

## ДИАГНОСТИКА СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Докт. техн. наук, проф. **ЛОБАТЫЙ А. А.**,  
асп. **ШЕЙНИКОВ А. А.**, канд. техн. наук **БЕЛЕГОВ А. Н.**

*Белорусский национальный технический университет,  
Военная академия Республики Беларусь*

Несмотря на широкое внедрение в авиационных системах электроснабжения синхронных генераторов нестабильной частоты и статических полупроводниковых преобразователей, в настоящее время продолжают оставаться актуальными задачи продления ресурса стартер-генераторов постоянного тока (СТГ). Их применение является наиболее оптимальным на воздушных судах военного назначения в связи с: относительно низкой стоимостью; высокой стойкостью систем управления СТГ к воздействию поражающих факторов электромагнитного оружия; возможностью обеспечения стартерного режима. Эти преимущества особенно важны с точки зрения тактики применения самолетов фронтовой и штурмовой авиации (Су-24, Су-25, МиГ-29). Поэтому на новых самолетах данного типа (МиГ-35, Су-39) устанавливаются именно такие электрические машины.

Известно, что одним из самых уязвимых элементов СТГ является их щеточно-коллекторный узел [1]. Внешним проявлением неудовлетворительного протекания процесса коммутации служит искрение в скользящем контакте. Проявление нарушений коммутации в искрении традиционно рассматривается как показатель общего состояния машин постоянного тока [1, 2]. При этом степень искрения оценивается в соответствии с характеристиками, приведенными в табл. 1 (ГОСТ 183–74), из которой видно, что степень искрения оценивается визуально (субъективно), что обуславливает неоднозначность оценки.

Таблица 1

Оценка степени искрения в щеточном контакте машин постоянного тока

Степень искрения	Характеристика искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 <sup>1/4</sup>	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 <sup>1/2</sup>	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление на коллекторе следов почернения, легко устранимых протиранием его поверхности бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всей щеткой, допустимое только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление на коллекторе следов почернения, не устранимых протиранием его поверхности бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под щеткой, наличие крупных вылетающих искр. Допустимо только в момент прямого включения или реверсирования двигателя	Значительное почернение коллектора, не устранимое протиранием его поверхности бензином, а также подгар и разрушение щеток

Проведенный анализ существующих методик контроля искрения (методики, основанные на измерении фототока, на выделении радиопомех при искрении, а также способе индикации искрения по методу дополнительной щетки) [2] показал недостатки, препятствующие их массовому внедрению:

- сложность конструкции и низкую помехозащищенность регистрирующей аппаратуры;
- сложность монтажа датчиков искрения на щеточно-коллекторном узле электрической машины, требующего изменения конструкции оборудования;
- невозможность автоматизации процесса контроля искрения при эксплуатации, записи, хранении и использовании информации об искрении при управлении техническим состоянием генератора.

Вместе с тем для оценки степени искрения возможен подход, основанный на утверждении, что всякие нарушения в работе авиационных СТГ влияют на параметры пульсаций напряжения их внешней сети [3]. Так как эти пульсации носят циклический характер, целесообразно в качестве диагностических признаков использовать параметры спектра сигнала напряжения [4]. Анализ неидентичности коммутационных циклов дает возможность полагать, что спектры таких сигналов мало отличаются друг от друга, а спектр, полученный в результате усреднения выборки реализаций, можно использовать для диагностики СТГ [5].

Основными задачами диагностики СТГ является обнаружение:

- несимметрии магнитного поля возбуждения, в том числе с учетом поля реакции якоря и компенсирующего поля дополнительных полюсов, из-за неравномерности воздушных зазоров и электрической несимметрии обмоток основных и добавочных полюсов;
- электрической несимметрии обмоток якоря, в том числе короткозамкнутых витков, и обрывов в обмотке и уравнительных соединениях;
- обрывов электрических соединений между обмотками якоря и пластинами коллектора;
- дефектов щеточно-коллекторного узла, в том числе неравномерного износа пластин и щеток, замыкания пластин коллектора и т. п.

