

Параметры качества электроэнергии

автономных источников, централизованных и автономных систем электроснабжения радиоэлектронной аппаратуры

В журнале «Силовая электроника» № 1'2019 опубликована статья [1], содержащая основные сведения об особенностях электроснабжения РЭА на различных объектах ее применения. Статья открывает цикл взаимосвязанных публикаций, посвященных созданию и применению имитационных технических средств (ИТС) для проверки устойчивости РЭА к изменениям значений параметров качества электроэнергии (КЭ) автономных источников, централизованных и автономных систем электроснабжения (СЭС). Основная цель статьи — привлечение внимания разработчиков РЭА к наличию в ИЭ и СЭС кондуктивных силовых электромагнитных воздействий (СЭМВ) природного и техногенного происхождения (непреднамеренного и преднамеренного характера). Данные СЭМВ проявляются в виде регламентированных и сверхнормативных изменений значений параметров КЭ и способны без учета этого обстоятельства и принятия априорных адекватных мер вызвать неустойчивое функционирование, отказы и повреждения РЭА.

Юрий Либенко

lib7636@rambler.ru

Алексей Воронцов

av@aktor.ru

В последние годы создание указанных ИТС является одним из основных видов деятельности ООО «НТЦ АКТОР» (Москва, Зеленоград) и соответствует задачам проверки стационарной и подвижной РЭА для наземной, морской и авиационной областей ее применения.

В настоящей статье приведены сведения о требованиях к видам и значениям параметров КЭ для РЭА наземных (стационарных и подвижных), морских и авиационных объектов, заданных в ряде существующих нормативно-технических документов (НТД), и результаты их анализа с точки зрения создания универсальных ИТС.

Общие сведения о нормативно установленных характеристиках КЭ в СЭС постоянного и переменного тока, предназначенных для электропитания РЭА на объектах различных направлений техники

Прежде, чем продолжить рассмотрение материала статьи, считаем полезным еще раз [1] обратиться к определению термина «качество электроэнергии» [2, 3].

«Качество электроэнергии — степень соответствия характеристик электрической энергии в данной

точке электрической системы совокупности нормированных значений показателей качества». Другими словами, характеристики электроэнергии СЭС или автономного ИЭ представлены рядом показателей с числовыми значениями, которые оцениваются совокупно на их соответствие нормам, заданным в общих технических требованиях к РЭА различных направлений применения и (или) в НТД по видам техники. При этом нормы КЭ в НТД задаются в виде максимально допустимых абсолютных значений показателей или в виде максимально допустимых отклонений от номинальных значений в процентах. Значения показателей КЭ СЭС или автономных ИЭ оцениваются непосредственно на входах электропитания РЭА или в пределах установленного максимального расстояния от них.

Вывод: РЭА должна устойчиво функционировать при изменении значений параметров КЭ от номинальных до предельных, заданных в соответствующих НТД. Некоторые пояснения данного аспекта приведены в [1].

Ряды номинальных значений напряжения до 1000 В постоянного и переменного тока в СЭС, электрических сетях, источниках, преобразователях параметров и присоединяемых к ним приемниках электрической энергии устанавливает [4], а ряды

номинальных значений частот 0,1–10 000 Гц и их допускаемых отклонений для напряжений переменного тока — [5].

Основным НТД, содержащим общие требования к КЭ для электропитания РЭА, относящейся к различным направлениям техники военного назначения (классы 1–5 по ГОСТ РВ 20.39.301-98), является [6]. В нем отдельно представлены нормы КЭ для РЭА, использующей электропитание постоянным или переменным током. В случае необходимости электропитания РЭА классов 1–3 трехфазным переменным током от СЭС общего назначения в [6] есть требование к этой РЭА о ее соответствии нормам КЭ, заданным в [3]. Однако здесь следует учитывать, что [3] устанавливает нормы КЭ в «*точке передачи электрической энергии*», то есть «*в точке электрической сети, находящейся на линии раздела объектов электроэнергетики между владельцами по признаку собственности или владения на ином предусмотренном законами основании, определенной в процессе технологического присоединения*». Эта точка может быть весьма удалена от входа электропитания РЭА и не учитывать влияние физических проводных линий, различных защитных, коммутационных и других устройств, являющихся принадлежностями внутриобъектовой распределительной сети, на значение параметров КЭ.

