические противоречия [21] в образовательном процессе учебных учреждений.

Энергетические процессы в электрических цепях с полупроводниковыми приборами являются предметом данного исследования, которое направлено на решение задачи повышения энергетической эффективности и электромагнитной совместимости преобразовательной техники.

Спектральный анализ несинусоидального напряжения и тока на входе полупроводниковых регуляторов мощности (ПРМ) применяется для доказательства сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) регуляторов.

Решение поставленных задач направлено на обоснование перспективных направлений дальнейшего совершенствования ПРМ.

Методика исследования

Изменение электрического потенциала на зажимах потребителей электрической энергии с помощью ПРМ можно определить, используя второй закон Кирхгофа

$$u(t) - u_p(t) = u_c(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения на входе ПРМ;

$u_p(t)$ – мгновенное значение напряжения на входе ПРМ во время непроводящего состояния силовых полупроводниковых приборов (СПП) ПРМ;

$u_c(t)$ – мгновенное значение напряжения на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП ПРМ.

Мгновенные значения напряжения и тока разложим в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n u_k(k\omega t) - \sum_{k=0}^n u_{pk}(k\omega t) &= \\ &= \sum_{k=0}^n u_{ck}(k\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_k(k\omega t)$ – мгновенное значение напряжения k -й гармоники на входе ПРМ;

k – номер составляющих ряда Фурье, целые числа;

n – номер последней из учитываемых гармоник;

ω – угловая частота основной гармонической составляющей напряжения на входе ПРМ;

$u_{pk}(k\omega t)$ – мгновенное значение напряжения k -й гармоники на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП;

$u_{ck}(k\omega t)$ – мгновенное значение напряжения k -й гармоники на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП.

Действующее значение напряжения составляющих ряда Фурье (2) и действующие значения несинусоидального напряжения на входе ПРМ на основании второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2 - \sum_{k=0}^n U_{pk}^2} &= \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{ck}^2}, \\ \sqrt{U^2 - U_p^2} &= U_c, \end{aligned} \quad (3)$$

где U_k – действующее напряжение k -й гармоники на входе ПРМ;

U_{pk} – действующее напряжение k -й гармоники на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП;

U_{ck} – действующее напряжение k -й гармоники на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;

U – действующее напряжение на входе ПРМ;

U_p – действующее напряжение на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП;

U_c – действующее напряжение на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП.

Под действием напряжения $\sum_{k=0}^n u_{ck}(k\omega t)$ во время проводящего состояния СПП регулятора мощности (2) в электрической цепи протекает ток:

$$i(t) = \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t), \quad (4)$$

где $i_k(k\omega t)$ – мгновенное значение тока k -й составляющей ряда Фурье на входе ПРМ.

Действующий ток учитываемых гармоник I :

$$I = \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}, \quad (5)$$

где I_k – действующее значение тока k -й составляющей ряда Фурье на входе ПРМ.

Мгновенные значения мощностей на входе ПРМ можно получить, если умножить левую и правую части выражений (2) и (4):

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n u_k(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t) - \\ - \sum_{k=0}^n u_{pk}(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t) &= \\ = \sum_{k=0}^n u_{ck}(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t). \end{aligned} \quad (6)$$

В зависимости от силовых элементов, устройства и принципа действия ПРМ составляющие рядов Фурье и их величины в выражении (6) изме-

няются. В выражении (6) суммы произведений постоянных составляющих ряда на гармонические составляющие с частотой $k\omega$ и суммы произведений гармонических составляющих разных частот равны нулю. Тогда мгновенное значение полной мощности (7) на входе ПРМ можно записать в виде

$$s(t) = \sum_{k=0}^n u_k(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t). \quad (7)$$

Полная мощность на входе ПРМ может быть рассчитана по формуле

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I. \quad (8)$$

Составляющую мгновенной мощности на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП в левой части выражения (6) обозначим $\Delta s(t)$:

$$\Delta s(t) = \sum_{k=0}^n u_{pk}(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t). \quad (9)$$

Часть полной мощности на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП, выраженная через действующие значения напряжения и тока:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I. \quad (10)$$

Мощность ΔS представляет собой составляющую полной мощности S на входе регулятора мощности, характеризующая ту часть электрической энергии источников, которую нельзя преобразовать в иной вид энергии или с помощью этой части энергии обеспечивать энергообмен в электрической цепи, так как напряжение U_p прикладывается к ПРМ во время непроводящего состояния его силовых элементов.

