

# Регламентированные методы проверки РЭА

## на воздействие изменений значений параметров качества электроэнергии

**Данная публикация является продолжением статьи с аналогичным названием, напечатанной в журнале «Силовая электроника» № 5 за 2019 год, в которой проведен анализ методов проверки РЭА на воздействие изменений значений параметров качества электроэнергии (ПКЭ), рекомендованных в [1]. Там же выражено отношение авторов статьи к большинству этих рекомендаций с точки зрения их реализации, а также рассмотрен ряд вопросов, возникающих в ее процессе.**

**Юрий Либенко  
Алексей Воронцов**

В НТД [2], устанавливающем требования к видам и значениям ПКЭ для РЭА всех основных (с 1 по 5) классов РЭА, а также рекомендательный статус [1], разработчикам РЭА предоставлена возможность проводить ее испытания на соответствие требованиям [2] в части ПКЭ по методикам, установленным в ТУ на РЭА конкретного типа. В результате появился ряд НТД, близких по статусу и уровню детализации к отраслевым стандартам бывшего СССР. В них был учтен ряд специфических особенностей РЭА в различных направлениях ее применения, особенно авиационного и морского, а также на подвижных объектах наземного базирования.

Эти особенности рассмотрены в данной статье с примечаниями авторов в виде рекомендаций по целесообразности и возможности их заимствования для тех направлений применения РЭА, в которых регламентированные методы являются, мягко говоря, менее эффективными или вовсе отсутствуют.

Начнем с [3], приняв его к рассмотрению не столько по вышеупомянутой причине, сколько в силу его специфики. Несмотря на простоту методов испытаний и применяемого в них оборудования, весьма значительная часть этого небольшого документа содержит подробные текстовые и графические сведения, относящиеся к проверке качества вырабатываемой объектом электроэнергии. Для сравнения отметим, что в большинстве других НТД по видам техники, содержащих требования к видам и значениям ПКЭ [4–7], методы проверки ПКЭ СЭС либо отсутствуют вообще, либо в них (то есть в НТД — упомянуты

ранее) нет даже ссылки на другие, взаимосвязанные НТД. Все эти «национальные» особенности создают определенный дискомфорт разработчикам РЭА и заставляют их решать эту задачу по методу «кто во что горазд» в сочетании с изобретением различных вариантов обхода некоторых обязательных проверок РЭА в части ПКЭ по причине «отсутствия соответствующего оборудования» или с упрощением регламентированных методов. Все это приводит к одному результату — снижению качества выпускаемой продукции, что нередко вызывает серьезные последствия.

Возвращаемся к анализу [3]. Несмотря на простоту самой СЭС объектов, обеспечивающей для всех их функциональных устройств только один номинал напряжения электропитания постоянного тока — 27 В (по современным понятиям — шину постоянного тока), методы проверки параметров качества этого напряжения являются минимально достаточными, даже исходя из перечня требований [1]: значения напряжения в установленном режиме, а также коэффициента его пульсаций. Из полного состава характеристик электроэнергии из [1] отсутствуют только требования и методика их проверки в части импульсов напряжения, но они имеются в [1, 2] для РЭА класса 1 соответствующего вида техники (отмечены как \*\*).

В [3] также приведены:

- электрическая структурная схема испытаний с указанием ряда специфических подробностей входящих в нее компонентов;
- предельные значения суммарной погрешности измерений определяемых показателей и параметров режима;

- подробная табличная и графическая иллюстрация предельных значений переходных отклонений напряжения в зависимости от длительности процесса для различных режимов работы СЭС;
- подготовительные операции, проведение которых необходимо для проведения испытаний;
- детализированные методики определения ряда характеристик качества электроэнергии с приведением необходимых формул для вычисления косвенных результатов проверок;
- примеры обработок полученных осциллограмм напряжения в переходных процессах;
- указание ряда ступеней и значений для них тока в эквиваленте электрической нагрузки.

Большинство видов и значений ПКЭ СЭС общего назначения установлено в [8]. Связанный с ним [9] дополняет его сведениями для проверки на устойчивость РЭА к наиболее опасному регламентированному виду воздействия — высоковольтным импульсам напряжения (ВИН) микросекундной длительности большой энергии, возникающим в стационарных наземных СЭС общего назначения, являющихся основным источником электроэнергии (ИЭ) для наземных стационарных объектов, а также для подвижных наземных объектов в стояночном режиме их применения при наличии возможности подключения к этим СЭС. Подтверждением повышенной опасности ВИН служит наличие ряда специализированных НТД, содержащих требования к их характеристикам, а также методы испытаний устойчивости различной РЭА к их воздействию.

