

Воробьев В. М., д-р техн. наук,
Захарченко В. А., канд. техн. наук,
Ильенко С. С.,
Сильнягин А. А., канд. техн. наук

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Аэрокосмический институт Национального авиационного университета

Уровень познания основных характеристик перспективных самолетов и бортового оборудования на современном уровне авиастроения настолько высок, что до 80...90 всего объема испытаний осуществляется «на земле», до первого испытательного полета. Сертификация воздушного судна и оборудования документально закрепляет выполнение разработчиком заявленных характеристик.

Вводная часть проблемы

Многоуровневый и поэтапный процесс создания современного воздушного судна (ВС) с авионикой нового поколения – сложные информационно-технический и технологический процессы, в которых реализуются новейшие результаты конструкторско – проектных решений на основе компьютерно – информационных технологий CALS, а также математических, полунатурных, стендовых и физических моделей. Летные испытания, как критерий истинности характеристик (летно-технических и эксплуатационно-технических (ЛТХ, ЭТХ)), выполняются, в основном, для проверки поведения ВС в особых случаях полета, по отдельному перечню заданий.

Важную роль в совокупности методов и средств испытаний авионики занимают опережающие эксплуатационные лабораторные стендовые испытания функциональных систем, непосредственно влияющих на безопасность полета ВС. К ним относятся: натурные наземные испытания систем электроснабжения (СЭС) и гидропитания, систем кондиционирования воздуха, огневые испытания, системы молниезащиты, копровые испытания и др. Принципиальной особенностью современных стендовых испытаний функциональных систем являются задачи обоснования варианта структуры и наполнения банка доказательной сертификационной документации по своему перечню.

Развитие автоматических и автоматизированных систем управления поле-

том и навигации, электронных систем управления силовыми установками, систем связи, информационно-управляющих комплексов на базе интегральных модульных конструкций (ИМА) потребовало определения ряда дополнительных характеристик о качестве параметров электроэнергии. К таким параметрам систем электроснабжения ВС относятся: модуляция напряжения и частоты, пульсации напряжения постоянного тока, небаланса напряжений в трехфазных системах, формы кривой переходных напряжений, переходных процессов от повышения и понижения напряжения и частоты, перерывов в электропитании приемников энергии.

Оптимизация характеристик качества электроэнергии. Определение оптимальных количественных значений параметров систем электроснабжения ВС вызывает необходимость для всех видов потребляющего энергию оборудования – приемников и структур электроснабжения знать зависимость массы, надежности, стоимости, выходных параметров от изменения каждой из характеристик качества электроэнергии. Задача усложняется оттого, что из-за быстрого развития самолетного оборудования и его элементов значения самих оптимальных величин характеристик электроэнергии непрерывно изменяется.

Основные количественные параметры качества электроэнергии переменного и постоянного тока систем электроснабжения ВС приведены в табл. 1, 2, 3.

Характеристики напряжения переменного тока

| Режимы работы СЭС | Характеристики СЭС | Нормативно-техническая документация | | | |
|-------------------|---|-------------------------------------|------------|--------------|------------------------|
| | | ГОСТ 19705-89 | ISO 1540.3 | MTL-STD-104B | ARINC-403A DO-403A-160 |
| Установившийся | Номинальные напряжения, В | 115 / 120 | 115 / 200 | 115 / 120 | 115 |
| | Напряжение при нормальной работе СЭС, В | 108 / 119 | 108 / 118 | 108 - 118 | 104 - 122 |
| | Напряжение при ненормальной работе СЭС, В | 104 / 127 | 98 - 132 | - | 97 - 134 |
| | Напряжение при аварийной работе СЭС, В | 104 / 122 | 104 - 122 | 102 - 104 | - |
| | Напряжение в точке регулирования, В | 114 / 119 | - | 116 - 119 | 116 - 119 |
| | Разность фазовых напряжений, В | ≤3 | ≤3 | ≤3 | ≤3 |
| | Сдвиг фаз между фазными напряжениями, эл. прод. | 116 / 124 | 118 - 122 | 118 - 122 | 118 - 122 |
| | Коэффициент гармоник, % | ≤7 | ≤5 | ≤5 | ≤5 |
| | Коэффициент амплитуды | 1,41 ± 0,15 | 1,41 ± 0,1 | 1,41 ± 0,1 | 1,41 ± 0,1 |
| | Отдельная высшая гармоническая, % | ≤5 | ≤4 | - | - |
| Переходный | Постоянная составляющая, В | ≤0,1 | - | ≤0,1 | ≤0,1 |
| | Двойная амплитуда модуляции (размах) | ≤2 % | ≤3,5 В | ≤1,75 В | ≤1,75 В |
| | Максимальное действующее значение напряжения при нормальной работе СЭС, В | 160 | 160 | 180 | 180 |
| | Минимальное действующее значение напряжения при нормальной работе СЭС, В | 58 | 58 | 80 | 80 |
| | Длительность переходного процесса при нормальной работе СЭС, С | ≤0,1 | ≤1 | ≤0,1 | ≤0,1 |
| | Перерыв электропитания при нормальной работе СЭС, С | ≤0,08 | ≤0,02 | ≤0,05 | ≤0,2 |
| | Максимальное действующее значение напряжения при ненормальной работе СЭС, В | 180 | 180 | 180 | 180 |
| | Минимальное действующее значение напряжения при ненормальной работе СЭС, В | 0 | 0 | 0 | 0 |

(продолжение табл. 1)

| | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | Длительность переходного режима при ненормальной работе СЭС, С | ≤7 | ≤7 | ≤7 | ≤0,7 |
| | Перерыв электропитания при ненормальной работе СЭС, С | ≤7 | ≤7 | ≤7 | ≤7 |
| | Амплитуда импульса напряжения, В | ± 600 | ± 600 | ± 600 | ± 600 |
| | Длительность импульса напряжения, мкс | 5 | 10 | 10 | 10 |