Мгновенное значение полной мощности на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП (6) можно определить по формуле

$$s(t) = u_{c0} \cdot i_0 + \sum_{k=1}^n u_{ck}(k\omega t) \cdot \sum_{k=1}^n i_k(k\omega t). \quad (11)$$

Каждую k -ю гармонику в выражении (11) можно разложить на косинусную и синусную составляющие ряда. Угол сдвига k -й гармоники тока φ_k относительно одноименной k -й гармоники напряжения с учетом их начальной фазы ψ_{ik}, ψ_{uk} :

$$\varphi_k = \psi_{uk} - \psi_{ik}. \quad (12)$$

Произведение постоянных составляющих и произведения косинусных составляющих ряда (11) в сумме образуют среднее значение полной мощности на входе ПРМ:

$$P = U_{c0} \cdot I_{c0} + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k, \quad (13)$$

где U_{c0} – постоянная составляющая напряжения на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;

I_0 – постоянная составляющая тока на входе ПРМ.

Произведения синусных гармонических составляющих ряда (11) образуют составляющие мгновенной мощности на входе ПРМ, которые принято называть реактивной мощностью:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k. \quad (14)$$

Баланс мощностей с учетом эффективности использования электрического потенциала на входе ПРМ:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (15)$$

Аргумент φ_Σ полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления ПРМ можно рассчитать по формуле

$$\varphi_\Sigma = \arctg \frac{Q}{P} = \arctg \left[\frac{\sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k}{U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k} \right]. \quad (16)$$

Зависимость действующего значения тока на входе ПРМ от эффективности использования электрического потенциала на входе ПРМ можно получить, подставив выражения (8), (10) в (15):

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}}. \quad (17)$$

Таким образом, для энергосбережения при увеличении работы с помощью электрической энергии (17) целесообразно повышать напряжение U на входе преобразователя и в контурах электропривода. Из-за сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии регуляторами мощности и реактивными элементами снижается эффективность работы электроэнергетической системы. Полное использование напряжения на входе преобразователя ($U_p = 0$) реализуется, если регулирование мощности выполнять за счет изменения величины входного электрического сопротивления ПРМ и поддержания его активного характера ($\varphi_\Sigma = 0$). Оценка интенсивности энергообмена (14) позволяет определить мощность устройств компенсации реактивной мощности.

Результаты исследования

В качестве примера можно оценить эффективность использования электрического потенциала на входе выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) с импульсно-фазовым управлением тиристорами секции грузового электровоза, который регулирует мощность 4 тяговых электродвигателей (ТЭД) М типа НБ-514Б номинальной мощностью 765 кВт (рис. 1).

Элементами схемы являются тяговая подстанция с напряжением холостого хода 27,5 кВ, контактная сеть R_{KC}, L_{KC} , тяговый трансформатор TV номинальной мощностью 4350 кВА, два ВИПа по 8 плеч в каждом, собранных на тиристорах VS, и четыре сглаживающих реактора R_S, L_S . Для оценки применяются математическое моделирование электропривода с помощью программы MATLAB в среде Simulink, ФФТ-анализ с помощью блока *powergui* и осциллоскопа. Электропривод работает с номинальным моментом сопротивления на валу $M_C = 7772$ Н·м при пуске, трогании и разгоне до установившейся частоты вращения вала $n = 94$ об/мин. Мощность на валу одного ТЭД $P_2 = 75,56$ кВт, суммарная мощность на валах четырех ТЭД $\sum P_2 = 306,22$ кВт. Действующее напряжение учитываемых гармоник на первичной обмотке $U_1 = 27\,250$ В. Номинальное напряжение 3 секций вторичных обмоток 1260 В. На ВИП подается четвертая часть переменного напряжения от

