

УДК 621.314
ББК 31.264.5

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОЙ КРИВОЙ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА К ТОЧНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

**Говорухин П. П.¹, Митяшин Н. П.², Миргородская
Е. Е.³, Томашевский Ю. Б.⁴**

*(Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов)*

В статье описывается методика анализа чувствительности показателей качества электрической энергии, генерируемой многоуровневым инвертором напряжения, к нечеткости задания параметров его кривой. Методика основана на использовании нечетких чисел, принципа обобщения Заде и понятия нечеткой чувствительности. Приведены результаты расчета нечеткой чувствительности коэффициента искажения синусоидальности выходной кривой многоуровневого инвертора к нечеткости настройки моментов переключения и величины ее уровней.

Ключевые слова: инвертор, выходное напряжение, качество электрической энергии, нечеткое число, чувствительность, принцип обобщения.

¹ Павел Павлович Говорухин, аспирант (govoruhin89@mail.ru).

² Никита Петрович Митяшин, профессор, доктор технических наук, профессор (mityashinpp@mail.ru).

³ Екатерина Евгеньевна Миргородская, доцент, кандидат технических наук (tee85@inbox.ru).

⁴ Юрий Болеславович Томашевский, профессор, доктор технических наук, профессор (Саратов, ул. Политехническая, д. 77, тел. (8452) 99-88-43).

1. Постановка задачи

В последние десятилетия в схемотехнике силовой электроники с целью улучшения качества выходной кривой стали применяться автономные инверторы напряжения (АИН) с многоуровневым формированием напряжения. В таких АИН качество выходной кривой определяется значениями параметрами ее задания, а именно числом уровней напряжения, их величинами и моментами перехода от одних уровней к следующим. Для каждого числа уровней существуют оптимальные значения величин уровней и моментов их коммутаций, обеспечивающие наименьший коэффициент искажения синусоидальности K_u .

В реальной схеме преобразователя оптимальные значения величин уровней и моментов коммутаций могут задаваться с некоторой погрешностью. Представляет интерес исследования чувствительности величины коэффициента K_u к неизбежным отклонениям основных параметров кривой от их номинальных значений, обеспечивающих требуемое функционирование комплексов.

2. Методика исследования

В работе предлагается задавать параметры кривой в виде нечётких чисел (НЧ) [1]. При этом значения неопределённых параметров отображаются степенью размытости соответствующих НЧ.

Математические операции с НЧ осуществляются с использованием принципа обобщения Заде [3]. В случае если один или несколько параметров модели исследуемого комплекса представлены в виде НЧ, то непосредственное применение этих операций при реализации модели приводило бы к весьма громоздким вычислениям. Из-за отсутствия аналитической модели комплекса, которая часто задается алгоритмически, т. е. существует в виде компьютерной программы, оперирующей с чётко заданными значениями параметров, это вовсе невозможно. Поэтому предлагается прямое применение принципа обобще-

ния, при котором алгоритм рассматривается как обобщенная математическая операция [4].

В этом случае принцип обобщения имеет следующую интерпретацию.

Пусть $(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$ – совокупность НЧ, соответствующих определенным параметрам комплекса, а $(\mu(\tilde{x}_1), \dots, \mu(\tilde{x}_n))$ – их функции принадлежности.

Рассмотрим некоторый показатель y , характеризующий качество функционирования комплекса. Очевидно, этот показатель в рассматриваемом случае также должен быть представлен в виде НЧ \tilde{y} . Если бы параметры x_1, x_2, \dots, x_n имели четкие значения, то показатель y также имел бы четкое значение, которое могло бы быть рассчитано с помощью оператора S

$$(1) \quad y = S(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Оператор S может быть задан в простейшем случае в аналитической форме, но для сложных комплексов чаще реализуется в виде компьютерной программы.

Принцип обобщения позволяет рассчитать функцию принадлежности этого НЧ $\mu(y)$ по формуле [3]

$$(2) \quad \mu(y) = \max_{\substack{(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ S(x_1, x_2, \dots, x_n) = y}} \min(\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)).$$

Здесь максимум берется по всем наборам (x_1, x_2, \dots, x_n) , для которых $S(x_1, x_2, \dots, x_n) = y$ по известным четким значениям параметров x_1, x_2, \dots, x_n .

