

УДК 621.37/.39:53.08-028.77

Г.М. КЛЕЩЕВНИКОВ
А.А. МАКАРЕНКО, кандидат
технических наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В статье представлена экспериментальная методика оценки критериальных параметров стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений, разработанная в ходе выполнения НИОКР, направленных на совершенствование изделий радиоэлектронной аппаратуры в мобильном (носимом) исполнении, предназначенных для применения в современных вооруженных силах. Методика обеспечивает возможность оперативного проведения испытаний радиоэлектронной аппаратуры в полевых условиях с учетом адаптации под конкретные условия ее дальнейшего использования.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, вооружение и военная техника, стойкость радиоэлектронной аппаратуры, критериальные параметры стойкости, мощные электромагнитные излучения, испытания стойкости.

Введение

Анализ действий Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) в современных условиях показывает существенное возрастание значимости создания и применения межвидовых группировок, формируемых для решения конкретных задач из разнородных сил, оснащенных различными видами вооружения. Такая ситуация, например, характерна для проведения специальных операций ВС РФ на территории иностранных государств¹. Особенностью применения межвидовых группировок в таких условиях является возможность сосредоточения на ограниченной территории (аэродромы, морские порты) воинского контингента, сформированного из разнородных сил и средств (авиации,

¹ Вооруженные Силы в Сирии. Научно-популярный труд. Специальная операция. Вооружение и военная техника. АО «Красная Звезда», 2019. 384 с.

флота, противовоздушной обороны, инженерных войск, подразделений сил специальных операций, охраны и обеспечения).

Для современного вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) характерно наличие различных радиоэлектронных компонентов и устройств, в том числе излучающих, часть из которых по своему целевому предназначению формирует мощные электромагнитные поля (например, системы и средства противовоздушной обороны, авиационные радиолокационные станции, системы связи, формирующие направленные радиолинии). Эти факторы обуславливают необходимость обеспечения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) различных систем вооружения, которые могут быть сконцентрированы на ограниченной территории для решения задач межвидовой группировки войск (сил). Кроме того, не исключается возможность попадания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) из состава ВВСТ не только под непреднамеренное мощное электромагнитное излучение своих средств, но и под преднамеренное излучение соответствующих средств вооружения противника. Особенно критично вопросы ЭМС могут стоять для ВВСТ в мобильном (носимом) исполнении (например, навигационная аппаратура потребителя, портативные средства связи и компьютеры, элементы управления современной боевой экипировки военнослужащего («Ратник»), защищенность РЭА которого в силу объективных причин может оказаться слабее, чем у РЭА в составе стационарных или мобильных (возимых) средств ВВСТ. При разработке и испытаниях такой РЭА на предприятиях-изготовителях не всегда предусматривалась возможность его попадания в описанные условия, когда случайное непредусмотренное воздействие может вывести из строя или существенно нарушить работоспособность таких ВВСТ, что может привести к срыву задач, поставленных перед оснащенными им подразделениями.

Наиболее достоверным способом подтверждения способности технических средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам является проведение натурных испытаний [1; 2].

В силу изложенных выше обстоятельств представляется актуальной разработка такой методики оценки критериальных параметров

стойкости РЭА в составе носимого ВВСТ к воздействию мощных электромагнитных излучений (МЭМИ), применение которой возможно не только в стационарных условиях испытательной лаборатории предприятия-изготовителя, но и в полевых условиях для дополнительного контрольного тестирования стойкости РЭА образцов ВВСТ с учетом описанных специфических условий их дальнейшего применения.

Понятие стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений

Интенсивные исследования стойкости ВВСТ к воздействию мощных электромагнитных излучений в нашей стране начались на рубеже 60-х и 70-х годов прошлого века и вызваны они были, в первую очередь, необходимостью разработки ВВСТ, способных функционировать в условиях возможного применения ядерного оружия, одним из поражающих факторов которого является импульс МЭМИ [3; 4]. Основные усилия и финансовые затраты при этом были направлены на создание имитаторов электромагнитного импульса ядерного взрыва. Что же касается методологии экспериментальной оценки стойкости к воздействию МЭМИ, то она, в основном, тоже была достаточно узко ориентирована на исследование указанного поражающего фактора ядерного оружия, что делает разработанные методы и полученные оценки малоприменимыми для рассматриваемого нами случая.

