

Каждый выбирает для себя?

В статье проанализирована ситуация, сложившаяся в различных нормативно-технических документах в части требований к параметрам и другим аспектам, относящимся к высоковольтным импульсам напряжения техногенного или природного характера происхождения, а также методов проведения испытаний РЭА различных классов (областей применения) на устойчивость к воздействию этих импульсов. В качестве ответа на вопрос: «Что же использовать для эффективного проведения испытания РЭА на воздействие высоковольтных импульсов напряжения по цепям электропитания — нормы, понятия (опыт, интуицию)?» приведено личное мнение автора в виде некоторых выводов и предложений.

Юрий Либенко

lib7637@rambler.ru

...Каждый выбирает для себя...

Выбираю тоже — как умею.

Ни к кому претензий не имею.

Каждый выбирает для себя.

Ю. Левитанский

Замечательный поэт Ю. Левитанский, человек, проживший непростую жизнь, выживший и победивший в страшной войне, посвятил одно из лучших своих стихотворений общечеловеческим нормам и идеалам. Это произведение, и даже всего одна его финальная строфа, взятая автором данной статьи в качестве эпиграфа, актуальны и в наше время при рассмотрении различных жизненных ситуаций и, в частности, нижеприведенной.

Из всех видов силовых электромагнитных воздействий (СЭВ) на РЭА по цепям электропитания, регламентируемых в различных нормативно-технических документах (НТД), высоковольтные импульсы напряжения (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, затрудняется реальная 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, возникающие в цепях стационарных или автономных систем электроснабжения (СЭС) с источниками электроэнергии (ИЭ) переменного (постоянного) тока, являются для подключенной к ним РЭА наиболее опасным видом СЭВ. 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 ра-

боте, необратимых отказов и повреждений, вплоть до полного разрушения.

Задача обеспечения устойчивости к СЭВ в виде ВИН существует для РЭА всех классов, предусмотренных ГОСТ РВ 20.39.301. Однако на практике наибольшие трудности в ее решении возникают в одно- и трехфазных СЭС с ИЭ переменного тока для РЭА классов 1 и 2. Причинами этого являются значительные протяженности силовых цепей СЭС, большое количество подключенных к ним разнотипных потребителей и значение электроэнергии, потребляемой как каждым из них, так и в совокупности, более сложная электромагнитная обстановка в СЭС. Кроме того, РЭА, относящаяся к этим двум классам, является самой массовой.

Для проведения качественных проверок и исследований СЭВ в виде ВИН на РЭА минимально необходимым является наличие:

- адекватных норм качества электроэнергии в части ВИН в НТД, определенных по результатам периодически проводимого мониторинга СЭС;
- имитационных технических средств, адаптированных к проверяемым объектам и воспроизводящих формы ВИН, виды и значения их параметров, как соответствующих установленным в НТД, так и выявленных по результатам оперативного мониторинга качества электроэнергии в СЭС;
- адекватных и периодически обновляемых (по мере необходимости) методов проведения проверок и исследований.

Первая составляющая данной триады является наиболее важной, ибо ее отсутствие или несоблюдение сводит на нет обе другие, превращая их в формальные процедуры, не создающие полезного эффекта. Более того, в этом случае имеется вероятность возникновения существенного ущерба деятельности, обеспечиваемой в процессе функционирования РЭА, вследствие априорного признания ее отвечающей

заданным требованиям устойчивости к воздействию ВИН, которые по факту не соответствуют реальной электромагнитной обстановке на объекте применения.

Хотя многое из приведенного в дальнейшем тексте статьи было известно широкому кругу специалистов давно, повышенное внимание ее автора к рассматриваемой проблеме возникло в процессе создания имитатора ВИН (ИВИН). Он изначально предполагался для применения в составе макета автоматизированного комплекса имитационных технических средств КИТС-1М [1], предназначенного для проведения проверок и исследований передвижных объектов управления и связи, соответствующих РЭА класса 1 и требованиям к СЭС, установленным в [2]. Однако, в связи с выявлением в процессе проведения этой работы ряда дополнительных возможностей КИТС-1М, комплекс и входящие в его состав основные функциональные части были позиционированы как «базовые», способные обеспечить оперативное создание на их основе дополнительных вариантов КИТС для выполнения аналогичных проверок и исследований РЭА других групп данного класса, а также и других классов.

С этой целью в первую очередь были подробно рассмотрены требования и методики, изложенные в ряде соответствующих НТД в части испытаний РЭА класса 1 на устойчивость к воздействию ВИН в одно- или трехфазных СЭС переменного тока, а затем — РЭА классов 2 и 3. В итоге по данной теме были проанализированы сведения, представленные в [2–18]. Изложение результатов этого анализа целесообразно представить далее в следующем порядке:

- некоторые основные термины и определения в части ВИН;
- нормы качества электроэнергии в части ВИН на входах электропитания РЭА;
- методика проверки устойчивости РЭА к воздействию ВИН;
- выводы (промежуточные, результирующие) и предположения.