Поскольку мы предполагаем, что оператор S задан в виде компьютерной программы, то для ее применения необходимо дискретизировать значения параметров x_1, x_2, \dots, x_n и показателя y .

Обозначим через $\text{supp}(\tilde{x}_i)$ множество значений параметра x_i , для которых его функция принадлежности отлична от нуля (т. е. носитель НЧ \tilde{x}_i [4]). Для треугольных НЧ носитель представляет собой некоторый интервал Δ_i на оси x_i [5]. Дискретизация значений x_i сводится к разделению интервала Δ_i на непересекающиеся достаточно малые подынтервалы Δ_i^j такие, что

$$(3) \quad \Delta_i = \bigcup_{j=1}^{N_i} \Delta_i^j.$$

и значения функции $\mu_i(x_i)$ на них можно считать постоянными.

Особенностью дискретизации показателя y состоит в том, что носитель нечеткого числа \tilde{y} заранее точно неизвестен. Однако можно использовать его верхнюю оценку, т. е. интервал, заведомо содержащий носитель \tilde{y} .

Пусть δ – такой интервал, а δ_k – подынтервал его разбиения, т. е.

$$(4) \quad \delta = \bigcup_{j=1}^{N_i} \delta^j.$$

причем искомые значения функции принадлежности $\mu(y)$ НЧ \tilde{y} на интервале δ_k считаем постоянными и равными ν_k .

Тогда формула (2) для дискретизированных значений будет иметь вид

$$(5) \quad \nu_k = \max_{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in S(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \delta_k} \min(\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)).$$

Формула (5) позволяет рассчитать функцию принадлежности нечеткого параметра \tilde{y} по известным функциям принадлежности параметров \tilde{x}_i . Эта функция $\mu(y)$ содержит информацию о возможных значениях отклонения показателя y от номинального значения y_0 . Из формулы (5) следует, что функция $\mu(y)$ достигает максимума на этом значении y_0 .

В качестве примера рассмотрим влияние нечеткого задания углов переключения уровней и величин этих уровней кривой выходного напряжения пятиуровневого инвертора [2] на коэффициент искажения синусоидальности K_u . При оптимальных значениях углов переключения и величинах уровней напряжения коэффициент K_u имеет значение 7,62%. В случае нечеткого задания, например, угла включения четвертого уровня θ_4 коэффициент K_u также оказывается нечетким.

Нечеткость включения углов θ_i зададим в виде треугольных нечетких чисел (рис. 1).

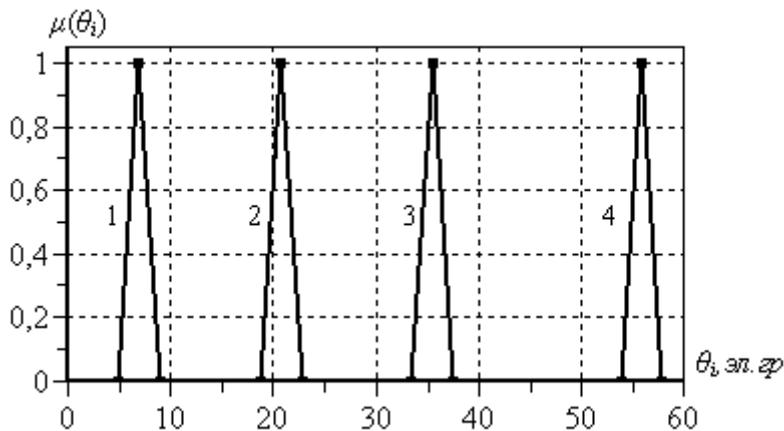


Рис. 1. Функции принадлежности треугольных НЧ, отображающих возможные значения углов θ_1 (1), θ_2 (2), θ_3 (3), θ_4 (4)