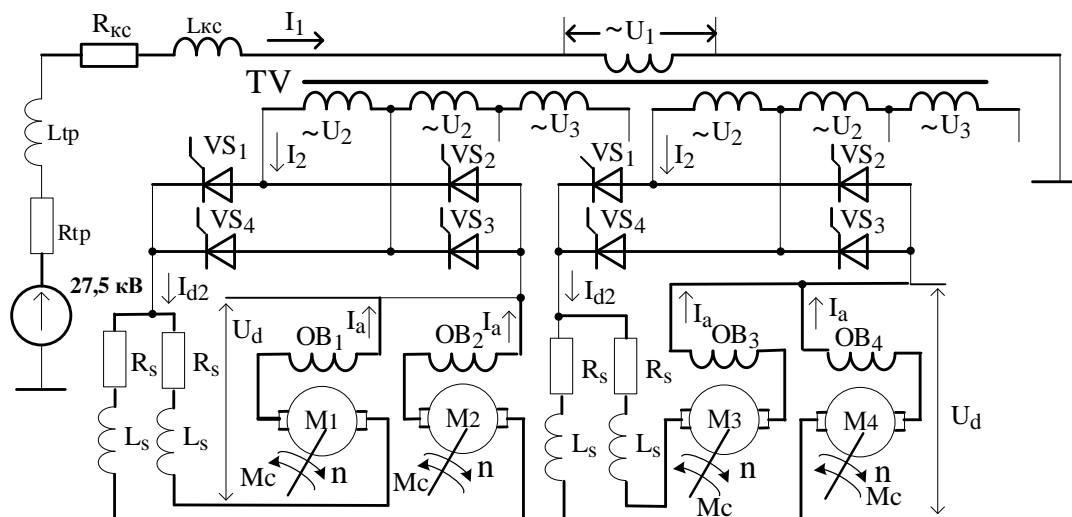


Рис. 1. Силовая электрическая схема электропривода с ВИПами

первой секции TV (см. рис. 1) с понижением выпрямленного напряжения за счет изменения угла регулирования тиристоров для ограничения пускового тока и плавного трогания поезда. На тягу поезда и на потери в электроприводе используется напряжение на первичной обмотке TV u_c (рис. 2) во время проводящего состояния тиристоров.

Суммарное действующее напряжение учитываемых гармоник и их начальные фазы ψ_u получены с помощью ФФТ-анализа $U_C = 20\ 338\ В$ (табл. 1).

С помощью формулы (3) определено напряжение $U_p = 18\ 136\ В$ в первичной обмотке трансформатора во время непроводящего состояния тиристоров ВИП. По первичной обмотке трансформатора протекает несинусоидальный ток i_1 (рис. 3). Действующие значения учитываемых гармоник тока и начальные фазы ψ_i даны в табл. 2.

Суммарный действующий ток учитываемых гармоник в первичной обмотке трансформатора в

установившемся режиме равен $I_1 = 35,51\ А$ и обусловлен суммарным током во вторичных обмотках I_2 , суммарным током 4 ТЭД $I_d = 3225\ А$.

С помощью формул (8), (10), (13), (14) рассчитаны полная мощность $S = 967,37\ кВА$, $\Delta S = 630,01\ кВА$, суммарная активная $P = 685,04\ кВт$, реактивная $Q = 250,21\ кВАр$ мощности, создаваемые учтенными одноименными гармониками несинусоидального напряжения и тока (рис. 2, 3). КПД TV и ВИП – 72,1 %, КПД ТЭД – 62 % и КПД электропривода – $\eta = 44,7\ %$. Коэффициент мощности электропривода $K_M = 0,71$. Потери мощности Баланс мощностей (15) на входе электропривода:

$$\sqrt{967,37^2 - 630,01^2} = \sqrt{685,04^2 + 250,21^2}.$$

Погрешность расчета составляет 0,6 %. Интегральный аргумент φ_Σ полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления электропривода (16) составляет $\varphi_\Sigma = 20,0^\circ$.

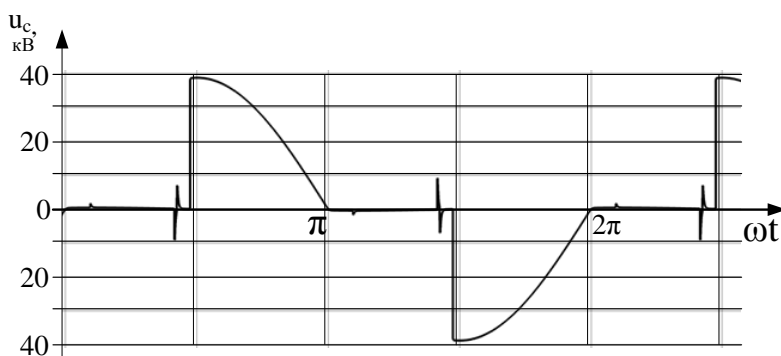


Рис. 2. Временная диаграмма напряжения на первичной обмотке трансформатора во время проводящего состояния тиристоров

Таблица 1

№ гармоник	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$u_1, В$	19880	8093	3376	2366	2028	1396	1370	1044	986	869
$\psi_u, \text{градус}$	-23,8	118,4	-8,1	182	44,0	248,2	98,3	-48,8	154,6	11,0