Приняв адекватными понятия «импульс напряжения (ИН)» и используемое ранее и далее «ВИН», рассмотрим вначале не очень конкретные определения трех терминов из [3].

Импульс напряжения в СЭС: резкое изменение напряжения в СЭС, длящееся малый (какой?) интервал времени относительно определенного (какого?) интервала времени.

Амплитуда импульса напряжения: максимальное мгновенное значение ИН (где начало отсчета на импульсе напряжения?). В отменном с 2013 г. [5] имелось два термина: «импульсное напряжение» $U_{\text{имп}}$, измеренное как максимальное значение напряжения при резком его изменении и отсчитываемое от уровня 0 В, и «импульс напряжения» $U_{\text{имп. а}}$ — скачок напряжения с тем же максимальным значением, что и у $U_{\text{имп}}$, но отсчитываемым от уровня синусоиды в момент возникновения этого скачка (а это уже несколько другое!). Трудно понять, почему не сохранено это понятное различие в ныне действующем НТД [6], но можно только вспомнить известное выра-

жение: «с водой и ребеночка выплеснули», так как по дороге к нему были две, последовавшие друг за другом, замены: в 2013 г. [5] на ГОСТ Р 54149-2010 и в 2014 г. его замена на [6]. Все, «концы в воду!».

Длительность импульса: интервал времени от начала импульса до момента, когда напряжение импульса уменьшается до половины максимального значения его амплитуды.

Последнее определение справедливо при теоретически возможном случае $t_{\text{ф}} \rightarrow 0$. На практике минимальным критерием прямоугольности импульса считается соотношение $t_{\text{ф}} \leq 0,1 t_{\text{ч}}$, что вполне применимо и для импульса вида «спадающая экспонента», характерного в качестве «базового» для ВИН. Нормативная идеализация значения длительности переднего фронта реального ВИН приводит к появлению дополнительной погрешности измерения его длительности. В большинстве других НТД длительность ВИН устанавливается на уровне 0,5 его амплитуды по сечению, проходящему через фронт и спад.

Еще два термина и их определения из [3] в части ВИН будут рассмотрены далее.

Основным НТД, задающим требования к нормам качества электроэнергии на входах электропитания РЭА классов 1–5 по ГОСТ РВ 20.39.301, в т. ч. и в части ВИН, является [4]. Его анализ показал, что для выяснения ситуации по теме статьи вполне достаточно ограничиться рассмотрением требований к параметрам ВИН в СЭС переменного тока для РЭА классов 1–3 (табл. 1).

Сразу отметим более чем странное совпадение значений амплитуд (± 1000 В) и длительностей (10 мкс) ВИН для РЭА классов 1 и 2. Учитывая наличие в этих классах большого количества групп, а следовательно, и видов РЭА по условиям эксплуатации, сильное сомнение вызывает соответствие приведенных значений реально существующим (что и будет показано далее).

Не меньшее сомнение вызывает и одинаковое для РЭА всех пяти классов и видов СЭС значение внутреннего эквивалентного сопротивления источника, генерирующего (имитирующего) ВИН, — (50 ± 10) Ом. Вспомнив, что то же самое было и в аналогичном предыдущем НТД из состава КГВС «Мороз-5», можно предположить, что это значение было изначально заимствовано из требования к маломощным устройствам «допотопной» РЭА (возможно, авионики), которое потом, без затей, распространили и на большинство видов существовавшей РЭА, как раз и относящейся к классам 1–3.

Из [4] следует, что:

- нормы качества электроэнергии на входах питания РЭА, с учетом которых она разра-

ботана и при которых обеспечивает заданные в ТТЗ (ТЗ) характеристики, должны соответствовать установленным в настоящем стандарте;

- электроэнергией РЭА обеспечивают автономные источники (преобразователи) электроэнергии, а также СЭС непосредственно или через источники вторичного электропитания. При этом показатели и нормы качества электроэнергии на выходах СЭС и источников (преобразователей) электрической энергии должны соответствовать установленным в [4] и стандартах СЭС по видам техники;
- при питании от Госэнергосети общего назначения РЭА должна сохранять работоспособность при нормах качества электроэнергии, установленных в [5] (на территории РФ взамен него в настоящее время действует [6]).

Проведенный анализ значений норм качества электроэнергии, установленных в НТД на СЭС РЭА по видам техники, в одних случаях выявляет их отсутствие или отличие от требований [4] для РЭА соответствующих классов, в других же — простое копирование. Так, в [7–9] отсутствуют требования к ВИН как к показателю нормы качества электроэнергии, в [10] вообще отсутствуют термины и определения, относящиеся к ВИН, а в [2, 11, 12] требования к ВИН полностью копируют аналогичные из [4] (в двух последних НТД требование к значению внутреннего сопротивления установки, генерирующей ВИН при испытаниях, отсутствует).