НТД [9] является обязательным для применения и устанавливает:

- причины и особенности возникновения и появления в цепях электропитания ВИН микросекундной длительности большой энергии;
- подробные сведения о формах и параметрах ВИН;
- структуры испытательных генераторов и электрические параметры их основных элементов;
- способы ввода ВИН в испытываемые цепи РЭА, подключаемой к одно- и трехфазным ИЭ;
- способы и характеристики устройств связи — развязки (УСР) генераторов ВИН;
- степени жесткости испытаний в зависимости от условий эксплуатации РЭА на различных объектах;
- виды и особенности, а также технические характеристики испытательного оборудования и его составных частей;
- особенности реализации рабочих мест для проведения испытаний;
- методы испытаний РЭА на устойчивость к воздействию ВИН;
- пояснения и рекомендации по различным вопросам создания и применения испытательного оборудования.

Практически полезными в [9] являются подробные иллюстрации и поясне-

ния способов формирования ВИН, ввода их в испытываемые цепи РЭА и защиты самого ИЭ (СЭС) от воздействия, формируемого ВИН. Здесь и далее на рисунках ОП — объект проверки.

На рис. 1 приведена схема рабочего места для испытаний РЭА, питающейся от однофазной СЭС переменного тока (или от ИЭ постоянного тока), при подаче ВИН по симметричному пути распространения (между токонесущими проводами).

На рис. 2 изображено то же при подаче ВИН по несимметричному пути распространения (между каждым из токонесущих проводов и проводом цепи защитного заземления).

На обоих рисунках показана структура генераторов (имитаторов) ВИН, состоящая из двух основных функциональных частей:

- формирователя ВИН (ФВИН);
- УСР.

На рис. 2 дополнительно введен коммутатор выхода ФВИН.

Схема и состав основных элементов ФВИН приведены на рис. 3.

Принцип его функционирования заключается в последовательном выполнении двух операций:

- заряда емкостного накопителя ( $C_H$ ) через токоограничивающий резистор  $R_3$  до заданного уровня напряжения (амплитуды ВИН);

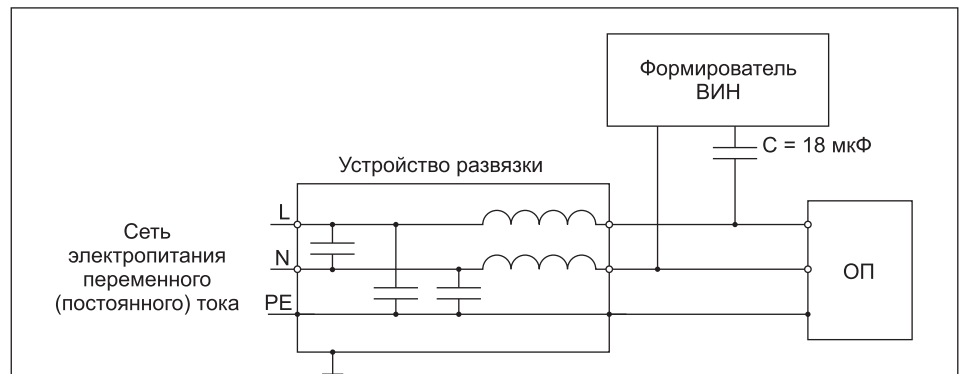


Рис. 1. Схема рабочего места для испытаний РЭА, питающейся от однофазной СЭС переменного тока (или от ИЭ постоянного тока), при подаче ВИН по симметричному пути распространения (между токонесущими проводами)