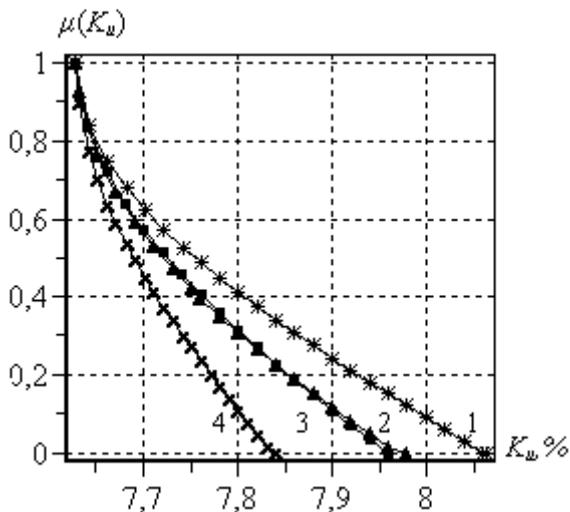


Рис. 2. Функции принадлежности коэффициента искажения синусоидальности $\mu_{\theta_1}(K_u)$, $\mu_{\theta_2}(K_u)$, $\mu_{\theta_3}(K_u)$, $\mu_{\theta_4}(K_u)$, соответствующие функциям принадлежности углов переключения θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 (рис. 1)

Расчеты по описанной выше методике в предположении четкого оптимального задания всех остальных параметров кривой приводит к функциям принадлежности $\mu_{\theta_1}(K_u)$, $\mu_{\theta_2}(K_u)$, $\mu_{\theta_3}(K_u)$, $\mu_{\theta_4}(K_u)$, приведенные на рис. 2.

Сравнение кривых $\mu_{\theta_i}(K_u)$ свидетельствует о различной чувствительности показателя K_u к неопределенности задания угла переключения различных уровней. В этой связи целесообразным является введение количественных характеристик чувствительности показателей качества функционирования комплексов к нечеткости задания их параметров.

Для этого полезным является понятие уровня или среза нечеткого множества.

Как известно [5], λ -срезом нечеткого множества A называется множество A_λ , у которого функция принадлежности μ_{A_λ} связана с функцией принадлежности μ_A множества A следующим образом

$$(6) \quad \mu_{A_\lambda}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_A(x) \geq \lambda \\ 0, & \text{если } \mu_A(x) < \lambda \end{cases}.$$

Здесь $0 < \lambda \leq 1$.

Величина λ характеризует требование исследователя к величине степени принадлежности значения x к рассматриваемому нечеткому множеству A . Очевидно, A_λ является четким множеством, причем для нечетких множеств A с односвязным носителем A_λ есть интервал. При этом длина интервала A_λ , которую будем обозначать как $m(A_\lambda)$, характеризует степень «размытости» множества A при данной степени требования λ к четкости задания переменных.

Если показатель \tilde{y} является функцией нечетко заданного параметра \tilde{x} , то можно рассчитать отношение

$$(7) \quad D_x^y(\lambda) = \frac{m(y_\lambda)}{m(x_\lambda)}.$$

Величина $D_x^y(\lambda)$ может рассматриваться как нечеткий аналог производной, поскольку характеризует степень «расшире-

ния» интервала неопределенности $m(y_\lambda)$ нечеткой переменной \tilde{y} , являющейся функцией нечеткой переменной \tilde{x} , по отношению к интервалу неопределенности $m(x_\lambda)$. Величина D_x^y является функцией уровня λ , т. е. зависит от степени требования к четкости задания переменных.

Недостатком величины D_x^y с точки зрения оценки чувствительности показателя y к неопределенности задания параметра x заключается в том, что меры λ -уровней $m(x_\lambda)$ и $m(y_\lambda)$ не соотносены к точным значениям y_0 и x_0 , для которых соответствующие функции принадлежности равны 1. Целесообразно оценить степень неопределенности задания этих НЧ безразмерными отношениями $m(y_\lambda)/y_0$ и $m(x_\lambda)/x_0$.