Таблица 2

Характеристики частоты переменного тока

| Режимы работы СЭС | Характеристика СЭС | Нормативно-техническая документация | | | |
|-------------------|--|-------------------------------------|------------|----------------|------------------------|
| | | ГОСТ 19105-89 | ISO 1540,3 | MTL – STD-104B | ARINC-403A DO-403A-160 |
| Установившийся | Номинальная частота, Гц | 400 | 400 | 400 | 400 |
| | Частота при нормальной работе СЭС, Гц | 380 - 420 | 380 - 420 | 380 - 420 | 380 - 420 |
| | Частота при ненормальной работе СЭС, Гц | 370 - 430 | 370 - 430 | - | 320 - 480 |
| | Частота при аварийной работе СЭС, Гц | 360 - 440 | 360 - 440 | 360 - 440 | - |
| | Скорость изменения частоты из-за ухода, Гц/мин, | ≤15 | ≤15 | ≤15 | ≤15 |
| | Амплитуда модуляции | ±4 ±0,2 | ±5 ±0,125 | ±5 ±0,6 | ±5 ±0,6 |
| | Частотный диапазон модуляции, Гц | 0,01 - 100 | 0,01 - 100 | 0,01 - 200 | 0,01 - 200 |
| | Максимальная частота, Гц | 450 | 450 | 425 | 425 |
| | Минимальная частота, Гц | 350 | 350 | 375 | 375 |
| | Длительность переходного процесса по частоте, С | ≤2 | ≤2 | ≤1 | ≤1 |
| Переходный | Максимальная частота при ненормальной работе СЭС, Гц | 480 | 480 | - | - |
| | Минимальная частота при ненормальной работе СЭС, Гц | 320 | 320 | - | - |
| | Длительность переходного процесса при ненормальной работе СЭС, С | ≤7 | ≤7 | - | - |
| | Отношение частоты и напряжения при снижении частоты | ≤2,7 | ≤3 | ≤2,9 | ≤2,9 |

Таблица 3

Характеристика напряжения постоянного тока

| Режим работы СЭС | Характеристики | Нормативно-техническая документация | | | | | ARINC-413A DJ-160 |
|------------------|--|-------------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------------|
| | | ГОСТ 19705-89 | ISO 1540,3 | MIL-STD-704 B | | Повышен ное | |
| | | | | Низкое | Повышен ное | | |
| Установившийся | Номинальное напряжение, В | 27 | 28 | 28 | 270 | 28 | 28 |
| | Напряжение при нормальной работе СЭС, В | 24 - 29,4 | 24 - 29 | 22 - 29 | 250 - 280 | 22 - 29,5 | 22 - 29,5 |
| | Напряжение при ненормальной работе СЭС, В | 21 - 31,5 | 21 - 32 | - | - | 20,5 - 32,2 | 20,5 - 32,2 |
| | Напряжение при аварийной работе СЭС, В | 18 - 31 | 18 - 29 | 18 - 29 | 240 - 290 | 20,5 - 32,2 | 20,5 - 32,2 |
| | В точке регулирования, В | 25,4 - 29,4 | - | - | - | - | - |
| | Амплитуда пульсации, В | ± 2 | ± 2 | ± 1,5 | ± 6 | ± 2 | ± 2 |
| | Коэффициент искажения | - | - | 0,02 | 0,03 | - | - |
| | Частотный диапазон пульсации, Гц | 10 - 150000 | 10-150000 | 10 - 106 | 10 - 106 | 200 - 20000 | 200 - 20000 |
| | Максимальное напряжение при нормальной работе СЭС, В | 70/40 | 70/40 | 475 | 50 | 50 | 50 |
| | Минимальное напряжение при нормальной работе СЭС, В | 8/13 | 6/13 | 16 | 125 | 16 | 16 |
| Переходный | Длительность переходного процесса при нормальной работе СЭС, С | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 |
| | Перерыв электропитания при нормальной работе СЭС, С | ≤ 0,08 | ≤ 0,2 | ≤ 0,05 | ≤ 0,05 | ≤ 0,2 | ≤ 0,2 |
| | Максимальное напряжение при нормальной работе СЭС, В | 80 / 45 | 80 / 45 | - | - | - | - |
| | Минимальное напряжение при ненормальной работе СЭС, В | 0 | 0 | - | - | - | - |
| | Длительность переходного процесса при ненормальной работе СЭС, С | ≤ 7 | ≤ 7 | - | - | - | - |
| | Перерыв электропитания при ненормальной работе СЭС, С | ≤ 7 | ≤ 7 | ≤ 5 | ≤ 7 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| | Амплитуда импульсов напряжения, В | ± 600 | ± 600 | ± 600 | ± 600 | ± 600 | ± 600 |
| | Длительность импульсов напряжения, МКС | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Примечание: В ГОСТ 19705-89 и предложениях ISO 1540.3 указаны два допустимых предела переходных напряжений в номинальном и ненормальных режимах; верхние цифры – для систем, питаемых генераторами; нижние цифры – для систем, питаемых трансформаторно-выпрямительными устройствами. Американский военный стандарт MIL-STD-704 В предусматривает для СЭС постоянного тока два номинальных напряжения 27 и 270 В.

Обоснование параметров качества электроэнергии СЭС

1. Основными параметрами СЭС являются номинальные значения напряжения и частоты. Желание повысить значение номинального напряжения и, следовательно, снизить токи, а, значит, повысить точность регулирования напряжения, снизить массу и повысить надежность СЭС и качество электроэнергии сталкивается с проблемой ограничения электрической прочности воздушных промежутков, особенно для высот полета 25...35 км.