Степень воздействия ВИН на РЭА зависит от ряда факторов, в т. ч. от характера происхождения ВИН (техногенного или природного) и их электрических характеристик. Также существенно влияют пути проникновения ВИН к РЭА, физическая реализация и электрические параметры цепей СЭС, наличие в этих цепях и (или) в РЭА защитных устройств (элементов), снижающих влияние энергии ВИН до безопасных нормированных уровней. В военных НТД нет никакой информации, касающейся этих важных аспектов, поэтому воспользуемся сведениями из гражданских, понимая, что физическая природа ВИН для РЭА обоих применений одинакова.

В [13] для варианта электроснабжения РЭА класса 1 от Госэнергосети общего назначения полезной информацией является следующее:

- ВИН в точке передачи электроэнергии пользователю в электрической сети вызываются в основном молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или в электроустановке потребителя электроэнергии. Время нарастания ВИН может изменяться в широких пределах

Таблица 1. Параметры ВИН в СЭС переменного тока

Характеристика электроэнергии	Показатель качества электроэнергии	Класс РЭА по ГОСТ РВ 20.39.301		
		1	2	3
Номинальные значения напряжения/частоты электропитания, В/Гц				
220; 380/50; 400				
220; 380/50; 400				
115; 200/400; 1000				
ВИН	Амплитуда ВИН, В	± 1000	± 1000	$\pm 70; \pm 600$
	Длительность ВИН, мкс	10	10	5; 10

Примечание: внутреннее эквивалентное сопротивление источника, генерирующего (имитирующего) ВИН с данными параметрами, устанавливаются равным (50 ± 10) Ом.

(от значений менее 1 мкс до нескольких миллисекунд);

- значения ВИН, вызванных молниевыми разрядами, определенные расчетным путем в точках присоединения к электрической сети от:

а) воздушных линий — не более 10 кВ (вероятность 90%) на распределительных подстанциях и не более 6 кВ во внутренней проводке зданий и сооружений;

б) кабельных линий — данные отсутствуют;

- значения ВИН, вызванных процессами коммутации, при их длительности, равной 1–5 мс (на уровне 0,5 амплитуды), при номинальном значении напряжения электрической сети 380 В–4,5 кВ;

- ВИН, вызванные молниевыми разрядами, в основном имеют большие амплитуды, но меньшие значения энергии, чем ВИН, вызванные коммутационными процессами, характеризующимися, как правило, большей длительностью.

Для того же варианта электроснабжения РЭА класса 1 в [13] установлено следующее:

- стандарт распространяется на электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование (далее именуемые техническими средствами — ТС) и устанавливает требования и методы испытаний ТС на устойчивость к воздействию микросекундных импульсных помех большой энергии (МИП), вызванных перенапряжениями, возникающими в результате коммутационных переходных процессов и молниевых разрядов.

- стандарт не применяют при испытаниях прочности изоляции ТС в условиях воздействия высоковольтных напряжений. Прямые молниевые разряды в стандарте не учитываются;

- требования настоящего стандарта являются обязательными;

- если источник ВИН и испытываемое ТС находятся в одной цепи, например в цепи электропитания (непосредственная связь), ИВИН имитирует источник ВИН с низким внутренним сопротивлением, подключенный к испытываемому ТС;

- если источник ВИН и испытываемое ТС не находятся в одной цепи (косвенная связь), ИВИН имитирует источник ВИН с высоким внутренним сопротивлением;

- значения параметров элементов схемы ИВИН должны быть выбраны таким образом, чтобы в режиме холостого хода:

а) длительность фронта ВИН составляла 1 мкс $\pm 30\%$, длительность ВИН — 50 мкс $\pm 20\%$;

б) длительность фронта импульса тока составляла 6,4 мкс $\pm 20\%$, длительность импульса тока — 16 мкс $\pm 20\%$;

- ИВИН должен иметь эффективное выходное сопротивление со значением не более

2 Ом, определяемое как отношение пикового значения ВИН в режиме холостого хода к пиковому значению импульса тока в режиме короткого замыкания;

- выходное напряжение ИВИН в режиме холостого хода (пиковое значение) — от 0,5 до 4 ($\pm 10\%$) кВ, не менее;

- выходной ток ИВИН в режиме короткого замыкания (пиковое значение) — от 0,2 (по расчету — 0,25!) до 2 ($\pm 10\%$) кА, не менее;

- полярность ВИН — положительная/отрицательная;

- сдвиг по фазе импульсов напряжения (тока) по отношению к переменному напряжению питания — от 0 до 360°;

- интервал между импульсами — 1 мин, не менее.

