

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Алексеева Татьяна Леонидовна

*канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: talecseeva@rbcmil.ru*

Рябченко Наталья Леонидовна

*канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: astranal@mail.ru*

ENERGY-SAVING UTILIZATION OF ELECTRICAL ENERGY

Tatyana Alekseeva

*candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Irkutsk State University of Railways,
664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Street, 15*

Natalya Ryabchenok

*candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Irkutsk State University of Railways,
664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Street, 15*

АННОТАЦИЯ

Получена зависимость энергетической эффективности системы от изменения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии на основе уточнения закона сохранения энергии. Формула для расчета модуля реактивной мощности в электрических цепях с несинусоидальным напряжением и током применена для расчета аргумента с возможностью оценки характера входного электрического сопротивления регулятора мощности с нагрузкой. Достоверность расчетов с помощью разработанных энергетических характеристик полупроводниковых регуляторов мощности с нагрузкой подтверждена примерами. Впервые показана возможность расчета коэффициента мощности не только в электрических цепях переменного тока, но и в цепях постоянного тока с импульсными регуляторами мощности. Обоснован новый параметр управления мощностью для энергосбережения полупроводниковыми регуляторами мощности, их электромагнитной совместимости с другими элементами электроэнергетической системы и для снижения воздействия энергетики на природную среду. Регуляторы мощности с управлением мощностью за счет изменения входного электрического сопротивления приобретают свойство электрических вариаторов. Предложено в качестве регуляторов мощности различного назначения применять электрические полупроводниковые вариаторы. Высокая энергетическая эффективность, энергосберегающее использование электрической энергии и электромагнитная совместимость элементов обеспечивается электрическими полупроводниковыми вариаторами.

ABSTRACT

The dependence of system energy efficiency on changing the length of the irreversible conversion of electrical energy into another form of energy based on clarifying the energy conservation law is obtained. The formula to calculate the reactive power module in electrical circuits with non-sinusoidal voltage and current is applied to the calculation of an argument with the possibility of assessing the nature of the input electrical resistance of power control with the load. The calculation reliability with the help of developed power characteristics of semiconductor power controllers with the load is confirmed by examples. For the first time the possibility of calculating the power factor is shown not only in the electrical alternating current circuits, but also in direct-current circuits with a switching regulator power. The energy control factor is justified for power saving of semiconductor power regulators, their electromagnetic compatibility with other elements of the power system and for reducing the energy impact on the environment. Power controllers with power control by changing the input of electrical resistance have the property of electric regulators. It is proposed to use variable speed electric semiconductors as power controllers for different purposes. High energy efficiency, energy-efficient use of electrical energy and the electromagnetic compatibility of elements are provided by electrical semiconductor regulators.

Ключевые слова: эффективность, энергия, мощность, источник энергии, полупроводниковый прибор, вариатор, накопитель энергии, потребитель энергии.

Keywords: efficiency, energy, power, power source, semiconductor device, variator, energy store, energy consumer.

В настоящее время для энергосбережения при управлении мощностью и потоком энергии регуляторами мощности снижается энергетическая эффективность и нарушается электромагнитная совместимость элементов электроэнергетической системы с увеличением глубины регулирования мощности, не реализована возможность снижения потерь энергии при производстве, передаче и использовании электроэнергии.

Исследование направлено на выявление причины существующей проблемы, обоснование параметра управления мощностью для разработки перспективных регуляторов мощности. В работе [2] на основе уточненного закона сохранения энергии с применением преобразования Фурье получен баланс мощности (1) для электрических цепей с учетом сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии реактивными элементами и коммутационными аппаратами. Правая часть уравнения (1) является модулем полной мощности на входе ПРМ, которая характеризует электрическую энергию, необратимо преобразованную в иной вид энергии и расходуемую на энергообмен элементов электрической цепи.

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1)$$

Полная мощность на входе полупроводникового регулятора мощности (ПРМ) может быть рассчитана по формуле

$$S_G = U \cdot I, \quad (2)$$

где U, I – действующие значения напряжения, тока на входе ПРМ.