В переходных режимах работы напряжение переменного тока постоянной частоты превышает номинальное напряжение $U=1.5U_{\text{ном}}$ и $U=3U_{\text{ном}}$ – в СЭС постоянного тока. Отсюда $U_{\text{max}} \leq 235\text{В}$ для СЭС переменного тока стабильной частоты и $U \leq 167\text{В}$ для СЭС постоянного тока. Аналогично обоснованы номинальные напряжения переменного тока 115 В и 200 В на приемниках и 120 и 208 В на клеммах генераторов. Кроме того необходимо учитывать особенности работы коммутационной аппаратуры СЭС постоянного тока в высотных условиях, а также дополнительные затруднения в работе штепсельных разъемов из-за возможных перекрытий воздушных промежутков (при $U=600\text{В}$ для отключаемой нагрузки). Эти особенности ограничивают величину напряжения постоянного тока 27 В.

2. Номинальное значение частоты в СЭС переменного тока отечественных и зарубежных ВС равно 400Гц. Массо-

габаритные характеристики машин оптимальны для диапазона $f=400...600\text{Гц}$ и обеспечивают приемлемые уровни качества электроэнергии

3. Точность поддержания напряжения на клеммах приемников в СЭС, в установившихся режимах определяется: точностью регулирования напряжения источников; изменением напряжения в электросети; небалансом напряжений из-за неравномерности нагрузок в фазах. Точность регулирования напряжения в СЭС постоянного тока определяется точностью работы системы регулирования напряжения и величиной падения напряжения в сети.

4. Согласно нормативно-технической документации (ГОСТ 19705-89, MILSTD-704 В и др) напряжение в точке регулирования трехфазной СЭС должно поддерживаться в пределах $\sim U=115...119\text{В}$, а в СЭС $U=27...29\text{В}$. Во вторичных системах постоянного тока напряжение в точке подключения нерегулируемых выпрямительных устройств обеспечивается в пределах $U_{\text{ву}}=25.4...29.4\text{В}$. Дальнейшее увеличение точности регулирования напряжения требует усложнения системы, но снижается надежность и устойчивость работы регулятора.

Из опыта проектирования и эксплуатации отечественных и зарубежных самолетных СЭС установлено, что оптимальное падение напряжения в системе передачи и распределения электроэнергии: для СЭС $\sim 115/200\text{В}$ 400 Гц составляет $\Delta U=4\text{В}$, в СЭС $=27\text{В}$ составляет $\Delta U=1.5...3\text{В}$. Влияние небаланса напряжения на клеммах приемников СЭС, вызванного неравномерностью нагрузок фаз, оценивается разностью наибольшего и наименьшего фазных напряжений системы, что отражено в нормативно-технической документации. Другой метод определения небаланса напряжений сводится к оценке наибольшего отклонения трехфазных напряжений относительно среднего уровня ($U=U_{\text{рег}}$):

$$\Delta U = \left| |U_{\phi}| - |U_{\text{cp}}| \right|,$$

где U_{ϕ} – напряжение; U_{cp} – напряжение регулятора.

$$U_{cp} = (|U_a| + |U_b| + |U_c|) / 3.$$

Несимметричность трехфазных напряжений определяется симметричными составляющими напряжений (нулевой, прямой и обратной последовательностей):

$$\epsilon_2 = \dot{U}_2 / \dot{U}_1; \quad \epsilon_0 = \dot{U}_0 / \dot{U}_1$$

– соответственно коэффициенты обратной и нулевой последовательности, где $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ – напряжения соответственно обратной, прямой и нулевой последовательностей. Равномерная статическая трехфазная нагрузка несколько снижает небаланс напряжений, но до 30 % мощности нагрузки влияние незначительно, поэтому наибольшее влияние оказывает неравномерность загрузки фаз. Так при нагрузках фаз: $y_a=0,7; y_b=0,6; y_c=0,85$ (в относительных единицах) неравномерность нагрузок фаз соответственно равна: 0,85; 0,6; 0,25. При этом для однофазной нагрузки напряжение обратной последовательности определяется выражением:

$$\epsilon_2 \approx 1/3 y z_2,$$

где y – однофазная нагрузка; Z_2 – сопротивление генератора токам обратной последовательности. Коэффициент нулевой последовательности определяется выражением

$$\epsilon_0 \approx 1/3 y Z_0,$$

где Z_0 – сопротивление генератора токам нулевой последовательности. Зависимость коэффициента обратной и нулевой последовательностей от произведения $y z_2$ ($y z_0$) изображена на рис. 1.

Небаланс напряжений практически определяется коэффициентом напряжения обратной последовательности и ограничен значением 4 В. Снижение неравномерности нагрузок фаз на 10...15 % мощности фазы генератора снижает допустимый дебаланс напряжений на 1,5...2 В.

5. Применяемые на пассажирских самолетах нерегулируемых выпрямительных устройств – трехфазных выпрямительных устройств по схеме Ларионова имеют пульсации $f_{\Pi}=2400$ Гц и выше (при симметрии напряжения на входе).

При несимметрии напряжения на входе появляется гармоническая составляющая 800 Гц с амплитудой, прямо пропорциональной небалансу напряжения $U_{M800}=0,2\Delta U$,

где U_{M800} – амплитудное значение гармонической составляющей 800 Гц в кривой постоянного тока; ΔU – небаланс фазных напряжений на входе трансформаторно – выпрямительных устройств (ТВУ).

При небалансе напряжений $\Delta U=4$ В действующее значение гармонической составляющей 800 Гц составит $U_{M800}=0,8$ В.