Износ щеток, их слабый прижим, заедание в обойме, а также биение коллектора и подгорание его пластин чаще всего приводят к нарушениям процесса коммутации преимущественно одной из щеток с одной или группой пластин. Отсутствие контакта щетки с одной или несколькими коллекторными пластинами ведет к перераспределению тока в обмотке якоря. При этом магнитное поле становится несимметричным, что обуславливает модуляцию выходного напряжения с частотами, кратными частоте вращения якоря.

На частоте вращения и кратных ей частотах также проявляются дефекты обмотки якоря (обрывы секций, витковые замыкания), обуславливающие дополнительные пульсации напряжения несколько раз за оборот.

Сколы щеток обуславливают нарушение коммутации при каждом переключении секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую, что приводит к модуляции выходного напряжения с частотами, кратными частоте коммутации.

При нарушении геометрии установки щеток проводники коммутируемых секций оказываются под воздействием искаженного магнитного поля главных полюсов. В этих секциях, кроме реактивной ЭДС, индуцируется еще ЭДС вращения, что также может привести к ухудшению коммутации при каждом переключении тока якоря.

Неравномерный износ коллектора приводит к модуляции выходного напряжения на промежуточных частотах (диапазон частот между частотой вращения якоря и частотой коммутации). При этом размер частотного диапазона зависит от характера износа коллектора.

Таким образом, практически все эксплуатационные неисправности СТГ (кроме неравномерного износа коллектора) проявляются на двух частотах спектра напряжения внешней цепи: частоте вращения и частоте коммутации.

Очевидно, что при развитии определенного дефекта наблюдается рост амплитуды характерной гармоники. Следовательно, имеется возможность оценки технического состояния СТГ по амплитудам характерных гармоник разностного спектра напряжения внешней цепи. Условием такой диагностики является необходимость учета режимов работы генератора. Так, эталонные значения диагностических параметров зависят от частоты вращения якоря  $n$ .

На рис. 1 даны разностные спектры, представляющие собой результат вычитания из текущего спектра напряжения авиационного стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д эталонного спектра (исправная электрическая машина). На рисунке обозначены амплитуды гармоник искрения для различных частот вращения якоря (1 –  $n = 4500$  об/мин; 2 – 6000; 3 – 9000 об/мин).

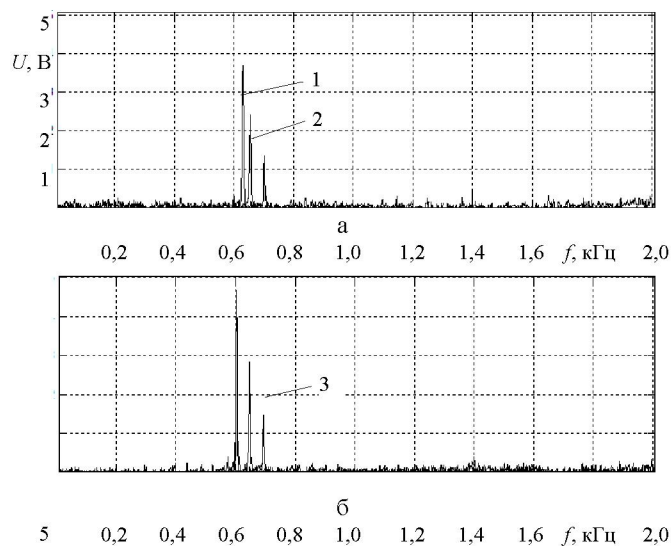


Рис. 1. Влияние режимов работы СТГ на значение диагностического параметра: а – значение при сколе одной щетки; б – то же при сколе четырех щеток

Большинство диагностических алгоритмов, основанных на спектральном анализе соответствующих сигналов, требует наличия значительного объема статистической информации для формирования обучающей выборки. При этом субъективность оценки степени искрения на практике не поз-

воляет получить конкретные эталонные значения диагностических параметров. Кроме того, большие погрешности измерения амплитуд гармоник, обусловленные нестабильностью параметров СТГ, приводят к тому, что исходные данные для анализа представляют нерепрезентативные выборки.