Для этого же варианта электроснабжения РЭА класса 1 в [3] имеются два необходимых для настоящего обзора термина и их определения:

- *стандартизованный грозовой ВИН: ВИН установленной формы с временем нарастания фронта 1,2 мкс и длительностью полуспада 50 мкс;*

- *стандартизованный коммутационный ВИН: ВИН установленной формы с временем подъема до максимума 250 мкс и длительностью полуспада 2500 мкс.*

В [14] для РЭА класса 2, питающейся от трехфазной СЭС переменного тока 380 В/50 Гц, установлены указанные в таблице 2 характеристики ВИН (импульсных коммутационных перенапряжений — ИКП), в цепях «фаза–фаза» и «фаза–корпус».

Требование к значению внутреннего сопротивления установки, генерирующей ВИН при испытаниях, отсутствует.

В [15] для варианта электроснабжения РЭА класса 3 от бортовой СЭС переменного тока установлено следующее.

ВИН, возникающие в момент размыкания цепи на контактах коммутационных аппаратов со стороны выключаемых приемников электроэнергии или приходящие по цепям электропитания приемников электроэнергии переменного и постоянного токов, не должны выходить за следующие установленные значения амплитуды напряжения ВИН:

а) до ± 600 В при длительности ВИН 1–10 мкс;

б) от ± 600 до ± 250 В при длительности ВИН 10–100 мкс;

в) от ± 250 до 0 В (*ошибка: должно быть $U_{и} \rightarrow 0$ В!*) при длительности ВИН 100–500 мкс.

- внутреннее сопротивление приемника (*ошибка: должно быть «источника!»*), генерирующего ВИН, должно быть не менее 50 Ом. Учитывая, что такое же значение было установлено и в [16] — «долгостеле» и предшественнике [15], данный факт

добавляет уверенности в предположении насчет заимствования из авионики, сделанном в начальной части настоящей статьи (после табл. 1).

В [17] для варианта электроснабжения РЭА класса 3 от бортовой СЭС переменного тока установлено следующее:

- амплитуда ВИН для оборудования категории:

а) «А» — ± 600 В;

б) «В» — $\pm 2 \times U_{ном}$ или ± 200 В (выбирается меньшее значение);

- время нарастания ВИН — не более 2 мкс;
- длительность ВИН — не менее 10 мкс (*отсчитывается по уровню основания ВИН, что не соответствует «классическому» для данного вопроса условию отсчета — на уровне 0,5 значения его амплитуды*);

- значение сопротивления источника ВИН должно составлять 50 Ом $\pm 10\%$ (*несколько не то, что в [3, 15, 16], т. к. $\pm 10\%$ — это не ± 10 Ом, но похоже*).

Типичная форма ВИН, установленная в [17], выполняется при значении времени нарастания (фронта) не более 2 мкс и общей длительности ВИН не менее 10 мкс (*т. е. отсчитывается по основанию импульса, а в [18] — по уровню 0,5 $A_{и}$*).

По результатам сравнения требований к ВИН, существующих в [4] и в вышеперечисленных НТД по видам техники, можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. Для РЭА классов 1–3 требования к параметрам ВИН в одних НТД по видам техники не заданы вообще (и без ссылки на [4]), в других — содержатся требования, аналогичные приведенным в [4], в большинстве же НТД заданы существенно отличающиеся требования. Значения параметров ВИН в [4] для РЭА классов 1 и 2, а также их совпадение не соответствует реальной электромагнитной обстановке в СЭС переменного тока. Все это в достаточной степени поясняет вынужденное применение «индивидуальных подходов» (каждый выбирает для себя!) к поиску более реальных путей решения рассматриваемой задачи.
2. В [4] ВИН не классифицируются по природе происхождения (молниевые, техногенные), определяющей специфические различия в значениях их параметров, а сами значения не соответствуют количественным и качественным характеристикам тех и других, приведенным в целом ряде других вышеперечисленных НТД.
3. В [4] не установлены различия в значениях параметров ВИН, соответствующих различным степеням жесткости условий функционирования РЭА на конкретных объектах [11], само же понятие «степень жесткости», по сути, отсутствует.
4. В [4] не содержатся требования к параметрам ВИН, задаваемым при проведении двух уровней проверок: аппаратурном и системном (см. [13]). Во втором случае потенциально могут задаваться более жесткие значения параметров.

Перейдем к рассмотрению результатов анализа методов проверки (испытаний) устой-

Таблица 2. Характеристики ИКП в цепях «фаза–фаза» и «фаза–корпус»

Амплитуда $U_{и}$, В	Длительность на уровне 0,5 $U_{и}$, мкс	Длительность фронта от 0,1 $U_{и}$ до 0,9 $U_{и}$, мкс
800	100	не более 3
800	10	не более 1
600	1	не более 0,1

Примечание: ИКП имеют экспоненциальную форму.