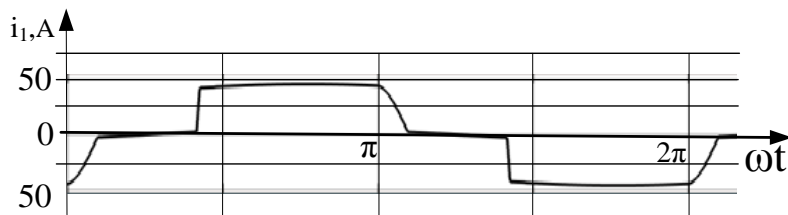


Рис. 3. Временная диаграмма тока в первичной обмотке трансформатора

Таблица 2

№ гармоник	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
i_1, A	34,48	1,71	6,71	3,26	1,42	2,78	1,18	1,13	1,46	0,76
$\psi_i, \text{градус}$	-3,5	51,3	-35,1	234,2	-13,5	-245,3	133,8	-84,3	158,1	17,9

Можно сравнить пуск и работу электропривода с ВИПом и с разработанным регулятором входного электрического сопротивления (рис. 4). Выпрямитель присоединен к трем секциям вторичной обмотки ТВ. Фильтры R_s, L_s устраняют импульсные токи в обмотках ТВ при работе силовых IGBT-транзисторов. Промежуточные емкостные накопители энергии C и диоды, соединенные встречно-параллельно к обмоткам ТЭД позволяют непрерывно использовать энергию электрического и магнитного поля для работы электропривода, устранить из схемы сглаживающие реакторы и снизить в 10 раз коэффициент пульсаций тока в обмотках ТЭД. Импульсы управления IGBT-транзисторами формируются генераторами прямоугольных импульсов (ГПИ). При подаче напряжения на ТВ транзисторы заперты. Диоды переходят в проводящее состояние и выполняется заряд накопителей энергии C до амплитуды переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора ТВ. Диоды выпрямителя запираются, а входное электрическое сопротивление электропривода становится большим.

Импульсы управления подаются на IGBT-транзистор, и выполняется пуск, разгон электродвигателей до установившейся скорости вращения $n = 94,05$ об/мин. Диоды вначале отпираются и запираются вблизи амплитуды переменного напряжения. По мере потребления энергии от промежуточного накопителя напряжение на его выводах снижается и диоды отпираются и запираются при смене фазы переменного напряжения, а из сети увеличивается ток заряда промежуточного накопителя энергии. Входное электрическое сопротивление электропривода уменьшается, а потребляемый из сети ток для заряда накопителей увеличивается.

Сравнение работы электропривода выполняется при одинаковом тяговом электроснабжении и режиме работы электродвигателей. В установившемся режиме работы электропривода выполнен спектральный анализ напряжения и тока в первичной обмотке ТВ (рис. 5, 6, табл. 3, 4).

По ранее приведенным выражениям с использованием спектрального анализа получены резуль-

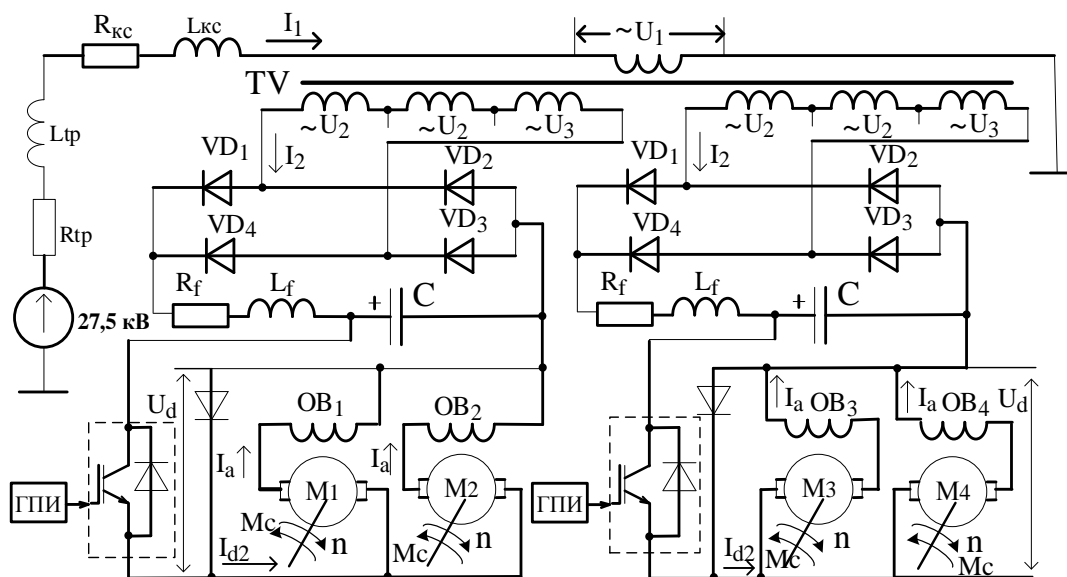


Рис. 4. Силовая электрическая схема электропривода с регулятором входного электрического сопротивления