Дополнительная информация об особенностях номенклатуры, численных значений и принципов оценки показателей КЭ из [3] приведена далее по тексту. В то же время, поскольку нормы КЭ из [6] в основном учитывают требования к автономным основным или резервным ИЭ из [7] и НТД по видам техники, а также некоторые нормы аналогичных показателей из [3], они могут быть минимально достаточными для разработки на их основе технических требований к создаваемым ИТС.

Нормативно установленные номинальные значения основных параметров электроэнергии и виды параметров ее качества в СЭС постоянного и переменного тока для электропитания РЭА на объектах различных направлений техники

Анализ нормативно установленных номинальных значений основных параметров электроэнергии и видов параметров ее качества в СЭС постоянного и переменного тока целесообразно изначально провести для РЭА, применяемой на наземных (стационарных и подвижных) объектах, как наиболее многочисленных. Для РЭА других направлений применения, в случае выявления аналогий по отношению к первым, будут даны соответствующие ссылки на ранее приведенные сведения, а в случаях, отличающихся от них, — ссылки на соответствующие НТД по видам техники.

Как было отмечено в [1], в гражданской и военной областях применения большинство видов РЭА, расположенной на наземных стационарных объектах, получают электроэнергию от СЭС общего назначения, являющихся для РЭА основным видом ИЭ. В зависимости от требований к надежности электроснабжения РЭА в случае возникновения в основном ИЭ сверхнормативных изменений значений КЭ или ее полного пропадания используется один или несколько видов резервных ИЭ, подключаемых вместо основного через гарантированное время (гарантированное электроснабжение, off-line) или априорно подключенных к нему и работающих параллельно с основным ИЭ на общую нагрузку в виде РЭА (бесперебойное электроснабжение, on-line). В качестве резервного ИЭ в зависимости от реальных условий и структуры электроснабжения объекта может быть использован второй ввод от другого (штатно функционирующего) направления той же СЭС, один или несколько автономных ИЭ других видов, размещенных непосредственно на объекте с установленной РЭА. Нередко в качестве компонента резервного ИЭ применяется накопитель электроэнергии постоянного тока (аккумуляторная или суперконденсаторная батарея), инвертируемой в электроэнергию переменного тока с необходимым количеством фаз. В ряде случаев электроэнергия постоянного тока накопителя может быть использована непосредственно (без дополнительного преобразования ее параметров) для электропитания РЭА.

Для наземных подвижных объектов, наоборот, основными являются автономные СЭС и ИЭ различных видов [1], требования к параметрам КЭ для которых заданы в [8, 9].

В связи с вышеизложенным РЭА должна быть адаптирована к подаче на ее вход электропитания электроэнергии от любого из предназначенных для этой цели ИЭ, обеспечивающих априорно регламентированные для них параметры КЭ. Это означает, что характеристики входной цепи электропитания РЭА как минимум [1] должны соответствовать совокупным диапазонам значений аналогичных характеристик всех таких ИЭ. Причем номинальное значение напряжения и частоты (для напряжения переменного тока) в этих совокупных диапазонах является неизменным и служит точкой отсчета регламентированного в НТД относительного изменения параметра обоих знаков.

В соответствии с [6] РЭА, расположенная на наземных (стационарных и подвижных), а также морских объектах, получает электропитание переменным током с номинальными значениями: напряжения [4, 6] 220 В (однофазное) или 380 В (трехфазное) и частоты [5, 6] 50 Гц или 400 Гц. При электропитании РЭА на этих же объектах постоянным током используются номинальные значения напряжения [4, 6] 12, 24, 27, 110, 220 В.