Составляющая мгновенной мощности на входе ПРМ во время непроводящего состояния силовых полупроводниковых приборов (СПП) в левой части выражения (1) $\Delta s(t)$:

$$\Delta s(t) = \sum_{k=0}^n u_{pk}(k\omega t) \cdot \sum_{k=0}^n i_k(k\omega t). \quad (3)$$

Так как в выражении (3) содержатся произведения одноименных составляющих ряда Фурье, тогда еще одна составляющая полной мощности на входе ПРМ, выраженная через действующие значения напряжения и тока, равна

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2 \cdot I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (4)$$

где U_{pk} – действующее значение напряжения k -й составляющей ряда Фурье на входе регулятора мощности во время непроводящего состояния СПП;

I_k – действующее значение одноименной k -й гармоники тока на входе ПРМ;

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

Мощность ΔS представляет собой составляющую полной мощности 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, так как напряжение прикладывается к регулятору мощности во время непроводящего состояния его силовых элементов. Под символом ΔS понимается потенциальная или пассивная мощность, она образуется на входе ПРМ при импульсной передаче потока энергии от источника к потребителю. Так как действующее напряжение U_p во время паузы в потоке энергии не используется для выполнения работы с помощью электрической энергии, то действующий ток превышает минимальный ток (активный ток), который можно было потреблять от источников энергии при полном использовании действующего напряжения на входе регулятора мощности.

Мгновенное значение полной мощности на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП

$$S_{Gc}(t) = u_{c0} \cdot i_0 + \sum_{k=1}^n u_{ck}(k\omega t) \cdot \sum_{k=1}^n i_k(k\omega t). \quad (5)$$

Каждую k -ю гармонику в выражении (5) можно разложить на косинусную и синусную составляющие ряда.

Произведение постоянных составляющих и произведения косинусных составляющих ряда (5) в сумме образуют среднее значение полной мощности на входе ПРМ (6).

$$P = U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \phi_k, \quad (6)$$

где U_{c0} , – соответственно среднее значение напряжения и действующее значение напряжения k -й гармоники на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;

I_0 , – соответственно среднее значение тока и действующее значение тока k -й гармоники на входе ПРМ;

Произведения синусных гармонических составляющих ряда (5) образуют составляющие мгновенной мощности на входе ПРМ (7), которые принято называть реактивной мощностью.

$$Q = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \phi_k}. \quad (7)$$

Аргумент полной мощности на входе ПРМ, которая используется для выполнения работы в технологическом процессе и для энергообмена в электрической цепи с несинусоидальным напряжением и током можно рассчитать с помощью выражения (8)

$$\phi_2 = \arctg \frac{Q}{P} = \arctg \frac{\pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \phi_k}}{U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \phi_k} \quad (8)$$

Положительный знак аргумента указывает на активно-индуктивный характер входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой, а отрицательное значение аргумента полной мощности – на активно-емкостный характер входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой.

С учетом (2 – 7) из выражения (1) можно аналитически выявить причины недостатков ПРМ, производимых заводами в настоящее время, и определить перспективные направления технических решений для обеспечения энергосберегающего использования электрической энергии

$$\sqrt{I^2 \cdot U^2 - I^2 \cdot U_p^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (9)$$

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}} \quad (10)$$

ПРМ различного назначения отечественного и импортного производства для управления технологическими процессами изменяют продолжительность использования электрической энергии источников, поэтому с увеличением глубины регулирования мощности за счет увеличения U_p снижается энергетическая эффективность и нарушается электромагнитная совместимость элементов электрических сетей.

Мощности можно рассчитать по формулам (2 – 7) с высокой точностью при помощи современных

компьютерных программ, а на практике измерить величины приборами, по их показаниям рассчитать отдельные составляющие выражения (1) и проверить баланс мощности.

Аналитическое выражение для расчета коэффициента мощности K_M , позволяющего оценить эффективность использования электрической энергии для выполнения работы с учетом реактивных элементов и работы коммутационного оборудования в электрической цепи (11) можно получить, если в выражении (1) левую и правую части возвести в квадрат и перенести ΔS в правую часть уравнения.

$$K_M = \frac{P}{S_G} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}} \cdot \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = K_C \cdot K_Q, \quad (11)$$

где $K_C = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}}$ – коэффициент, учитывающий изменение коммутационным оборудованием продолжительности использования электрической

энергии источников; $K_Q = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$ – коэффициент, учитывающий изменение реактивными элементами

электрической цепи продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии.