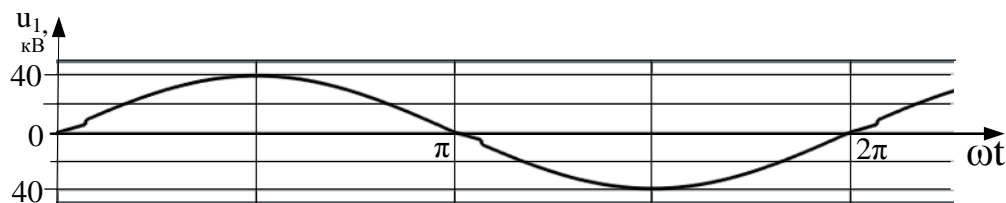


Рис. 5. Временная диаграмма напряжения на первичной обмотке трансформатора

Таблица 3

№ гармоники	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
U_1 , В	27400	142,5	137	134,3	128,8	120,6	115,1	106,9	98,6	87,7
ψ , градус	-0,5	246,4	228,6	211,2	193,7	176,1	158,4	140,4	122,0	103,1

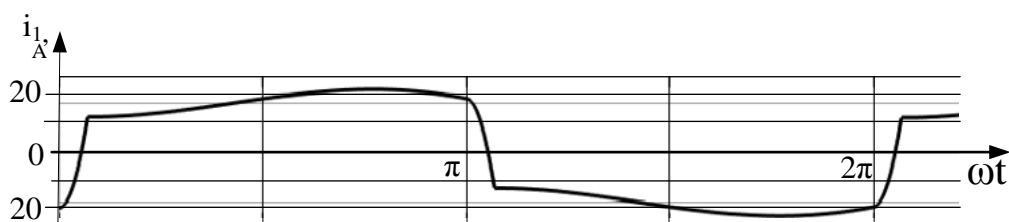


Рис. 6. Временная диаграмма тока в первичной обмотке трансформатора

Таблица 4

№ гармоники	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
I_1 , А	19,71	5,17	3,03	2,10	1,57	1,22	0,97	0,78	0,64	0,52
ψ , градус	-18,6	-18,3	-38,2	-56,6	-74,6	267,6	249,6	231,6	213,2	194,4

таты расчета: полная мощность $S = 565,8$ кВА, суммарная активная и реактивная мощность учетных гармонических составляющих несинусоидального тока и напряжения $P = 513,2$ кВт, $Q = 165,7$ кВАр. Учетные высшие гармоники тока смещены по фазе относительно одноименных гармоник напряжения на углы 90° или 270° , поэтому активные мощности высших гармоник находятся в пределах погрешности расчетов. Из-за коммутации тока в диодах выпрямителя при изменении фазы переменного напряжения снижается эффективность использования электрического потенциала системы электроснабжения (3) и на входе ПРМ образуется мощность $\Delta S = 171,2$ кВА (10). При одном и том же объеме выполненной работы электроприводом с разработанным ПРМ потребляемый ток снижается на 41 %, потери мощности в приводе снижаются на 45 %, потери мощности в системе электроснабжения снижаются на 66 %. Коэффициент мощности электропривода составил $K_M = 0,9$ и повысился на 21 % по сравнению с работой электропривода с ВИПом. Интегральный аргумент входного электрического сопротивления $\varphi_\Sigma = 17,9^\circ$ указывает на то, что реактивная мощность намагничивания трансформатора снижена разработанным регулятором. Улучшенные энергетические показатели электропривода получены

также за счет использования энергии магнитного поля электродвигателей для повышения напряжения и для снижения величины тока в контуре вторичных обмоток, в контуре выпрямленного тока.

Момент сопротивления на валах ТЭД в рассмотренных примерах является предельно допустимым по условию сцепления колес с рельсами. На рис. 7, 8 показаны для сравнения основные энергетические показатели электропривода с ВИПом и с разработанным ПРМ при изменении мощности на валу P_2 ТЭД, полученные и рассчитанные по методике, изложенной ранее при $M_H = 7772$ Н·м.

КПД электропривода η с ВИПом меньше, чем η с разработанным ПРМ, так как в контуре первой секции вторичной обмотки ТВ (1-я зона регулирования) тиристорами ВИП выполняется коммутация тока в 4 раза больше тока, который выполняется диодами ПРМ. Коэффициент мощности K_M в начале каждой зоны регулирования ВИП снижается из-за неэффективного использования напряжения (см. рис. 7), а K_M ПРМ поддерживается на достаточно высоком уровне (см. рис. 8). Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в питающей сети K_U достигает 5,5 % при угле регулирования тиристоров ВИП во 2-й зоне регулирования и снижается до уровня $K_U = 4,5$ % ПРМ с увеличением P_2 .