Следует отметить, что в гражданской сфере данная проблема тоже исследовалась, особенно с ростом компьютеризации и оснащённости портативными средствами связи и другими устройствами в промышленности и в быту, что нашло соответствующее отражение в нормативных документах, в частности, в соответствующих ГОСТах (ГОСТ 30372-95, ГОСТ Р 50397-92, ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95), ГОСТ Р 51317.4.4-2007 (МЭК 61000-4-4: 2004), ГОСТ Р 51317.1.5-2009 (МЭК 61000-1-5:2004)). В указанных документах вводится ряд понятий, которые значимы в рамках рассматриваемой проблемы: *устойчивость к электромагнитной помехе* – способность устройства, оборудования или системы функционировать без ухудшения качества при наличии электромагнитной помехи; *уровень устойчивости к электромагнитной помехе* – максимальный уровень электромагнитной помехи, воздей-

ствующей на конкретное устройство, оборудование или систему, при котором оно сохраняет требуемое качество функционирования; *ненамеренно созданный путь электромагнитного проникновения* – отверстие в электромагнитном экране, не являющееся намеренно созданным, которое может обеспечить путь для проникновения электромагнитной энергии через электромагнитный экран (ненамеренно созданный путь электромагнитного проникновения, как правило, является нежелательным). Анализ указанных источников позволил определить понятие стойкости ВВСТ.

Под *стойкостью ВВСТ* будем понимать свойство ВВСТ выполнять свои функции и сохранять заданные параметры в пределах норм во время и после действия внешнего воздействующего фактора. Тогда понятие *стойкости РЭА к воздействию МЭМИ* можно трактовать как свойство выполнять свои функции и сохранять заданные параметры в пределах норм во время и после воздействия на него МЭМИ². Понятие стойкости РЭА к воздействию МЭМИ в данной трактовке можно распространить на электромагнитные воздействия естественного происхождения (электростатические и грозовые разряды) и искусственного происхождения. Последние целесообразно разделить на боевые воздействия (воздействия средств поражения), реализующиеся только в боевой обстановке, и эксплуатационные воздействия (ЭМВ техногенного происхождения), возникающие в результате работы своего электро- и радиооборудования (например: магнитные поля станций безобмоточного размагничивания кораблей, электромагнитные поля линий электропередачи, контактной сети железных дорог, радиопередающих и радиолокационных средств, а также электромагнитные поля авиационных и корабельных носителей оружия).

В данной классификации объединяются мощные электромагнитные помехи и электромагнитные воздействия средств поражения, которые до настоящего времени рассматривались отдельно. Но такое объединение по мнению специалистов, занимающихся этой проблемой, оправдано единством физической природы рассматриваемых воздействий, что обеспечивает единство методологии электромагнитной стойкости и открывает стратегическую возможность оптимизации не только

² Электромагнитная стойкость оружия // Армейский сборник. URL: <http://army.milportal.ru/elektromagnitnaya-stojkost-oruzhiya/> (дата опубликования 19.04.2018).

системы испытаний, но и всей системы создания оружия, включающей формирование требований, теоретические исследования, расчеты, содержание и порядок отработки, построение экспериментальной базы, методы и средства имитации МЭМИ, метрологическое обеспечение испытаний и так далее [5-10].

Установлено [4], что электромагнитные воздействия большой мощности могут привести к следующим результатам (в порядке убывания жесткости воздействия): постоянному физическому повреждению системы; постоянному прекращению выполнения установленной функции; временному прекращению выполнения установленной функции; ухудшению характеристик функционирования; временному нарушению функционирования, которое может быть устранено действиями оператора.

С учетом изложенных положений была разработана методика оценки критериальных параметров стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений.

Методика оценки критериальных параметров стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений

Цель испытаний – экспериментальное определение уровней стойкости исследуемых образцов радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений.

Задачи испытаний: формирование МЭМИ с заданным временем продолжительности; проведение измерений параметров форм МЭМИ; сборка объектов испытаний и проверка функционирования; проведение воздействия на объекты испытаний (ОИ) МЭМИ с последующей проверкой их функционирования; анализ результатов испытаний и подготовка отчетной документации.

В качестве критерия стойкости выбрано минимальное значение плотности потока мощности в точке нахождения ОИ, при воздействии которой происходят сбои в работе аппаратуры и нарушения работоспособности ОИ.

В качестве проверяемой характеристики выбрана работоспособность испытываемых ОИ после воздействия на них источниками МЭМИ.