Под продолжительностью использования электрической энергии источников понимается часть времени цикла потребления электрической энергии для необратимого ее преобразования в иной вид энергии, а также для энергообмена между реактивными элементами и источником энергии.

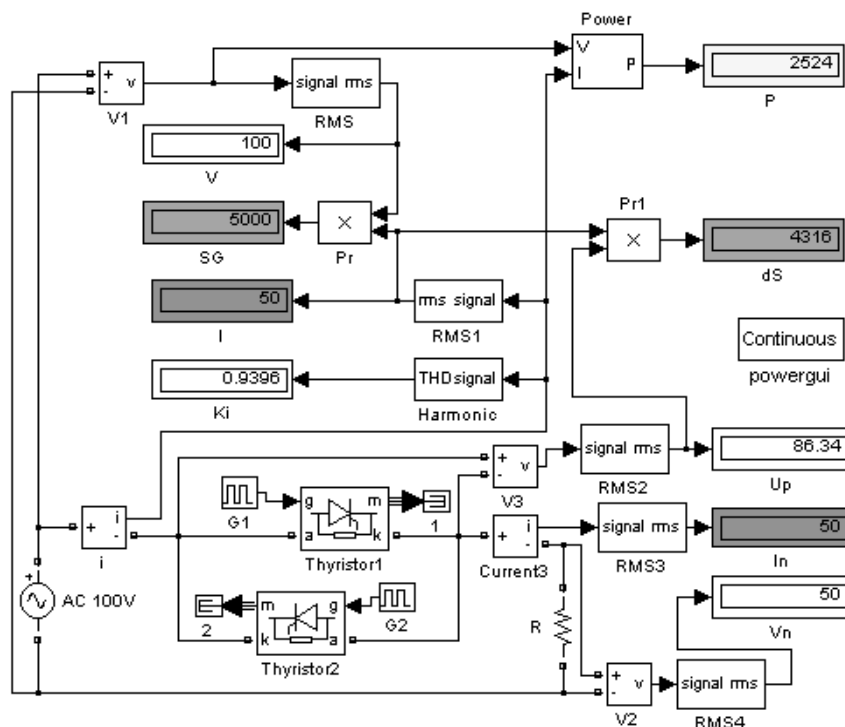


Рисунок 1. Математическая модель энергетических процессов в электрической цепи переменного тока

Баланс мощности (1) проверен с помощью математического моделирования в среде Matlab в электрических цепях переменного (рис. 1) и постоянного (рис. 2) тока с полупроводниковыми регуляторами напряжения и резистивной нагрузкой R . Геометрическая разность полной мощности S_G и мощности ΔS равна активной мощности P , не зависит от способа импульсного управления СПП регуляторов. При напряжении источника энергии 100 В используется 50 В для преобразования электроэнергии в тепловую энергию резистора R , а другая часть напряжения источника $U_p = 86$ В прикладывается к СПП регуляторов во время их непроводящего состояния.

Такие же результаты получены [1] с применением полупроводниковых регуляторов с пакетным управлением напряжения, с частотно-импульсной и

широтно-импульсной модуляцией напряжения. Регулирование мощности за счет сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии и формирования U_p вызывает значительные нелинейные искажения формы кривой мгновенного значения тока. Коэффициент искажения формы кривой тока рассчитан с помощью блока THD signal Harmonic $K_i = 0,93$ (Рис. 1, 2).

В рассмотренных примерах $\Delta S = 4300$ ВА, поэтому коэффициент мощности равен $K_M = 0,5$ в цепи переменного и в цепи постоянного тока, из-за непроводящего состояния полупроводниковых приборов и сокращения продолжительности использования электрического потенциала источников для производства тепловой энергии в резисторе R .