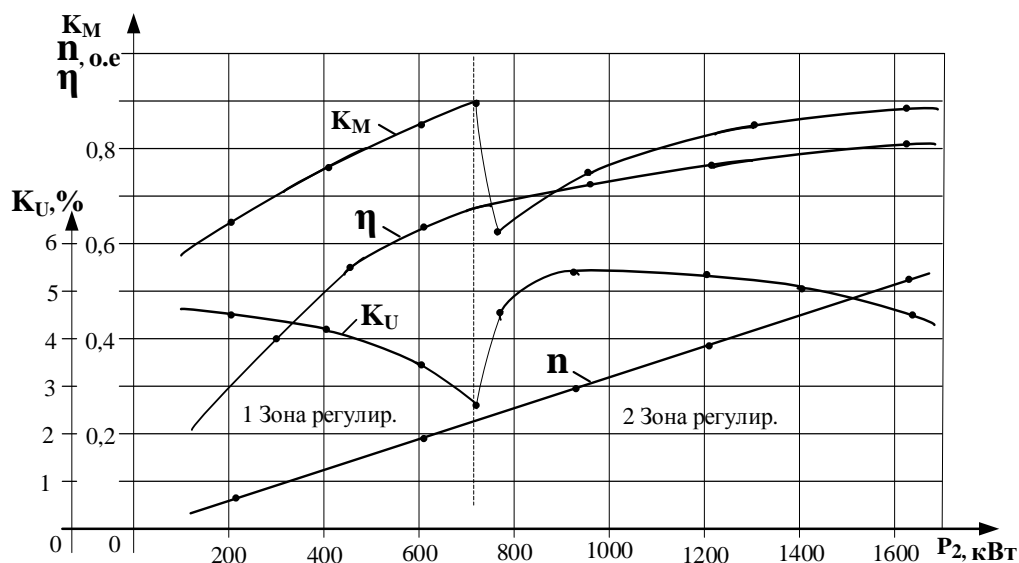


Рис. 7. Основные энергетические показатели электропривода с ВИП

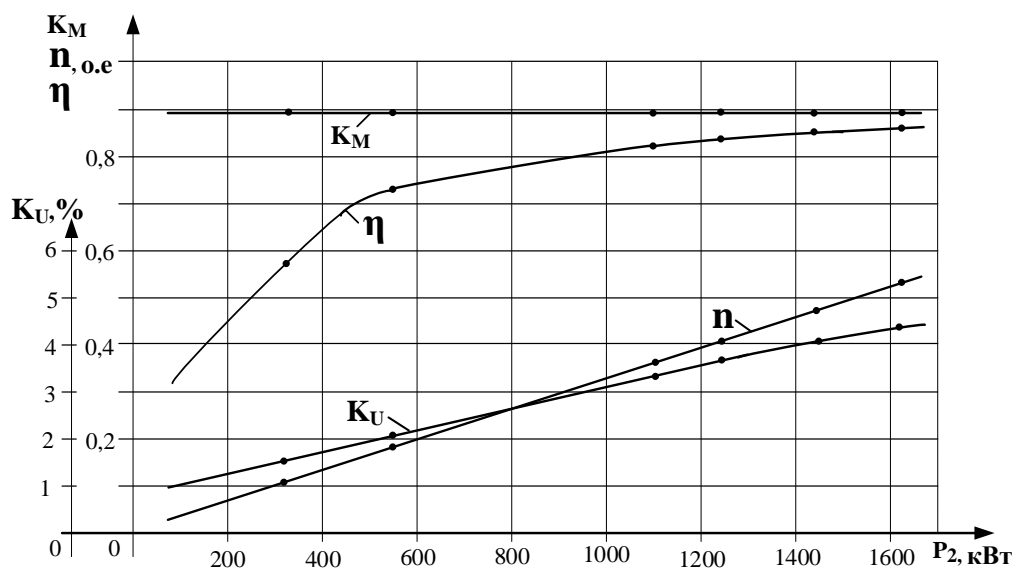


Рис. 8. Основные энергетические показатели электропривода с разработанным ПРМ

Заключение

В результате развития теории основателей фундаментальной электротехники исследованием доказано влияние непроводящего состояния СПП ПРМ на продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии, на их энергетическую эффективность. Потери напряжения и активной мощности в электрических цепях в основном возникают из-за снижения использования электрического потенциала на входе ПРМ и из-за коммутации тока СПП. Результатами исследования показана возможность повышения коэффициента мощности на 21 % и снижения потерь активной мощности в электроприводе на 45 % с помощью регуляторов входного электрического сопротивления. Перспективным направлением дальнейшего совершенствования преобразова-

тельной техники является разработка устройств, которые позволяют повышать напряжение на входе ПРМ и в контурах преобразователя с увеличением их мощности, изменять величину и поддерживать активный характер входного электрического сопротивления ПРМ. Для решения этой сложной задачи потребуются: напряженная научная работа, грамотные технические решения и значительное материальное, финансовое обеспечение.