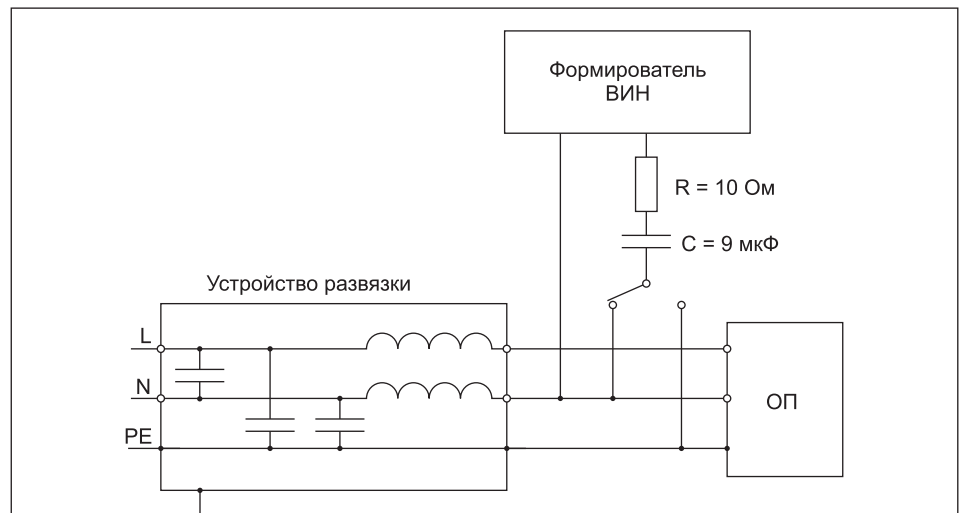


Рис. 2. Схема рабочего места для испытаний РЭА, питающейся от однофазной СЭС переменного тока (или от ИЭ постоянного тока), при подаче ВИН по несимметричному пути распространения (между каждым из токонесущих проводов и проводом цепи защитного заземления)

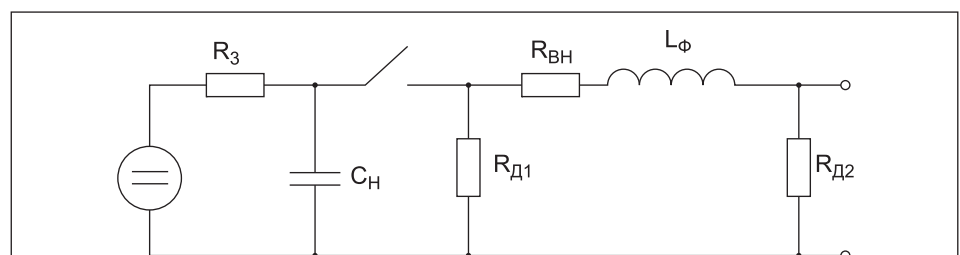


Рис. 3. Схема и состав основных элементов ФВИН

- разряда емкостного накопителя при замыкании ключа в выходную цепь ФВИН с одновременным формированием его временных параметров (длительность ВИН, длительность фронта ВИН) с помощью элементов  $R_{д1}, R_{д2}, L_{ф}$  и внутреннего сопротивления  $R_{вн}$ .

На рис. 4 приведена схема рабочего места для испытаний РЭА, питающейся от трехфазной СЭС переменного тока, при подаче ВИН по симметричному пути распространения (между токонесящими проводами).

На рис. 5 приведено то же при подаче ВИН по несимметричному пути распространения (между каждым из токонесящих проводов и проводом цепи защитного заземления).

Другой полезной информацией, которую можно получить из вышеприведенных вариантов схем рабочих мест, является иллюстрация наиболее часто применяемого на практике спо-

соба реализации УСР — цепь ввода ВИН подключается параллельно цепи электропитания ОП. Подключение реализуется через элементы связи в виде конденсатора (для симметричных путей распространения ВИН) или конденсатора с последовательно включенным резистором (для несимметричных). Функцию частичной развязки ИЭ (СЭС) с ФВИН выполняет одно- или трехфазный индуктивно-емкостной фильтр, затухание которого для каждой фазы рассчитывается исходя из следующих условий (текст с терминологией из [9]):

- *напряжение перекрестной помехи от испытательного импульса на сетевых входах устройства развязки для цепей, не подвергаемых воздействию, не должно превышать 15% максимального значения импульса применяемого испытательного напряжения;*
- *напряжение помехи от испытательного импульса на сетевых входах устройства развязки*

для цепей, подвергаемых воздействию, не должно превышать большего из двух значений: либо 15% максимального значения импульса применяемого испытательного напряжения, либо двойного амплитудного значения напряжения сети. При этом сеть питания и ИТС (ОП. — Прим. авторов) должны быть отсоединены от устройства (по-видимому, для обоих условий. — Прим. авторов)

- Недостатками такого УСР являются:
- неполное ограничение амплитуды ВИН в вышеуказанных цепях, что вызывает необходимость применения в них более высоковольтных элементов;
  - необходимость увеличения значения напряжения ФВИН на:
    - текущее значение напряжения в цепи электропитания РЭА постоянного тока;
    - мгновенное значение (с учетом фазового угла синусоиды в каждой из фаз) напряжения в цепи электропитания РЭА переменного тока с целью достижения соответствия значения амплитуды ВИН регламентируемому значению (см. первую часть статьи в [10]).

Приведем из [9] (в принятой в нем терминологии) другие практически полезные, по мнению авторов, пояснения видов испытаний на устойчивость к ВИН (справочное «Приложение Б», раздел Б2):

«Различают два вида испытаний на устойчивость к МИП (они же — ВИН. — Прим. авторов): испытания отдельных образцов ТС (технических средств. — Прим. авторов) и испытания систем, включающих ТС в качестве элементов. Соответственно различают аппаратурный и системный уровень помехоустойчивости.

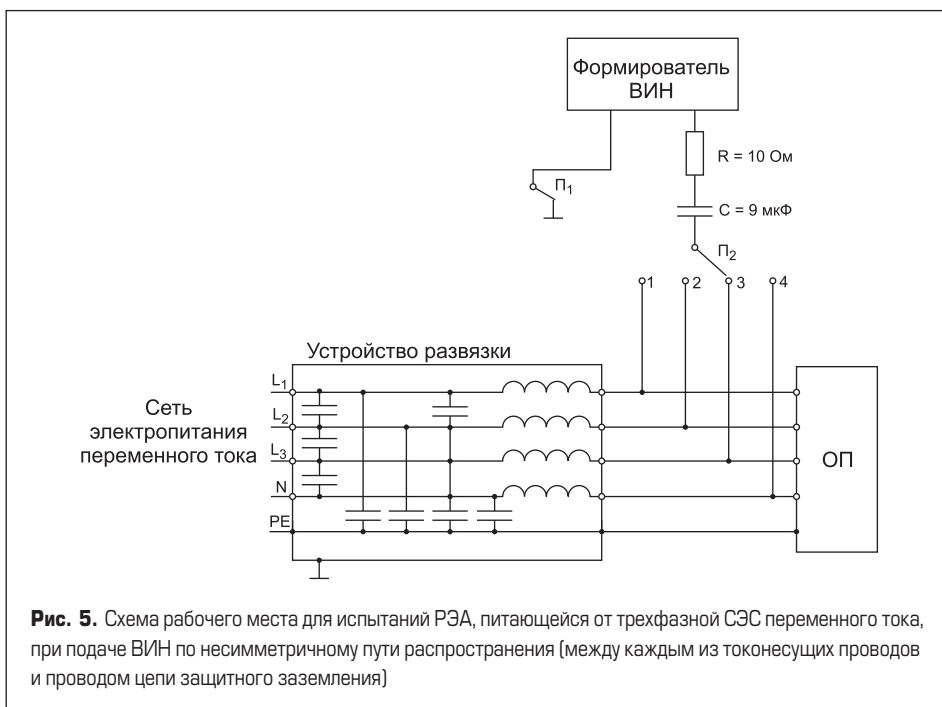
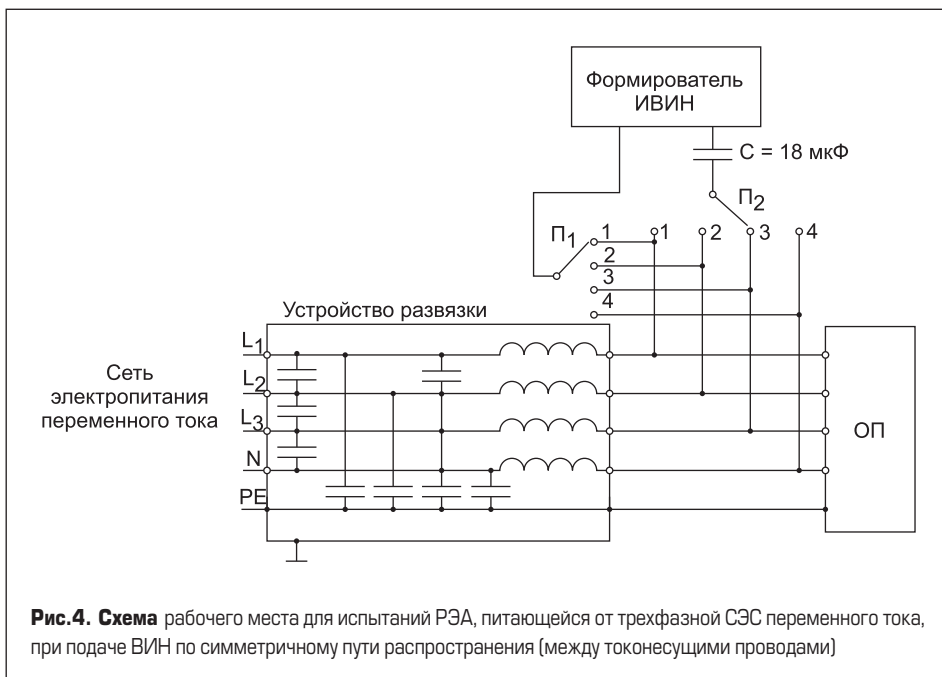
### Аппаратурный уровень помехоустойчивости

При оценке аппаратурного уровня помехоустойчивости испытания проводят в лабораторных условиях на отдельно взятом образце ТС. Уровни помех не должны превышать прочности изоляции ТС в условиях воздействия высоковольтных напряжений.

Позволим себе некоторые пояснения текста данного абзаца.

Под «уровнем помехи» (правильное применение термина «помеха» дано в первой части статьи) здесь понимается значение амплитуды ВИН (с длительностью не менее 50 мкс и амплитудой 0,5–4 кВ в зависимости от степени жесткости испытаний), подаваемого на ОП.

С другой стороны, есть два основных метода проверки электрической прочности изоляции электрических цепей. Первый изложен в [1] и заключается в подаче в проверяемую цепь в течение 1 мин испытательного напряжения синусоидальной формы с частотой 50 Гц и действующим (амплитудным) значением напряжения в зависимости от действующего (амплитудного) значения рабочего напряжения в этой цепи. Для наиболее применяемого в ОП диапазона действующих значений рабочего напряжения 0,2–0,5 кВ (амплитудное соответственно



0,28–0,7 кВ) действующее значение испытательного напряжения устанавливается в диапазоне 1,5–1,7 кВ (амплитудное соответственно 2–2,4 кВ). Данные значения испытательного напряжения не «дотягивают» примерно в 1,5–2 раза до регламентированного максимального значения амплитуды испытательных ВИН. Кроме того, в [1] имеется значительный ряд ограничений при проведении данной проверки.

Второй метод проверки электрической прочности изоляции силовых цепей ОП — импульсный, проводимый с применением специализированных генераторов ВИН с регулируемым значением амплитуды до 8 кВ и шагом 100 В, длительностью 50 мкс, формой — «спадающая экспонента», значением внутреннего сопротивления 500 Ом, обеспечивающим значение тока в проверяемой цепи, не приводящего к разрушению ее элементов. В генераторе имеется датчик тока, определяющий начало появления тока утечки в этой цепи, при котором дальнейшее увеличение амплитуды ВИН блокируется.

Смысл априорной проверки тем или иным методом (несмотря на их различие по воздействию на ОП) — определить предельное значение формируемого ВИН, после которого его дальнейшее повышение становится нецелесообразным из-за наступления электрического пробоя изоляции цепи и возрастает вероятность повреждения ОП.

### Системный уровень помехоустойчивости

Испытания проводят в лабораторных условиях, аналогичных условиям при испытаниях отдельно взятого образца ТС. Учитывая, что аппаратный уровень помехоустойчивости не гарантирует помехоустойчивости систем во всех случаях, при оценке системного уровня помехоустойчивости имитируют условия установки ТС в составе системы в месте эксплуатации. Имитация условий установки включает применение средств защиты от помех (разрядников, варисторов, экранов и т. п.) и соединительных кабелей реальных типов и длин. Основное внимание при испытаниях уделяется имитированию условий установки ТС с максимальным приближением к эксплуатационным.

В этом случае могут быть применены более высокие степени жесткости испытаний при условии, что энергия МИП должна быть ограничена за счет использования средств защиты от перенапряжений.

При испытаниях с целью оценки системного уровня помехоустойчивости необходимо также подтвердить, что вторичные эффекты, вызванные срабатыванием средств защиты (изменения формы сигналов, режимов работы, величин напряжений и токов), не оказывают нежелательного воздействия на ТС.

Есть в [9] и занятые положения. Например, начиная с 1999 г. (год выхода данной редакции ГОСТ) в нем упоминается наличие другого варианта УСР:

«Индуктивная связь для цепей электропитания (на рассмотрении)». Не дождавшись за какие-то 20 лет результатов его применения, приведем вариант такой связи далее по тексту из другого НТД.

Рассмотрим следующий «отраслевой» НТД — [11]. Методик проведения испытаний в нем нет, но зато есть ссылка на [12] в части импульсов напряжения.

В [12] имеются требования к форме, полярности, амплитуде, длительности импульса и его фронта и другие необходимые данные, а также имеется типовая структура испытательной установки для формирования импульсов напряжения, приведенная на рис. 6.

Положительным свойством данной схемы является реализация в ней того самого способа индуктивного ввода импульсов в цепь электропитания ОП, длительное отсутствие которого упомянуто выше. Для регламентированной в [12] частоты следования ВИН 50 импульсов в минуту (0,8 Гц) трансформатор является наиболее удобным передаточным элементом, одновременно решающим задачу полной развязки выходной цепи ФВИН и цепи электропитания ОП.

В [12] относительно рассматриваемой схемы сделано примечание о том, что могут быть использованы и другие методы генерирования импульсов, если их форма будет соответствовать приведенной в этом НТД, а также имеются практически полезные положения (даны в редакции, принятой в НТД):

«Сопротивление источника импульса напряжения должно составлять  $50 \text{ Ом} \pm 10\%$ . Указанный пик напряжения и длительность даны только для условий разомкнутой цепи. Пиковое значение напряжения при подсоединенном испытываемом оборудовании может быть значительно ниже».

«Проверка импеданса источника может быть произведена при его включении на нагрузочный резистор с сопротивлением 50 Ом. При этом источник должен развивать напряжение, равное половине от указанного напряжения  $\pm 10\%$ ».

Сразу отметим здесь:

а) несоответствие значения внутреннего сопротивления источника импульсов значению этого сопротивления в [1 и 2], то есть

(50 Ом  $\pm 10\%$ ) и (50  $\pm 10$ ) Ом все же отличаются для практической реализации;

б) неоднозначность в части значения напряжения, «развиваемого» источником импульсов. Более четким и однозначным здесь было бы указание измерить напряжение импульса на нагрузочном резисторе, которое должно быть равно половине от установленной амплитуды импульса с допустимым отклонением не более  $\pm 10\%$ .

Существует и другой НТД [13], определяющий требования, нормы и методы испытаний РЭА авиационного применения.

Он содержит большой и подробный материал для проведения испытаний РЭА с электропитанием от СЭС постоянного и переменного одно- и трехфазного тока, совместно с [12] учитывающих регламентированные изменения значений ПКЭ, установленных в [2].

Для испытаний устойчивости авиационной РЭА к воздействию изменения значений ПКЭ различных видов возможно применение структурных схем рабочих мест, имеющих в [1], с уточнением специфики проверок, приведенных в [12 и 13].

РЭА для морских объектов также может быть испытана на устойчивость к воздействию изменения значений ПКЭ различных видов по методикам, приведенным в [1], но ее устойчивость к воздействию импульсных коммутационных перенапряжений (ИКП), наиболее специфичных для морских объектов, должна испытываться дополнительно по методике, приведенной в [14].

В связи с наличием на морских объектах основных видов СЭС — переменного трехфазного тока (380 В/50 Гц), переменного однофазного тока (220 В/50 Гц) и постоянного тока (175–320 В) — в [14] для каждой из них имеется вариант установки для испытаний устойчивости РЭА к воздействию ИКП. Так же, как и в других вышеприведенных НТД, содержащих методики и схемы рабочих мест для испытаний устойчивости РЭА к воздействию ВИН, в [14] рассмотрены варианты подачи ИКП как по симметричному пути распространения, так и по несимметричному. Для сокращения объема статьи приведем лишь первый вид схем установок для испытаний устойчивости РЭА к воздействию ИКП на объектах с электропитанием от СЭС одно-