Испытания проводятся на образцах РЭА, ранее не подвергавшихся воздействиям МЭМИ.

По результатам испытаний оформляется протокол испытаний.

Обобщенная схема проведения испытаний приведена на рисунке 1.

Перед началом испытаний осуществляется проверка работоспособности ОИ. Для этого проводится их штатное включение. Автономная проверка функционирования ОИ осуществляется при каждом включении. Визуально фиксируется бесперебойное качественное отображение информации, выводимой на экраны измерительных приборов.

Последовательность проведения испытаний.

Объекты испытаний, функционирующие в штатном режиме, располагаются на высоте 1 м от поверхности земли в зоне прямого воздействия источника МЭМИ на фиксированных расстояниях, отградуированных в соответствующие значения электромагнитных полей при заданной мощности излучения моделирующей установки (МУ).

Принцип градуировки значений электромагнитных полей при заданной мощности излучения МУ схематически представлен на рисунке 2.

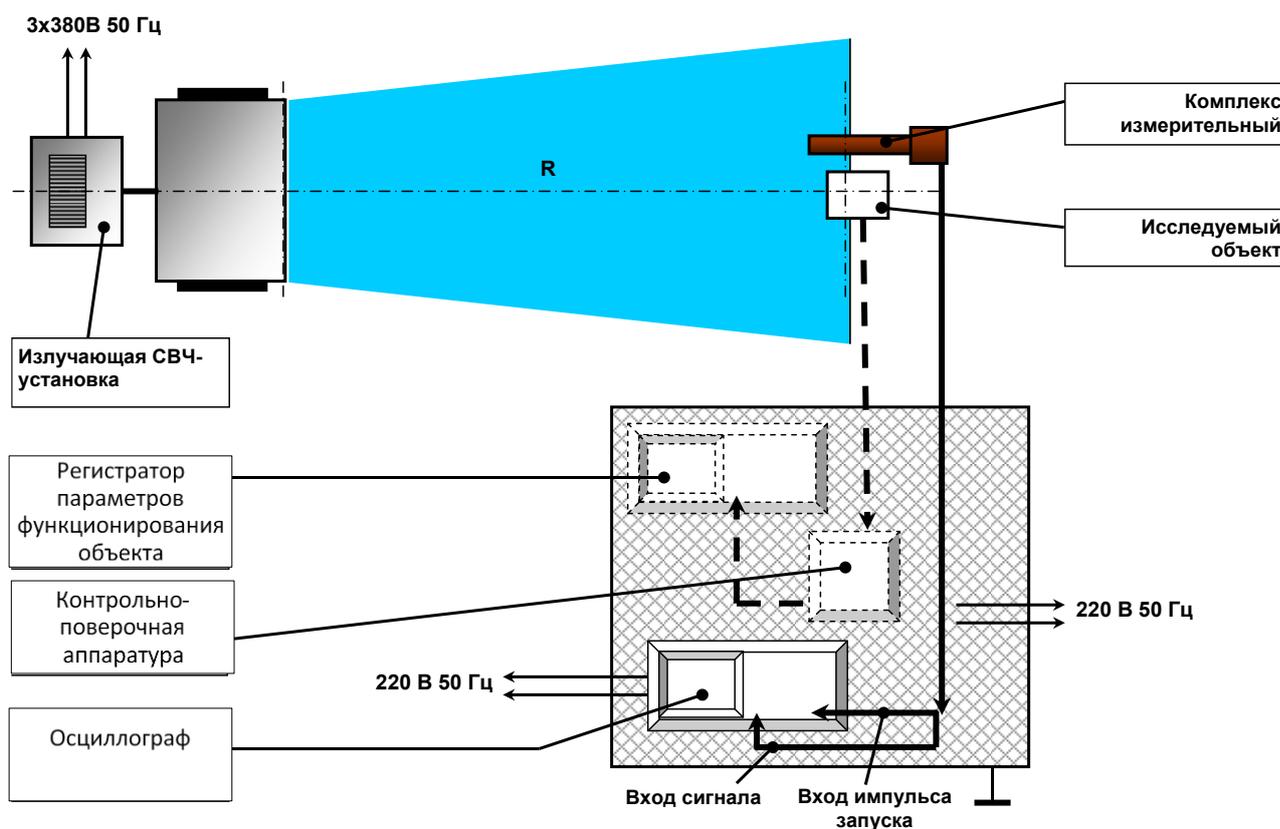


Рисунок 1 – Обобщенная схема проведения испытаний

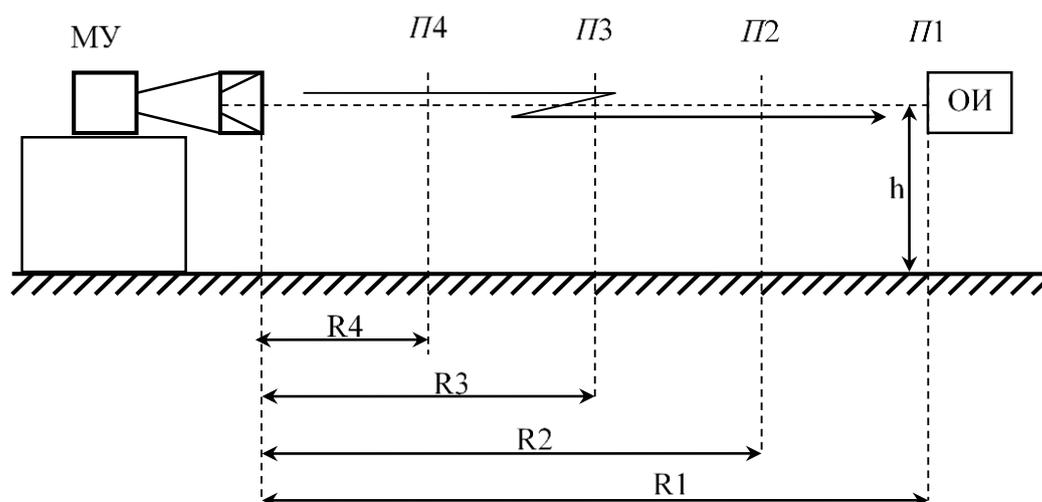


Рисунок 2 – Принцип градуировки значений электромагнитных полей при заданной мощности излучения МУ

Для выборочного измерения плотности потока мощности в зоне расположения объектов испытаний используется комплекс измерения энергетических характеристик МЭМИ в составе измерительной антенны системы рупорного типа (модель П6-68) и измерителя пиковой и средней мощности Е4416А с измерительной головкой Е9327А.

Для регистрации параметров функционирования средств нагружения применяется осциллограф.

Средства отображения и обработки со штатным программным обеспечением помещаются в экранированную камеру, обеспечивающую уровень ослабления отражений 100 дБ.

Общий порядок испытаний.

Задаются параметры электромагнитного излучения: f (несущая частота), F (частота следования импульсов), t_u (длительность импульса), а также t (продолжительность воздействия), расстояние между излучающей антенной и ОИ, ориентация ОИ.