6. Синусоидальность формы кривой напряжения СЭС характеризуется коэффициентом гармоник K ; предельным значением гармонической составляющей K_2 ; коэффициентом амплитуды K_a ; отклонением мгновенного значения кривой напряжения переменного от формы синусоиды. В нормативно-технической документации наибольшее распространение получил так называемый коэффициент

$$\text{гармоник} \quad K = \frac{\sqrt{\sum_{k=7}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \times 100\%,$$

где U_k – амплитуда высшей гармонической k -го порядка; U_1 – амплитуда первой гармоники кривой напряжения. Другим по значению коэффициентом K_r является предельное значение с любой высшей гармонической составляющей. Этот коэффициент позволяет установить максимально возможное влияние каждой частотной составляющей для конкретного приемника (функциональная система).

Значение коэффициента K_r определяется выражением

$$K_r = U_k / U_1 \cdot 100\%,$$

где U_k – действующее значение k -ой гармоники; U_1 – действующее значение основной гармоники.

Дополнительная оценка синусоидальности кривой направления осуществляется коэффициентом амплитуды

$$K_a = U_m / U,$$

где U_m – максимальное мгновенное значение напряжения; U – действующее значение напряжения.

Указанные три оценки формируются нормативно-технической документацией. Так, согласно ГОСТ 19705-89, коэффициент гармоник $K \leq 8\%$; коэффициент любой гармоник $K \leq \%$ от основной; коэффициент амплитуды должен находиться в пределах $1,26 \leq K_a \leq 1,56$. Нагрузка от трансформаторно – выпрямительного устройства является нелинейной для сети 115 / 200 В 400 Гц и может достигать 25 % мощности. При этом уровне мощности кривая напряжения СЭС должна соответствовать указанным стандартам [1,2].

7. Модуляция напряжения – периодическое или случайное изменение амплитуды напряжения СЭС относительно уровня среднего значения в установившихся процессах от действия гармонических с частотами ниже основной. Модуляция напряжения нормируется действующими стандартами, ограничивающими разность максимального и минимального значений огибающей кривой напряжения. В СЭС для фазного напряжения $U=115$ В эта разница не должна превышать 2 % $U_{ном}$. Ограничиваются также частотные составляющие огибающей кривой модуляции напряжения переменного тока.

Максимальная амплитуда равна 1,15 В действующего значения или

$$U_m = 1,15 \sqrt{2} U_{ном} = 1,673 U_{ном},$$

а двойная амплитуда $Um_2 = 2 * 1,673 = 3,35$ В. Допускаются наибольшие амплитуды для частичного диапазона $f_{доп} = 10...25$ Гц (рис.2).

В случае, если система регулирования напряжения оптимальна в смысле быстрой реакции и устойчива, то модуляция напряжения определяется переходными и сверхпереходными реактивными сопротивлениями (демпферные обмотки) генератора и характером нагрузок (импульсно-периодический характер).

8. Модуляция частоты как процесс аналогичен модуляции напряжения. Помимо системы регулирования напряжения, типа нагрузки, переходных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений генератора модуляция частоты определяется механическими характеристиками привода – генератора постоянной частоты вращения (ППЧВ), моментом инерции вращающихся частей, жесткостью валов.

Импульсно-периодический характер нагрузки вызывает в СЭС~ модуляцию частоты, а при отсутствии такой нагрузки причиной модуляции частоты являются коммутационные процессы мощных приемников электроэнергии.

Модуляция частоты определяется амплитудой модуляции и частотными составляющими, изображенными на (рис. 3).

Амплитуда модуляции частоты может достигать значения 4 Гц при частоте модуляции от 0,01 до 1,5 Гц, затем ее допустимая амплитуда снижается до 0,2 Гц. Опыт эксплуатации и испытаний СЭС~ показали, что частоты модуляции или повторений находятся в пределах:

▪ $f = 0,5...5$ Гц – для пневмомеханических ППЧВ;

▪ $f = 5...15$ Гц – для гидромеханических ППЧВ.

Установлено, что появление процесса модуляции напряжения и частоты в СЭС с турбоприводным ППЧВ вызывает раскачку частоты, что характеризует наличие «люфта» регулирующей заслонки привода и может являться диагностическим признаком для соответствующего технического обслуживания.

Максимальная скорость изменения частоты ухода не должна превышать 15 Гц/мин или 0,25 Гц/с. При таких ограничениях максимальной скорости изменения частоты больше 0,25 Гц/с – соответствует модуляция частоты, а при меньших значениях приводит к изменению частоты из-за ухода.

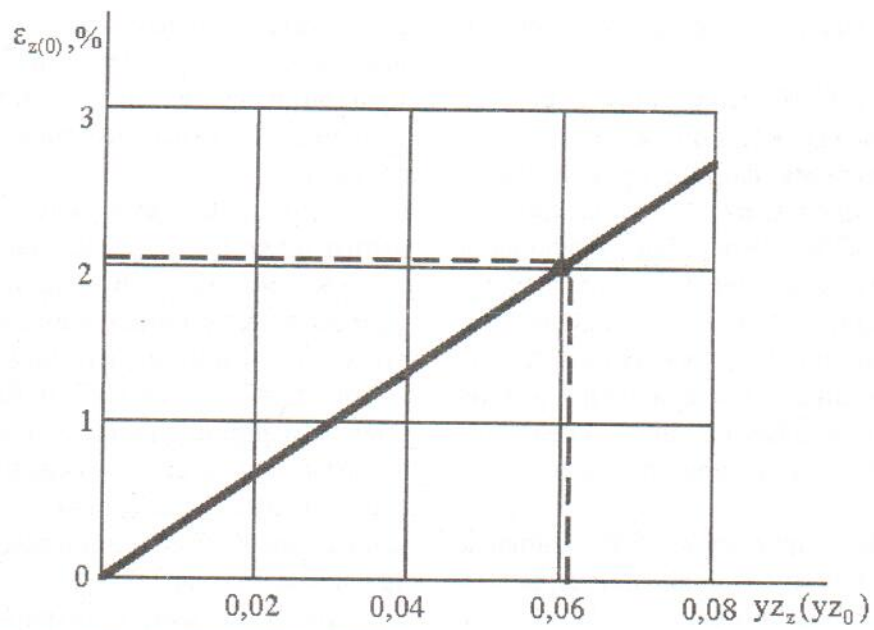


Рис. 1. Зависимость коэффициентов обратной и нулевой последовательностей от произведения $yz_z(yz_0)$

