

в языках программирования стандарта МЭК 61131-3 или отлаживать макеты систем управления.

## ВЫВОД

Развитие полупроводниковых технологий и технологий встраиваемых операционных систем позволяет разрабатывать систему управления, не вдаваясь в низкоуровневые подробности программирования. Разработчик, проектирующий изделие, может самостоятельно написать программу управления, а обслуживающий персонал – модернизировать ее.

Специалист, изучивший стандартные компоненты МЭК на базе обучающего комплекса, поддерживающего «открытый» стандарт МЭК 61131-3, сможет работать с контроллерами многих фирм, поддерживающих этот стандарт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Программируемые контроллеры. Общие положения и функциональные характеристики: ГОСТ Р 51840–2001 (МЭК 61131-3–92) Госстандарт России, Москва, БЗ 11 – 2001/301. – Режим доступа: <http://standartgost.ru/>. – Дата доступа: 09.11.2011.
2. Однокристалльный компьютер SC143-IEC со встроенной ОС РВ. – Режим доступа: [www.prolog-plc.ru/becknew](http://www.prolog-plc.ru/becknew). – Дата доступа: 09.11.2011.
3. Горбун, Н. Встраиваемая ОС как основа успеха. – Режим доступа: <http://www.swd.ru/index.php3?pid=566>. – Дата доступа: 06.05.2011.
4. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты / И. В. Петров; под ред. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.
5. Industrial PC to you. – Режим доступа: <http://www.ipc2u.by>. – Дата доступа: 03.05.2011.
6. SCADA системы для АСУ ТП. SCADA-SOFTLOGIC-MES-EAM. – Режим доступа: <http://www.adastra.ru>. – Дата доступа: 06.05.2011.

Представлена кафедрой  
электротехники и электроники

Поступила 06.12.2011

УДК 629.7

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО КОНТРОЛЯ ОБМОТОК АВИАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ШЕЙНИКОВ А. А., канд. техн. наук СУХОДОЛОВ Ю. В.

*Военная академия Республики Беларусь*

**Описание объекта контроля.** Авиационные коллекторные генераторы постоянного тока всех типов (ГСР, ГСР-СТ, СТГ) аналогичны по конструкции. Отличие ГСР (генератор самолетный с расширенным диапазоном

частот вращения) от ГСР-СТ и СТГ состоит в том, что последние предназначены для работы в стартерном режиме и используются для запуска авиационных двигателей. Для авиационных генераторов характерна высокая удельная мощность. Например, ГСР-18000 (мощность генератора 18 кВт) весит примерно столько же, сколько генератор общепромышленного назначения мощностью 2,5 кВт. Высокая удельная мощность генераторов постоянного тока достигается в результате применения достаточно большой частоты вращения, высококачественных электромагнитных материалов и эффективных способов охлаждения. Так, плотность токов в обмотках якоря достигает 20 А/мм<sup>2</sup>, а под щетками – 25–30 А/см<sup>2</sup>, в то время как у общепромышленных машин эти величины составляют соответственно не более 7 и 15 А/см<sup>2</sup>. Повышенная температура обмотки (до 185 °С) и высокие плотности тока, несмотря на применение специальных электротехнических материалов, сокращают срок службы авиационных генераторов до 3000 ч, в то время как срок службы генераторов общего назначения составляет десятки лет. Обмотка якоря генератора мощностью менее 6 кВт выполняется как простая волновая. У генератора большей мощности обмотка простая петлевая.

**Причины повреждений обмоток авиационных электрических машин.** Известно, что до 30 % преждевременных отказов авиационных электрических машин происходит из-за повреждений их обмоток [1], которые вызываются внешними и внутренними механическими воздействиями, имеющими электромагнитную природу [2]. Уязвимость обмоток обусловлена, прежде всего, вхождением в электромеханическую систему, состоящую из разнородных элементов: медь проводников – полимерные изоляционные материалы. Деформации в подобной системе при изменении температуры, электродинамических усилиях, вибрациях обмотки приводят к развитию внутренних напряжений в изоляции и, как следствие, образованию дефектов. Наиболее интенсивное воздействие оказывают знакопеременные моменты, возникающие в процессе пуска или реверса электрической машины.

