

УДК 621.316.722

Анализ искажения формы сигнала на выходе цифрового регулятора напряжения

А.А. Кириллов

ФГБОУВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»,
Рыбинск, Российская Федерация
E-mail: andrey_kirillov_87@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применяемые в настоящее время способы тиристорного регулирования напряжения вносят значительные искажения в электрическую сеть.

Материалы и методы: Моделирование формы сигнала на выходе регулятора напряжения и расчет его спектрального состава осуществляются в программной среде MatLab.

Результаты: Произведен анализ искажений формы сигнала при различных способах регулирования действующего напряжения. Рассмотрены регуляторы, построенные на основе секционированных трансформаторов. Приведена зависимость коэффициента искажений от параметров регулятора и особенностей управления.

Выводы: Полученные характеристики целесообразно использовать в процессе проектирования регуляторов напряжения с контролируемым спектральным составом.

Ключевые слова: коэффициент искажений, действующее напряжение, управление, широтно-импульсное модулирование.

Analysis of signal deformation in output of digital voltage regulator

A.A. Kirillov

Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation
E-mail: andrey_kirillov_87@mail.ru

Abstract

Background: The currently applied methods of thyristor voltage regulation make a major distortion in the electrical network.

Materials and methods: The waveform simulation in output of the voltage regulator and the calculation of its spectral composition in the MatLab programming environment.

Results: The analysis of signal deformation as a result of different methods of effective voltage regulation was performed. The regulators designed on the basis of sectionalized transformers were considered. The dependence of deformations coefficient with the regulator parameters and features of control was given.

Conclusions: The obtained characteristics are reasonable to be applied in the design of voltage regulators with controlled spectral composition.

Key words: deformation coefficient, effective voltage, control, pulse duration modulation.

Одной из наиболее востребованных наукоемких технологий энергосбережения становится технология производства свето-диодов. Основой для производства сверхъярких светодиодов являются подложки из лейкосапфира. Кристаллы сапфира по методу Киропулоса выращивают путем медленного снижения температуры расплава. При этом в течение длительного времени плавно снижается мощность на нагревателе. Спектральный состав мощности, питающей установку, оказывает заметное влияние на температурное поле теплового узла, а следовательно, сказывается на качестве сапфиров [1]. Вследствие этого необходима разработка класса устройств и методов регулирования электрической мощности при условии соблюдения ограничений в части электромагнитной совместимости и качества электроснабжения.

В настоящее время в связи с автоматизацией промышленного производства широкое распространение получили цифровые регуля-

торы напряжения (ЦРН), то есть регуляторы, важной характеристикой которых является линейность зависимости действующего значения напряжения на выходе регулятора от входного тока [2].

Перспективным направлением развития ЦРН с малой погрешностью регулирования является построение регуляторов напряжения на основе секционированных трансформаторов [3], которые позволяют обеспечить высокий коэффициент полезного действия. Получить требуемое действующее значение напряжения можно периодическим переключением между дискретными уровнями напряжения секционированного трансформатора. Интервал времени, в течение которого происходит переключение, называется периодом регулирования $T_{\text{РЕГ}}$. На электронные ключи секций подаются импульсы, определяющие логические состояния ключей. Длительность периода регулирования $T_{\text{РЕГ}}$ и момент переключения $T_{\text{М}}$ характеризуют сигнал с широтно-импульсным

модулированием (ШИМ). Так как ШИМ-управление применяется для двух ключей одновременно, такой способ управления можно назвать комбинированным ШИМ-методом. Погрешность при использовании данного способа во многом зависит от аппаратной реализации регулятора. В частности, точность, с которой можно задать момент переключения, определяет точность действующего значения сигнала на выходе регулятора. Схема регулятора напряжения, реализующего комбинированный ШИМ-метод управления, показана на рис. 1.