чивости РЭА на воздействие ВИН, приняв [4] так же, как и ранее, в качестве основного НТД. В нем указано, что испытания проводят по методикам, установленным в ТУ на РЭА конкретного типа, а также сделана ссылка на рекомендуемую методику испытаний, содержащуюся в [18]. Сразу отметим, что в части ВИН этот НТД вполне достоин [4]. Вот, например, как [18] рекомендует проводить испытания (цитаты в кавычках), с комментариями автора данной статьи, следующими за наиболее «привлекательными» рекомендациями (курсив в скобках).

«Испытания аппаратуры, электропитание которой осуществляют от многофазных ИЭ, проводят при формировании аналогичных видов и значений параметров электроэнергии одновременно во всех фазах». (Для этого надо применять сложный и дорогой трехфазный ИВИН. Кроме того, такая жесткая рекомендация может не устроить проверяющего, желающего ввести ВИН в каждую из фаз в отдельности, в две из трех, в три фазы с одинаковыми или разными значениями амплитуд и т. д. Опять-таки, каждый выбирает для себя!)

«Имитатор или специальная схема электропитания должны обеспечить подачу на аппаратуру ВИН положительной и отрицательной полярности с заданными параметрами».

«Внутреннее сопротивление генератора таких импульсов должно быть (50 ± 10) Ом». (Заимствованно из [4], комментарии см. выше.)

«Испытания проводят при подаче ВИН в каждую цепь питающего напряжения, как по симметричному, так и по несимметричному пути их распространения».

«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 ВИН и их длительность (по уровню 0,5τ) соответствовали заданным значениям. Затем вместо эквивалента подключают испытываемую аппаратуру и подают установленный ВИН, одновременно контролируя параметры импульса». (Здесь необходимо дать развернутый комментарий. При указанных значениях внутреннего и эквивалентного сопротивлений в ИВИН:

- уровень отсчета длительности указан с ошибкой (см. выше): надо 0,5 от амплитуды, а в НТД — «по уровню 0,5 τ»;
- следует иметь, как минимум, двойной запас по значению амплитуды ВИН;
- при параллельном относительно ИЭ способе ввода ВИН (см. структурную схему установки для проведения испытаний) требуется иметь дополнительный запас по значению напряжения формирователя ВИН до 310 В в зависимости от фазы синусоиды, при которой подается ВИН;
- при подаче на эквивалент нагрузки напряжения питания проверяемого объекта требуется обеспечить значение его мощности рассеяния в полтора-два раза больше расчетной, т. е. при напряжении 220 В — до 2 кВт;

- длительность фронта ВИН и самого ВИН на эквиваленте увеличится.

Самое важное — при общем значении сопротивления цепи ИВИН–РЭА, равном 2×50 Ом (100 Ом), значение энергии воздействия ВИН на РЭА будет неэффективным, а при значении входного сопротивления входа электропитания РЭА ниже 50 Ом — практически никаким. Кроме того, в рекомендации не уточняется, даже качественно, каким образом измеряется значение амплитуды (энергии) ВИН, измеренное на входе электропитания РЭА (по примеру «Приложения 1» в [14]).

«Число ВИН, подаваемых на аппаратуру, и их среднюю частоту повторения устанавливают в ПИ или ТУ на аппаратуру конкретного типа». (Вопрос неоднозначный, требует индивидуального подхода в каждом случае, см. далее. И снова — каждый выбирает для себя!)

«Испытания проводят при подаче ВИН как положительной, так и отрицательной полярности».

Теперь обратимся к ранее рассмотренным НТД по видам техники для анализа имеющихся в них методик проведения испытаний устойчивости РЭА к воздействию ВИН.

1. В [2, 7, 8, 9, 11, 12, 15] отсутствует методика проверки устойчивости РЭА к воздействию ВИН или хотя бы ссылка на [18].

2. В [13] различают два вида испытаний на устойчивость РЭА к воздействию ВИН: испытания отдельных образцов ТС и испытания систем, включающих ТС в качестве элементов. Таким образом, различают аппаратурный и системный уровни помехоустойчивости.

При оценке аппаратурного уровня помехоустойчивости испытания проводят в лабораторных условиях на отдельных образцах ТС. Уровни воздействий ВИН не должны превышать значений прочности изоляции в условиях воздействий высоковольтных напряжений. При оценке системного уровня помехоустойчивости испытания проводят в тех же условиях, что и испытания отдельных ТС, входящих в систему. Учитывая, что аппаратурный уровень помехоустойчивости не гарантирует помехоустойчивости систем во всех случаях, при оценке системного уровня имитируют условия установки ТС системы в месте ее эксплуатации. При этом применяются реальные средства защиты от импульсных воздействий (разрядники, варисторы и т. п.) и соединительные кабели реальных типов и длин. В этих случаях не исключено применение более жестких условий (степени) проведения испытаний в предположении, что энергия ВИН может быть ограничена за счет использования вышеупомянутых средств защиты (в очередной раз каждый волен выбрать для себя!).