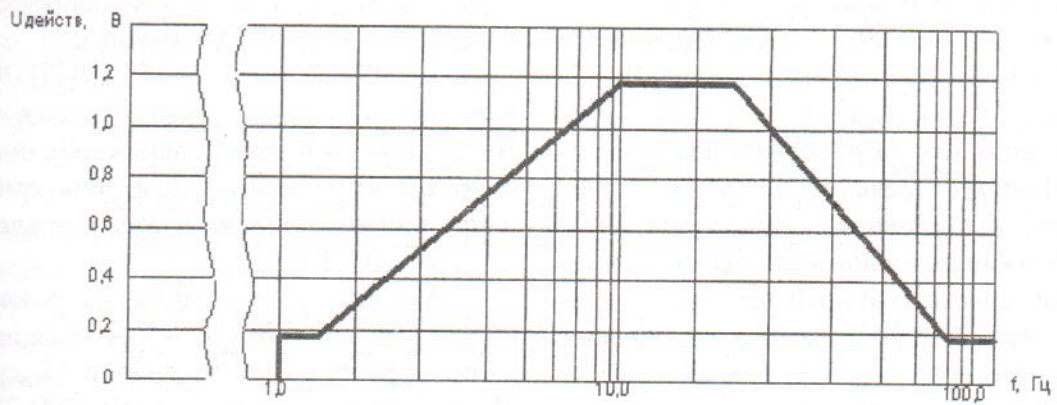


Рис. 2. Кривая модуляции напряжений СЭС~, допустимая в пределах частотных составляющих

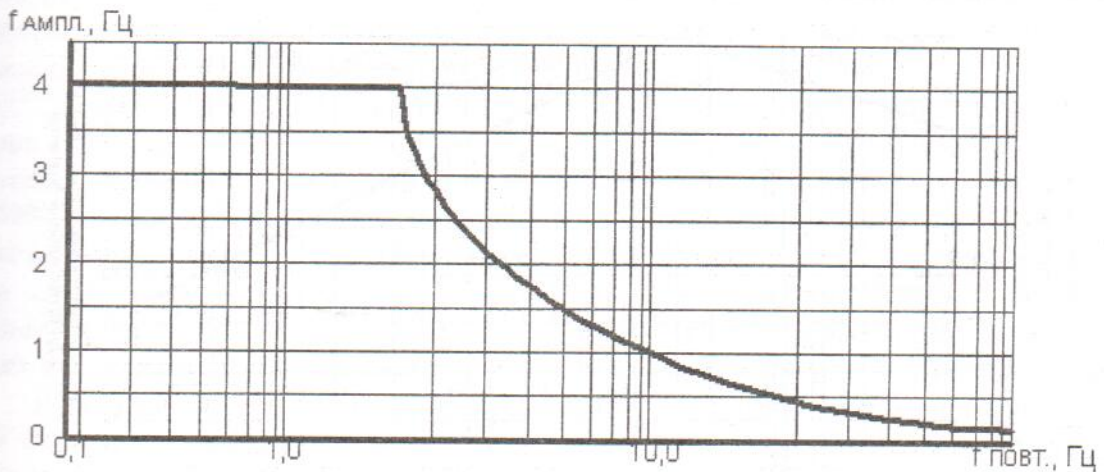


Рис. 3. Кривая модуляции частоты СЭС~, допустимая в пределах частотных составляющих

9. Пульсация напряжения постоянного тока

Если в СЭС модуляция и искажения формы кривой напряжения определяют отклонения формы кривой (синусоиды) от идеальной, то пульсации напряжения в СЭС определяют отклонение мгновенного значения от среднего уровня. Пульсации в СЭС представляют наличие переменной составляющей в кривой напряжения, характеризуемой амплитудой и частотными составляющими (периодическая или непериодическая функция).

В СЭС, питаемых ТВУ, основные гармонические пульсации определяются схемами выпрямления:

- для трехфазной двухполупериодной схемы Ларионова основная гармоническая пульсация равна $f_{п} = 2400$ Гц;

- для схемы трехобмоточного трансформатора с двумя выходными обмотками (одна «звезда», другая «треугольник»), включенными на два двухполупериодных трехфазных моста параллельно по постоянному току, $f_{п} = 4800$ Гц. Помимо основной частоты пульсации в характеристике кривой имеются и другие составляющие: высших и низших гармонических:

- высшие гармонические обусловлены процессами коммутации диодов трехфазного двухполупериодного моста и составляющими на клеммах входа ТВУ, в

результате чего частотные спектры кривых напряжения переменного тока и пульсаций напряжения постоянного тока, питаемых ТВУ, имеют одинаковые диапазоны;

- подобная связь характерна и для частот ниже $f_{п} = 2400$ Гц, так как в трехфазной системе СЭС из-за небаланса фазных и нелинейных напряжений существует пульсация напряжений постоянного тока $f_{п} = 2400/3 = 800$ Гц. Кроме того, в кривой выпрямленного напряжения низшие частотные составляющие пульсаций соответствуют частотным составляющим модуляции напряжения переменного тока на клеммах входа ТВУ.

Весь диапазон спектра частот пульсации напряжения постоянного тока соответствует диапазону спектра модуляции и искажения формы кривой напряжения переменного тока. Американский стандарт на СЭС самолетов MIL-STD-704B устанавливает допустимый диапазон частот спектра пульсаций напряжения постоянного тока и искажений формы кривой напряжения переменного тока в пределах $f_{\text{доп. дчп}} = 10 \dots 10^6$ Гц (рис.4).