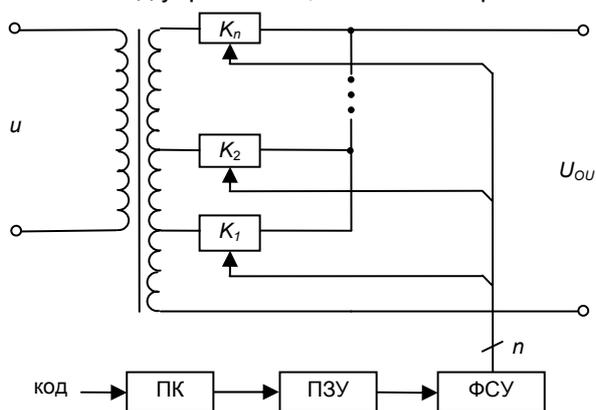


Рис. 1. Структурная схема ЦРН

ЦРН содержит n -секционный трансформатор, преобразователь кода (ПК), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и формирователь сигналов управления (ФСУ). Подключение нагрузки к секциям ДРТ осуществляется с помощью электронных ключей K_1, K_2, \dots, K_n . Подача логической единицы на ключ соответствует открытому состоянию ключа, подача логического нуля – закрытому состоянию. В каждый момент времени лишь один электронный ключ открыт. Во избежание короткого замыкания ситуации, когда открыты два и более ключа, должны исключаться ФСУ.

Регулятор функционирует следующим образом. На вход регулятора поступает код. Исходя из этого кода ПК формирует адрес области памяти, в которой хранится набор данных. Набор состоит из номера секции, определяющей начальный уровень напряжения, номера секции, определяющей конечный уровень напряжения и момент переключения между секциями начального и конечного уровней.

В начале каждого периода регулирования ФСУ обрабатывает данные из ПЗУ и на их основе выдает по n -разрядной шине сигналы управления электронными ключами секций. Через интервал времени, определяемый моментом переключения, происходит подключение другой секции.

Комбинированный ШИМ-метод управления, применяемый для получения действующего значения напряжения, вносит искажение формы сигнала на выходе ЦРН. Характер искажения зависит от соотношения между пе-

риодом регулирования $T_{\text{РЕГ}}$ и периодом сетевого напряжения T . Рассмотрим два варианта (рис. 2): первый – период регулирования равен полупериоду сетевого напряжения; второй – период регулирования кратен полупериоду сетевого напряжения.

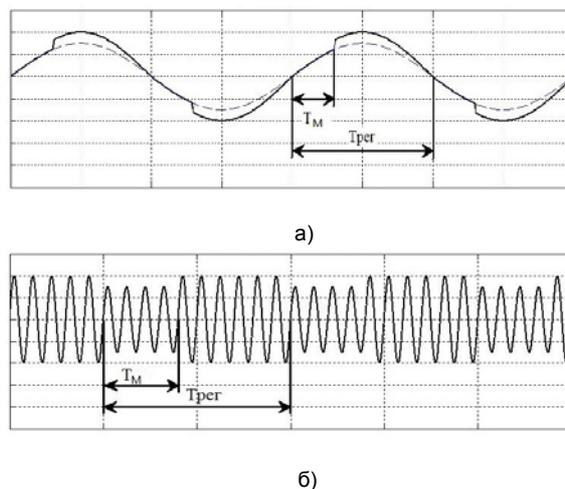


Рис. 2. Форма сигнала на выходе ЦРН: а – период регулирования равен полупериоду сети; б – период регулирования кратен полупериоду сети

Произведем сравнение двух вариантов комбинированного ШИМ-метода, чтобы сделать вывод, какой из них вносит меньше искажения. Согласно ГОСТ 13109-97¹, искажение оценивается с помощью коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, который рассчитывается по формуле

$$K_{\text{нecин}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1} \quad (1)$$

При использовании способа регулирования, в котором период регулирования кратен полупериоду сети, в сигнале на выходе регулятора возникают субгармоники, которые не являются кратными гармонике сети. В результате искажения, вносимые данным способом регулирования, не могут быть объективно оценены по формуле (1). Коэффициент искажений $K_{\text{и}}$ предлагается рассчитывать по формуле, в которой сумма всех спектральных компонент кроме гармонике сети $U_{(50)}$ соотносится с действующим значением сигнала:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sqrt{\sum U_i^2 - U_{(50)}^2}}{U_{\text{дейст}}} \quad (2)$$

¹ ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 33 с.