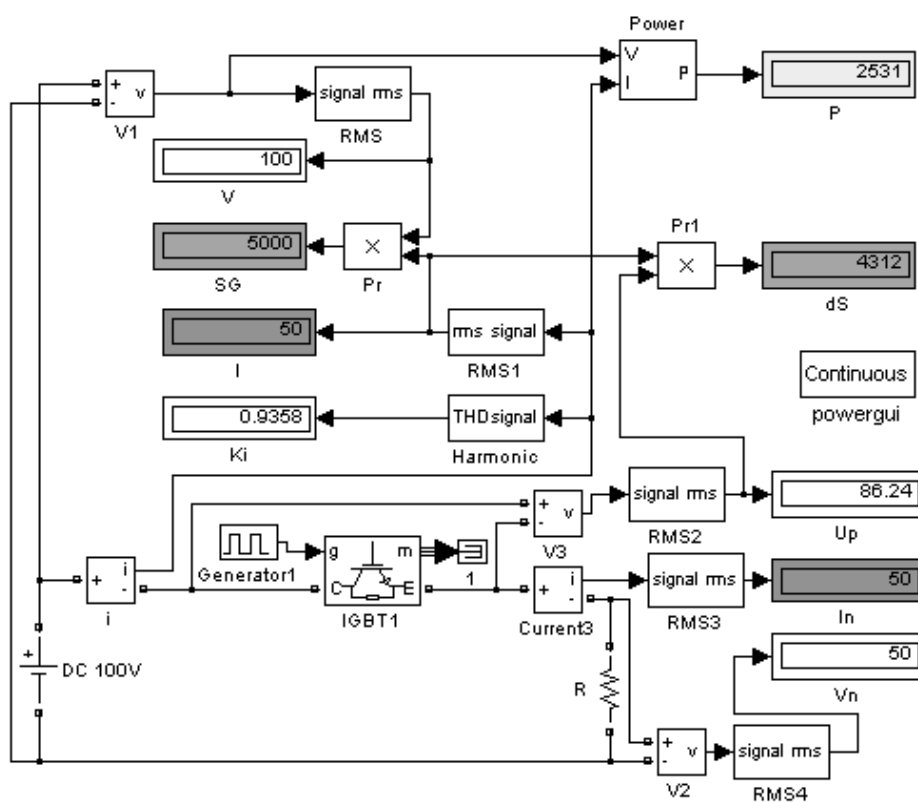


Рисунок 2. Математическая модель энергетических процессов в электрической цепи постоянного тока

При импульсно-фазовом управлении тиристорами (Рис. 1) с отстающим или опережающим углом регулирования на входе регулятора напряжения с резистивной нагрузкой варметр показывает мощность сдвига Q_1 с отрицательным или положительным знаком. Регуляторы мощности за счет изменения величины и характера электрического сопротивления непрерывно передают поток энергии от источника к потребителю и приобретают свойство электрического вариатора, который изменяет соотношение токов на входе и выходе в зависимости от соотношения

напряжений на входе и выходе вариатора. Производимые в настоящее время регуляторы мощности таким свойством не обладают (Рис. 1, 2). Математическая модель энергетических процессов при работе электрического полупроводникового вариатора (ЭПВ) представлена на рисунке 3. Из выражения (10) следует, что активную мощность $P = 2500$ Вт при полном использовании напряжения $U = 100$ В можно получить снизив в два раза действующий ток на входе ЭПВ по сравнению с регуляторами напряжения путем увеличения входного электрического сопротивления регулятора мощности с нагрузкой.