В наиболее сложных условиях эксплуатируется витковая изоляция. Помимо механических воздействий, изоляция обмоток испытывает тепловые, климатические и электрические нагрузки. Тепловые воздействия определяют скорость старения и тепловую деформацию изоляции, которые, в свою очередь, приводят к ухудшению ее механических свойств и накоплению усталостных повреждений. При этом механические воздействия ускоряют процесс образования дефектов.

Климатические и электрические воздействия способствуют дальнейшему развитию первоначальных дефектов изоляции, образовавшихся при изготовлении генераторов. Климатические факторы, прежде всего перепад температур, увлажнение и загрязнение, создают токопроводящие мостики, способствующие электрической и электрохимической эрозии изоляции. С увеличением температуры сопротивление изоляции уменьшается, а процессы ее разрушения активизируются. Коммутационные перенапряжения, возникающие при включении и отключении, также снижают ресурс изоляции. Дефекты изоляции между витками являются причиной ее пробоя, приводящего в дальнейшем к выгоранию части обмотки.

**Характеристика методов диагностирования обмоток электрических машин.** Применяемые в эксплуатации методы испытания изоляции обмоток можно разделить на две группы. Первую составляют измерения различных параметров изоляции обмоток, ко второй относятся испытания самой изоляции, например повышенным напряжением, выпрямленным, импульсным напряжением. Для определения дефектов изоляции между обмоткой и корпусом используются такие методы, как измерение сопротивления изоляции мегаомметром, испытание повышенным напряжением частотой 50 Гц, испытание повышенным выпрямленным напряжением с измерением токов утечки. Характерным недостатком данных методов является невысокая достоверность.

При оценке состояния изоляции путем измерения емкости относительно корпуса в качестве диагностических параметров принимается отношение емкости изоляции при температуре 80–100 °С к емкости при 20 °С [3]. Необходимость нагрева изоляции снижает производительность контроля этим методом. Известен метод проверки состояния изоляции по значению тангенса угла диэлектрических потерь. Однако применение этого метода ограничено необходимостью учета разброса значений параметра при сухой и влажной изоляции.

Широкое распространение в последнее время получил метод определения дефектов изоляции измерением интенсивности частичных разрядов, предполагающий количественную оценку изменений зарядов элементов измерительной схемы, вызываемых частичными разрядами в испытуемой изоляции (ГОСТ 20074–83). Однако имеющиеся в разработанных на сегодняшний день стандартах нормативные характеристики частичных разрядов (кажущийся заряд единичного частичного разряда, частота следования частичных разрядов, средний ток частичных разрядов, квадратичный параметр частичных разрядов, мощность частичных разрядов, суммарный заряд за интервал времени) не позволяют оценить их интенсивность, а следовательно, делают затруднительным процесс построения диагностических моделей.

Обзор существующих способов контроля изоляции показал, что они не учитывают конструктивные особенности электрических машин. Решение этой задачи возможно при диагностике электрических машин с помощью анализа затухающих колебаний. Так, известен способ, основанный на исследовании характера изменения затухающего переходного процесса в проверяемой обмотке, возникающего при воздействии на объект контроля импульсным испытательным напряжением путем преобразования указанного переходного процесса в прерывистую последовательность импульсов, при сравнении образцовой и сравниваемой последовательностей импульсов и по результатам их сравнения, при определении наличия виткового замыкания в обмотке. Однако достоверность этого способа невысока, так как образцовая прерывистая последовательность импульсов формируется из почти затухшего переходного процесса по точкам перехода через ноль, фиксация которых затруднена из-за помех, соизмеримых со значением сигнала. Для стабильной фиксации этих точек необходимо увеличивать чувствительность диагностической системы, а значит, и повышать вероятность ложного заключения о неисправности обмотки якоря. Другими словами, основным недостатком способа является необходимость

подавления неинформативных спектральных составляющих и искажений, вызванных нестабильностью параметров испытательного сигнала.

**Обеспечение достоверности контроля обмоток якоря коллекторных электрических машин постоянного тока.** Эффективность контроля можно повысить, согласуя спектральный состав испытательного сигнала с частотной характеристикой контролируемой обмотки. Это необходимо для создания между витками максимальных испытательных напряжений и их равномерного распределения вдоль обмотки. Схема снятия частотных характеристик обмоток якоря авиационных коллекторных генераторов постоянного тока представлена на рис. 1.