В [7] для наземных подвижных объектов отсутствуют номинальные значения частоты 400 Гц для напряжения переменного тока и значения 12 и 24 В для напряжения постоянного тока, зато для последнего установлены два дополнительных номинальных значения: 300 и 550 В.

В [3] в качестве видов параметров (показателей) КЭ приняты следующие:

- а) Продолжительные изменения характеристик напряжения:
 - отклонение частоты;
 - медленные изменения напряжения;
 - колебания напряжения и фликер;
 - несинусоидальность напряжения (гармонические и интергармонические составляющие напряжения);
 - несимметрия напряжения в трехфазных системах;
 - напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям.
- б) Случайные события:
 - прерывания напряжения;
 - провалы напряжения и перенапряжения;
 - импульсные напряжения.

Из вышеприведенного вида специфика принятых в электроэнергетике номенклатуры, численных значений и принципов оценки показателей КЭ. Данное обстоятельство определяет применение [3] для рассматриваемой в настоящем цикле статей проблемы создания ИТС, формирующих виды и значения показателей КЭ, непосредственно подаваемой на различные виды РЭА, как дополнительного справочного источника технической информации.

Учитывая вышеотмеченную иерархическую связь НТД, определяющих нормы КЭ практически для всех направлений применения РЭА военного назначения, в качестве главного ориентира выберем для дальнейшего рассмотрения требования из [6].

В нем в качестве видов параметров (показателей и характеристик) КЭ на входах электропитания РЭА приняты следующие:

- а) Для ИЭ переменного тока:
 - отклонение напряжения (установившееся, переходное и его длительность);
 - отклонение частоты (установившееся, переходное и его длительность);
 - амплитудная модуляция напряжения (коэффициент амплитудной модуляции, действующее значение напряжения огибающей гармоники, диапазон частот);
 - модуляция частоты (величина изменения частоты, диапазон частот повторения);
 - искажение синусоидальности формы кривой напряжения (коэффициент искажения синусоидальности, действующее значение напряжения гармоники, диапазон частот);
 - импульсы напряжения (амплитуда импульса и его длительность);
 - небаланс напряжения (коэффициент небаланса, величина угла сдвига фаз).
- б) Для ИЭ постоянного тока:
 - отклонение напряжения (установившееся, переходное и его длительность);
 - пульсации напряжения (коэффициент пульсации, действующее значение напряжения гармоники, диапазон частот);
 - импульсы напряжения (амплитуда импульса и его длительность).

В [6] также определено, что для РЭА, применяемой на наземных подвижных, морских, авиационных объектах и объектах других видов базирования, показатели КЭ должны соответствовать требованиям, установленным в НТД на СЭС по видам техники.

В качестве основных таких НТД можно привести: для наземных подвижных объектов вышеупомянутые [7–9], а также [10]; для морских — [11, 12]; для авиационных — [13–16].

Приведем ряд графических иллюстраций рассматриваемых в настоящей статье процессов изменения значений параметров КЭ переменного и постоянного тока, встречающихся в различных НТД (рис. 1–8).

Из всех вышеприведенных видов параметров КЭ следует особо выделить высоковольтный импульс напряжения (ВИН). Причины его возникновения, пути распространения по силовым цепям от СЭС к РЭА, формы, параметры и их значения, а также возможные результаты воздействия ВИН на вход электропитания РЭА неоднократно анализировались специалистами в области электромагнитной совместимости

