

В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук; **Ю.С.НЕМЧЕНКО**;
А.И.ТАНЦУРА; **Ю.Н.ГИРКА**; НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОНА РЭМП

В статті розглядаються фактори, які можуть мати вплив на вихідні характеристики Еталона РЕМП. Експериментально досліджений ступінь їх впливу на амплітудно-часові параметри Еталона РЕМП. Зроблені висновки та запропоновані шляхи зменшення їх впливу.

In this article, factors which can influence output characteristics of primary REMP-standard are considered. The extent of their influence on amplitude and time parameters of primary REMP-standard was experimentally investigated. Conclusions are made, the ways of decreasing of their influence are proposed.

Постановка задачи. В соответствии с первым этапом бюджетной темы «Эталон-2» необходимо было экспериментально определить нестабильность выходных параметров Эталона РЭМП за длительный период эксплуатации.

Ниже приведены результаты определения степени влияния различных факторов на стабильность выходных характеристик Эталона РЭМП.

Согласно требованиям на разработку и создание Эталона РЭМП [1] нестабильность выходных характеристик Эталона не должна превышать 1 % в течение года.

Под нестабильностью выходных характеристик Эталона РЭМП понимают относительное отклонение его выходных параметров от величин, определенных при метрологической аттестации. Выходными параметрами Эталона являются форма и амплитудно-временные параметры (АВП) импульсов напряженности электрического и магнитного полей в рабочем объеме полосковых линий ПЛ-24 и ПЛ-48. Нестабильность можно выразить формулами для амплитуды $v_{E_{\max}}$ и времени нарастания импульса $v_{T_{\phi}}$:

$$v_{E_{\max}} = \frac{E_{\text{тек}}^{\max} - E_{\text{ат}}^{\max}}{E_{\text{ат}}^{\max}} \cdot 100\% ; \quad (1)$$

$$v_{T_{\phi}} = \frac{T_{\text{тек}}^{\phi} - T_{\text{ат}}^{\phi}}{T_{\text{ат}}^{\phi}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где $E_{\text{тек}}^{\max}$, $T_{\text{тек}}^{\phi}$ – текущие значения амплитуды и времени нарастания импульса;

$E_{\text{ат}}^{\max}$, $T_{\text{ат}}^{\phi}$ – значения амплитуды и времени нарастания импульса, определенные при метрологической аттестации и указанные в свидетельстве о

метрологической аттестации на Эталон.

На рис. 1 приведена структурная схема Эталона РЭМП [2], а на рис. 2 – пояснительная схема построения обоих подэталонов: ЭНИ и ЭСИ.

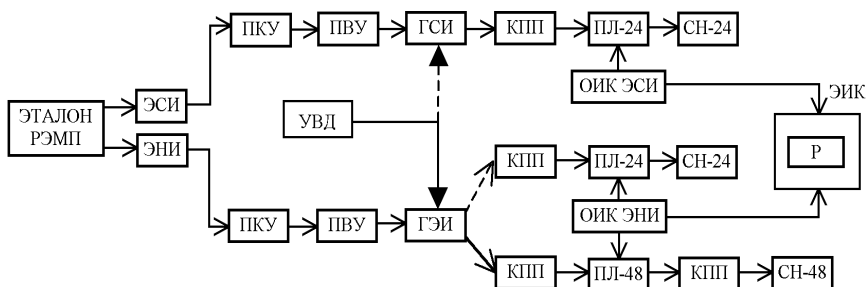


Рисунок 1 – Структурная схема Эталона РЭМП

ЭСИ – эталон субнаносекундных импульсов ЭМП; ЭНИ – эталон наносекундных импульсов ЭМП; ПКУ – пульт контроля и управления; ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; ГСИ – генератор ступенчатых импульсов; ГЭИ – генератор экспоненциальных импульсов; КПП – коаксиально-полосковый переход; ПЛ-24 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,24 м; ПЛ-48 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,48 м; СН – согласующая нагрузка; ОИК – образцовый измерительный комплекс; УВД- установка высокого давления; Р – регистраторы; ЭИК – экранированная измерительная кабина.