Коэффициент искажений зависит от момента переключения с одной секции трансформатора на другую. Для определения зависимости моделирование формы сигнала, а также расчет действующего значения и коэффициента искажений произведем в программной среде *MatLab*. Для получения спектра сигнала воспользуемся функцией быстрого преобразования Фурье [4].

На рис. 3 изображены характеристики обоих рассматриваемых вариантов регулирования, построенные для случая, когда амплитуда напряжения на одной из переключаемых секций больше амплитуды напряжения на другой секции в 2 раза.

Анализ полученных характеристик (рис. 3) показывает, что коэффициент искажений принимает наибольшее значение, если момент переключения происходит вблизи середины периода регулирования.

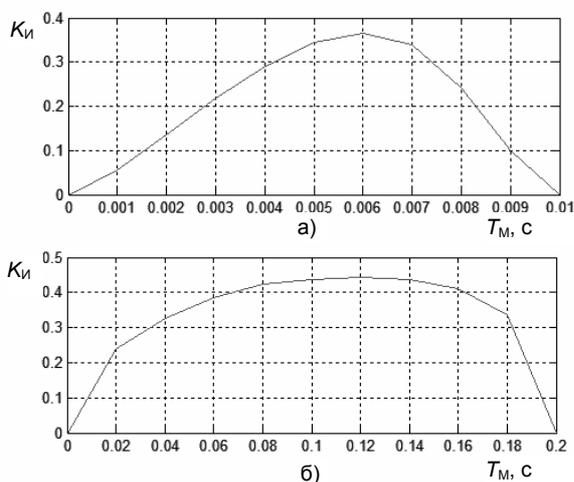


Рис. 3. Зависимость коэффициента искажений от момента переключения: а – период регулирования равен полупериоду сети; б – период регулирования кратен полупериоду сети

Выполним сравнение коэффициента искажений для двух вариантов комбинированного ШИМ-метода при условии получения на выходе ЦРН одного и того же действующего значения напряжения. Анализ произведем для случая, когда переключение происходит вблизи середины периода регулирования, то есть сигнал имеет наибольший коэффициент искажений. В качестве примера рассмотрим ЦРН на основе трансформатора с двумя секциями, имеющими амплитудные значения 10 и 20 В. В случае, если период регулирования равен полупериоду сети, а переключение происходит в середине периода регулирования, сигнал на выходе ЦРН будет иметь действующее значение напряжения 11,2 В. Такое же действующее напряжение может быть получено при другом варианте управления, когда период регулирования кратен полупериоду сети. Необходимо правильно выбрать момент переключения ме-

жду секциями и длительность периода регулирования.

Для того чтобы рассчитать момент переключения, необходимый для получения требуемого действующего напряжения по заданному начальному и конечному дискретным уровням напряжения, воспользуемся формулой

$$U_{\text{дейст}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}. \quad (3)$$

Для случая, когда в течение периода регулирования происходит переключение с одного дискретного уровня напряжения на другой, действующее напряжение рассчитывается по формуле

$$U_{\text{дейст}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T_m} (U_1 \sin \omega t)^2 dt + \int_{T_m}^T (U_2 \sin \omega t)^2 dt \right)}. \quad (4)$$

Полученное выражение (4) является трансцендентным уравнением относительно момента переключения T_m . Для решения целесообразно применять численные методы, которые позволяют получить значение момента переключения с заданной точностью.

На рис. 4 представлена форма сигнала на выходе регулятора для случая, когда период регулирования равен полупериоду сетевого напряжения. При этом коэффициент искажений равен 34,4 %.