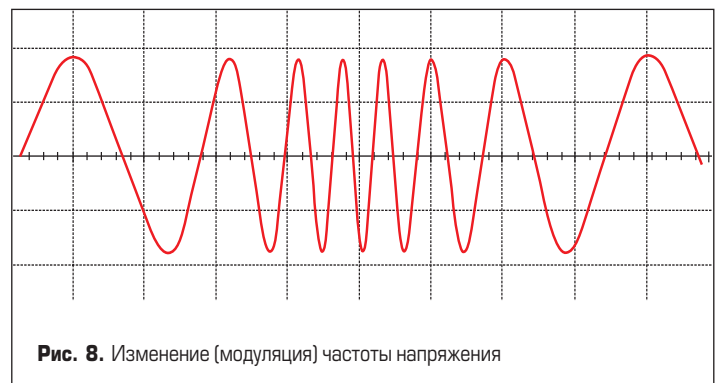
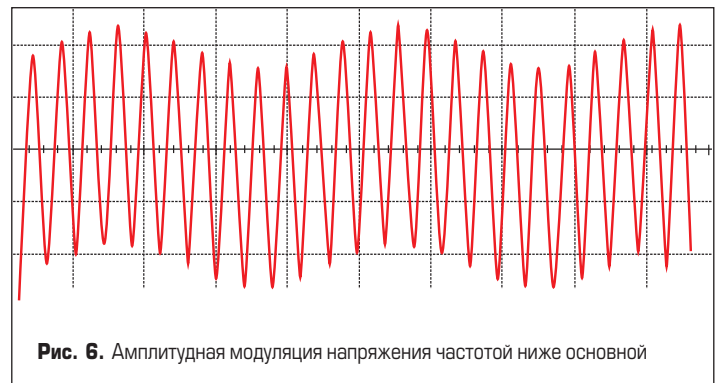
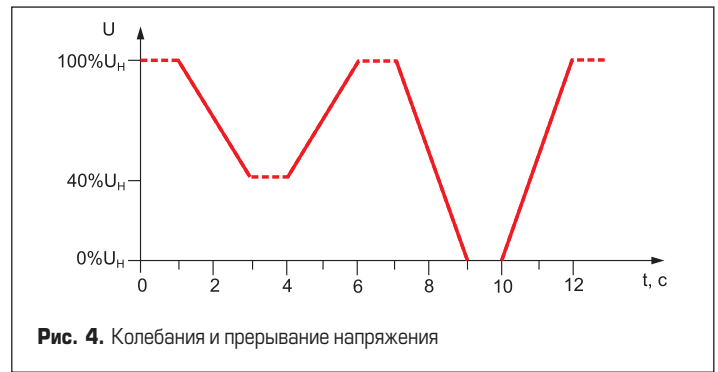
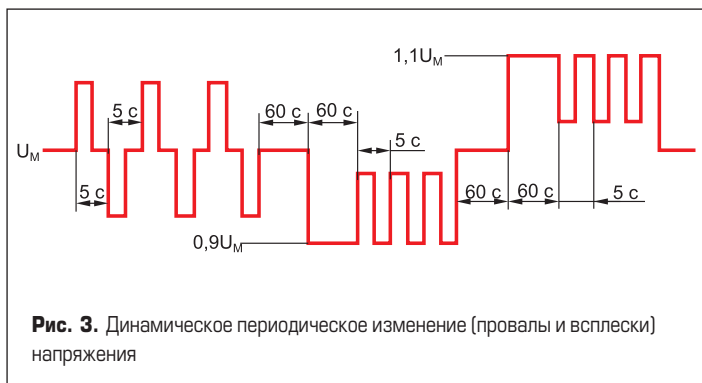
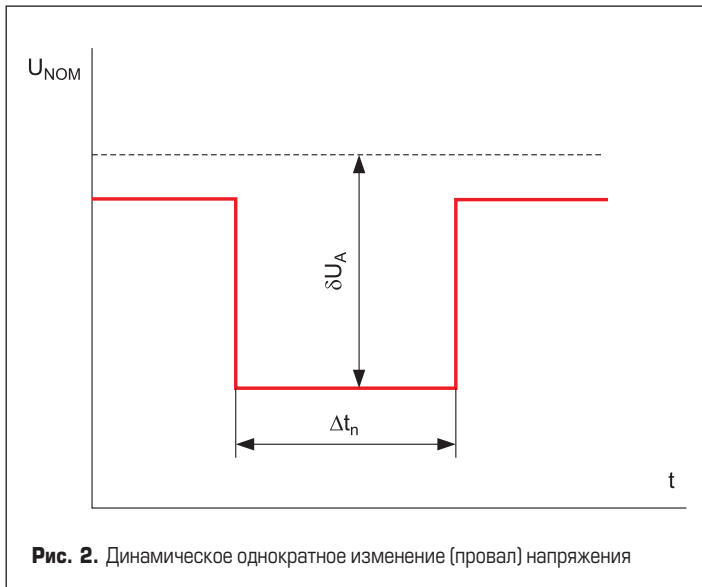
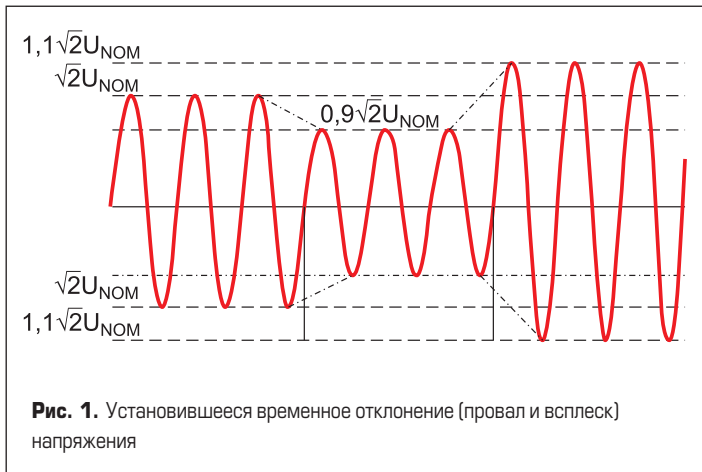