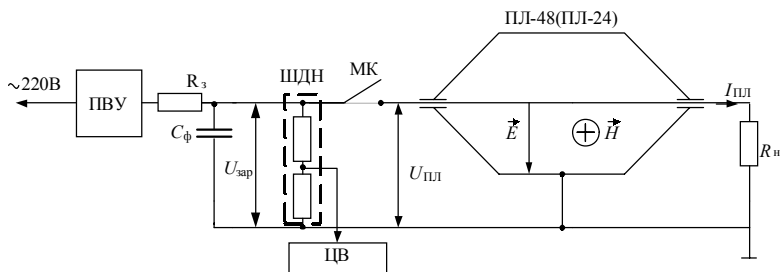


Рисунок 2 – Пояснительная схема Эталона РЭМП

ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; R_3 – зарядный резистор; C_ϕ – формирующий конденсатор; ШДН – штатный делитель напряжения; МК – механический коммутатор; ЦВ – цифровой вольтметр; R_n – сопротивление нагрузки; ПЛ-48(ПЛ-24) – полосковые линии с межэлектродным расстоянием 0,48 и 0,24 м

Из пояснительной схемы видно, что формирующий конденсатор C_ϕ (в ЭНИ – это конденсатор типа 50–3 УХЛ4 емкостью 3 мкФ, а в ЭСИ – это бухта кабеля типа РК50–17–17 длиной 50 м) заряжается от ПВУ до постоянных напряжений $U_{зар}$ от 1 до 50 кВ, после чего по команде с ПКУ механический коммутатор МК замыкается и C_ϕ через полосковую линию ПЛ (в ЭНИ – это ПЛ-48 с габаритами $5,7 \times 2,2 \times 1,7$ м, а в ЭСИ – ПЛ-24 с габаритами

6,7 × 1,2 × 1,47 м) на активную нагрузку $R_n = 50$ Ом, равную по величине волновому сопротивлению обоих ПЛ. При этом между электродами ПЛ распространяется плоская электромагнитная волна, электрическая и магнитная компоненты которой однозначно связаны с напряжением $U_{\text{ПЛ}}$ между электродами ПЛ, зарядным напряжением $U_{\text{зар}}$ на $C_{\text{ф}}$ и габаритами ПЛ в плоском сечении (см. рис. 3).

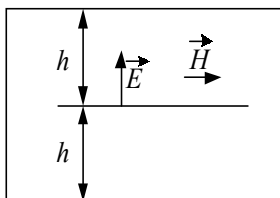


Рисунок 3 – Поперечное сечение полосковой линии

Из теории полосковых линий [3] известно, что максимальная напряженность электрического поля в согласованных ПЛ рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{ПЛ}}}{h}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ПЛ}}$ – напряжение между электродами ПЛ, кВ;

h – расстояние между электродами, м,

а напряженность магнитного поля в этом случае рассчитывается по формуле:

$$H_{\text{max}} = \frac{E_{\text{max}}}{Z_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{в}}$ – волновое сопротивление воздуха, $Z_{\text{в}} = 377$ Ом.

В Эталоне РЭМП зарядное напряжение измеряется штатным измерительным комплексом с высокой точностью. Он состоит из высоковольтного делителя напряжения (ШДН) и цифрового вольтметра типа В2–22 (ЦВ).

Напряженность электрического поля E_{max} измеряется штатным измерителем типа СПЕФВ–ЕК, который располагается в рабочей зоне полосковой линии и имеет очень стабильные метрологические характеристики, указанные в свидетельстве о его метрологической аттестации (СМА), выданной ВНИИОФИ Госстандарта РФ.