Амплитуда пульсаций напряжения СЭС = отечественные и зарубежные стандарты ограничивают значением $U_{\text{п. доп}} \leq 2$ В, в то же время стандарт MIL-STD-704B устанавливает предел амплитуды пульсаций $U_{\text{п. доп MIL-STD-704B}} = \pm 1,5$ В.

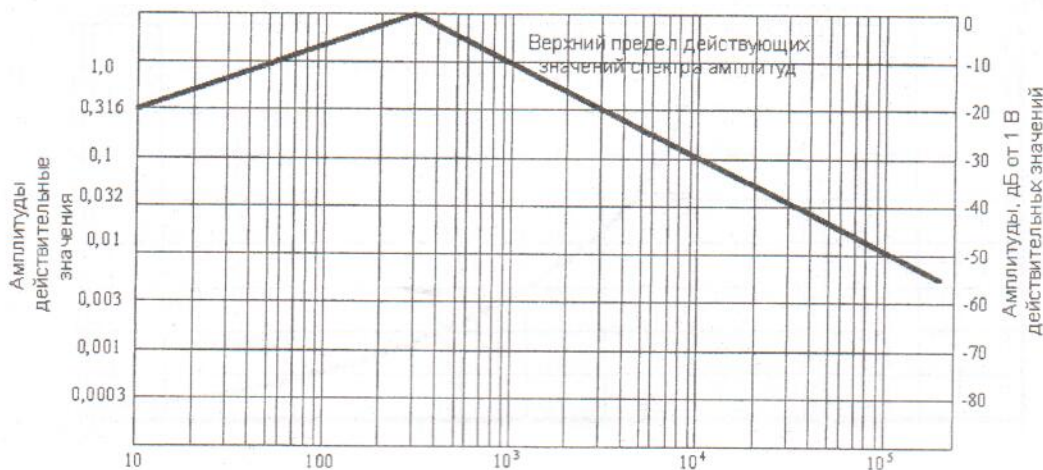


Рис. 4. Область допустимых значений частотного спектра пульсаций напряжения постоянного тока по MIL-STD-704B

10. *Качество электроэнергии СЭС* и СЭС регламентируется нормативно-технической документацией относительно переходных значений напряжения, частоты и перерывов в питании при нормальной и ненормальной работе СЭС. Эти вопросы рассматриваются в отдельной работе и являются весьма существенными в реализации требуемого качества электропитания самолетов. Рассмотрены переходные процессы для различных нагрузок генераторов повышения – понижения напряжения и частоты (режимы «сброса» – «наброса» нагрузки). Исследуемые параметры напряжения и частоты должны «уложиться» в коридор, чаще называемый «трубкой допусков», в случае выхода параметров за пределы (для нормальных и ненормальных режимов) может быть сформулировано понятие *отказа системы электроснабжения ВС*, как фундаментального случайного события теории надежности.

Экспериментальное определение и анализ коэффициента нелинейного искажения, гармонических составляющих напряжения и времени прерывания питания в СЭС переменного тока самолета Ан-148

Измерение коэффициента искажения формы кривой напряжения, величин гармонических составляющих и коэффициента амплитуды проводились в установленном режиме работы системы электроснабжения, как при питании от генераторов Г1 и Г2 (ГТЗОНЖЧ12), так и при питании системы от генератора Гвсу 30030-140 при 10% и длительной нагрузке в системе постоянного тока, а также при минимальной, длительной и максимальной (длит + НС №2) – насосной станции в системе переменного тока.

Измерение коэффициента искажений формы кривой напряжения переменного тока производились на шинах генераторов Г1 и Г2 измерителем нелинейных искажений С6-11, а величины гармониче-

ских составляющих анализатором спектра СК4-56.

Коэффициент амплитуды определялся по результатам замеров амплитудного значения напряжения амплитудным вольтметром –12 и действующего значения напряжения, которое измерялось с помощью вольтметра Д5015. Вольтметры подключались через общий делитель напряжения.

Результаты измерений приведены в таблицах 4, 5 и 6.

Для определения амплитудного значения первой гармоники и для расчетов коэффициентов искажений были использованы аналитические выражения из теории электротехники:

$$U_{\Sigma}^2 = U_0^2 + U_{\Sigma 1}^2 + U_{\Sigma 2}^2 + U_{\Sigma 3}^2 + \dots + U_{\Sigma n}^2$$

$$U_{\Sigma}^2 = U_0^2 + \left(\frac{U_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_n}{\sqrt{2}}\right)^2$$

$$2U_{\Sigma}^2 = 2U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2$$

$$U_1 = \sqrt{2U_{\Sigma}^2 - 2U_0^2 - U_2^2 - U_3^2 - \dots - U_n^2}$$

$$K_c = \frac{\sqrt{2U_0^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

$$K_n = \frac{U_n}{U_1},$$

где: U_{Σ} – действующее значение фазного напряжения, измеренное прибором;

U_0 – постоянная составляющая напряжения переменного тока;

$U_{\Sigma 1}, U_{\Sigma 2}, U_{\Sigma 3}, \dots, U_{\Sigma n}$ – действующее значение 1-й, 2-й, 3-й, ..., n-й гармоники;

$U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ – амплитудное значение 1-й, 2-й, 3-й, ..., n-й гармоники;

K и K_n – коэффициент искажения;

Как видно из таблицы 6, при питании от генератора Г1 во всех измеренных режимах коэффициент нелинейных искажений формы кривой напряжения переменного тока не превышает 5,6%, а при питании от генератора Г2 не превышает 6,4%, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89, не более 8%, соответствует.