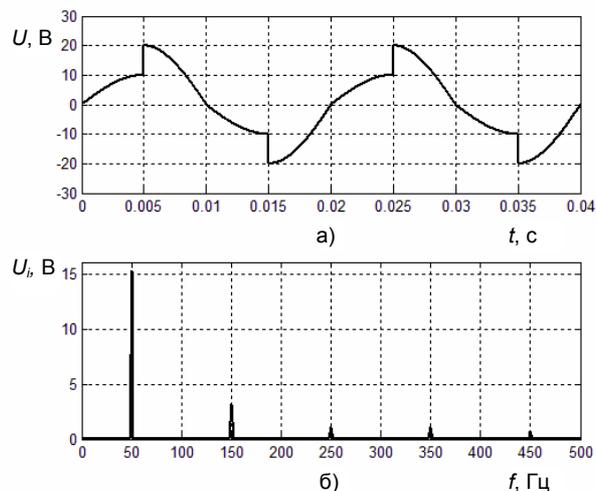


Рис. 4. Сигнал на выходе ЦРН, когда период регулирования равен полупериоду сети: а – форма сигнала; б – амплитудный спектр сигнала

На рис. 5 представлена форма сигнала на выходе регулятора для случая, когда период регулирования кратен полупериоду сетевого напряжения. При этом коэффициент искажений равен 43,8 %.

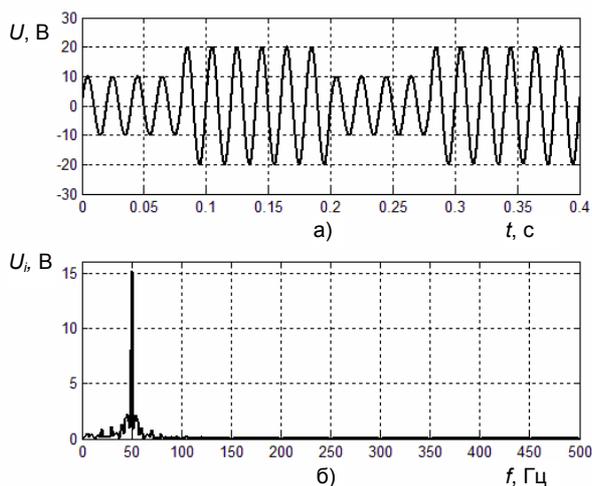


Рис. 5. Сигнал на выходе ЦРН, когда период регулирования кратен полупериоду сети: а – форма сигнала; б – амплитудный спектр сигнала

Сравнивая полученные спектры сигналов можно отметить, что сигнал с периодом регулирования, равным полупериоду сети, имеет не только меньший коэффициент искажений, но и исключительно высшие гармоники, кратные гармонике сети. Если период регулирования кратен полупериоду сети, в спектре полученного сигнала присутствуют гармоники как высшие, так и низшие, причем 97 % энергии сигнала сосредоточено на интервале от 1 до 100 Гц.

Выполним также анализ спектрального состава сигнала на выходе ЦРН и расчет коэффициента искажений для двух распространенных способов тиристорного регулирования: фазоимпульсного и широтно-импульсного, при условии использования того же трансформатора, что и в приведенных выше примерах.

В расчете примем, что требуемое действующее напряжение, как и при моделировании сигналов с применением комбинированного ШИМ-метода, равно 11,2 В. Такая величина может быть получена лишь при включении секции с амплитудным значением 20 В.

На рис. 6 представлена форма сигнала и его спектр при фазоимпульсном управлении. Коэффициент искажений равен 66,4 %, что заметно выше по сравнению с вариантами комбинированного ШИМ-метода управления, рассмотренными выше.

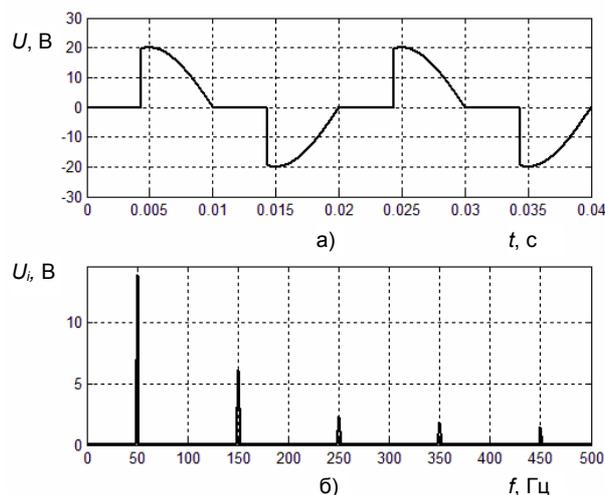


Рис. 6. Сигнал на выходе ЦРН при фазоимпульсном тиристорном регулировании: а – форма сигнала; б – амплитудный спектр сигнала

На рис. 7 представлена форма сигнала и его спектр при широтно-импульсном управлении. Коэффициент искажений равен 91,2 %, что является наихудшим показателем по сравнению с рассмотренными выше способами регулирования.