Тогда чувствительность показателя \tilde{y} к нечеткости задания параметра \tilde{x} может быть оценена величиной

$$(8) \quad \Xi_x^y(\lambda) = \frac{m(y_\lambda)/y_0}{m(x_\lambda)/x_0} = D_x^y(\lambda) \cdot \frac{x_0}{y_0}.$$

Эту функцию уровня можно рассматривать, как нечеткий аналог классической чувствительности, задаваемой известной формулой [6]:

$$(9) \quad \Xi_x^y = \frac{d \ln(y)}{d \ln(x)} = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{y'(x) x}{y}.$$

3. Результаты расчетов нечеткой чувствительности

Результаты расчетов, проведенных по формулам (5) и (8) для определения чувствительности качества кривой выходного напряжения к точности задания углов переключения $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ пятиуровневого инвертора напряжения, задаваемого функциями принадлежности соответствующих НЧ по рис. 1, приведены на рис. 3.

Знание, например, функции $\Xi_{\theta_2}^{K_u}(\lambda)$ позволяет определить допустимую величину интервала λ разброса угла θ_2 переключения второго уровня, при котором величина интервала отклоне-

ния значения K_u от оптимального значения не превысит произведения $\lambda \cdot \Xi_{\theta_2}^{K_u}(\lambda)$.

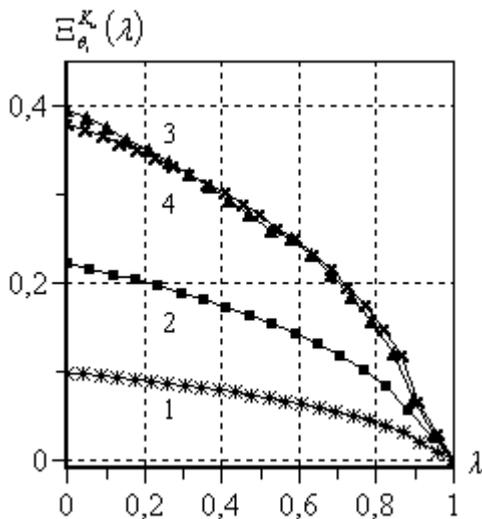


Рис. 3. Нечеткие чувствительности $\Xi_{\theta_i}^{K_u}(\lambda)$ коэффициента искажения синусоидальности K_u , соответствующие функциям принадлежности углов переключения θ_i

Очевидно, что функция $\Xi_x^y(\lambda)$ не является функцией принадлежности НЧ. Вместо нее можно рассмотреть обратную функцию $\mu(\Sigma)$, которая является функцией принадлежности НЧ $\bar{\Xi}_x^y$, содержащего ту же информацию, что и функция $\Xi_x^y(\lambda)$. Это НЧ можно назвать НЧ-чувствительностью показателя y к нечеткости задания параметра x . Функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\bar{\Xi}_{\theta_i}^{K_u}$, соответствующие функциям $\Xi_{\theta_i}^{K_u}(\lambda)$ приведены на рис. 4.

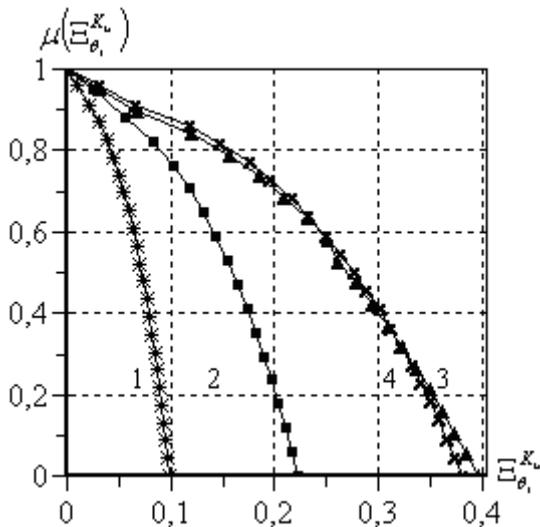


Рис. 4. Функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\Xi_{\theta_i}^{K_u}$ коэффициента искажения синусоидальности K_u

Были проведены аналогичные исследования влияния нечеткости задания значений уровней напряжения выходной кривой на коэффициент искажения синусоидальности K_u .