Таблица 1. Нормативные значения параметров КЭ в СЭС постоянного тока

Номинальное значение напряжения, В	Низкое: 12; 24; 27 Повышенное: 110; 175–320; 220; 300; 550
Установившееся отклонение напряжения, %	12 В: +25; -10; 24 В: +25; -10; 27 В: +(5-30); -(5-25); 110 В: +(5-10); -(5-10); 220 В: +(5-10); -(5-18); (175-320) В: (не установлены); 300 В: +10; -(не установлен); 550 В: +10; -(не установлен)
Переходное отклонение напряжения, % [Длительность переходного отклонения, с]	12 В: ±40; [0,01]; 24 В: ±40; [0,01]; 27 В: +(13-160); -(20-70); [0,001-3]; 110 В: +(13-40); -(20-40); [0,1-3]; 220 В: +(13-40); -(20-40); [0,1-3]; (175-320) В: +(25-57); -(20-36); [0,08]*; + (10-100); [3]*; + (16-111); [0,02]*; + (25-130); [3]*; 300 В: ±30; [3]; 550 В: ±30; [3]
Коэффициент пульсации напряжения, % [Действующее значение напряжения гармоники, %]; {Диапазон частот, Гц}	12 В: 15; [8]; {25-10 ³ }; [5]; {10 ³ -10 ⁴ }; 24 В: 15; [8]; {25-10 ³ }; [5]; {10 ³ -10 ⁴ }; 27 В: 1-15; [3-8]; {10-10 ⁴ }; 110 В: 10; [3-5]; {25-10 ⁴ }; 220 В: 10; [3-8]; {25-10 ⁴ }; (175-320) В: 10 (во всем диапазоне значения напряжения)*; 300 В: 10; [5-8]; {25-10 ⁴ }; 550 В: 10; [5-8]; {25-10 ⁴ }
Амплитуда импульса напряжения, В: [Длительность импульса напряжения, с]	12 В: ±150; [5×10 ⁻⁵]; 24 В: ±150; [5×10 ⁻⁵]; 27 В: ±50; [5×10 ⁻³ , не более]; ±150; [5×10 ⁻⁶ -5×10 ⁻⁵]; ±600; [10 ⁻⁵ , не более]; ±1000; [10 ⁻⁵]; 110 В: ±1000; [10 ⁻⁵]; 220 В: ±1000; [10 ⁻⁵]; (175-320) В: 600; [10 ⁻⁶]*; 800; [10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴]*; 1000; [2×10 ⁻³]*; 300 В: ±1000; [10 ⁻⁵]; 550 В: ±1000; [10 ⁻⁵]

Примечание. *Данные из ТЗ на РЭА класса 2.