Описанных выше недостатков лишены методики, основанные на использовании теории нечеткой логики. Нечеткие системы основаны на правилах, позволяющих приблизиться к стилю мышления человека и использующих лингвистические переменные. Для построения нечеткой диагностической модели СТГ предлагается использовать лингвистическую переменную «степень искрения». Множество ее значений  $D = \{D_i\} (i = \overline{1,5})$

соответствует степени искрения  $S = \left\{ 1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 2, 3 \right\}$  ( $i$  – класс коммутации).

Пусть каждое  $i$ -е значение лингвистической переменной представляет собой пересечение нечетких подмножеств  $D_i = A_i \cap B_i \cap C_i$ , определенных на трех базовых шкалах  $(X, Y, Z)$ :

$$\left. \begin{array}{l} D_i(s, \mu_{D_i}(s)), \quad s \in S; \\ A_i(x, \mu_{A_i}(x)), \quad x \in X; \\ B_i(y, \mu_{B_i}(y)), \quad y \in Y; \\ C_i(z, \mu_{C_i}(z)), \quad z \in Z, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – множества значений амплитуд гармоник искрения при частотах вращения якоря:  $n_1 = 4500$  об/мин;  $n_2 = 6000$  об/мин;  $n_3 = 9000$  об/мин соответственно;  $A_i, B_i, C_i$  – множества значений амплитуд гармоники искрения, соответствующих  $i$ -му классу коммутации ( $i$ -му значению лингвистической переменной) при частотах:  $n_1 = 4500$  об/мин;  $n_2 = 6000$  об/мин;  $n_3 = 9000$  об/мин;  $\mu_{D_i}(s), \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y), \mu_{C_i}(z)$  – функции принадлежности базовых переменных  $s, x, y, z$  нечетким множествам  $D_i, A_i, B_i, C_i$ .

Механизм нечеткого логического вывода основан на базе знаний, формируемой в виде совокупности нечетких продукционных правил  $\Pi_i$  [6]:

$$\left. \begin{array}{l} \Pi_1 : \text{if } x \in A_1 \cap y \in B_1 \cap z \in C_1 \Rightarrow s \in D_1; \\ \Pi_2 : \text{if } x \in A_2 \cap y \in B_2 \cap z \in C_2 \Rightarrow s \in D_2; \\ \Pi_3 : \text{if } x \in A_3 \cap y \in B_3 \cap z \in C_3 \Rightarrow s \in D_3; \\ \Pi_4 : \text{if } x \in A_4 \cap y \in B_4 \cap z \in C_4 \Rightarrow s \in D_4; \\ \Pi_5 : \text{if } x \in A_5 \cap y \in B_5 \cap z \in C_5 \Rightarrow s \in D_5. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Правила, связывающие значения входных  $D_i$  и выходных  $A_i, B_i, C_i$  лингвистических переменных, можно найти из опыта эксплуатации и теории функционирования систем. Так, если значения всех диагностических параметров близки к эталонным, то существует высокая степень уверенности в исправности системы.

Алгоритм логического вывода (обработки информации по правилам нечеткой логики) включает в себя четыре этапа.

Первый этап представляет собой введение нечеткости для исходной информации (фазификация). При этом для конкретных входных значений амплитуд гармоник на частоте коммутации при различных оборотах якоря СТГ были рассчитаны принадлежности к отдельным значениям лингвистической переменной «степень искрения». С этой целью было проведено моделирование процессов переключения тока в секциях якорей электрических машин с различным техническим состоянием.