Максимальное действующее значение любой отдельной высшей гармоники во всех измеренных режимах, как при питании от Г1, так и при питании от Г2 не превышает 3,2% от действующего значения первой гармоники напряжения, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89, не более 5%, соответствует.

Коэффициент амплитудного значения напряжения находится в пределах 1,39 – 1,50, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89 $1,41 \pm 0,15$ (1,26 – 1,56), соответствует.

Как видно из таблицы 5, при питании от генератора Гвсу во всех измеренных режимах коэффициент нелинейных искажений формы кривой напряжения переменного тока не превышает 7,6%, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89, не более 8%, соответствует.

Максимальное действующее значение любой отдельной высшей гармоники во всех измеренных режимах при питании от Гвсу не превышает 4,6% от действующего значения первой гармоники напряжения, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89, не более 5%, соответствует.

Коэффициент амплитудного значения напряжения находится в пределах 1,41 – 1,48, что требованиям п.2.1.8. ГОСТ 19705-89 $1,41 \pm 0,15$ (1,26 – 1,56), соответствует.

Время прерывания питания при выключении генератора ВСУ при условии, что Г2 включен а Г1 отключен составляет $t=0,35$ мс, что соответствует требованиям ГОСТ 19705-89 (см. осциллограммы, рис. 5).

Таблица 4

Коэффициент нелинейных искажений и гармонические составляющие напряжения переменного тока

| Нагрузка системы ~115В | | Минимальная | | Минимальная | | Длительная | |
|---------------------------|----------|-------------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------|
| Нагрузка системы =27В | | Длительная | | Длительная | | Длительная | |
| | | Шины Г1 | | Шины Г2 | | Шины Г2 | |
| № гар | f [Гц] | U_n [В] | K_n [%] | U_n [В] | K_n [%] | U_n [В] | K_n [%] |
| U_ϕ | | 117,9 | | 118,0 | | 117,6 | |
| U_0 | | 0,015 | | 0,016 | | 0,016 | |
| 1 | 400 | 176,7 | 100,0 | 171,1 | 100,0 | 166,9 | 100,0 |
| 3 | 1200 | 0,16 | 0,09 | 0,58 | 0,34 | 0,55 | 0,33 |
| 5 | 2000 | 3,00 | 1,70 | 3,00 | 1,75 | 1,50 | 0,90 |
| 7 | 2800 | 2,00 | 1,13 | 1,60 | 0,94 | 1,50 | 0,90 |
| 9 | 3600 | 0,11 | 0,06 | 0,30 | 0,18 | 0,15 | 0,09 |
| 11 | 4400 | 5,00 | 2,83 | 5,50 | 3,20 | 1,90 | 1,14 |
| 13 | 5200 | 2,80 | 1,58 | 5,00 | 2,92 | 2,00 | 1,20 |
| 15 | 6000 | 0,43 | 0,24 | 0,43 | 0,25 | 0,11 | 0,07 |
| 17 | 6800 | 0,55 | 0,24 | 0,85 | 0,50 | 0,35 | 0,21 |
| 19 | 7600 | 0,83 | 0,47 | 0,23 | 0,13 | 0,60 | 0,36 |
| 21 | 8400 | 0,37 | 0,21 | 0,30 | 0,17 | 0,10 | 0,06 |
| 23 | 9200 | 3,00 | 1,70 | 1,90 | 1,11 | 1,30 | 0,78 |
| 25 | 10000 | 1,50 | 0,85 | 2,00 | 1,17 | 1,30 | 0,78 |
| K_n | | 7,63 | 4,32 | 8,73 | 5,1 | 4,00 | 2,42 |

Таблиця 5

Коефіцієнт нелінійних искажень і гармонічні складові напруження перемінного току, вимірені на шинах Г1, при живленні від генератора Гвсу

| Нагрузка системы ~115В | | Минимальная | | Длительная | |
|------------------------|----------|-------------|-----------|------------|-----------|
| Нагрузка системы =27В | | Длительная | | Длительная | |
| № гар. | f [Гц] | U_n [В] | K_n [%] | U_n [В] | K_n [%] |
| U_ϕ | | 117,2 | | 115,8 | |
| U_0 | | 0,01 | | 0,011 | |
| 1 | 400 | 173,0 | 100,0 | 165,5 | 100,0 |
| 3 | 1200 | 0,15 | 0,09 | 0,30 | 0,18 |
| 5 | 2000 | 1,50 | 0,87 | 2,70 | 1,63 |
| 7 | 2800 | 1,00 | 0,58 | 0,85 | 0,50 |
| 9 | 3600 | 1,00 | 0,58 | 0,43 | 0,26 |
| 11 | 4400 | 8,00 | 4,62 | 3,80 | 2,30 |
| 13 | 5200 | 7,00 | 4,00 | 2,50 | 1,50 |
| 15 | 6000 | 1,60 | 0,92 | 0,63 | 0,38 |
| 17 | 6800 | 1,70 | 0,98 | 0,60 | 0,36 |
| 19 | 7600 | 0,93 | 0,54 | 0,40 | 0,24 |
| 21 | 8400 | 0,13 | 0,08 | 0,65 | 0,39 |
| 23 | 9200 | 3,50 | 2,00 | 2,00 | 1,21 |
| 25 | 10000 | 2,20 | 1,27 | 1,10 | 0,66 |
| K_n | | 11,85 | 6,85 | 5,96 | 3,6 |