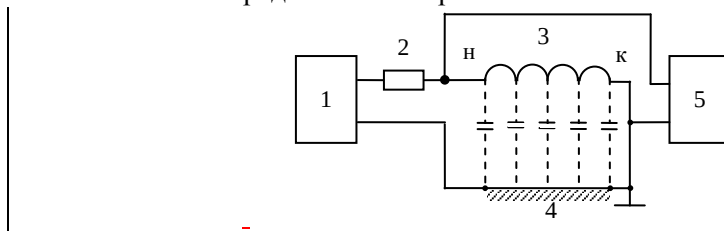


Рис. 1. Схема измерения характеристик обмотки якоря: 1 – генератор сигналов высокой частоты; 2 – активное сопротивление; 3 – обмотка якоря; н, к – начало и конец обмотки якоря; 4 – магнитопровод якоря; 5 – вольтметр

Согласно представленной на рис. 1 схеме измерения, вольтметр включается в цепь параллельно обмотке якоря. При этом напряжения в начале и конце обмотки будут  $U_n$  и  $U_k$  соответственно. Под частотной характеристикой обмотки понимается резонансная кривая, отражающая зависимость  $\frac{U_k}{U_n} = F(f)$ , где  $f$  – частота испытательного сигнала. Частотные характеристики обмоток якоря некоторых авиационных электрических машин постоянного тока, снятые по приведенной выше (рис. 1) схеме измерения, представлены на рис. 2.

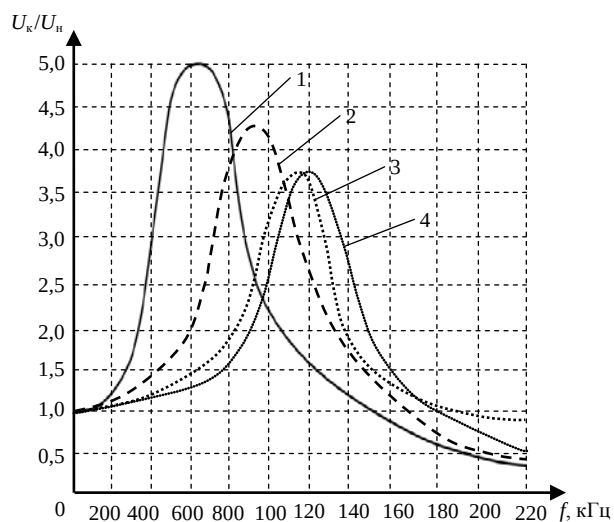


Рис. 2. Частотная характеристика обмотки якоря авиационных электрических машин постоянного тока: 1 – стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д; 2 – двигателя постоянного тока

авиационного электромашинного преобразователя напряжения ПТО-1000/1500М;  
3 – ПО-750А; 4 – ПТ-200Ц

Максимальную чувствительность контроля можно получить, если о состоянии обмотки судить по одной или нескольким составляющим сигнала, которые подвергаются наибольшим изменениям при возникновении дефекта. Таковыми являются составляющие, соответствующие по частоте резонансной области обмотки.

При этом для создания оптимальных испытательных напряжений и получения стабильных параметров подаваемого сигнала целесообразно использовать последовательность радиоимпульсов. Здесь полезная информация заключена в одном из нескольких параметров высокочастотного колебания. При этом не обязательно сохранять полностью структуру колебания, достаточно лишь сохранить закон изменения того параметра, в котором заключена информация. Особенности высокочастотных модулированных сигналов открывают путь к увеличению достоверности импульсных методов контроля обмоток. Значения определенных гармонических составляющих импульсного напряжения в контролируемой обмотке будут зависеть только от ее параметров. При этом сохраняется возможность обеспечения максимальных значений этого напряжения.

**Выбор формы испытательного сигнала.** При выборе оптимальной формы испытательного напряжения необходимо, чтобы основная энергия его спектра была сосредоточена в диапазоне резонансных частот контролируемой обмотки. В результате анализа форм спектров различных сигналов установлено, что наилучшим образом удовлетворяют предъявленным требованиям напряжения в виде отрезков синусоиды, имеющей  $k$  периодов  $u(t) = \sin(\omega_0 t)$  при  $0 \leq t \leq \frac{2\pi k}{\omega_0}$ , причем пик амплитудного спектра  $S(\omega)$

единичного отрезка синусоиды на частоте  $\omega$  выражен тем резче, чем больше число периодов  $k$ :

$$S(\omega) = \left| \frac{2k\pi\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right|. \quad (1)$$

Рассмотренную форму напряжения можно трактовать как синусоидальное колебание, модулированное прямоугольной функцией. При этом начальная фаза несущего колебания совпадает с фронтом огибающей. Аналитически сигнал можно записать в виде

$$u(t) = U \operatorname{rect} \left( \frac{t}{\tau_u} \right) \cos(\omega_0 t). \quad (2)$$

Спектральная плотность радиосигнала  $\dot{G}_p(\omega)$  получается путем сдвига спектральной плотности  $\dot{G}(\omega)$  прямоугольной огибающей по оси частот на  $\omega_0$  вправо и влево с уменьшением ординат в два раза [4] (рис. 3).

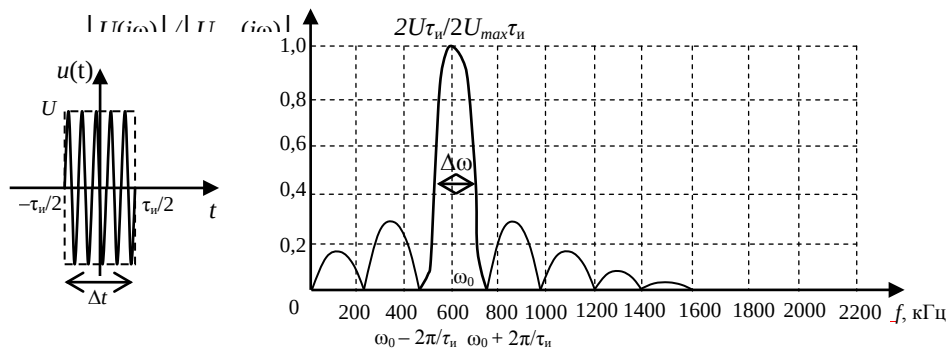


Рис. 3. Форма и амплитудный спектр напряжения в виде отрезка синусоиды, соответствующего резонансной частоте обмотки якоря генератора ГСР-СТ-12/40Д

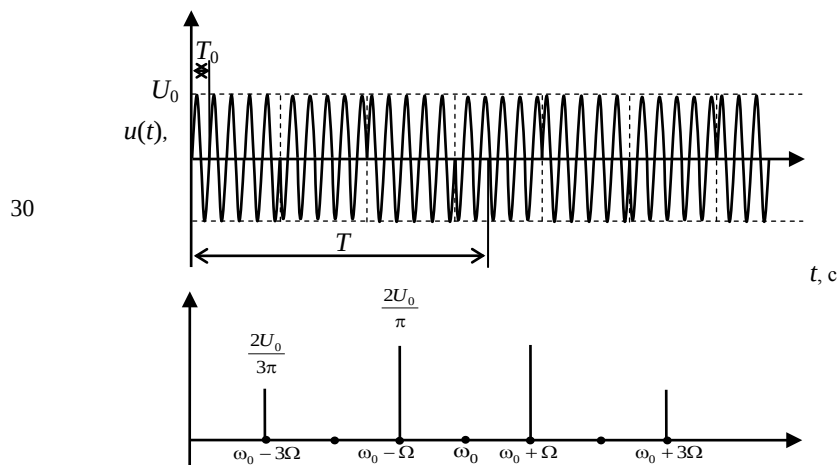
Спектральную плотность рассматриваемого радиосигнала можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{G}_p(\omega) &= \frac{1}{2}\dot{G}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\dot{G}(\omega + \omega_0) = \\ &= \frac{U\tau_i}{2} \operatorname{sinc}\left[\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2}\right] + \frac{U\tau_i}{2} \operatorname{sinc}\left[\frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2}\right] = \\ &= \frac{U}{\omega - \omega_0} \sin\left[\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2}\right] + \frac{U}{\omega + \omega_0} \sin\left[\frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2}\right].\end{aligned}\quad (3)$$

Активную ширину спектра прямоугольного импульса длительностью  $\tau_i$  можно представить как полосу частот  $\Delta\omega$  между значениями частот, при которых спектральная плотность первый раз обращается в нуль  $\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2} = \frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2} = \pi$ . Пользуясь равенством Парсеваля (4), можно показать, что доля полной энергии рассматриваемого сигнала, заключенная в полосу рассматриваемых частот  $k > 90\%$ , будет равна

$$\int_{\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2}}^{\frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2}} G^2(\omega) d\omega = k \int_{-\infty}^{\infty} G^2(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Огибающая при периодизации анализируемых радиоимпульсов образует последовательность прямоугольных импульсов. Сигнал при таком режиме работы представляет собой манипулированное колебание [5]. Сравнительные исследования видов манипуляции высокочастотных сигналов показали, что максимальная достоверность контроля обеспечивается при



фазовой манипуляции с  $\Delta\varphi = \pi$ . При этом вся энергия сигнала содержится только в боковых полосах, а составляющая на несущей частоте отсутствует (рис. 4).

Рис. 4. Временная и спектральная характеристики фазоманипулированного сигнала ( $\Delta\varphi = \pi$ )

Это объясняется наложением двух спектров – спектра фазоманипулированного сигнала (ФМС)  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$  и несущей  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ . На интервале, где

колебания синфазны, суммарная амплитуда удваивается, а где фазы противоположны – компенсируется. Двукратное превышение амплитуд спектральных составляющих фазоманипулированного сигнала над составляющими спектра амплитудно-манипулированного сигнала и возможность минимизации составляющей на несущей частоте позволяют увеличить помехоустойчивость.

**Выбор диагностических признаков.** Проведенные экспериментальные исследования авиационного стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д показали, что наибольшее изменение при появлении дефекта получает положение резонансного максимума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контролируемой обмотки якоря (рис. 5). Это изменение можно легко зафиксировать, выделяя из входного сигнала две близлежащие гармонические составляющие, соответствующие по частоте самому крутому участку АЧХ исправной обмотки (рис. 5а). Несущая частота  $\omega_0$  и частота модуляции  $\Omega$  выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная разность их амплитуд:  $\operatorname{tg}(\alpha) \Big|_{\Delta\omega=2\Omega} = \max$  (рис. 5б).

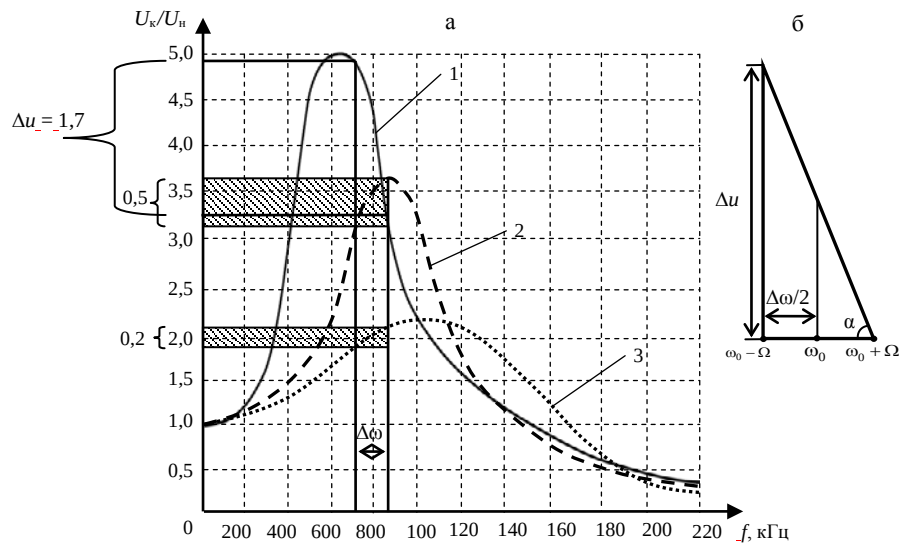


Рис. 5. Частотные характеристики обмотки якоря авиационного стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д с различным техническим состоянием: 1 – АЧХ исправной обмотки; 2 – то же при замыкании одного витка; 3 – то же при замыкании двух витков

Номера выделяемых близлежащих гармоник выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная разность их амплитуд  $\Delta u$ :

$$\Delta u = \frac{2U}{\pi} K(\omega_0 - \omega) + \frac{2U}{\pi} K(\omega_0 + \omega) = \max, \quad (5)$$

где  $K(\omega)$  – АЧХ обмотки якоря.

Сумма выделенных гармонических составляющих будет представлять балансно-модулированное колебание, по форме огибающей которого можно судить о разности амплитуд выделяемых гармоник и о состоянии обмотки (рис. 6).

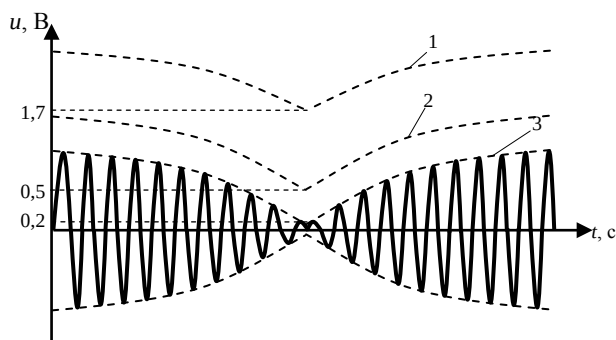


Рис. 6. Результирующий сигнал для обмотки с различным техническим состоянием:  
1 – огибающая результирующего сигнала (балансно-модулированного колебания) для исправной обмотки; 2 – то же для обмотки с одним витковым замыканием; 3 – то же для обмотки с двумя витковыми замыканиями

При отсутствии дефекта разность амплитуд гармонических составляющих будет максимальной. Следовательно, величина минимума огибающей результирующего сигнала имеет предельное значение, отличное от нуля (рис. 6, кривая 1). По мере развития витковых замыканий величина минимума огибающей стремится к нулю, что подтверждается результатами экспериментов на обмотке якоря авиационного стартер-генератора постоянного тока ГСР-СТ-12/40Д (рис. 7).

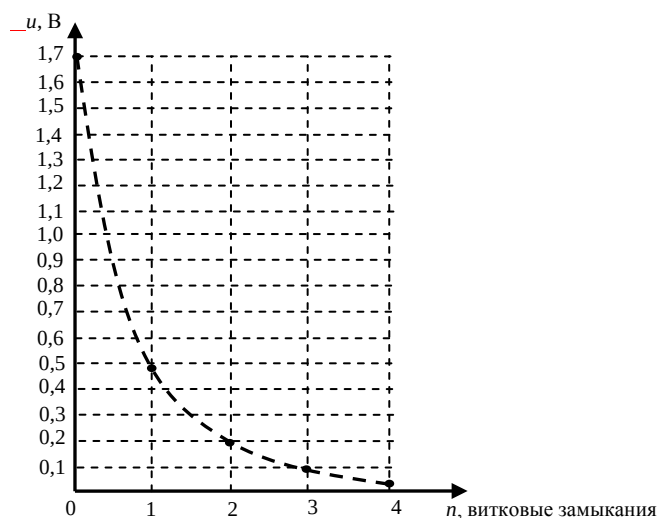




Рис. 7. Зависимость между количеством витковых замыканий обмотки якоря генератора ГСР-СТ-12/40Д и значением минимума огибающей результирующего балансно-модулированного колебания

## ВЫВОД

Таким образом, сущность диагностирования обмотки якоря заключается в формировании фазоманипулированного испытательного сигнала и выделении из выходного сигнала двух гармонических составляющих, первая из которых соответствует по частоте верхней, а вторая – нижней границам разброса значений первых максимумов амплитудно-частотной характеристики исправной обмотки электрической машины. Результатом сложения этих спектральных составляющих является балансно-модулированное колебание с низкочастотной периодической огибающей, параметры которой чувствительны к дефектам изоляции обмотки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зонтов, А. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов / А. В. Зонтов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. – 420 с.
2. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1969. – 272 с.
3. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 504 с.
4. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / К. А. Самойло [и др.]. – М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.
5. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

Представлена кафедрой  
авиационной техники  
и вооружения

Поступила 17.05.2012

УДК 621.311.7:621.382

## СИНТЕЗ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОКРАТНЫХ ШИМ, СОЗДАННЫХ ПО ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ И СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФУНКЦИЯМ ПОСТРОЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. СТРИЖНЕВ А. Г., инж. РУСАКОВИЧ А. Н.

НПООО «ОКБ ТСП»

Для управления электроприводом, содержащим электродвигатель переменного тока, используют частотные преобразователи, которые формируют напряжения в виде многократной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Принято считать [1], что указанные выходные ШИМ-напря-