На основании разработанной модели с использованием классической теории коммутации [7] получено выражение зависимости амплитуды гармоники на частоте коммутации  $u_k$  от интенсивности искрения  $P$  и оборотов якоря  $n$  [4]

$$u_k = 2\tau n \omega_c l_\delta \left( \sqrt{\frac{2ar l_m P}{b\tau n L_c \beta_k}} + \left( \frac{\xi N b}{\pi D_a} + \frac{K_a}{\beta_k} \right) i_a \right), \quad (3)$$

где  $b$  – число пар полюсов;  $\tau$  – протяженность полюсного деления;  $n$  – частота вращения якоря (об/мин);  $L_c$  – индуктивность короткозамкнутой секции;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря;  $r$  – сопротивление секции;  $\omega_c$  – число витков в секции;  $l_\delta$  – длина активной части деления обмотки якоря;  $\xi$  – удельная магнитная проводимость путей для магнитных потоков взаимной индукции;  $N$  – количество активных проводников, составляющих обмотку якоря;  $D_a$  – диаметр якоря;  $K_a$  – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение сопротивления скользящего контакта в процессе коммутации;  $i_a$  – ток якоря.

Для выбранного в качестве объекта исследований авиационного стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д на основании выражения (3) с учетом (1) и (2) получены функции принадлежности  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(y)$ ,  $\mu_C(z)$  для степени искрения 1;  $1\frac{1}{4}$ ;  $1\frac{1}{2}$ ; 2; 3.

Графики некоторых функций принадлежности ( $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(y)$ ,  $\mu_C(z)$ ) представлены на рис. 2.

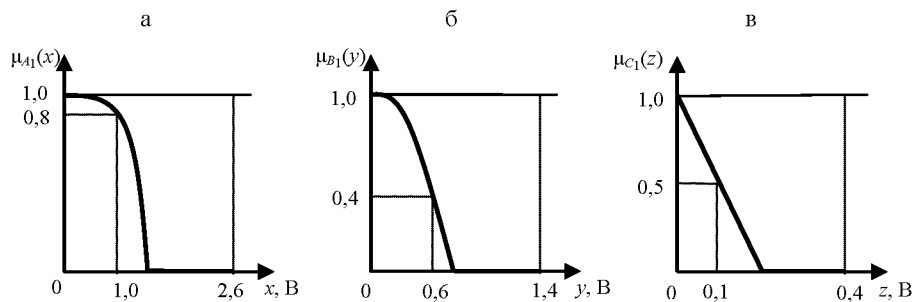


Рис. 2. Функции принадлежности для степени искрения 1

С помощью этих функций на основании задаваемых четких значений входных базовых переменных ( $x = 1$  В;  $y = 0,6$  В;  $z = 0,1$  В) определяется степень уверенности в том, что выходная лингвистическая переменная

(степень искрения  $D$ ) принимает конкретное значение ( $D_i = D_1 = 1$ ). Характер рассмотренных функций принадлежности для степени искрения 1 показывает тенденцию к повышению класса коммутации при росте значений входных базовых переменных. Зависимости значений выходной лингвистической переменной от значений входных базовых переменных строились по аналогии с зависимостью значений диагностических признаков от интенсивности искрения  $P$  (3) [5].

Второй этап логического вывода – нечеткая импликация представляет собой нахождение предпосылок изменения выходной функции принадлежности, создаваемых каждым отдельным правилом  $\alpha(i)$  при конкретных входных сигналах  $x_0$ ,  $y_0$  и  $z_0$  (значениях диагностических параметров при заданных оборотах якоря) [6]:

$$\alpha(i) = \mu_{A_i}(x_0) \cap \mu_{B_i}(y_0) \cap \mu_{C_i}(z_0). \quad (4)$$

Результирующие функции принадлежности каждого правила вычислим по формуле

$$\mu_i(s) = \alpha(i) \cap \mu_{D_i}(s). \quad (5)$$

Третий этап логического вывода – нечеткая композиция представляет собой нахождение результирующей функции принадлежности всей совокупности правил при заданных входных сигналах  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$

$$\mu_{\Sigma}(s) = \mu_1(s) \cap \mu_2(s) \cap \mu_3(s) \cap \mu_4(s) \cap \mu_5(s). \quad (6)$$