Таким образом, при каждом разряде Эталона РЭМП штатным измерительным комплексом контролируются основные и вспомогательные АВП Эталона, а именно $U_{\text{зар}}$ и $E_{\text{вых}}$, зависимость между которыми приведена на рис. 4 и 5.

Исходя из этого можно утверждать, что если стабильность работы Эталона близка к идеальной, то при постоянном зарядном напряжении напряженность электрического поля на выходе так же останется постоянной.

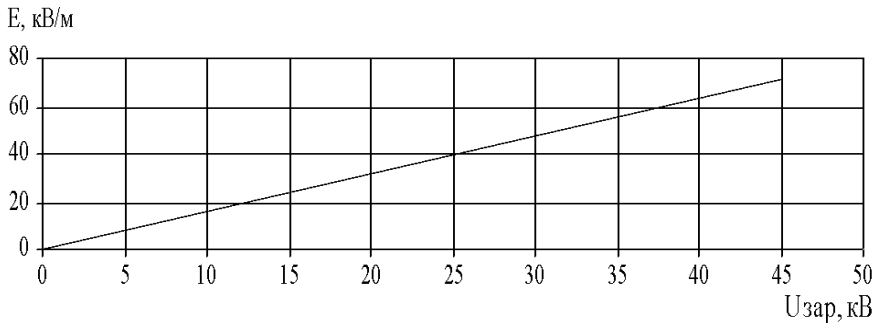


Рисунок 4 – График зависимости напряженности электрического поля в ПЛ-48 от зарядного напряжения ГЭИ

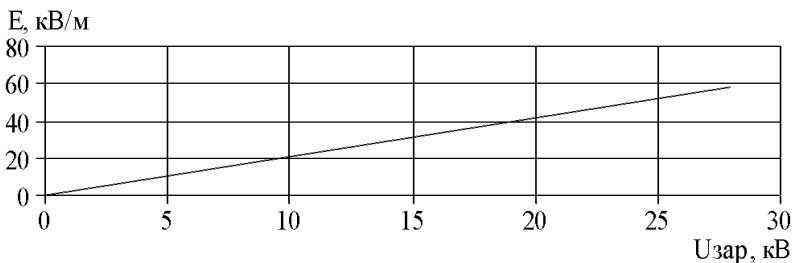


Рисунок 6 – График зависимости напряженности электрического поля в ПЛ-24 от зарядного напряжения ГСИ

В реальности же стабильность работы Эталона зависит от целого ряда факторов, а именно:

- от изменения температуры в помещении Эталона в период его работы;
- от текущих отклонений напряжения питания в период работы Эталона;
- от изменения параметров элементов Эталона, формирующих его АВП, в том числе их старения;
- от изменения механических и электрических характеристик коммутаторов Эталонов ЭСИ и ЭНИ;
- от изменения метрологических характеристик СПЕФВ–ЕК.

Рассмотрим степень влияния этих факторов на стабильность работы Эталона.

В соответствии с ТЗ диапазон рабочих температур Эталона составляет величину $t = 20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, что обеспечивается двумя штатными кондиционерами. Изменение температуры в помещении Эталона влияет на:

- геометрические размеры ПЛ, и в первую очередь на расстояние h , а следовательно, на $E_{\text{вых}}$ (см. рис. 3 и формулу (3));

- изменение коэффициента преобразования СПЕФВ–ЕК;
- рассогласование ПЛ из-за температурного изменения $R_{\text{н}}$;
- изменение давления газа в корпусе коммутаторов и т. д.

И хотя эти изменения температуры при работе Эталона очень малы (всего лишь ± 2 °С) и это влияние будет незначительным, все же мы должны экспериментально проверить влияние этого фактора на нестабильность $E_{\text{вых}}$.

Влияние изменения напряжения электропитания Эталона $U_{\text{пит}}$ более существенны, так как в схеме Эталона присутствует прямая зависимость между зарядным напряжением и напряжением питания. Так как в соответствии с ТЗ на Эталон $U_{\text{пит}} = 220\text{В} \pm 10\%$, то, если не принять меры по стабилизации питания, этот фактор будет весьма ощутимо влиять на стабильность работы Эталона.