Таблица 2. Нормативные значения параметров КЭ в СЭС переменного тока

Номинальное значение напряжения, В/ частоты, Гц	40; 115; 200/400; 1000; 115; 200/400; 220; 380/50; 400
Установившееся отклонение напряжения, %	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: ±(3-10); 115; 200 В/400 Гц: +(3,5-10); -(6,1-10); 220; 380 В/50; 400 Гц: +(5-10); -(5-15)
Переходное отклонение напряжения, % [Длительность переходного отклонения, с]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: ±(3-10); [0,1-1]; 115; 200 В/400 Гц: +35; -(7-31); [0,02-0,05]; 220; 380 В/50; 400 Гц: +(13-40); -(20-40); [0,1-3]
Установившееся отклонение частоты, %	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: ±(3-5); 115; 200 В/400 Гц: ±5; 220; 380 В/50; 400 Гц: ±(2-5)
Переходное отклонение частоты, % [Длительность переходного отклонения, с]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: ±10; [1]; 115; 200 В/400 Гц: ±13; [0,5]; 220; 380 В/50; 400 Гц: +(3-10); -(3-10); [1-3]
Коэффициент амплитудной модуляции напряжения, % [Действующее значение напряжения оглабляющей гармоники, %] {Диапазон частот, Гц}	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: 2; [1]; {1-100}; [0,5]; {100-200}; 115; 200 В/400 Гц: 1; [0,5]; {1-5}; [1]; {5-100}; [0,2]; {100-200}; 220; 380 В/50; 400 Гц: {0,5-2}; {0,5-2}; {1-25}; {1-2}; {1-25}; {0,5-1}; {100-200}
Модуляция (величина изменения) частоты, Гц [Диапазон частот повторения, Гц]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: 2; [1-80]; 115; 200 В/400 Гц: 4; [1-5]; 2; [5-80]; 220; 380 В/50; 400 Гц: 2; [1-10] — для 50 Гц; [1-80] — для 400 Гц
Коэффициент искажения синусоидальности формы кривой напряжения, % [Действующее значение гармоники, %]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: 10; [8]; {800-5×10 ³ }; [5]; {5×10 ³ -10 ⁴ }; 115; 200 В/400 Гц: 8; [8]; {800-5×10 ³ }; [5]; {5×10 ³ -10 ⁴ }; 220; 380 В/50; 400 Гц: 5-20; [8]; {2н-5×10 ³ }; [5]; {5×10 ³ -10 ⁴ }
Амплитуда импульса напряжения, В [Длительность импульса напряжения, с]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: ±600; [10 ⁻⁵]; 115; 200 В/400 Гц: ±70; ±600; [5×10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵]; 220; 380 В/50; 400 Гц: ±1000; [10 ⁻⁵]; 600; [10 ⁻⁶]*; 800; [10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴]*
Коэффициент небаланса напряжения, % [Величина угла сдвига фаз, °]	40; 115; 200 В/400; 1000 Гц: 3[2-5]; 115; 200 В/400 Гц: 3[4]; 220; 380 В/50; 400 Гц: 3[2-5]

Примечание. *Данные из ТЗ на РЭА класса 2.