Проверка характеристик ВИН, формируемых ИВИН, выполняется в следующих условиях: форма, амплитуда, временные параметры ВИН и его расположение относительно фазы синусоиды ИЭ — на холостом ходу, а параметры импульса тока — при коротком замыкании выхода ИВИН. Холостой ход обеспечивается при входном сопротивлении средства измерения не менее 10 кОм. Режим

короткого замыкания выхода ИВИН обеспечивается при значении сопротивления перемычки не более 0,1 Ом.

Количество подаваемых ВИН — 10 (пять положительной и пять отрицательной полярности), если иные требования не установлены в НТД на проверяемое ТС конкретного вида.

Интервал между подачей ВИН должен составлять не менее 1 мин. Так как большинство применяемых устройств защиты имеет ограниченную мощность рассеивания тепловой энергии при протекании через них значительных импульсных токов, то частота повторения ВИН должна быть установлена с учетом допустимых характеристик устройств защиты, встроенных в проверяемое ТС.

3. В [14] приведено следующее:

- проверка электроприемников (ЭП) на устойчивость к воздействию ИКП проводится в цепях электропитания одно- и трехфазного переменного тока по схемам «фаза-фаза» и «фаза-корпус»;
 - подключение генератора ИКП к испытываемым цепям ЭП переменного тока выполняется с помощью емкостной связи. Защита ИЭ переменного тока от воздействия ИКП осуществляется с помощью катушки индуктивности без сердечника;
 - во всех имеющихся схемах проверки и в тексте НТД отсутствует резистор, имитирующий внутреннее сопротивление испытательной установки. Резистор со значением сопротивления 50 Ом подключается к выходу испытательной установки только для определения значения выделяемой на нем энергии ВИН. При этом в «Приложении 1» к [14] (см. ссылку выше) приведена методика пересчета этого значения в случае испытания ЭП со значением внутреннего сопротивления менее 50 Ом;
 - ИКП формируются с погрешностью: не более $\pm 10\%$ по амплитуде, не более $\pm 30\%$ по длительности импульса и переднего фронта импульса;
 - ИКП формируются с положительной полярностью над текущим (мгновенным) значением напряжения источника электроэнергии в виде одиночных импульсов с паузой между ними 3; 5; 25 с или пачек импульсов с любой частотой до 50 Гц в течение 3 с;
 - одиночные импульсы для проверки ЭП переменного тока подаются в количестве, обеспечивающем получение трех ИКП в контрольной зоне на вершине синусоиды (в зоне более 0,8 ее амплитуды);
 - пачки импульсов для проверки ЭП переменного тока подаются в количестве не менее трех, обеспечивающем попадание хотя бы одного ИКП в контрольную зону синусоиды.
4. В [16] установлено, что нормы и методы испытаний оборудования бортовых систем (РЭА класса 3) должны соответствовать применяемым для самолета или вертолета квалификационным требованиям, приведенным в [17] (раздел 17.0).

5. В разделе 17.0 [17] установлено следующее:

- приведенные значения пика (амплитуды) и длительности ВИН даны только для условий разомкнутой выходной цепи (холостого хода) генератора. Пиковое значение ВИН при подсоединении испытываемого оборудования может быть значительно ниже;
- проверка импеданса генератора может быть произведена при включении его на нагрузочный резистор с сопротивлением 50 Ом ($\pm 10\%$). При этом генератор должен обеспечить значение амплитуды ВИН, равное половине от указанного $\pm 10\%$;
- на каждый вход электропитания испытываемого оборудования, работающего при номинальном значении напряжения, подается серия положительных и отрицательных ВИН (50 имп./мин). Испытания повторяют для каждого режима работы или для каждой функции испытываемого оборудования. Соответствие заданных и фактических характеристик оборудования проверяют во время и после воздействия ВИН;
- для оборудования с большими значениями потребляемого тока по входу электропитания могут потребоваться другие методы испытаний, чтобы избежать насыщения трансформатора и т. п.