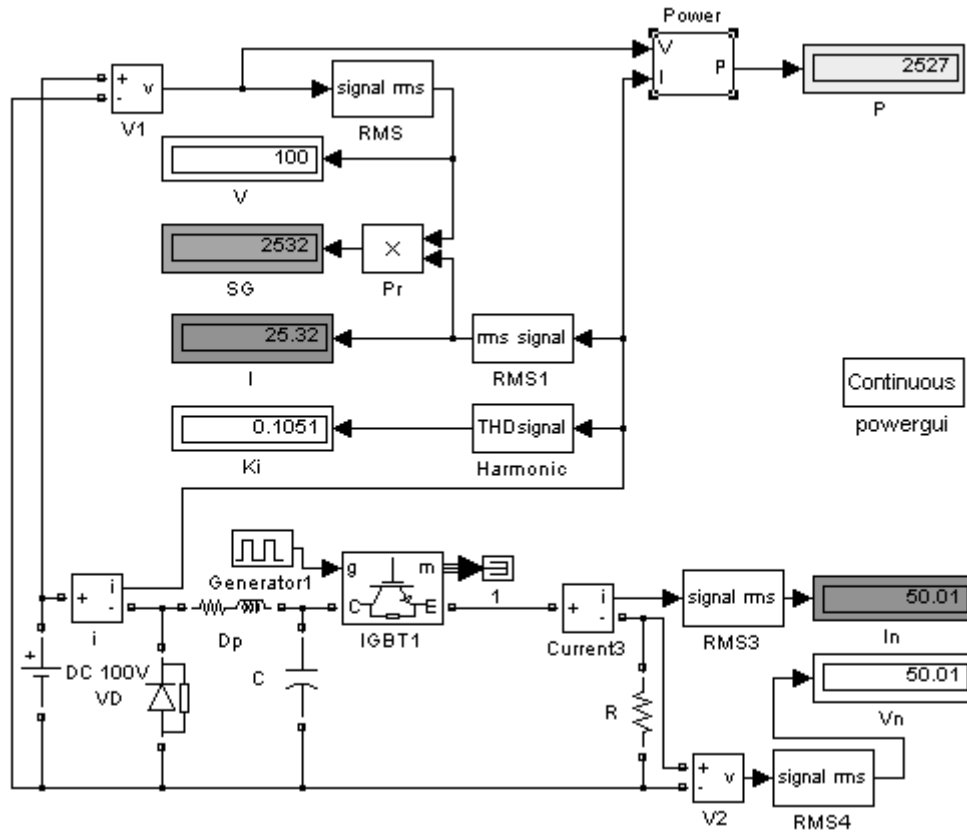


Рисунок 3. Математическая модель работы электрического полупроводникового вариатора с резистивной нагрузкой

Мощность $\Delta S = 0$, а коэффициент мощности $K_M = 1$. Его высокая энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость реализуется на всем диапазоне регулирования мощности без применения дополнительного оборудования для компенсации мощности сдвига Q_1 и мощности искажения T . Свойство электрического вариатора в рассмотренном примере (Рис. 3) достигается за счет непрерывного потока энергии от источника к промежуточному накопителю энергии C . В сочетании с дросселем D_p , который исключает импульсное потребление энергии от источника, накопитель энергии C выполняет функцию фильтра. Нелинейные искажения формы кривой мгновенных значений тока ($K_i = 0,1$), вариатором снижаются, поэтому нелинейные искажения формы кривой напряжения в системе электроснабжения будут меньше нормально допустимого ГОСТом уровня. В разработанных и апробированных на практике полупроводниковых регуляторах мощности для управления электротермическими установками и электроприводом мощностью 300 кВт [1] изменяется величина входного электрического сопротивления

устройств без промежуточных накопителей энергии и фильтров.

Выводы.

1. Использование новых энергетических характеристик, разработанных на основе уточненного закона сохранения энергии, можно совершенствовать научно-методическую работу в учебных учреждениях и ориентировать специалистов на разработку, изготовление и применение на практике полупроводниковых регуляторов мощности нового поколения.

2. Регулятор мощности с нагрузкой приобретает свойство электрического полупроводникового вариатора, если им изменяется поток энергии от источника к потребителю энергии за счет изменения величины и характера входного электрического сопротивления.

3. Электрический полупроводниковый вариатор обеспечивает энергосбережение до 20 – 40 процентов за счет полного использования электрического потенциала источника энергии и электрических сетей для выполнения работы, а непрерывной передачей потока энергии от источника к потребителю энергии достигается электромагнитная совместимость элементов в электроэнергетической системе.

Список литературы:

1. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л., Астраханцева Н.М., Астраханцев Л.А. Электронные преобразователи для ресурсосберегающих технологий. – Иркутск: ИрГУПС, 2010.– 240 с.

2. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Якобчук К.П., Астраханцев Л.А. Уточненный закон сохранения энергии / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm. (дата обращения 17.10.2016).

References:

1. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantseva N.M., Astrakhantsev L.A. Electronic converters for resource-saving technologies. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2010. 240 p. (In Russian).
2. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. The specified energy conservation law. Available at: URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm. (accessed 17 October 2016).