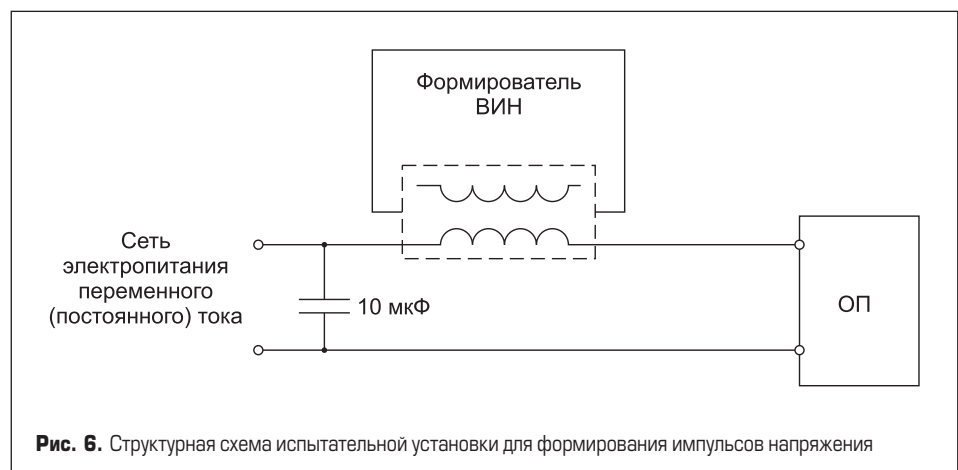


Рис. 6. Структурная схема испытательной установки для формирования импульсов напряжения

фазного переменного (рис. 7) и постоянного (рис. 8) тока.

В вышеприведенных схемах отметим следующее:

- в обеих схемах в разрядной цепи отсутствует классический последовательно включенный резистор, определяющий внутреннее сопротивление генератора ИКП. Разряд накопителя выполняется на резистор (R), на котором и образуется импульс;
- для защиты ИЭ от воздействия ИКП в УСР на схеме установки с электропитанием ОП от однофазной СЭС переменного тока в каждый из токонесущих проводов силовой цепи включен дроссель. Для ввода ИКП в цепь электропитания ОП применяется конденсатор;
- для защиты ИЭ от воздействия ИКП в УСР на схеме установки с электропитанием ОП от СЭС постоянного тока, а также для ввода ИКП в цепь электропитания ОП применяется «вилка» диодов (D), что реализуется для формирования ИКП только положи-

тельной полярности. Для получения ИКП отрицательной полярности в схему должен быть введен дополнительный коммутатор и другой вариант включения диодов.

Основное различие в обоих видах высоковольтных импульсов заключается в природе возникновения последних, отраженной в их названии, а именно — в результате мощных коммутационных процессов (штатных или аварийных), часто возникающих на морских подвижных объектах. Менее принципиальное различие между ВИН и ИКП содержится в расширенном ряде регламентированных значений амплитуд последних (600, 800, 1000 В), а более принципиальное — в ряде регламентированных значений их длительности (1, 10, 100 мкс — для СЭС переменного тока и 1, 10, 100, 2000 мкс — для СЭС постоянного тока), причем большему значению амплитуды ИКП соответствует большее значение его длительности. В этом плане очевидно, что в ИКП, по сравнению с ВИН, содержится большее значение энергии (1000 В/2000 мкс

против 1000 В/10 мкс из [2]). Кроме того, ИКП реально поступают на вход электропитания РЭА пачками, что значительно усиливает эффект теплового воздействия на элементы за счет его интегрального характера.

### Литература

1. ГОСТ РВ 20.57.310-98 «Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия конструктивно-техническим требованиям».
2. ГОСТ РВ 20.39.309-98 «Комплексная система общих технических условий. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования».
3. ГОСТ В 21999-86 «Системы электроснабжения военных гусеничных машин. Нормы качества электрической энергии и методы контроля».
4. ГОСТ В 21134-75 «Системы электроснабжения средств военной техники автономные. Нормы качества электрической энергии».
5. ГОСТ В 23653-79 «Источники и преобразователи электрической энергии автономных систем электроснабжения средств военной техники. Нормы качества электрической энергии».
6. ГОСТ РВ 2090-004-2008 «Системы электроэнергетические корабельные. Общие технические требования».
7. ГОСТ РВ 2090-006-2008 «Устройства и изделия электротехнические корабельные. Общие технические требования».
8. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
9. 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».
10. Либенко Ю., Воронцов А. Регламентированные методы проверки РЭА на воздействие изменений значений параметров качества электроэнергии // Силовая электроника. 2019. № 5.
11. ГОСТ Р 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии».
12. «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».
13. «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».
14. «14.326.023М Методика проверки электрооборудования (ЦНИИСЭТ, 1992 г.)».

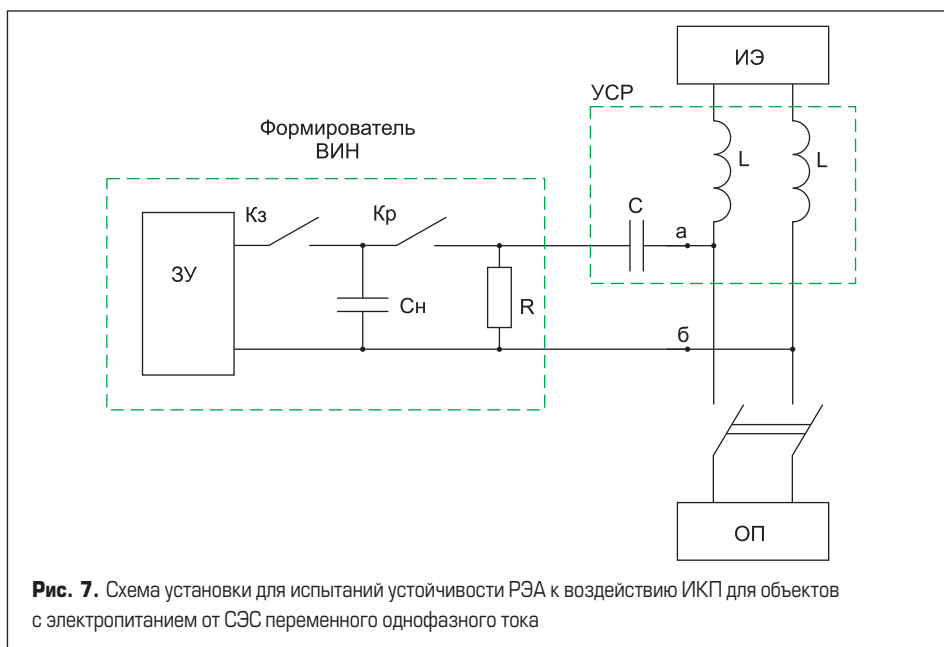


Рис. 7. Схема установки для испытаний устойчивости РЭА к воздействию ИКП для объектов с электропитанием от СЭС переменного однофазного тока

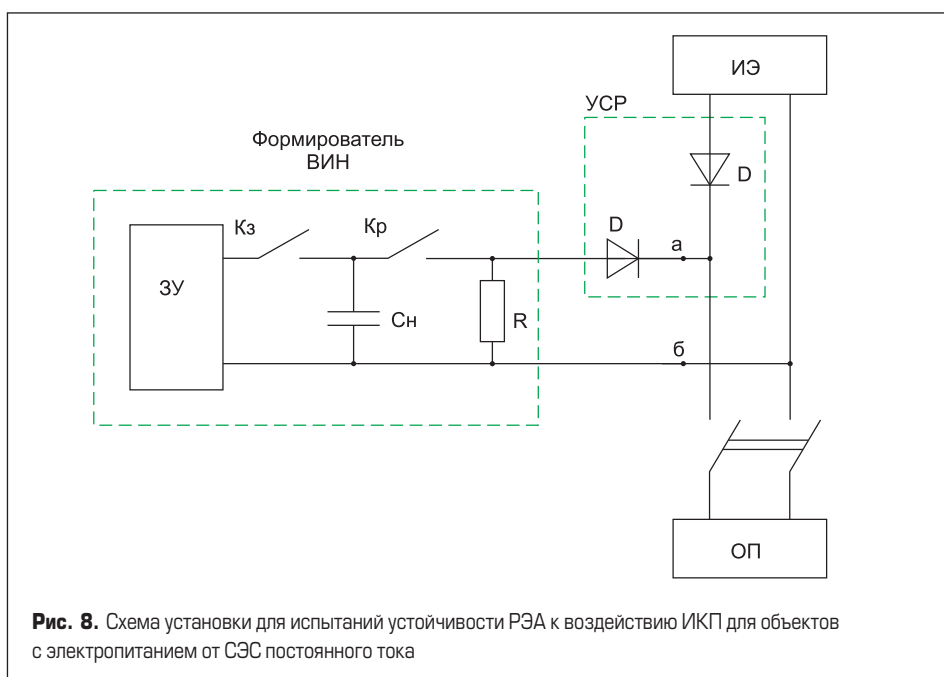


Рис. 8. Схема установки для испытаний устойчивости РЭА к воздействию ИКП для объектов с электропитанием от СЭС постоянного тока