На рис. 5 показаны функции принадлежности треугольных НЧ $\mu(\tilde{V}_i)$, $i = 1, 2, 3, 4$, отображающие возможные значения относительных значений уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$, причем за базовое значение взято напряжение пятого уровня, т. е. амплитуда напряжения. При задании функций принадлежности предполагается, что стабилизация напряжений уровней производится с 5-процентной точностью, а их значения на оптимальных значениях напряжений равны 1.

Расчеты по описанной выше методике в предположении четкого оптимального задания всех остальных параметров кривой приводит к функции принадлежности $\mu_{V_i}(K_u)$, приведенной на рис. 6.

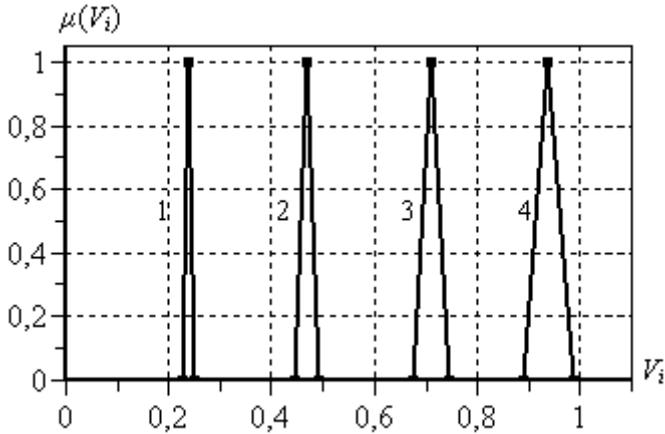


Рис. 5. Функции принадлежности треугольных НЧ, отображающих возможные значения уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$

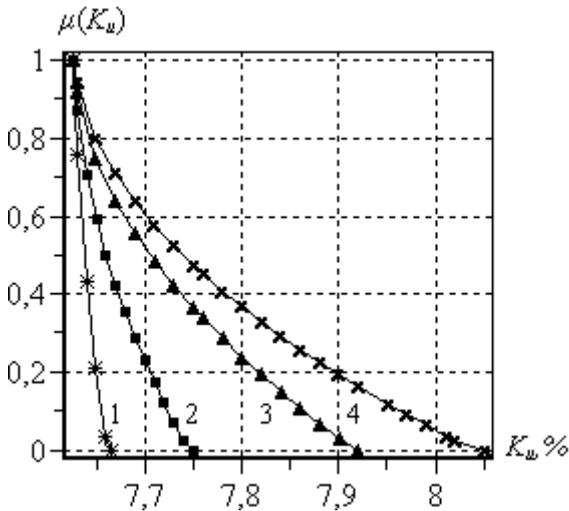


Рис. 6. Функции принадлежности коэффициента искажения синусоидальности K_u , соответствующие функциям принадлежности уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$