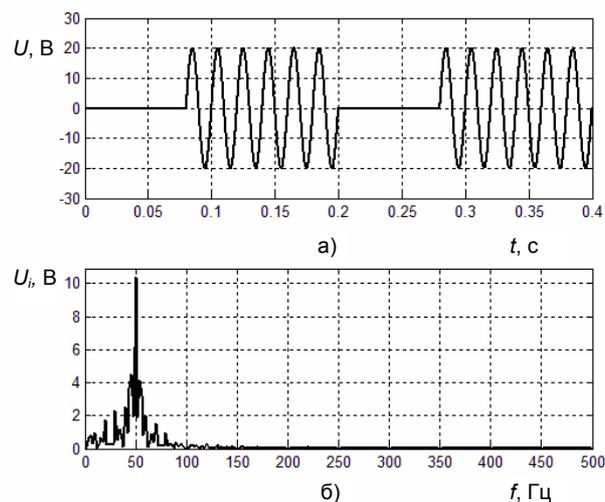


Рис. 7. Сигнал на выходе ЦРН при широтно-импульсном тиристорном регулировании: а – форма сигнала; б – амплитудный спектр сигнала

Рассмотренные выше примеры лишь частные случаи. Определим связь коэффициента искажений с параметрами регулятора, т. е. с амплитудами напряжений секций. Величина коэффициента искажений, с одной стороны, зависит от момента переключения с одной секции на другую, а с другой – от отношения амплитуд напряжений этих секций K_A . Построим поверхность, отражающую взаимосвязь этих факторов. Такая характеристика для случая, когда период регулирования кратен полупериоду сети, показана на рис. 8.

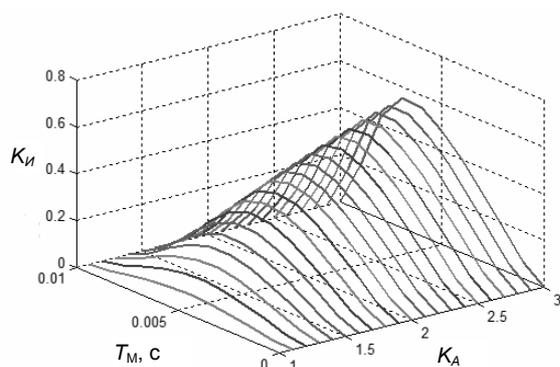


Рис. 8. Взаимосвязь коэффициента искажений $K_{И}$ с отношением амплитуд переключаемых секций K_A и моментом переключения между секциями T_M

На рис. 9 изображена проекция данной поверхности на плоскость «момент переключения – коэффициент искажений». На проекции отчетливо видно, что чем больше отношение амплитуд секций, тем больше смещение максимума коэффициента искажений от середины периода регулирования. Отметим, что расчет производился из условия, что переключение происходит с секции с меньшей амплитудой на секцию с большей амплитудой. В случае изменения направления переключения график зеркально отразится относительно середины периода регулирования.

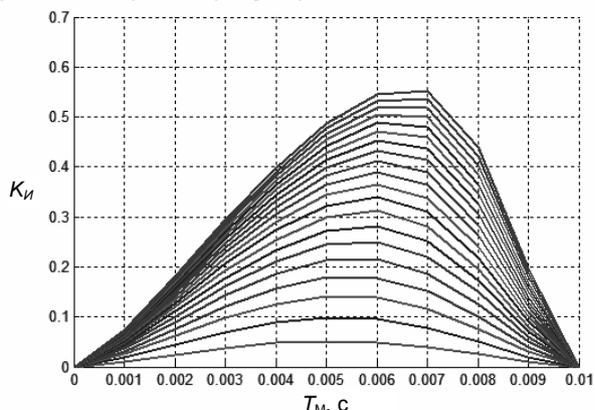


Рис. 9. Зависимость коэффициента искажений от момента переключения между секциями для различных соотношений амплитуд секций