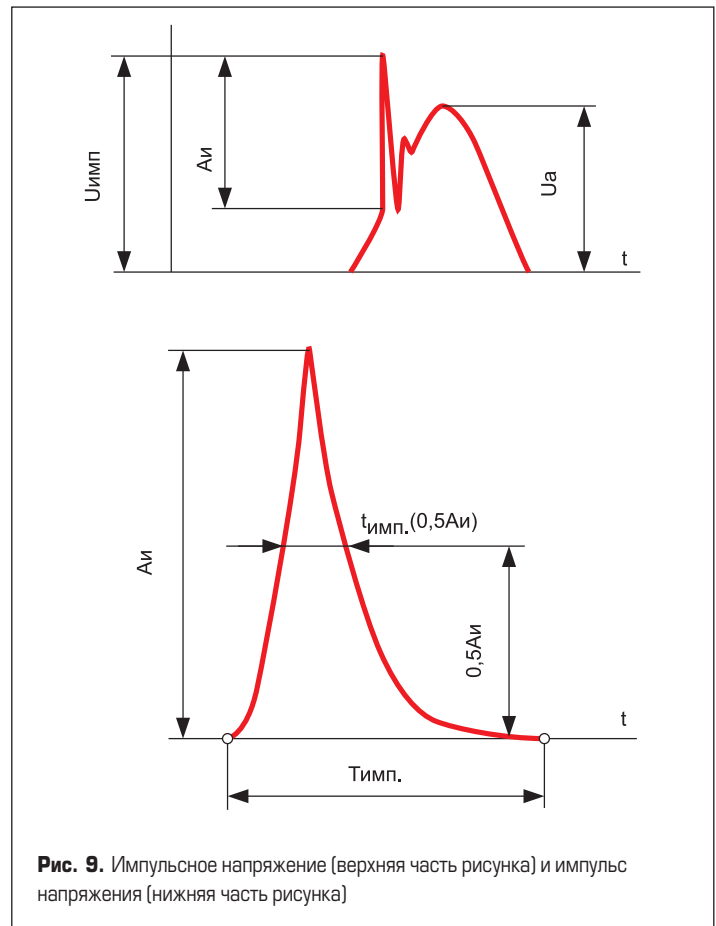


Рис. 9. Импульсное напряжение (верхняя часть рисунка) и импульс напряжения (нижняя часть рисунка)

и в других связанных с ней областях. Достаточный для общего понимания данной проблемы материал приведен в [17, 18]. Здесь повторим в сокращенном варианте его часть, отражающую суть данной проблемы.

«Из всех видов СЭМВ на РЭА по ценам электропитания, регламентируемых в различных НТД, ВИН являются наиболее сложно априорно учитываемыми по природе и времени возникновения, свойственным им характеристикам и оценке возможного значения их энергии на входе электропитания РЭА. По этой причине, с одной стороны, затрудняются реальные классификация ВИН и нормирование значений их параметров, а с другой — выбор наиболее адекватной методики проверки РЭА на устойчивость к воздействию ВИН и создание соответствующих имитационных технических средств. В связи с этим ВИН являются для подключенной к ним РЭА наиболее опасным видом СЭМВ. В случае недостаточного понимания и (или) внимания со стороны создателей и потребителей РЭА к данной проблеме весьма вероятно наличие риска появления в РЭА «неожиданных» сбоев в работе, необратимых отказов и повреждений, вплоть до полного разрушения».

При этом наибольшую опасность для РЭА представляют ВИН с большим значением энергии природного и техногенного (непреднамеренного и преднамеренного) характера происхождения: микро- и миллисекундной длительности с амплитудой от 0,6–0,8 до 1–5 кВ.

О важности сведений о ВИН говорит и наличие ряда специализированных НТД по направлениям техники, устанавливающих требования к устойчивости функционирования РЭА при данном виде СЭМВ, а также соответствующие методики ее проверки: для наземных объектов — [19], морских — [20], авиационных — [21].