Изменение параметров элементов у исправного Эталона (например, за счет старения) происходит очень медленно и может быть выявлено только при длительной эксплуатации Эталона, и в рамках кратковременных опытов не может быть обнаружено.

Изменение параметров элементов Эталона за счет изменения температуры окружающей среды в диапазоне $20^\circ \pm 2$ °С будет незначительным и практически не повлияет на АВП выходных импульсов Эталона.

Изменение давления газа в механических коммутаторах Эталона, по сравнению с рабочим давлением в 6,5 атм (например, его снижение) может привести, в первую очередь к снижению пробивного напряжения коммутаторов и при напряжениях близких к максимально возможному зарядному – к самоходу, что не позволит достичь верхней границы $E_{\text{вых}}$. Для исключения этого негативного фактора необходимо постоянно поддерживать требуемое давление газа в коммутаторах, для чего и существует в Эталоне РЭМП штатная система контроля и регулировки давления газа.

Изменение метрологических характеристик СПЕФВ–ЕК (в первую очередь коэффициента преобразования $K_{\text{пр}}$) может быть только от значительно (не менее 50 °С) перепада рабочих температур. Но учитывая, что этот перепад составляет всего лишь 4 °С, то изменение $K_{\text{пр}}$ будет незначительным.

Вышеприведенный анализ негативного влияния различных факторов на стабильность работы Эталона позволяет сделать вывод, что при экспериментальных исследованиях необходимо учитывать только разброс температуры окружающей среды и колебания напряжения питания.

На этой основе и были проведены эксперименты по поочередному определению зависимости $E_{\text{вых}} = f(\Delta t \text{ } ^\circ\text{C})$ и $E_{\text{вых}} = f(\Delta U_{\text{пит}})$.

Эксперименты проводились еженедельно в течение 6 месяцев (с октября 2006 г. по март 2007 г.) по следующей методике:

- 1) измерение $E_{\text{вых}}$ при температурах 18 °С и 22 °С и $U_{\text{пит}} = \text{const}$;
- 2) измерение $E_{\text{вых}}$ при напряжениях питания 200 В, 220 В, 240 В и $t = 20$ °С;
- 3) эксперименты проводились при минимальном, максимальном и сред-

нем зарядном напряжении;

4) эксперименты проводились на обоих подэталолах: ЭНИ и ЭСИ;

5) каждое самостоятельное измерение повторялось по 10 раз;

6) измерению в каждом из импульсов подвергались только напряженность электрического поля и время нарастания его фронтальной части.

Измерение зависимости $E_{\text{вых}} = f(\Delta t \text{ } ^\circ\text{C})$

Зависимость $E_{\text{вых}} = f(\Delta t \text{ } ^\circ\text{C})$ определяется при $t_{\text{min}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $t_{\text{max}} = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$. На рис. 7 и 8 приведены типовые осциллограммы выходных импульсов электрического поля в ПЛ-48 и ПЛ-24 при максимальном, минимальном и среднем зарядном напряжении. При этом в ручном режиме поддерживалось одинаковое для всех 10 импульсов в пачке текущее зарядное напряжение по штатному цифровому вольтметру.

Из этих осциллограмм видно, что из-за наличия на вершине импульса наложенных колебаний однозначная расшифровка $E_{\text{вых}}$ и $T_{\text{ф}}$ затруднительны, поэтому мы провели аппроксимацию импульсов по методике, изложенной в [4]. Типовая осциллограмма $E_{\text{вых}}$ в этом случае представлена на рис. 9.

Одним из вариантов определения времени нарастания $E_{\text{вых}}$ является определение его между уровнями 0,1 – 0,8 от максимальной амплитуды импульса, так как эта часть импульса не захватывается наложенными на него колебаниями и очень легко поддается расшифровке.