По результатам сравнения методик испытаний РЭА на устойчивость к воздействию ВИН, существующих в [18] и НТД по видам техники, можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. В [4] определено, что испытания проводят по методикам, установленным в ТУ на РЭА конкретного типа, а методика проведения испытаний РЭА на соответствие требованиям к качеству электроэнергии (в том числе на устойчивость к воздействию ВИН), изложенная в [18], является лишь рекомендуемой.
2. Анализ методики проведения испытаний РЭА на устойчивость к воздействию ВИН в [18] показал, в целом, ее непригодность для практической проверки современной РЭА по ряду причин, изложенных выше.
3. Анализ НТД по видам техники на наличие в них методик проведения испытаний устойчивости РЭА к воздействию ВИН выявил следующее:
 - в [2, 7, 8, 9, 11, 12, 15] искомая методика проверки или хотя бы ссылка на [18] отсутствует;
 - [13] предусматривает два вида испытаний на устойчивость РЭА к воздействию ВИН: испытания отдельных образцов ТС и испытания систем, включающих ТС в качестве элементов, т. е. аппаратный и системный уровни помехоустойчивости, различающиеся степенью жесткости испытаний. В этом же НТД, применимом при электропитании стационарной или передвижной РЭА класса 1 от Госэнергосети общего назначения, определены вполне выполнимые и четкие порядок и условия проведения испыта-

ний, существенно отличающиеся от рекомендуемых в [18];

- в [14] приведена технология проведения проверки, ориентированная на специфику эксплуатации бортовой РЭА класса 2 и также отличающаяся от рекомендуемой в [18]. Несмотря на солидный возраст (издан почти четверть века назад) и необходимость введения ряда уточнений, [14] в качестве основы применяется с вариациями при испытаниях РЭА данного класса;
- в [15] установлено, что нормы и методы испытаний оборудования бортовых систем (РЭА класса 3) должны соответствовать применяемым для самолета или вертолета квалификационным требованиям [17] (раздел 17.0);
- в [17] (раздел 17.0) учтены специфические особенности функционирования бортовой РЭА класса 3, практически применяемые ее создателями. Данный НТД, как и рассмотренные выше по конкретным видам техники, не соответствует рекомендациям [18] (выбирай что хочешь!).

На основании вышеизложенного представляется мнение автора данной статьи, сформированное в виде общих выводов и предложений по проблеме в целом.

Выводы

1. Из всех регламентируемых в НТД видов СЭВ по цепям электропитания РЭА ВИН являются наиболее сложно априорно учитываемыми по характеру возникновения, оценке значения их энергии на входе электропитания РЭА и свойственным им характеристикам. Это в значительной степени затрудняет их нормирование, выбор наиболее подходящей методики проверки РЭА на устойчивость к воздействию ВИН и создание адекватных имитационных ТС, реально обеспечивающих проведение объективной проверки.
2. Относительно видов, формы, значений параметров ВИН и требований к средствам их имитации в различных НТД практически отсутствует гармонизация. Так, в основном НТД ([4]) заданы требования к нормам качества электроэнергии на входах питания РЭА классов 1–5, с учетом которых она разработана и при которых обеспечивает заданные в ТТЗ (ТЗ) характеристики. В этом же [4] установлено, что электроэнергией РЭА обеспечивают автономные источники (преобразователи) и СЭС. В этих случаях показатели и нормы качества электроэнергии на их выходах должны соответствовать установленным в [7] и стандартам СЭС по видам техники. При питании РЭА от Госэнергосети общего назначения она должна сохранять работоспособность при нормах качества электроэнергии, установленных в [6].
3. ВИН, возникающие в цепях стационарных или автономных СЭС с ИЭ переменного тока, по своей сути, являются для питаемых от них потребителей электроэнергии (преимущественно РЭА) одним из наиболее опасных видов СЭВ. Степень воздействия ВИН на РЭА

зависит от значительного ряда факторов, в т. ч. от характера происхождения ВИН (техногенного или природного) и их электрических характеристик, путей проникновения ВИН к РЭА и их электрических параметров, физической реализации электрических цепей, наличия в этих цепях и в РЭА защитных устройств (элементов), снижающих влияние энергии ВИН до безопасных нормированных уровней. В случае недостаточного внимания со стороны создателей и потребителей РЭА к данной проблеме с определенными значениями вероятности могут существовать риски возникновения в РЭА сбоев в работе, необратимых отказов, повреждений, вплоть до полного разрушения.

4. Аналогичная проблема существует и в цепях с ИЭ постоянного тока, питающих РЭА всех классов по ГОСТ РВ 20.39.301. Однако на практике наибольшие трудности в ее решении возникают в одно- и трехфазных цепях с ИЭ переменного тока для классов 1–3 РЭА. Причинами этого являются их значительные протяженности, большое количество подключенных к ним разноплановых потребителей, существенно большие значения электроэнергии, потребляемой как каждым из них, так и в совокупности, более сложная электромагнитная обстановка на объекте применения РЭА.

5. Для проведения качественных проверок и исследований СЭВ в виде ВИН на РЭА обязательным условием является наличие следующей триады:

- адекватные нормы качества электроэнергии в части ВИН, определенные по результатам периодически проводимого мониторинга;
- имитационные ТС, адаптированные к проверяемым объектам и воспроизводящие виды и значения параметров ВИН, установленные по результатам мониторинга на текущий период времени;
- адекватные и периодически обновляемые (при необходимости) методы проведения проверок и исследований.