Предложенные энергетические характеристики устройств способствуют устранению методологических противоречий в образовательном процессе учебных учреждений и повышению точности расчетов при анализе энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковыми приборами.

Литература

1. Poynting, J.H. *On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field* / J.H. Poynting // *Philosactions of the Royal Society*. – London: 1884. – Vol. 175. – P. 343–361.
2. Демирчан, К.С. *Теоретические основы электротехники* / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – Т. 2. – 431 с.
3. Афанасьев, Б.П. *Теория линейных электрических цепей* / Б.П. Афанасьев, О.Е. Гольдин, И.Г. Клячкин. – М.: Высшая школа, 1973. – 592 с.
4. Маевский, О.А. *Энергетические характеристики вентильных преобразователей*. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
5. Akagi, H. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook* / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 379 p. DOI: 10.1002/0470118938
6. Бурков, А.Т. *Электроника и преобразовательная техника* / А.Т. Бурков. – М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – Т. 2. – 307 с.
7. Зиновьев, Г.С. *Основы силовой электроники*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
8. Хохлов, Ю.И. *Внешние и энергетические характеристики двенадцати фазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением* / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2014. – Вып. 4, № 14. – С. 37–45.
9. Осипов, О.И. *Управление тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей* / О.И. Осипов, В.В. Мельников, А.А. Оськин, К.П. Куцый // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2008. – Вып. 10, № 26. – С. 56–60.
10. Francesco, V. *Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters* / V. Francesco, I. Luigi. – Springer, 2012. – 492 p.
11. Розанов, Ю.К. *Силовая электроника* / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
12. Dahidah, M.S.A. *Selective harmonic elimination PWM control for cascaded multilevel voltage source converters: a generalized formula* / M.S.A. Dahidah, V.G. Agelidis // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2008. – Vol. 23, no. 4. – P. 1620–1630. DOI: 10.1109/tpel.2008.925179
13. Усынин, Ю.С. *Системы управления электроприводов* / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
14. Воронин, С.Г. *Регулирование механических координат вентильного электропривода методом векторного управления* / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2015. – Т. 15, №3. – С. 52–58.
15. Teigelkotter, J. *Мощные преобразователи на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе* / J. Teigelkotter, D. Sprenger. – Мюнхен: Siemens AG, 2000.
16. Литовченко, В.В. *4gS-четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока* / В.В. Литовченко // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2000. – № 3. – С. 64–73.
17. Кулинич, Ю.М. *Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока за счёт изменения структуры преобразователя* / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев, Д.Ю. Дроголов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2019. – № 2. – С. 47–52.
18. Дудкин, М.М. *Исследование помехоустойчивости фазосдвигающих устройств для управления силовыми вентильными преобразователями* / М.М. Дудкин // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2008. – № 4. – С. 35–39.
19. Розанов, Ю.К. *Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения* / Ю.К. Розанов, Р.П. Гринберг // *Электротехника*. – 2006. – № 10. – С. 55–60.
20. Эффективность электроэнергетической системы / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Н.М. Астраханцева, Л.А. Астраханцев // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2015. – № 3 (47). – С. 181–186.
21. Рябченко, Н.Л. *Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования* / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев // *Материалы III всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Иркутск: ИГУ, 2018. – С. 431–434.

Алексеева Татьяна Леонидовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; talecseeva843@gmail.com.

Рябченко Наталья Леонидовна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, astranal@mail.ru.

Астраханцев Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, astrahancev1943@mail.ru.

Тихомиров Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, svat_irk@mail.ru.

Поступила в редакцию 24 февраля 2020 г.