Четвертый этап логического вывода – приведение к четкости (дефазификация) – определение искомого значения степени искрения. Выходная функция принадлежности при этом преобразуется в конкретное четкое число  $s_0$  в соответствии с выражением (центроидный метод)

$$s_0 = \frac{\int_D s \mu_{\Sigma}(s) ds}{\int_D \mu_{\Sigma}(s) ds}. \quad (7)$$

На рис. 3 представлена схема нечеткого вывода по Мамдани при моделировании импликации минимумом за пять этапов (рис. 3а–д), агрегации среднего значения (е) и построении нечеткого значения выхода  $\mu_{\Sigma}(s)$  по результатам предыдущих этапов в соответствии с (6). Вычисленный в соответствии с (7) центр тяжести фигуры (рис. 3е)  $s_0 \approx 1\frac{1}{3}$  представляет собой полученное при входных сигналах  $x_0 = 1$  В;  $y_0 = 0,6$  В;  $z_0 = 0,1$  В четкое значение базовой переменной – степень искрения.

Прогнозирование изменения технического состояния СТГ основано на оценке степени отклонения центра тяжести  $s_0$  фигуры (рис. 3е) (функции принадлежности  $\mu_{\Sigma}(s)$ ) от ближайшего значения класса коммутации. Это свойство функции принадлежности позволяет осуществлять корректировку режимов технического обслуживания СТГ исходя из потребности в выполнении работ.