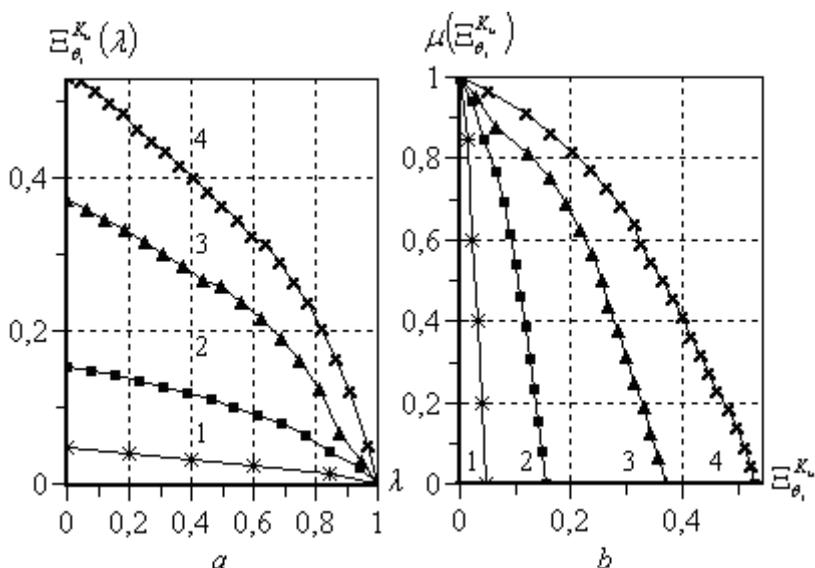


Рис. 7. Нечеткие чувствительности $\Xi_{V_i}^{K_u}(\lambda)$ (a) и функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\mu(\Sigma)$ (b) коэффициента искажения синусоидальности K_u , соответствующие функциям принадлежности уровней напряжения U_2 и U_4

Результаты расчетов, проведенных по формулам (5) и (8) для определения чувствительности качества кривой выходного напряжения к точности задания уровней напряжения U_2 и U_4 пятиуровневого инвертора напряжения, задаваемого функциями принадлежности соответствующих НЧ по рис. 1, приведены на рис. 3.

Знание, например, функции $\Xi_2^{K_u}(\lambda)$ позволяет определить допустимую величину интервала λ разброса уровня напряжения U_2 , при котором величина интервала отклонения значения K_u от оптимального значения не превысит произведения $\lambda \cdot \Xi_2^{K_u}(\lambda)$.

4. Выводы

Описывается методика оценки чувствительности показателей качества функционирования инвертора, к нечеткой настройке параметров силовой схемы преобразователя и системы управления. Методика иллюстрируется результатами исследования влияния нечеткости установления углов переключения транзисторов в пятиуровневом инверторе на качество кривой выходного напряжения.

Рассмотренная методика оценки чувствительности показателей качества функционирования инвертора, к нечеткой настройке параметров силовой схемы преобразователя и системы управления, может быть распространена на изучение электротехнических систем любой сложности.

Литература

1. DUBOIS D., PRADE H. Operations on fuzzy numbers. // Int. J. Syst. Sci. – 1978. – Vol. 9, № 6. – P. 613-626.
2. MARTINA CALAIS, VAASILIOS G. AGELIDIS, MICHAEL S. DYMOND. When to Switch Which Switch in a Five Level Single Phase Cascaded Inverter. URL: http://www.researchgate.net/profile/Vassilios_Agelidis/publication/228608572_When_to_Switch_Which_Switch_in_a_Five_Level_Single_Phase_Cascaded_Inverter/links/0c96053887160e0ca4000000.pdf (дата обращения: 28.06.2015)
3. ZADEN L.A. Basis for a new approach to the analysis of complex systems and decision making. – In: Math today. М.: Knowledge, 1974. – P. 5-49.
4. МИТЯШИН Н.П. Оценка влияния малых неопределенных параметров на характеристики агрегированного преобразователя /Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2003. – №11-12. – С.96-106.

5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, гл. ред. физ.- мат. лит., 1986. – 321 с.
6. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. – 712 с.

ARTICLE TITLE, ANALYSE OF SENSITIVITY OF QUALITY OF OUTPUT CURVE OF INVERTER ACCURACY AT IMPLEMENTATION OF ITS PARAMETERS

Pavel Govorukhin, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov graduate student (govoruhin89@mail.ru).

Nikita Mityashin, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, doctor of technical sciences, professor (mityashinnp@mail.ru).

Ekaterina Mirgorodskaya, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, candidate of technical sciences (mee85@inbox.ru).

Yuri Tomashevsky, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, doctor of technical sciences, professor (Saratov, Politekhnicheskaya st., 77, (8452) 99-88-43).

Abstract: The report describes the method of analyze of the sensitivity of quality of electric energy generated by a multi-level voltage inverter, to the fuzziness of the settings of parameters of its curve. The technique is based on the use of fuzzy numbers, the principle of generalization Zadeh and idea of fuzzy sensitivity. The results of the calculation of the fuzzy sensitivity of harmonic distortion factor of the output curve of multilevel inverter to fuzziness setting switching times and the value of its levels are represented.

Keywords: inverter, output voltage, power quality, fuzzy number, sensitivity, principle of generalization.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...

Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...