Для ВИН существует еще одно важное обстоятельство: их амплитуда должна отсчитываться от мгновенного значения напряжения в СЭС (переменного или постоянного тока), при котором возникает ВИН, совокупно с его амплитудой создающее понятие «импульсное напряжение» [17, 18]. Для иллюстрации данного аспекта приведем эпюры из ранее действовавшего [23], чья замена на последующие НТД с исключением в них этих понятий и эпюр никак не повлияла на физический смысл протекания импульсных процессов во входных цепях электропитания РЭА (рис. 9).

В нижней части рисунка показаны два практически применяемых способа отсчета длительности импульса: по основанию ($T_{имп.}$) и на уровне 0,5 его амплитуды ($t_{имп. 0,5A_и}$).

Нормативные значения параметров КЭ в СЭС постоянного и переменного тока, установленные для электропитания РЭА на объектах различных направлений техники

Анализ требований к значениям параметров качества КЭ в СЭС постоянного и переменного тока, установленных в [6–16, 19, 21–23] для электропитания РЭА на объектах различных направлений техники, позволил получить сводные данные о практических диапазонах этих значений (табл. 1 и 2), подлежащих воспроизведению создаваемыми ИТС.

В следующей статье данного цикла будут представлены основные сведения о ряде ранее созданных отечественных ИТС, воспроизводящих виды и значения параметров КЭ различных СЭС: области применения, электрические параметры и функциональные характеристики. Цель такого ретроспективного обзора — определение возможности их использования для унификации и повышения эффективности качества проведения исследований, проверок и испытаний современной РЭА в различных направлениях ее применения в части создания управляемых электромагнитных кондуктивных воздействий в цепях электропитания РЭА, соответствующих требованиям действующих НТД. Выводы, сделанные по результатам проведения данного анализа, будут полезными для определения необходимости применения новых технических решений по созданию перспективных автоматизированных имитационных устройств и комплексов.

Литература

1. Либенко Ю., Воронцов А. Некоторые аспекты электроснабжения РЭА в различных направлениях ее применения // Силовая электроника. 2019. № 1.
2. ГОСТ Р 54130-2010 «Качество электрической энергии. Термины и определения».
3. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
4. ГОСТ 21128-83 «Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В».
5. ГОСТ 6697-83 «Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии переменного тока. Номинальные частоты от 0,1 до 10 000 Гц и допускаемые отклонения».
6. ГОСТ РВ 20.39.309-98 «Комплексная система общих технических условий. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования».
7. ГОСТ РВ 51937-2002 «Системы электроснабжения передвижных радиоэлектронных объектов и объектов военной техники связи автономные. Типы. Технические требования».
8. ГОСТ В 21134-75 «Системы электроснабжения средств военной техники автономные. Нормы качества электрической энергии».
9. ГОСТ В 23653-79 «Источники и преобразователи электрической энергии автономных систем электроснабжения средств военной техники. Нормы качества электрической энергии».
10. ГОСТ В 21999-86 «Системы электроснабжения военных гусеничных машин. Нормы качества электрической энергии и методы контроля».
11. ГОСТ РВ 2090-004-2008 «Системы электроэнергетические корабельные. Общие технические требования».
12. ГОСТ РВ 2090-006-2008 «Устройства и изделия электротехнические корабельные. Общие технические требования».
13. ГОСТ 19705-89 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергетики».
14. ГОСТ Р 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергетики».
15. ГОСТ Р 54073-2018 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергетики».
16. «Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (внешние воздействующие факторы — ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 16.0. Электропитание».
17. Либенко Ю. Н.. Каждый выбирает для себя? // Силовая электроника. 2018. № 1.
18. Либенко Ю. Н., Колосов В. А. Проведение испытаний РЭА на воздействие высоковольтных импульсов напряжения по цепям электропитания // Практическая силовая электроника. 2018. № 1.
19. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний».
20. «14.326.023М Методика проверки электрооборудования (ЦНИИСЭТ, 1992)».
21. «Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (внешние воздействующие факторы — ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 17.0. Импульсы напряжения».
22. ГОСТ 13109 -97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».