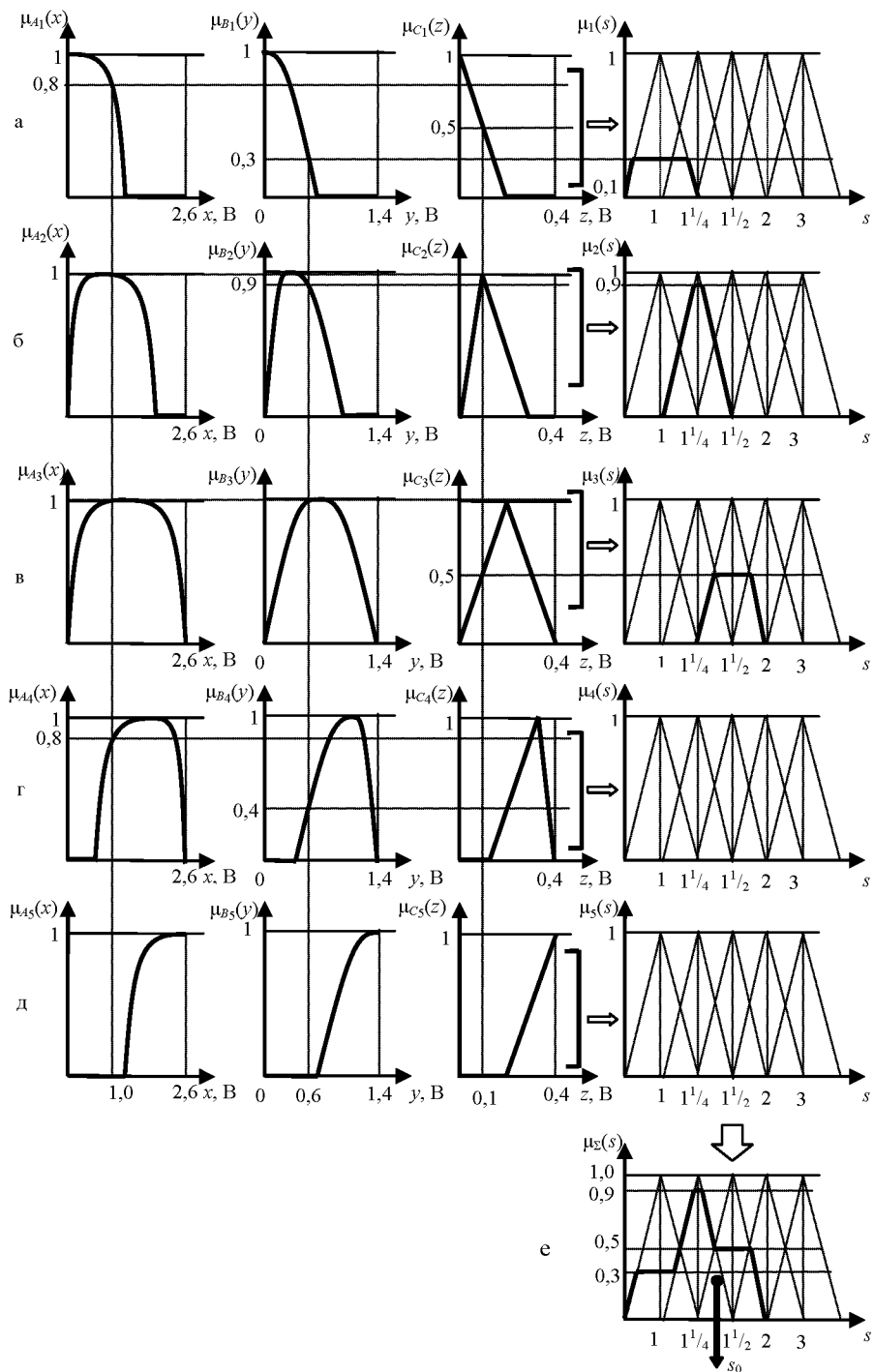


Рис. 3. Нахождение четкого значения степени искрения СТГ

### ВЫВОД

Таким образом, алгоритм диагностики СТГ на основе теории нечеткой логики позволяет оценивать и прогнозировать техническое состояние СТГ путем комплексирования всей имеющейся диагностической информации, включая знания эксперта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
2. Гольдберг, О. Д. Испытания электрических машин / О. Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.
3. Куприн, В. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов / В. В. Куприн, К. Д. Рунов, И. М. Синдеев. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1975. – 318 с.
4. Шейников, А. А. Диагностика коллекторных электрических машин по параметрам входного (выходного) напряжения / А. А. Шейников, В. Р. Вашкевич, А. А. Санько // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2010. – № 4. – С. 96–102.
5. Шейников, А. А. Спектральная оценка качества коммутации коллекторных электрических машин постоянного тока / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, В. Р. Вашкевич // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2011. – № 2. – С. 103–108.
6. Круглов, В. В. Нечеткая логика, искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

Представлена кафедрой  
информационных  
систем и технологий

Поступила 14.04.2011

УДК 621.311.7: 621.382

### **СИНТЕЗ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОКРАТНЫХ РАВНОМЕРНЫХ ШИМ, СОЗДАНЫХ ПО СТУПЕНЧАТЫМ ФУНКЦИЯМ ПОСТРОЕНИЯ**

**Канд. техн. наук, доц. СТРИЖНЕВ А. Г., инж. ЛЕДНИК Г. В.**

*ООО «Техносоюзпроект»*

В электроприводе, содержащем электродвигатель переменного тока, используют частотные преобразователи, которые формируют напряжения многократной равномерной ШИМ. Существуют различные способы формирования указанной ШИМ [1], один из которых базируется на использовании модулирующей ступенчатой функции построения. При данном способе выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  образуется в результате сравнения ступенчатого, аппроксимирующего синусоиду эталонного напряжения  $U_{\text{эт}}$  и пилообразного опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$ . Формирование напряжения  $U_{\text{вых}}$  указанным способом требует либо мощных универсальных микроконтроллеров, либо специализированных, относительно дорогих микроконтроллеров. Значительно проще можно сформировать многократную равномерную ШИМ табличным или индексным табличным способом [2]. Однако для этого нужно аналитически определить параметры ШИМ импульсов и качественно оценить гармонический состав напряжения многократных равномерных ШИМ, созданных по ступенчатым функциям построения.