Максимальная амплитуда импульса электрического поля $E_{\text{вых}}^{\text{max}}$ определяется по формуле:

$$E_{\text{вых}}^{\text{max}} = \frac{U_{\text{ЭО}}^{\text{max}}}{K_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{ЭО}}^{\text{max}}$ – напряжение на выходе СПЕФВ–ЕК, В;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования СПЕФВ–ЕК, берется из свидетельства о метрологической аттестации на него, В(В/м).

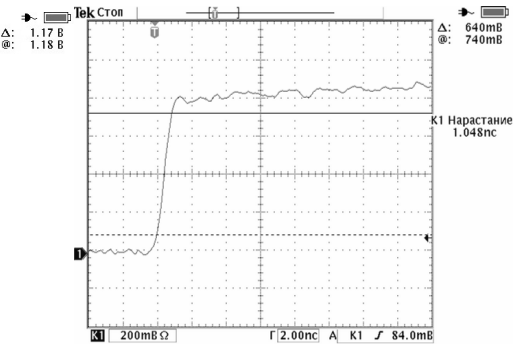
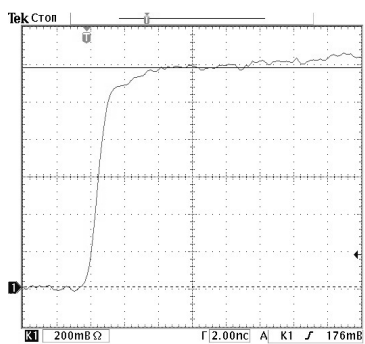
Длительность фронта воспроизводимых импульсов напряженности электрического поля между уровнями 0,1 – 0,9 от амплитуды составляет:

– для ПЛ-24 – $(0.66 \pm 0,03)$ нс;

– для ПЛ-48 – $(9,5 \pm 0,3)$ нс.

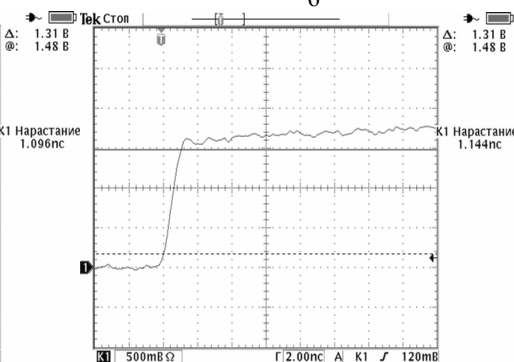
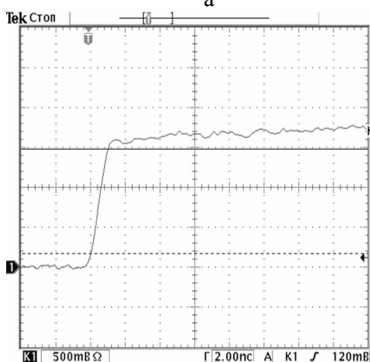
По этим критериям были проанализированы все полученные при экспериментах осциллограммы. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что при росте температуры наблюдается незначительное (менее 1 %) падение максимальной амплитуды, а так же, в большинстве случаев, изменение фронтов импульсов (до 0,05 нс). Такая зависимость наблюдается при всех уровнях зарядного напряжения. Колебания выходных характеристик отражены в табл. 2.



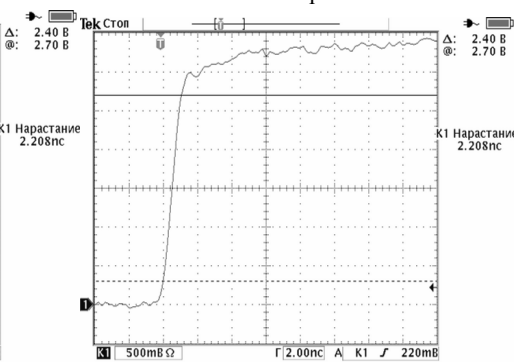
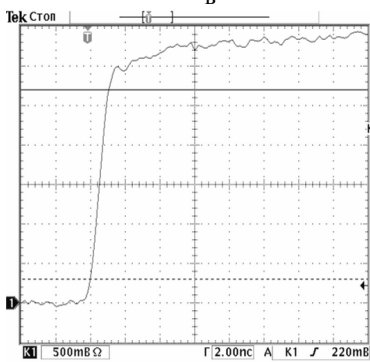
а