DOI: 10.14529/power200208

ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRICAL CIRCUITS CARRYING SEMICONDUCTOR DEVICES

*T.L. Alekseyeva, talecseeva843@gmail.com,
N.L. Ryabchenok, astranal@mail.ru,
L.A. Astrakhantsev, astrahancev1943@mail.ru,
V.A. Tikhomirov, svat_irk@mail.ru*

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

The paper discusses the theory of energy processes in electrical circuits carrying semiconductor converters, which are widely used in a variety of industries. Analysis of the known energy efficiency and electromagnetic compatibility improvement solutions applicable to converters is what defines the goals hereof. The energy conservation law and spectral analysis of non-sinusoidal voltage and current are the methodological fundamentals of this research into energy efficiency of semiconductor-carrying circuits. The article cites papers by the founders of fundamental electrical engineering to devise new energy-related characteristics of semiconductor converters. The research proves that the non-conducting state of semiconductor converters affects the duration of the irreversible electricity conversion into a different kind of energy; it thus substantiates the need to account for the spectrum of non-sinusoidal voltage and current harmonics. To reduce the current consumption from the grid, the paper proposes using converters to regulate power by means of value adjustment and to 'activate' their input resistance. Mathematical modeling shows that the energy performance of an electric drive can be improved by using a semiconductor variable-voltage transformer instead of a controlled rectifier. The devised energy characteristics of semiconductor-based power controllers determine the promising future converter improvements; they also help address the methodological contradictions pertaining to teaching electrical engineers.

Keywords: energy efficiency, converter, voltage, power, input electrical resistance.

References

1. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosactions of the Royal Society*. London, 1884, vol. 175, pp. 343–361.
2. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009, vol. 2. 431 p.
3. Afanas'ev B.P., Gol'din O.E., Klyatskin I.G. *Teoriya lineynykh elektricheskikh tsepey* [Linear Electrical Circuit Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 592 p.
4. Maevskii O.A. *Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei* [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 320 p.
5. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. The Power Engineering: Handbook*. New York, Wiley, 2007. 379 p. DOI: 10.1002/0470118938
6. Burkov A.T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika* [Electronics and Converter Technology]. Moscow, UMTs ZhDT Publ., vol. 2, 2015. 307 p.
7. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Bases of a Power Electronics Engineering]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 672 p.

8. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzinger P.V. [External and Energy Characteristics of Twelve-Hase Compensated Vector-Controlled Rectifiers]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 4, no. 14, pp. 37–45 (in Russ.)

9. Osipov O.I., Mel'nikov V.V., Os'kin A.A., Kutsyy K.P. [Control of Thyristor Exciters of High-voltage Synchronous Motors]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Energetika*, 2008, no. 26, iss. 10, pp. 56–60. (in Russ.)

10. Francesco V., Luigi I. *Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters*. Springer, 2012. 492 p.

11. Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika* [Power Electronics Engineering]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI Publ., 2007. 632 p.

12. Dahidah M.S.A., Agelidis V.G Selective harmonic elimination PWM control for cascaded multilevel voltage source converters: a generalized formula. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1620–1630. DOI: 10.1109/tpe.2008.925179

13. Usynin Yu.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control Systems of Electric Drives]. Chelyabinsk, South Ural State University, 2004. 328 p.

14. Voronin S.G., Kurnosov D.A. [Adjustment of Echanical Coordinates of the Valve Electric Drive of the Vector Control Meta-house]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Energetika*, 2015, no.3, iss. 15, pp. 52–58. (in Russ.)

15. Teigelkotter J, Sprenger D. *Moshchnye preobrazovateli na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave* [Powerful IGBT-transistor Converters for Railway Rolling Stock Applications]. Munich, Siemens AG, 2000.

16. Litovchenko V.V. [4gS-Quadrant converter of AC electric locomotives]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [News of Higher Education Institutions of the Electrician], 2000, no. 3, pp. 64–73. (in Russ.)

17. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Drogolov D.Yu. [Increase of AC Electric Locomotive Power Factor Due to Change of Converter Structure]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Higher School Proceedings. Electrician], 2019, no. 2, pp. 47–52. (in Russ.)

18. Dudkin M.M. [Investigation of Noise Immunity of Phase-Shifting Devices for Control of Power Valve Converters]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Higher School Proceedings. Electrician], 2008, no. 4, pp. 35–39. (in Russ.)

19. Rozanov Yu.K., Grinberg R.P. [Hybrid Filters to Reduce Non-Sinusoidality of Current and Voltage in Power Supply Systems]. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 10, pp. 55–60. (in Russ.)

20. Alekseeva T.L. Ryabchenok N.L., Astrakhantseva N.M., Astrakhantsev L.A. [Effectiveness of an Electrical Power System]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2015, no. 3 (47), pp. 181–186. (in Russ.)

21. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. [New Opportunities to Increase the Efficiency of the Educational Process in Educational Institutions of Higher Education]. *Materialy III vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya"* [Materials of III All-Russian Scientific and Practical Conferences with International Participation "Modern problems of vocational education: experience and solutions"]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2018, pp. 431–434. (in Russ.)

Received 24 February 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208

FOR CITATION

Alekseyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energy Efficiency of Electrical Circuits Carrying Semiconductor Devices. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 89–98. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200208