Отметим, что максимальное значение коэффициента искажений для комбинированного ШИМ-метода снижается при уменьшении отношения амплитуд переключаемых секций K_A . То есть максимально допустимое значение коэффициента искажений является критерием выбора секционированного трансформатора для регулятора напряжения. Чтобы коэффициент искажений с выхода цифрового регулятора напряжения находился в пределах заданного значения, необходимо не превышать определенное соотношение между амплитудами напряжения переключаемых секций.

На рис. 10 для двух вариантов комбинированного ШИМ-метода представлена зависи-

мость максимального коэффициента искажений от соотношения амплитуд напряжений секций, между которыми происходит переключение. Для построения графика выбиралось наихудшее значение коэффициента искажений, которое может быть при данном соотношении амплитуд секций. Анализ полученных зависимостей (рис. 10) показывает, что при периоде регулирования, равном полупериоду сети, коэффициент искажений ниже, чем при периоде регулирования, равном двадцати полупериодам сети.

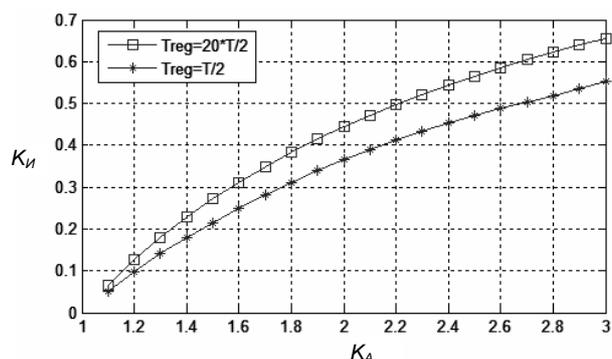


Рис. 10. Зависимость коэффициента искажений от соотношения амплитуд переключаемых секций

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование способов регулирования, основанных на переключении между дискретными уровнями напряжения в течение некоторого периода времени, позволяет получить коэффициент искажений на 50–70 % ниже, чем при известных и широко распространенных фазоимпульсном и широтно-импульсном тиристорном регулировании.

2. Коэффициент искажений при периоде регулирования, равном полупериоду сети, ниже, чем при периоде регулирования, кратном полупериоду сети, при условии получения одинакового действующего напряжения.

3. Величина коэффициента искажений определяется также и соотношением амплитуд переключаемых секций, что может служить критерием подбора секционированного трансформатора для цифрового регулятора напряжения с заданным максимальным коэффициентом искажений.

Список литературы

1. Юдин А.В. Оценка искривления фронта кристаллизации в расплаве по спектральному составу мощности нагревателя // Вестник РГАТА. – 2011. – Вып. 1(19). – С. 136–141.
2. Юдин В.В., Кириллов А.А. Аппаратная коррекция характеристики цифрового регулятора напряжения // Вестник РГАТУ. – 2011. – Вып. 2(20). – С. 139–144.
3. Юдин В.В. Функциональные возможности дискретно-регулируемых элементов // Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – № 5. – С. 21–34.

4. **Дашченко А.Ф.** *MatLab в инженерных и научных расчетах.* – Одесса: Астропринт, 2003. – 216 с.

References

1. Yudin, A.V. *Vestnik RGATA*, 2011, vol. 1(19), pp. 136–141.

2. Yudin, V.V., Kirillov, A.A. *Vestnik RGATU*, 2011, vol. 2(20), pp. 139–144.

3. Yudin, V.V. *Funktsional'nye vozmozhnosti diskretno-reguliruemyykh elementov* [The functionality of discrete-controlled elements]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2005, no. 5, pp. 21–34.

4. Dashchenko, A.F. *MatLab v inzhenernykh i nauchnykh raschetakh* [MatLab in the engineering and scientific calculations]. Odessa, Astroprint, 2003. 216 p.

Кириллов Андрей Александрович,
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева,
аспирант кафедры электротехники и промышленной электроники,
e-mail: andrey_kirillov_87@mail.ru