б



в

г



д

е

Рисунок 7 – Типовые осциллограммы выходных импульсов электрического поля

Эталона РЭМП, в рабочем объеме ПЛ-24:

а, б, в – при температуре 18 °С и $U_{зар} = 7; 20$ и 35 кВ соответственно;

г, д, е – при температуре 22 °С и $U_{зар} = 7; 20$ и 35 кВ соответственно

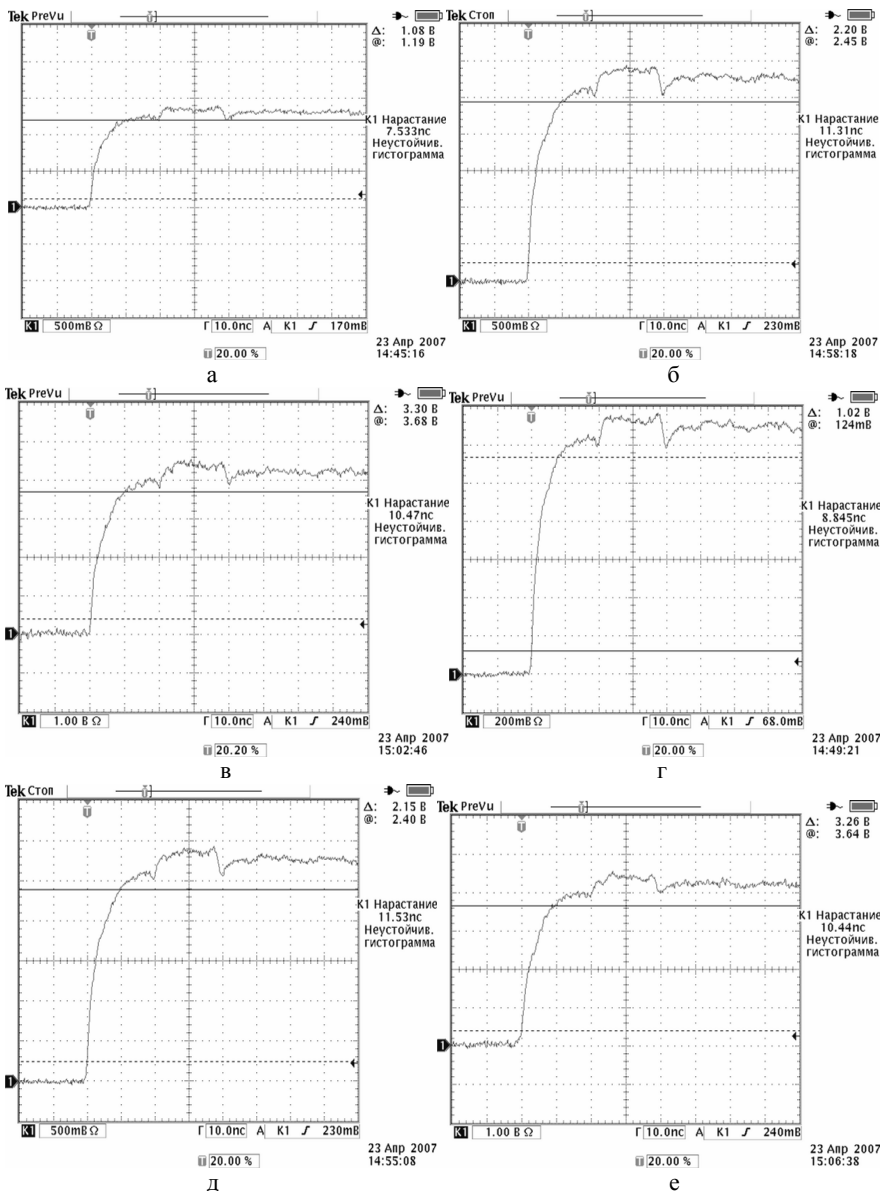


Рисунок 8 – Типовые осциллограммы выходных импульсов электрического поля
Эталона РЭМП, в рабочем объеме ПЛ-48:

а, б, в – при температуре 18 °С и $U_{\text{зар}} = 14; 30$ и 45 кВ соответственно;
г, д, е – при температуре 22 °С и $U_{\text{зар}} = 14; 30$ и 45 кВ соответственно

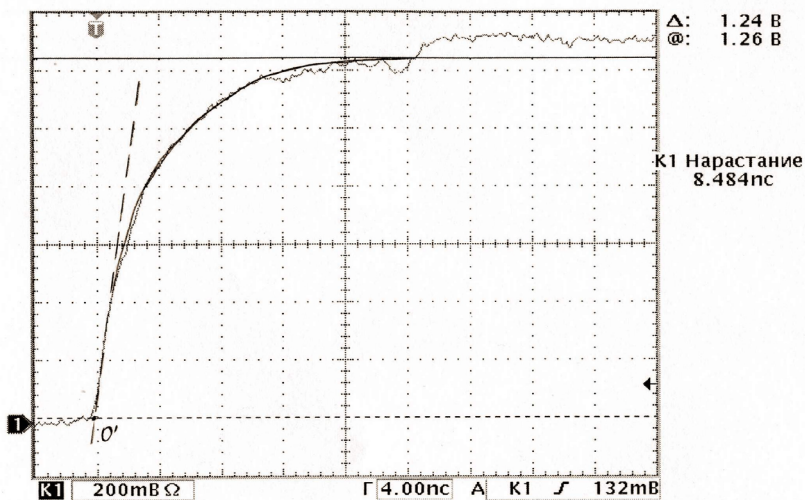


Рисунок 9 – Аппроксимация сигнала с выхода измерителя согласно ГОСТ 17512–82 [4]

Таблица 1

Параметр	t , °C	$U_{зар}^{min}$, кВ		$U_{зар}^{cp}$, кВ		$U_{зар}^{max}$, кВ	
		ПЛ-24	ПЛ-48	ПЛ-24	ПЛ-48	ПЛ-24	ПЛ-48
$E_{вых}^{max}$, кВ/м	18	13,77	25,75	27,2	48,96	49,8	70,12
	22	13,28	25,50	27,17	48,55	49,65	69,74
$T_{\phi}^{0,1-0,9}$, нс	18	0,97	9,61	0,97	9,60	0,94	9,51
	22	0,97	9,57	0,95	9,55	0,96	9,53
$T_{\phi}^{0,1-0,8}$, нс	18	0,71	6,50	0,72	6,52	0,72	6,53
	22	0,72	6,51	0,72	6,51	0,71	6,51

Примечание – В табл. 1 даны значения длительности фронта $T_{Э0}$ полученные с помощью электронного осциллографа Tektronix TDS 3052B, который имеет собственное время нарастания переходной характеристики $T_{ПХ(Э0)}$ равное 0,7 нс. Для определения истинного времени нарастания импульса напряженности электрического поля $T_{и}$ необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{и} = \sqrt{T_{Э0}^2 - T_{ПХ(Э0)}^2}, \quad (6)$$

где $T_{Э0}$ – длительность фронта импульса на экране осциллографа;

$T_{ПХ(Э0)}$ – время нарастания переходной характеристики осциллографа (указано в паспорте на него).

Таким образом, можно утверждать, что изменение температуры и зарядного напряжения в пределах определенных при последней метрологиче-

ской аттестации, не имеют значительного влияния на выходные характеристики Эталона РЭМП.