Таблиця 6

Несинусоидальність напруження в системі перемінного току перемінної частоти

| № п/п | Нагрузка системы переменного тока | Нагрузка системы постоянного тока | Коеффициенты искажений | | | Примечание |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|------------|--------------|
| | | | K_n [%] | K_n [%] | K_a о.е. | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| На шине Г1 при питании шины от генератора Г1 | | | | | | |
| 1 | Минимальная | 10% | 3,1 | - | 1,50 | |
| 2 | Минимальная | Длительная | 5,6 | 2,83 | 1,50 | |
| 3 | Длительная | Длительная | 3,0 | - | 1,45 | |
| 4 | Длит + НС№2 | Длительная | 3,2 | - | 1,42 | Г2 отключен |
| На шине Г2 при питании шины от генератора Г2 | | | | | | |
| 5 | Минимальная | 10% | 3,7 | - | 1,48 | |
| 6 | Минимальная | Длительная | 6,4 | 3,2 | 1,45 | |
| 7 | Длительная | Длительная | 3,0 | 1,2 | 1,42 | |
| 8 | Длит + НС№2 | Длительная | 3,6 | - | 1,39 | Г1 отключен |
| 9 | Длительная | Длительная | 4,2 | - | 1,42 | ВУ1 отключен |
| На шине Г1 при питании шины от генератора Гвсу | | | | | | |
| 10 | Минимальная | 10% | 2,6 | - | 1,44 | |
| 11 | Минимальная | Длительная | 7,6 | 4,62 | 1,48 | |
| 12 | Длительная | Длительная | 3,8 | 2,3 | 1,43 | |
| 13 | Длит + НС№2 | Длительная | 3,4 | - | 1,41 | |

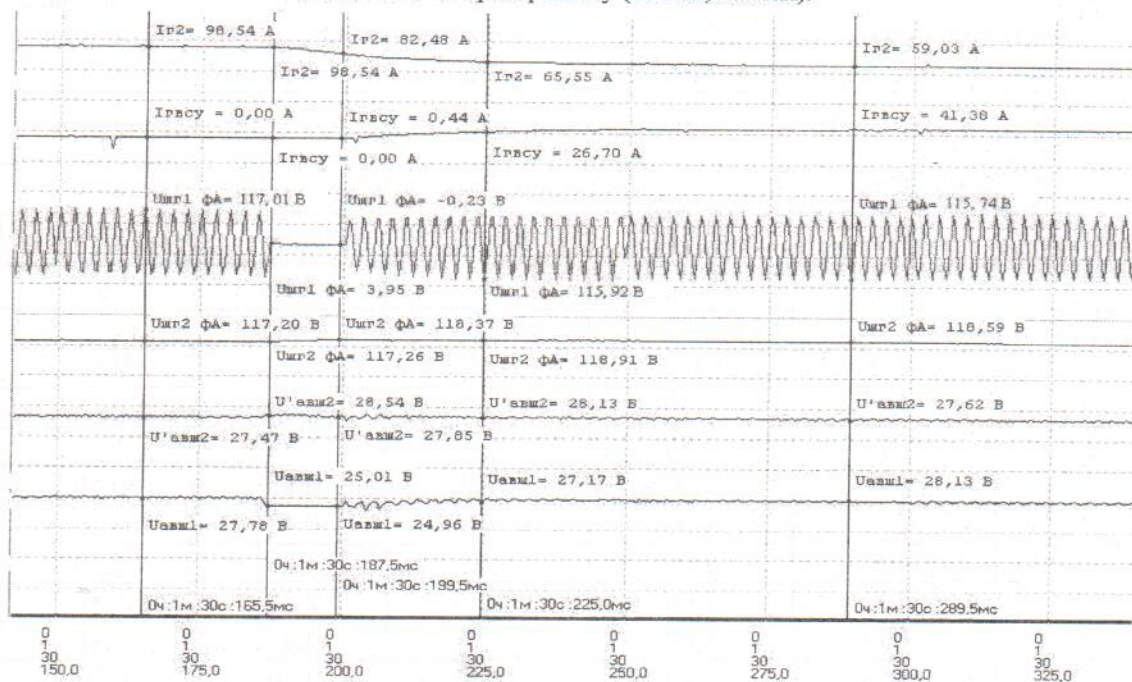


Рис. 5. Осциллограммы экспериментальных исследований СЭС самолета АН – 148

Выводы по работе

В процессе разработки бортовых систем электроснабжения постоянного и переменного тока, особое внимание уделяется вопросам согласования характеристик СЭС_п и СЭС_в с характеристиками входных устройств - приемников энергии. В работе рассмотрены основные вопросы реализации свойств СЭС_п и СЭС_в при большом спектре возмущений, а именно:

- оптимизации номинальных значений напряжения и частоты;
- обобщения нормативно-технических требований отечественного и зарубежного авиастроения к качеству электроэнергии для установившихся и переходных режимов;
- обобщения особенностей работы СЭС при работе в высотных условиях полета;
- методам повышения точности поддержания напряжения и частоты СЭС;
- влияния неравномерности нагрузок фаз СЭС_в и влияния пульсации напряжения СЭС_п;
- оценка модуляции напряжения и частоты, пульсации напряжения СЭС_п;

Оценка качества электроэнергии

СЭС пассажирских самолетов регламентирована действующими стандартами и обеспечивается при проектировании для последующих этапов сертификации, серийного изготовления и эксплуатации.

Список литературы

1. *Электрооборудование пассажирских самолетов* / Под ред. Е. М. Никанорова, В. Д. Жаркова. – М.: Машиностроение, 1983. – 368 с.
2. *ГОСТ 19705-89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Требования к качеству электроэнергии.* – М.: ГК СССР по стандартам, 1989. – С. 45
3. *ДСТУ 3589-97. Системи та комплекси авіаційного обладнання. Надійність та експлуатація. Терміни та визначення.* – К.: Київстандарт, 1997. – С. 28.
4. В. М. Воробьев, С. В. Енчев, И. М. Ищенко, В. А. Захарченко. Обоснование степени отказоустойчивости энергосистем воздушных судов в задачах повышения безопасности полетов // Проблемы інформатизації та управління. Зб. наук. пр.: Вип.13. – К.: НАУ, 2005. – С. 26-34.