Первая составляющая данной триады является наиболее важной, ибо ее отсутствие или несоблюдение сводит на нет обе другие, превращая их в формальные процедуры, не создающие полезного эффекта. Более того, в этом случае имеется вероятность возникновения существенного ущерба деятельности, обеспечиваемой в процессе функционирования РЭА, вследствие априорного признания ее отвечающей заданным требованиям устойчивости к воздействию ВИН, которые по факту не соответствуют реальной электромагнитной обстановке на объекте применения РЭА.

Предложения

1. Для каждого класса РЭА и групп в пределах этих классов должны быть практически определены и заданы в ТЗ (ТУ) характерные для условий ее применения данные о ВИН, воздействующих по цепям электропитания, с обновлением через установленный период времени.

2. Для составных частей (устройств) систем и комплексов РЭА в ТЗ (ТУ) должны быть установлены степени жесткости испытаний, соответствующие аппаратурному и системному уровням проверки на устойчивость к воздействию ВИН по цепям электропитания (аналогично определенным в [13]).
3. При проведении аппаратурного уровня проверки РЭА задавать значение амплитуды испытательного ВИН, не превышающее значение прочности изоляции в условиях воздействий высоковольтных напряжений (см. [13], с применением, например, имитатора ИГМ8.1 НПФ «Прорыв»).
4. Значение выходного сопротивления ИВИН следует определять с учетом конкретных параметров ИЭ, условий возникновения ВИН в цепях электропитания и их воздействия на устойчивость РЭА. ИВИН должен обеспечивать любое из двух базовых значений выходного сопротивления — 2 Ом и 50 Ом (выбор — на усмотрение пользователя!).
5. Форму и значения параметров ВИН, воспроизводимых ИВИН, контролировать на холостом ходу непосредственно на выходе последнего.
6. Форму и значения параметров импульса тока, воспроизводимого ИВИН, контролировать при коротком замыкании выхода последнего.
7. Заданное расположение имитируемого ВИН относительно начала периода синусоиды фазного напряжения ИЭ контролировать на выходе типового (индуктивно-емкостного) устройства связи-развязки (УСР) при подключении ИЭ и выхода имитатора к соответствующим входам УСР.
8. В случае электропитания РЭА от многофазных ИЭ ИВИН должен обеспечивать возможность ввода ВИН как одновременно во всех фазах, так и в любой из них или в различных сочетаниях фаз (как кому нравится и необходимо!). При этом значения параметров и полярность импульсов, а также фазовый угол их ввода в каждую

из фаз ИЭ (СЭС) должны варьироваться в пределах установленных характеристик ИВИН.

9. При параллельном включении ИЭ и ИВИН с помощью типового УСР обеспечить возможность увеличения значения амплитуды ВИН до заданной нормы относительно мгновенного значения синусоиды напряжения ИЭ при заданном фазовом угле синусоиды напряжения.
10. При формировании последовательности (пачки) ВИН учитывать время, необходимое для установления нормального теплового режима элементов защиты на входе электропитания РЭА (например, для значений выходного сопротивления ИВИН 2 Ом и амплитуды ВИН до 4 кВ задается частота повторения ВИН не более одного в минуту).

Литература

1. А. В. Воронцов, Ю. Н. Либенко. Традиции и эволюции развития технических средств имитации видов и значений параметров качества входной электроэнергии РЭА // Практическая силовая электроника. 2017. №3(67).
2. ГОСТ РВ 51937-2002 «Системы электроснабжения передвижных радиоэлектронных объектов и объектов военной техники связи автономные. Типы. Технические требования».
3. ГОСТ Р 54130-2010 «Качество электрической энергии. Термины и определения».
4. ГОСТ РВ 20.39.309-98 «Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования».
5. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
6. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической

энергии в системах электроснабжения общего назначения».

7. ГОСТ В 23653-79 «Источники и преобразователи электрической энергии автономных систем электроснабжения средств военной техники. Нормы качества электрической энергии».
8. ГОСТ В 21134-75 «Системы электроснабжения средств военной техники автономные. Нормы качества электрической энергии».
9. ГОСТ В 21999-86 «Системы электроснабжения военных гусеничных машин. Нормы качества электрической энергии и методы контроля».
10. ГОСТ В 26341-84 «Системы электроснабжения средств военной техники. Термины и определения».
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 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».
14. 14.326.023М «Методика проверки электрооборудования». ЦНИИСЭТ, 1992 г.
15. ГОСТ Р 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии».
16. ГОСТ 19705-89 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии».
17. 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». 2004 г.
18. ГОСТ РВ 20.57.310-98 «Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия конструктивно-техническим требованиям».