Таблица 2 – Нестабильность выходных характеристик Эталона РЭМП

Параметр	ПЛ-24	ПЛ-48
Изменение амплитуды $E_{\max}, \%$	0,4 – 0,6	0,6 – 0,86
Изменение времени нарастания $T_{\phi}, \%$	0,3 – 0,9	0,2 – 0,8

Измерение зависимости $E_{\text{вых}} = f(\Delta U_{\text{пит}})$

Данная зависимость определялась при изменении зарядного напряжения в пределах от 200В до 240В и $t = 20^\circ\text{C}$.

Типовые осциллограммы не отличаются от приведенных выше на рис. 5. Единственным отмеченным отличием в осциллограммах является рост максимальной напряженности электрического поля одновременно с ростом напряжения питания, так как в формуле (1.1) $U_{\text{пл}}$ является линейной функцией зарядного напряжения, а тем самым и напряжения питания.

Поэтому, для исключения этого фактора, негативно влияющего на стабильность выходных характеристик Эталона, были приняты два решения:

- 1) Установить в ПКУ Эталона РЭМП электронный стабилизатор напряжения типа Б2–3.
- 2) В течение всей работы Эталона поддерживать постоянное зарядное напряжение по штатному цифровому вольтметру Эталона типа В2–22.

Выводы. Факторы, влияющие на выходные характеристики Эталона РЭМП, можно условно разделить на действующие в течение одной серии испытаний и действующие в течение межповерочного интервала.

К кратковременным факторам можно отнести изменение температуры окружающей среды, давления в коммутаторах ЭНИ и ЭСИ и колебания сетевого напряжения питания.

В результате исследований было доказано, что, если исключить колебания напряжения питания путем установки в цепь питания электронного стабилизатора, то при установке и контроле зарядного напряжения и давления в газовом оборудовании наблюдающиеся изменения характеристик находятся в пределах допустимых свидетельством о метрологической аттестации (до 1% по амплитуде и до 0,1 нс по времени нарастания импульсов).

К изменениям, имеющим длительный характер, относятся трансформации в высоковольтном и измерительном оборудовании. Если эти изменения и имеют место, то их влияние на выходные характеристики Эталона РЭМП замечены не были.

Список литературы: 1 Техническое задание на разработку и создание Эталона РЭМП от 18.05.2003 г. 2. Исходный Эталон Украины единиц импульсных электрического и магнитного полей. Руководство по эксплуатации. Эталон РЭМП-000.000.000 РЭ. 3. *Ковалев И.С.* Конструирование и расчет полосковых устройств. – М., 1974. – 296 с. 4. ГОСТ 17512–82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением.

Поступила в редколлегию 04.06.2007.

УДК 621.318

В.И.КРАВЧЕНКО, докт.техн.наук; **В.Н.ДНЫЩЕНКО; Ю.Н.ГИРКА;**
Ф.В.ЛОСЕВ; И.В.ЯКОВЕНКО, докт.физ.-мат.наук; НТУУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ СТОРОННЕГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Експериментально доведено, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на напівпровідникові прилади (кремнієві діоди) супроводжується відхиленням їх вольт-амперних характеристик (появою зворотних відказів). Показано що такого роду зміни робочих характеристик приладів пов'язано з генерацією власних електромагнітних коливань напівпровідникових комплектуючих приладів при їх взаємодії з токами, наведеними зовнішнім випромінюванням.

It has been experimentally proved that pulse electromagnetic radiation effect (EMC) on semiconductor devices (silicon diodes) is accompanied by deviation of their volt-ampere characteristics (appearance of reverse refusals). It was shown that such a type of change of working characteristics of the devices is connected with generator of natural electromagnetic oscillators of semiconductors components with currents induced by external radiation.

Введение. Все многообразие отказов, возникающих в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [1]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности РЭА. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ), необратимые отказы обычно возникают как следствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональ-