

Регламентированные методы проверки РЭА

на воздействие изменений значений параметров качества электроэнергии

Данная статья продолжает цикл материалов, посвященных вопросам влияния качества электроэнергии, вырабатываемой ее источниками, на устойчивость функционирования РЭА в различных направлениях применения.

В двух предыдущих статьях, опубликованных в журнале «Силовая электроника» № 1 и 3 за 2019 год, представлены сведения об особенностях электроснабжения РЭА и о регламентированных видах и значениях параметров качества электроэнергии источников в этих направлениях.

**Юрий Либенко
Алексей Воронцов**

В третьей статье цикла рассмотрены методы проверки РЭА на воздействие изменений значений параметров качества электроэнергии (ПКЭ), регламентированные различными нормативно-техническими документами (НТД), а также ряд вопросов, возникающих при практическом применении этих методов.

Прежде чем перейти к основной теме статьи, напомним постоянным читателям журнала главную цель публикации данного цикла [1] — предварительно ознакомить заинтересованных разработчиков РЭА, занимающихся проектами в различных направлениях ее применения, с намерениями ООО «НТЦ АКТОР» по созданию перспективных имитационных технических средств (ИТС), воспроизводящих различные виды и значения параметров качества электроэнергии (ПКЭ) источников, используемых в данных направлениях. К этим ИТС относятся как отдельные устройства и комплекты из нескольких их видов, так и автоматизированные комплексы (АКИТС) с выходом на постоянном и переменном токе (одно- и трехфазные) [2], позволяющие существенно повысить качество проверок РЭА на устойчивость к данному виду внешних воздействующих факторов. В эти же намерения предприятия входят априорные определения порядка и срока создания ИТС, а также учет предложений потенциальных потребителей в части реализуемых ИТС функций и параметров.

На пути к достижению поставленной цели прежде всего было необходимо проанализировать аспекты электроснабжения РЭА в различных областях ее применения, виды и диапазоны значений параметров ПКЭ автономных источников, централизованных и автономных систем электроснабжения РЭА, что уже выполнено авторами данной статьи [1, 3]. Очередным шагом в этом направлении является проведение анализа регламентированных методов проверки устойчивости РЭА к воздействию изменения значений ПКЭ в процессе ее функционирова-

ния, результаты которого представлены ниже. Далее предполагается рассмотреть возможности ранее созданных видов ИТС, а также определить концепции создания их перспективных вариантов.

Для всех классов РЭА, установленных ГОСТ РВ 20.39.301, общие требования к нормам качества электроэнергии, питающей РЭА, указаны в [4] и продублированы или уточнены в ряде НТД по видам техники. С методами проверки устойчивости РЭА к воздействию изменений значений ПКЭ дело обстоит несколько иначе. В [4] в качестве *рекомендованного* НТД, содержащего данные методы, приведен [5] и дана общая ссылка на НТД по видам техники, в которых должны быть уточнения этих методов в соответствии со спецификой РЭА и питающих ее источников электроэнергии.

В *рекомендованном* «Приложении А» («Методика проведения испытаний аппаратуры на соответствие требованиям к качеству электрической энергии») к [5] имеются общие сведения о порядке проведения испытаний РЭА на соответствие требованиям к качеству электроэнергии, а также приведены структуры рабочих мест и методики их проведения. Для целостности представления рекомендаций, содержащихся в данных сведениях, приведем их в редакции [5] (выделены курсивом), с комментариями в тех местах, где авторы статьи частично или полностью не соглашались с ними. При этом термины, их определения [6] и использованные в рекомендациях [5] «своеобразные» технические обороты не комментировались, кроме отдельных случаев, с целью исключения их неоднозначного или ошибочного понимания. Совокупность этих рекомендаций позволяет в первом приближении представить номенклатуру и объем испытательного оборудования, требуемого для проведения проверок и испытаний.

Рассмотрим конкретные рекомендации из [5]:

А.1.1 Испытания аппаратуры на соответствие требованиям к качеству электрической энергии про-

водят для проверки ее способности выполнять свои функции и сохранять параметры, заданные в ТТЗ (ТЗ), в процессе и после воздействия различных изменений напряжения питания и частоты в пределах норм, установленных в [4].

А.1.2 Испытания аппаратуры проводят непосредственным моделированием различных показателей качества электроэнергии в цепях ее электропитания и определением устойчивости аппаратуры к их воздействию.

А.1.3 Испытания аппаратуры, питание которой осуществляют от нескольких источников питания с различными номинальными значениями напряжения или различного рода тока (например, постоянного и переменного), проводят для всех цепей питающего напряжения.

Данная рекомендация неоднозначна, поскольку здесь можно понимать либо совместную (одновременную) работу нескольких (различных) источников питания, упрощающих реализацию РЭА (исключаются внутренние избыточные узлы преобразования видов и значений параметров электроэнергии), либо альтернативное их подключение в зависимости от возможности (видов) систем электроснабжения различных объектов эксплуатации универсальной (с точки зрения электроснабжения) РЭА. Во втором случае ИТС могут представлять собой либо АКИТС с набором информационно связанных имитаторов различных источников электроэнергии и их функционирование в соответствии со специализированным алгоритмом (ПО), либо комплект из тех же устройств, не связанных информационно и алгоритмически и применяемых для испытаний поочередно.

А.1.4 Испытания аппаратуры, работающей от многофазных источников, проводят при моделировании одних и тех же показателей качества электроэнергии во всех фазах одновременно.

Реально эту рекомендацию можно рассматривать как один из возможных вариантов возникновения силового электромагнитного воздействия в автономной сбалансированной трехфазной системе электроснабжения (СЭС), к которой подключены исключительно трехфазные нагрузки, то есть возможность подключения нагрузок, различных по характеру, мощности и циклам включения/отключения к/от СЭС, практически не предусматривается. В противном случае в разных фазах СЭС могут быть и отличающиеся по видам и значениям изменения ПКЭ, да еще и не совпадающие по времени возникновения. Этот вывод склоняет к созданию ИТС, имитирующих ПКЭ трехфазных СЭС переменного тока, с возможностью формирования видов и значений этих ПКЭ как одинаковых и синхронных по фазам, так и различных (в том числе несинхронных) в каждой из них. Практическое применение второго варианта будет рассмотрено далее.

А.1.5 Испытания проводят при установленном тепловом режиме работы аппаратуры и в нормальных климатических условиях, если другие не установлены в программах испытаний.

Из этой рекомендации следует, что проведение испытаний в нормальных климатических условиях (НКУ) — правило, а в других условиях — исключение, то есть в угоду упрощению, ускорению и удешевлению методов ис-

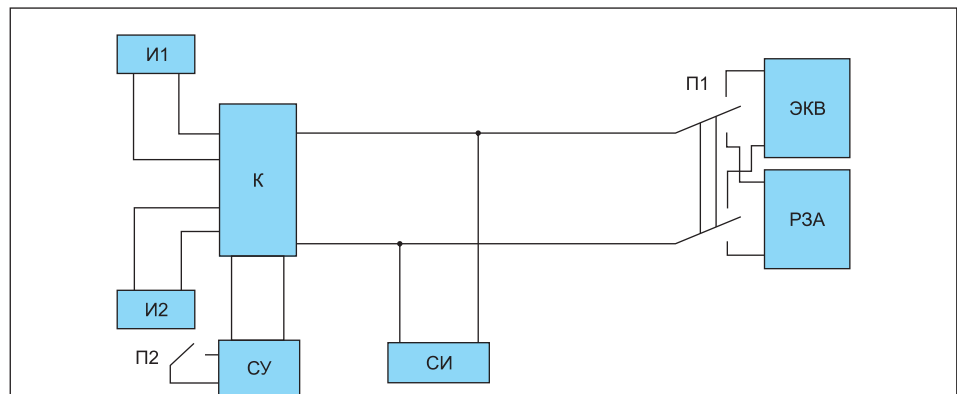


Рис. 1. (рис. А.5 из «Приложения А» к [5]) Схема электропитания аппаратуры при испытаниях на воздействие переходных отклонений напряжения:

И1, И2 — регулируемые источники переменного и постоянного тока, обеспечивающие соответственно получение требуемых значений установившегося и переходного напряжения; К — коммутатор, обеспечивающий подключение соответствующего источника; П1 — переключатель эквивалент-аппаратура; П2 — пуск; ЭКВ — эквивалент нагрузки; СУ — схема управления коммутатором;

СИ — средства измерения напряжения при переходном отклонении; РЭА — аппаратура

Примечание: Необходимо сделать уточнение подрисовочных надписей к рис. 1: И1 и И2 — источники переменного или постоянного напряжения в зависимости от испытываемой аппаратуры, обеспечивающие соответственно получение требуемых значений установившегося и переходного напряжений; П1 — переключатель «эквивалент-аппаратура»

пытаний сознательно снижается достоверность их результатов. Рекомендуемые нормальные условия испытаний часто не соответствуют реальным условиям эксплуатации РЭА, при которых усиливается зависимость устойчивости ее функционирования от совокупного воздействия нескольких внешних факторов (например, от изменения значений ПКЭ наряду с изменением климатических условий эксплуатации, нагрузки и т. п.). Данное обстоятельство положено в основу методик проведения комплексных испытаний РЭА на функциональную безопасность для вариантов ее применения, в которых отказ может вызвать критические (катастрофические) последствия.

А.1.6 Перечень контролируемых параметров, по которым проводят оценку работоспособности аппаратуры, методы и средства их измерения устанавливаются в программах испытаний или в технических условиях на конкретную аппаратуру.

Для аппаратуры, электропитание которой осуществляют через средства вторичного электропитания, обязательно контролируют качество электроэнергии на их выходе.

Причина выделения текста последнего абзаца данного пункта жирным шрифтом означает полную поддержку авторов этой «обязательной» рекомендации, так как она соответствует идеологии проведения комплексных испытаний РЭА, позволяющих снизить риск отправки на эксплуатацию РЭА, у которой каждый индивидуальный показатель при испытаниях зачтен, а на объектах эксплуатации происходит... то, что происходит! Для реализации этой, очень эффективной рекомендации необходимо подключение входов автоматизированной тестовой (измерительной) системы к контрольным точкам в выходных цепях внутренней системы электропитания РЭА. АРМ с общим информационным каналом для климатической камеры, АКИТС, те-

стовых систем для проверки функционирования РЭА и ее внутренней системы электропитания РЭА позволит выявить большинство слабых мест в РЭА, недоступных при проведении испытаний традиционным (последовательным) методом.

А.1.7 Аппаратуру испытывают в составе предварительных, приемочных (государственных, межведомственных) или квалификационных испытаний. Продолжительность испытаний аппаратуры при заданном воздействии определяют временем, необходимым для измерения контролируемых параметров, если иное время не установлено в программе испытаний.

Эта рекомендация лишь подтверждает необходимость автоматизации и комплексных проверок при совокупном воздействии на РЭА различных факторов, так как позволит сократить время при проведении большого объема индивидуальных проверок (особенно при необходимости N-кратного повторения испытаний) и одновременно повысить их качество.

А.1.8 Устройства и испытательные стенды (имитаторы систем электроснабжения), обеспечивающие моделирование необходимых показателей качества электроэнергии, должны быть аттестованы в соответствии с ГОСТ Р 8.568.

Здесь необходимо отметить, что приведенные в «Приложении А» к [5] структурные схемы рабочих мест для проведения испытаний (рис. А1–А6) являются лишь графической иллюстрацией рекомендуемых методов и не отражают в достаточной мере возможность их аппаратных реализаций. С точки зрения методов проверки следует подробнее рассмотреть два из них.

Вначале рассмотрим схему рабочего места, приведенную на рис. 1 (А.5 по нумерации «Приложения А» к [5]), и рекомендуемый метод проверки РЭА на устойчивость функционирования при воздействии на РЭА переходных отклонений входного напряжения (п. А.7).

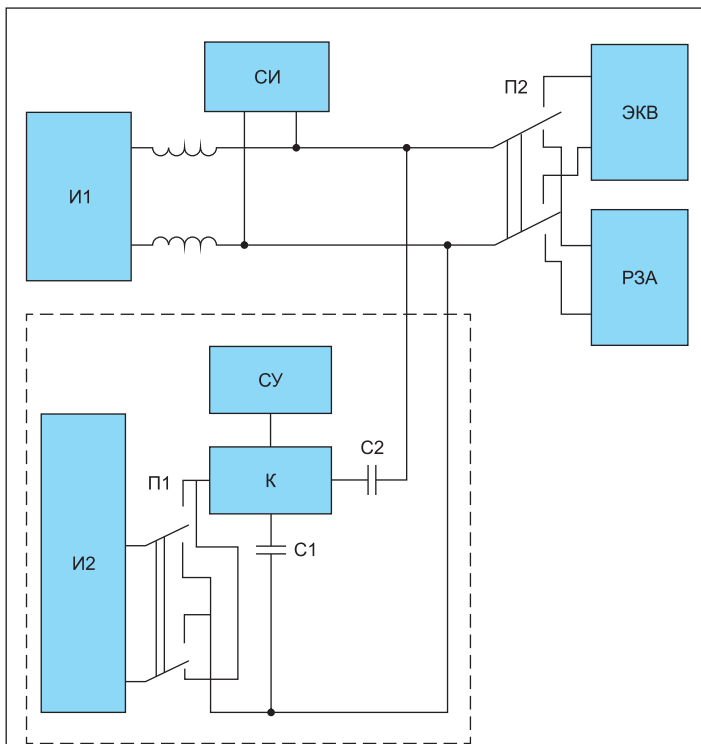


Рис. 2. (рис. А.6 из «Приложения А» к [5]) Схема электропитания аппаратуры при испытаниях на воздействие импульсов напряжения:

И1 — источник постоянного или переменного напряжения в зависимости от испытываемой аппаратуры;
 L — дроссель защиты источника И1 от импульса напряжения;
 СИ — средства измерения параметров импульсов напряжения;
 П2 — переключатель полярности импульсов;
 К — ключ, обеспечивающий заряд и разряд конденсатора С1 в сеть электропитания;
 С2 — конденсатор связи с сетью электропитания;
 И2 — высоковольтный источник постоянного напряжения, обеспечивающий заряд накопительного конденсатора С1 до заданной амплитуды напряжения импульса;
 С1 — накопительный конденсатор; СУ — схема управления конденсатором

Примечание: Необходимо также сделать уточнение подрисочных надписей к рис. 2: К — ключ, обеспечивающий заряд и разряд конденсатора С1 в цепь электропитания испытываемой аппаратуры; С2 — конденсатор связи с цепью электропитания испытываемой аппаратуры.

А.7.1 Для испытаний используют имитатор или специальную схему электропитания, обеспечивающие импульсную мощность, не менее чем в 10 раз превышающую мощность, потребляемую аппаратурой, и позволяющие моделировать переходное отклонение напряжения в виде импульсов прямоугольной формы отрицательной или положительной полярности заданной длительности и фронтами, не более 0,1.

Здесь необходимо сделать два уточнения.

Первое: увеличенное значение мощности, потребляемой РЭА, должно учитываться только на время формирования фронта импульса, а не в течение всей его длительности (до 3–5 с), что изложено более подробно ниже по тексту в комментарии к п. А.7.2. При скачке входного напряжения происходит дозаряд конденсаторов входных фильтров преобразователей напряжения внутренней системы электропитания РЭА, что и вызывает кратковременный скачок входного тока и мощности, потребляемой ею.

Второе: длительность фронта импульса должна быть задана относительно его длительности.

А.7.2 Сначала к имитатору или схеме подключают эквивалент в виде активной нагрузки, мощность потребления которой равна потребляемой мощности аппаратуры. Устанавливают номинальное значение напряжения питания (частоты) и подбирают режим работы имитатора или схемы таким образом, чтобы при эквивалентной нагрузке величина переходного отклонения напряжения и его длительность соответствовали заданным значениям.

Затем вместо эквивалента подключают испытываемую аппаратуру и подают импульс переходного отклонения напряжения, одновременно контролируя параметры аппаратуры.

При аттестации основных характеристик имитатора (напряжение, форма, длительность импульса и его фронта) значение мощности активной нагрузки должно быть больше значения мощности, потребляемой РЭА при подаче на нее того же переходного отклонения (скачка) напряжения. При увеличении значения напряжения через резистор практически пропорционально увеличивается значение тока, а следовательно, выделяется большее значение мощности в течение данного воздействия (до 3–5 с), что может быть причиной их перегрева.

При подаче такого же воздействия на вход электропитания РЭА из-за отрицательного входного напряжения преобразователей напряжения внутренней системы электропитания РЭА значение тока уменьшается. При этом значение потребляемой РЭА мощности остается практически на прежнем уровне.

Кроме того, из-за наличия на входе электропитания РЭА элементов с реактивными составляющими (индуктивными и емкостными) сопротивления, а также с существенно нелинейными характеристиками форма и временные параметры импульса переходного напряжения, как правило, отличаются от существующих при подключении эквивалента активной нагрузки, что делает нецелесообразным их контроль на входе электропитания РЭА (см. текст п. А.7.2 и сравните с приведенным ниже текстом из п. А.9.3).

А.7.3 Конкретное число импульсов переходного напряжения, подаваемых на аппаратуру, устанавливают в ПИИ или ТУ на аппаратуру конкретного типа, но оно должно быть не менее трех.

А.7.4 Испытания по А.7.2, А.7.3 повторяют для других значений переходных отклонений напряжения, установленных в ГОСТ РВ 20.39.309.

Оба пункта (А.7.3 и А.7.4) лишь подтверждают необходимость априорного учета возможного увеличения значения рассеиваемой мощности на эквиваленте активной нагрузки и его интегрального перегрева при увеличении количества и значения размаха импульсов переходных отклонений напряжения.

И наконец, «гвоздь программы» в виде методики испытаний РЭА при воздействии импульсов напряжения на ее вход электропитания (п. А.9). Схема рабочего места — на рис. 2 (А.6 по нумерации «Приложения А» к [5]).

Следует отметить, что в обоих случаях (п. А.7 и А.9) воздействие на вход электропитания РЭА является импульсом с разницей в форме, амплитуде, длительности импульса и его фронта. Положительной полярности импульса напряжения (п. А.9) физически соответствует скачок входного напряжения (п. А.7), отрицательной (п. А.9) — провал (п. А.7). Также в обоих случаях проводится и аттестация имитатора с предварительным подключением к его выходу эквивалента активной нагрузки. Разница здесь заключается в требовании [4, 5] соответствия во втором случае значения его сопротивления значению входного сопротивления РЭА. Отсюда и начинаются «чудеса», связанные с установленным в [4] для РЭА всех классов по ГОСТ РВ 20.39.301 и для любых значений потребляемой ею мощности единого, необоснованного и трудно понимаемого значения выходного сопротивления имитатора импульсов напряжения, равного (50 ± 10) Ом, более подробно проанализированного в [7, 8]. Эти «чудеса» продолжаются уже в виде методики, приведенной в п. А.9 [5], поддерживающей это значение и добавившей от себя аналогичное значение сопротивления эквивалентной активной нагрузки.

Приводим п. А.9 в редакции [5].

А.9.1 Для испытаний используют имитатор или специальную схему электропитания, обеспечивающие подачу на аппаратуру импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности с заданными параметрами. Внутреннее сопротивление генератора таких импульсов должно быть (50 ± 10) Ом.

Комментарий в части значения внутреннего сопротивления приведен выше.

А.9.2 Испытания проводят при подаче импульсов напряжения в каждую цепь питающего напряжения как по симметричному, так и несимметричному пути их распространения.

Все бы хорошо, но опять здесь имеется неоднозначность: подавать импульсы следует одновременно во все эти «цепи питающего напряжения» или поочередно в каждую из них? Склоняемся ко второму варианту, учитывая и необходимость изменения полярности импульсов в каждой из цепей.

А.9.3 Сначала к имитатору или схеме подключают эквивалент в виде активной нагрузки сопротивлением (50 ± 10) Ом. Устанавливают номинальное значение напряжения питания (частоты) и подбирают режим работы имитатора или схемы таким образом, чтобы амплитуда положительных импульсов напряжения (U) и их длительность (по уровню $0,5\tau$) соответствовали заданным значениям.

Затем вместо эквивалента подключают испытываемую аппаратуру и подают установленный импульс напряжения, одновременно контролируя параметры импульса.

Именно в этом пункте и содержится большинство узких мест рекомендуемой методики. Комментарии даются в порядке изложения ее текста в [5].

Подключение эквивалента в виде активной нагрузки с сопротивлением (50 ± 10) Ом к выходу имитатора с таким же значением внутреннего сопротивления с точки зрения передачи максимального значения электроэнергии от генератора в нагрузку является оптимальным условием. Любой небаланс значений этих сопротивлений снижает значение передаваемой энергии. В практике проведения испытаний к имитатору может быть подключена РЭА с различными родом потребляемого тока и значениями входного напряжения и сопротивления. Если в первом приближении воспользоваться значением комплексного сопротивления входа ее электропитания (50 ± 10) Ом для номинальных значений частоты (50 Гц) и напряжения (220 В), то потребляемая РЭА электрическая мощность соответствует значению порядка 1 кВт. При больших значениях потребляемой мощности значение входного сопротивления РЭА снижается, при меньших — увеличивается, что при фиксированном значении внутреннего сопротивления имитатора (50 ± 10) приводит к различиям в условиях испытаний. Те же результаты существуют и для РЭА, питающейся напряжением постоянного тока.

С точки зрения передачи амплитуды импульса напряжения от имитатора к РЭА образуется делитель напряжения с верхним плечом в виде внутреннего сопротивления имитатора и нижним — в виде сопротивления входа электропитания РЭА. При равенстве обоих значений сопротивлений установленная на имитаторе до пуска импульса амплитуда при его пуске уменьшается примерно вдвое. При подключении РЭА с большим (меньшим) значением входного сопротивления к нему прикладывается импульс с большим (меньшим) значением амплитуды.

При следовании рекомендации оперативно подбирать значение амплитуды импульса на имитаторе под значение внутреннего сопротивления РЭА может возникнуть необходимость наличия в имитаторе зарядного — разрядного устройства с максимальным значением напряжения, более чем на порядок превышающим требуемую амплитуду на входе РЭА. Так как при данном виде испытаний основной целью является проверка возможности штатного функционирования РЭА во время и по окончании воздействия на ее вход электропитания импульсов напряжения микро- и миллисекундной длительности, то есть импульсов с большой электрической энергией (вольт \times ампер \times секунда), вызывающей тепловые разрушения элементов и узлов входной цепи, то, учитывая вышеизложенное, того же эффекта можно достичь более простым способом — оперативным (регулируемым) изменением значения внутреннего сопротивления имитатора в соответствии со значением входного сопротивления РЭА. При этом существенно сокращается диапазон регулировки напряжения зарядного устройства (до 2–2,5 раз), что для требуемой по [4] амплитуды импульса в 1000 В будет обеспечиваться значением напряжения до (2–2,5) кВ.

Здесь же следует добавить еще одно важное обстоятельство. Исходя из физической сущности возникновения импульса напряжения в силовых цепях переменного и постоянного тока [3, 7, 8], для создания условий испытаний РЭА на устойчивость к данному виду силового электромагнитного воздействия, максимально приближенных к реальным, следует при имитации этого импульса с заданным значением амплитуды и полярности располагать его в момент пуска над мгновенным значением напряжения электропитания РЭА (для цепей переменного тока — еще учитывать и значение фазового угла синусоиды). При наиболее массовом по применению параллельном способе ввода импульса в цепь электропитания РЭА необходимо увеличивать его амплитуду на мгновенное значение напряжения в этой цепи, что еще более усугубляет условия формирования импульса с последующим пуском по рекомендуемой методике.

Просто ошибкой является рекомендуемая установка длительности импульса по уровню $0,5\tau$ (так как τ и есть длительность импульса).

Правильный (классический) вариант — по уровню $0,5$ от значения амплитуды импульса ($0,5 A_i$).

Самая сомнительная рекомендация — контроль параметров импульса напряжения при его подаче после калибровки на эквиваленте активного сопротивления в цепь электропитания испытываемой РЭА. Во-первых, это бессмысленное занятие, так как характер комплексного сопротивления входа электропитания РЭА и практически обязательное наличие в этой цепи подключенных параллельно входу различных типов ограничителей напряжения с нелинейной характеристикой существенным образом изменит амплитудно-временные характеристики и форму исходного импульса (на эквиваленте). Это отмечается в аналогичных по сути других НТД и будет приведено далее по тексту. Скорее всего, и эта рекомендация является ошибкой, поскольку контроль параметров импульса на входе электропитания РЭА по смыслу должен дополняться сравнением их с аналогичными параметрами на эквиваленте, чего нет в дальнейшем тексте п. А.9.3. Кроме того, данная операция заменяет (просто отсутствует в тексте) обязательный контроль работоспособности РЭА при таком виде воздействия, что является классикой при всех предыдущих методиках проверки (п. А.2–А.8). Последний довод в пользу утверждения авторов данной статьи — вышеупомянутая смысловая тождественность рассматриваемой методики и методики проверки по п. А.7.

К этому же вопросу целесообразно, несколько нарушив последовательность изложения рекомендаций в [5], привести содержание п. А.10 «Оценка результатов испытаний» и п. А.10.1 с рекомендациями конкретного содержания.

А.10.1 Аппаратуру считают выдержавшей испытания, если в процессе и после воздействия различных изменений напряжения питания и частоты, указанных в подразделах А.2–А.9, ее контролируемые параметры находятся в пределах норм, установленных в ПИ или ТТЗ (ТЗ), ТУ на аппаратуру конкретного типа.

Данное положение также подтверждает ошибочность рекомендации в п. А.9.3, подменившей контроль параметров аппаратуры во время воздействия импульса на контроль параметров этого импульса на ее входе электропитания.

А.9.4 Число импульсов напряжения, подаваемых на аппаратуру, и их среднюю частоту повторения устанавливают в ПИ или ТУ на аппаратуру конкретного типа.

В последующем тексте будут приведены методики проведения испытаний на этот и ранее рассмотренные виды воздействия из НТД по другим направлениям применения РЭА.

Продолжение следует

Литература

1. Либенко Ю., Воронцов А. Некоторые аспекты электроснабжения РЭА в различных направлениях ее применения // Силовая электроника. 2019. № 1.
2. Либенко Ю. Н. Варианты применения оборудования для воспроизводства параметров качества электроэнергии систем электроснабжения // Практическая силовая электроника. 2018. № 3 (71).
3. Либенко Ю., Воронцов А. Параметры качества электроэнергии автономных источников, централизованных и автономных систем электроснабжения радиоэлектронной аппаратуры // Силовая электроника. 2019. № 3.
4. ГОСТ РВ 20.39.309-98 «Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования».
5. ГОСТ РВ 20.57.310-98 «Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия конструктивно-техническим требованиям».
6. Либенко Ю. Как вы яхту назовете, так она и поплывет // Силовая электроника. 2018. № 4, 5.
7. Либенко Ю. Н., Колосов В. А. Проведение испытаний РЭА на воздействие высоковольтных импульсов напряжения по цепям электропитания // Практическая силовая электроника. 2018. № 1 (69).
8. Либенко Ю. Каждый выбирает для себя? // Силовая электроника. 2018. № 1.