Во время одного включения моделирующей установки одновременно облучаются 2-3 образца объекта испытаний, одинаково сориентированных относительно потока МЭМИ.

Для учёта поляризационных характеристик ОИ изменяется их ориентация относительно направления потока МЭМИ.

При проведении испытаний используются три варианта ориентации объектов относительно потока МЭМИ (А, Б, В):

Вариант А: ОИ расположен прямо напротив источника МЭМИ, поток МЭМИ направлен на переднюю панель прибора (для приёмной антенны ОИ – поток излучения направлен по нормали к её поверхности).

Вариант Б: ОИ лежит на задней стенке, поток излучения направлен на боковую панель прибора (для приёмной антенны ОИ – поток излучения направлен в её боковую проекцию).

Вариант В: ОИ расположен как в варианте А, но прибор повернут в сторону на 90 градусов, поток излучения направлен на переднюю панель прибора.

Расстояния от излучающей антенны до ОИ выбирается в зависимости от характеристик конкретной моделирующей установки. При первом облучении на каждой МУ объекты испытаний выставляются на максимальное расстояние от излучающей антенны. С целью увеличения падающей на объекты испытаний плотности потока мощности расстояние уменьшается на очередную отградуированную отметку. При достижении критического результата или же одного и того же результата на разных расстояниях испытания на данной МУ прекращаются.

Время воздействия выбирается с расчётом, чтобы не допустить выход из строя объектов испытаний при первых облучениях.

После каждого облучения визуально фиксируется проверяемая характеристика, описывается полученный эффект, протоколируются результаты, полученные при облучении. После этого изменяются параметры создаваемого мощного электромагнитного поля, а затем, после очередного облучения, – расстояние от излучающей антенны до объекта испытаний.

В случае возникновения эффектов, ОИ не подвергается очередному облучению до тех пор, пока автономная проверка функциональных узлов прибора не фиксирует устойчивую штатную работу прибора.

При испытаниях используется прямой метод облучения (воздействие на ОИ МЭМИ), при котором объект испытаний в режиме штатного функционирования подвергается электромагнитному воздействию полем в течение заданного времени с заданными параметрами.

Испытания проводятся циклически, в трёх испытательных режимах.

Варианты изменения критериальных параметров при проведении экспериментальных исследований представлены в таблице 1. Обозначения критериальных параметров представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Варианты изменения критериальных параметров при проведении экспериментальных исследований

Испытательный режим	Критериальные параметры						Эффект от воздействия
	1	2	3	4	5	6	
1	c	c	c	v	c	v	
2	c	c	c	v	v	c	
3	v	c	c	c	c	c	
	c	v	c	c	c	c	
	c	c	v	c	c	c	

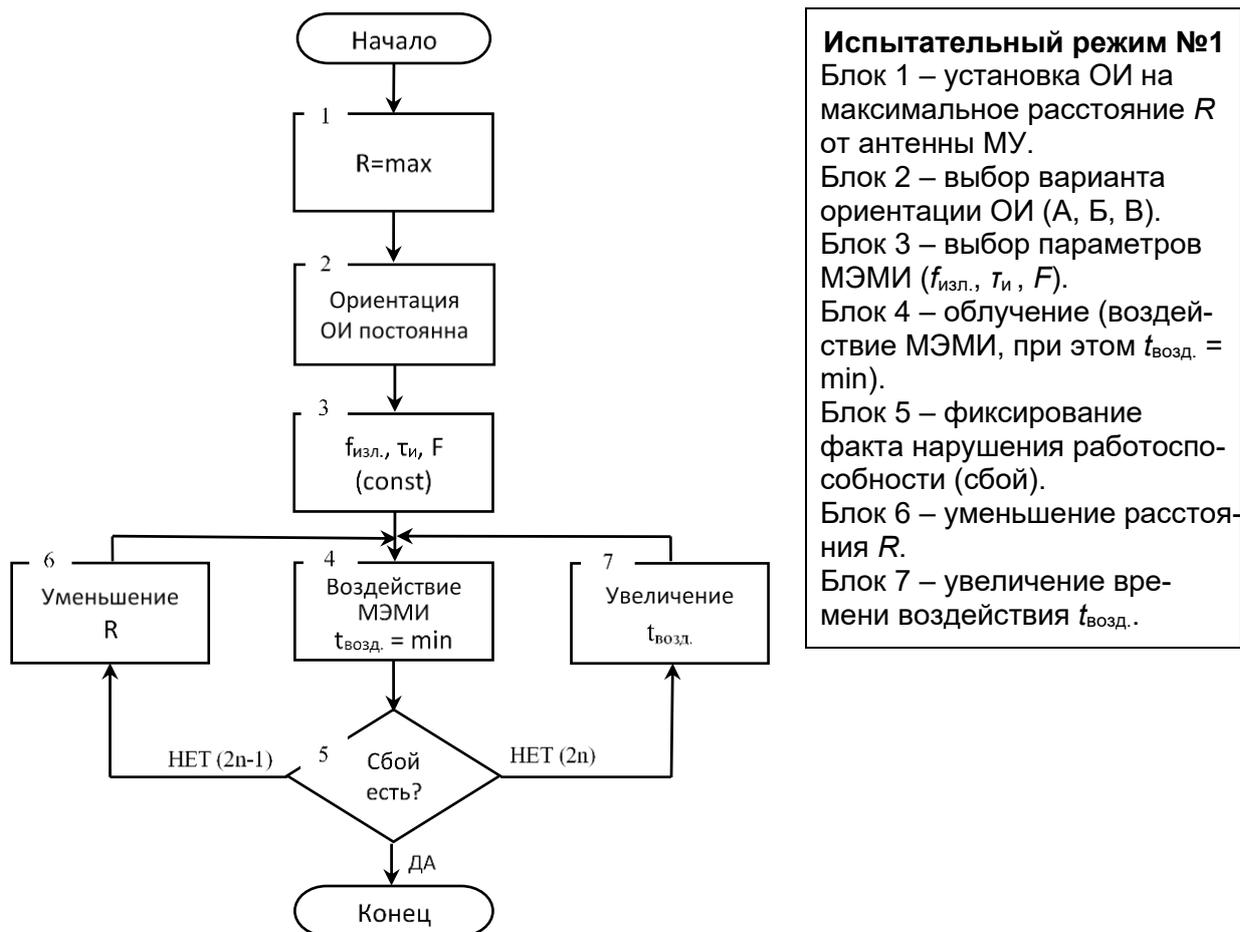
c – const, v – var.

Таблица 2 – Обозначения критериальных параметров

Номер параметра	Обозначение	Название
1	f	несущая частота
2	F	частота следования импульсов
3	τ_u	длительность импульса
4	t	продолжительность воздействия
5		тип ориентации ОИ
6	R	расстояние между излучающей антенной и ОИ

Блок-схемы испытательных режимов представлены на рисунках 3-5. Результаты испытаний фиксируются в формах, представленных в таблицах 3-5. По окончании испытаний полученные результаты обобщаются и анализируются.

Описанная экспериментальная методика определения критериальных значений стойкости РЭА к воздействию МЭМИ была разработана в ВКА имени А.Ф. Можайского и апробирована в полевых условиях на базе полигона 12 ЦНИИ МО РФ в ходе экспериментов по многократному облучению образцов малогабаритной носимой РЭА различными моделирующими установками, генерирующими электромагнитные излучения различной мощности. Установлено, что в результате воздействий происходили как обратимые, так и необратимые отказы, причём после проведения нескольких экспериментов наблюдались случаи снижения уровней воздействий, приводящих к отказам, что свидетельствует о деградации внутренней структуры элементов РЭА под воздействием МЭМИ и потенциальном снижении достоверности декларируемых производителем значений показателей стойкости после такого воздействия.

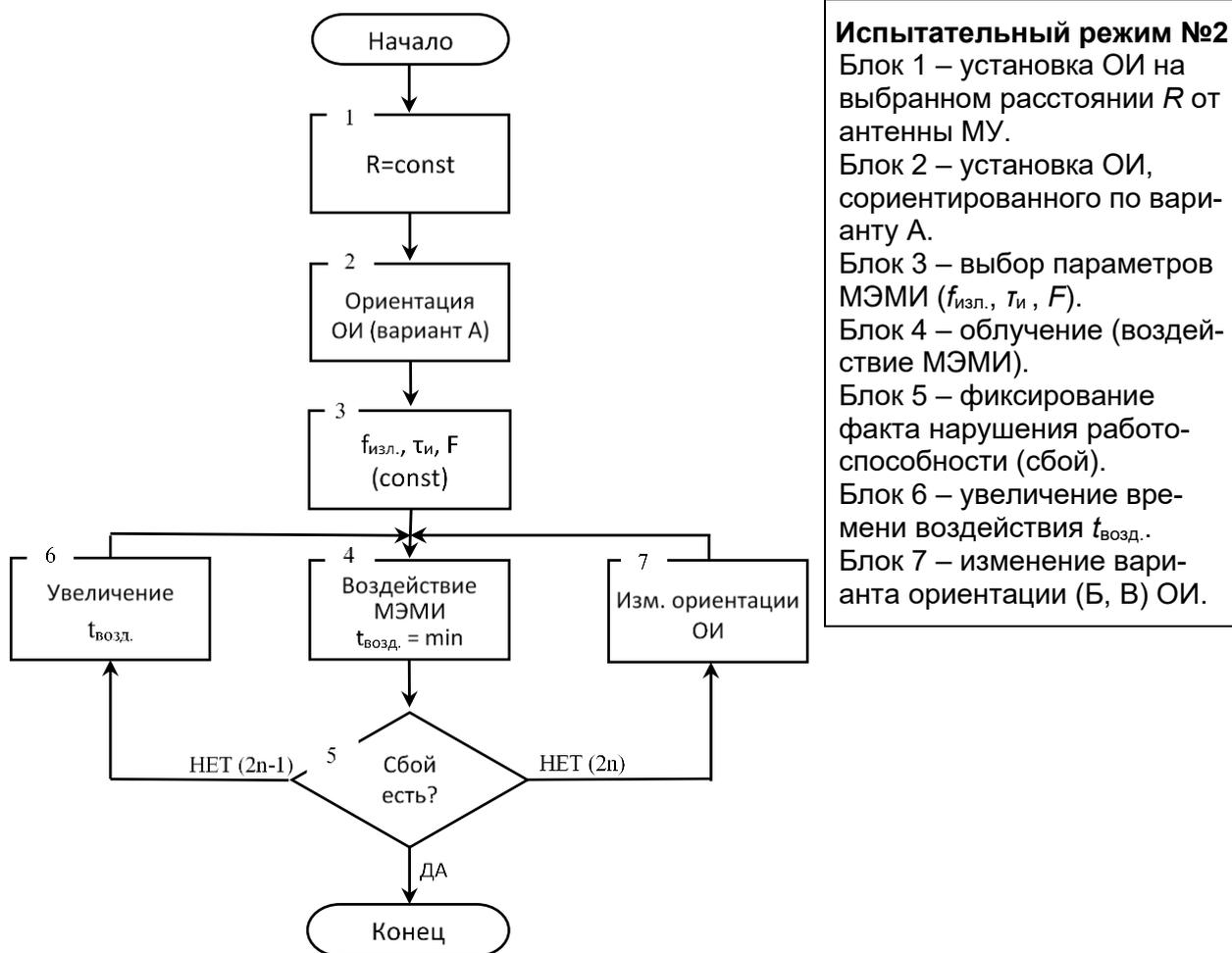


Испытательный режим №1
 Блок 1 – установка ОИ на максимальное расстояние R от антенны МУ.
 Блок 2 – выбор варианта ориентации ОИ (А, Б, В).
 Блок 3 – выбор параметров МЭМИ ($f_{изл.}$, $\tau_{и}$, F).
 Блок 4 – облучение (воздействие МЭМИ, при этом $t_{возд.} = \min$).
 Блок 5 – фиксирование факта нарушения работоспособности (сбой).
 Блок 6 – уменьшение расстояния R .
 Блок 7 – увеличение времени воздействия $t_{возд.}$.

Рисунок 3 – Блок-схема испытательного режима №1

Таблица 3 – Результаты испытаний в режиме №1

Параметры МЭМИ		$f_{изл.} = \text{const} = \underline{\hspace{2cm}}$; $\tau_{и.} = \text{const} = \underline{\hspace{2cm}}$; $F = \text{const} = \underline{\hspace{2cm}}$	
Ориентации ОИ		Const, тип: <u> </u>	
№ исп.	Расстояние (м)	Время воздействия (с)	Эффект от воздействия МЭМИ
1	$R_{\max} = \underline{\hspace{2cm}}$	$t_{\text{возд.}}(\min) =$	
...		...	
n		$t_{\text{возд.}}(\max) =$	
1	$R = \underline{\hspace{2cm}}$	$t_{\text{возд.}}(\min) =$	
...		...	
n		$t_{\text{возд.}}(\max) =$	
	
1	$R_{\min} = \underline{\hspace{2cm}}$	$t_{\text{возд.}}(\min) =$	
...		...	
n		$t_{\text{возд.}}(\max) =$	

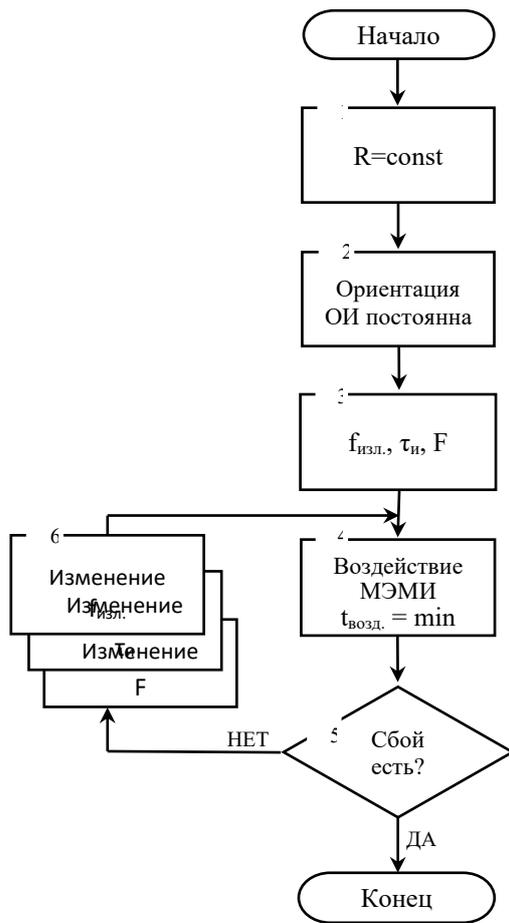


Испытательный режим №2
 Блок 1 – установка ОИ на выбранном расстоянии R от антенны МУ.
 Блок 2 – установка ОИ, сориентированного по варианту А.
 Блок 3 – выбор параметров МЭМИ ($f_{изл.}$, $T_{и}$, F).
 Блок 4 – облучение (воздействие МЭМИ).
 Блок 5 – фиксирование факта нарушения работоспособности (сбой).
 Блок 6 – увеличение времени воздействия $t_{возд.}$.
 Блок 7 – изменение варианта ориентации (Б, В) ОИ.

Рисунок 4 – Блок-схема испытательного режима №2

Таблица 4 – Результаты испытаний в режиме №2

Параметры ЭМИ		$f_{изл.} = const = \underline{\hspace{2cm}}$; $T_{и.} = const = \underline{\hspace{2cm}}$; $F = const = \underline{\hspace{2cm}}$	
Расстояние (м)		$R = const = \underline{\hspace{2cm}}$	
№ исп.	Ориентация ОИ (тип)	Время воздействия (с)	Эффект от воздействия
1	А	$t_{возд.(min)} =$	
2		...	
3		$t_{возд.(max)} =$	
1	Б	$t_{возд.(min)} =$	
2		...	
3		$t_{возд.(max)} =$	
1	В	$t_{возд.(min)} =$	
2		...	
3		$t_{возд.(max)} =$	



Испытательный режим №3
 Блок 1 – установка ОИ на выбранном расстоянии R от антенны МУ.
 Блок 2 – выбор варианта ориентации ОИ (А, Б, В).
 Блок 3 – выбор параметров МЭМИ ($\tau_{и}$, $f_{изл.}$, F).
 Блок 4 – облучение (воздействие МЭМИ).
 Блок 5 – фиксирование факта нарушения работоспособности (сбой).
 Блок 6 – последовательное изменение параметров МЭМИ:
 – изменяется $f_{изл.}$ при неизменных $\tau_{и}$, F ;
 – изменяется $\tau_{и}$ при неизменных $f_{изл.}$, F ;
 – изменяется F при неизменных $\tau_{и}$, $f_{изл.}$.

Рисунок 5 – Блок-схема испытательного режима №3

Таблица 5 – Результаты испытаний в режиме №3

Ориентация ОИ		Const, тип: _____		
Расстояние (м)		$R = \text{const} = \text{_____}$		
Время воздействия (с)		$t_{\text{возд.}} = \text{const} = \text{_____}$		
№ исп.	Параметры ЭМИ			Эффект от воздействия
	$f_{изл.}$	$\tau_{и}$	F	
1	$f_{изл.} = \text{const} = \text{_____}$	$\tau_{и} = \text{const} = \text{_____}$	$F = \text{_____}$	
...			...	
n			$F = \text{_____}$	
1	$f_{изл.} = \text{const} = \text{_____}$	$\tau_{и} = \text{_____}$	$F = \text{const} = \text{_____}$	
...		...		
n		$\tau_{и} = \text{_____}$		
1	$f_{изл.} = \text{_____}$	$\tau_{и} = \text{const} = \text{_____}$	$F = \text{const} = \text{_____}$	
...	$f_{изл.} = \text{_____}$			
n	$f_{изл.} = \text{_____}$			

Заключение

Предложенная методика оценки критериальных параметров стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений может применяться для определения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, а также для оценивания характеристик её работоспособности в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки. Отличительной особенностью методики является возможность оперативного проведения испытаний РЭА в полевых условиях с учетом адаптации под конкретные условия ее дальнейшего использования, в том числе для дополнительного контрольного тестирования стойкости РЭА образцов ВВСТ с учетом специфических условий их дальнейшего применения.

Список использованных источников

1. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978. 232 с.
2. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Пер. с нем. Г.А. Фомина и Н.С. Лецкой; под ред. Э. Лецкого. М.: Мир, 1977. 552 с.
3. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
4. Мырова Л.О., Попов В.Д., Верхотуров В.И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений / Под ред. К.И. Кукка. М.: Радио и связь, 1993. 268 с.
5. Разумов А.В., Радаев Н.Н. Об одном подходе к вопросу повышения стойкости вычислительных сетей к воздействию электромагнитных импульсов // Измерительная техника. 2002. №11.
6. Разумов А.В. Методология обеспечения защищенности цифровых вычислительных средств АСУ реального времени от воздействия мощных электромагнитных излучений: Монография. Пушкин: ПВИРЭ, 2002. 198 с.
7. Какаев В.В. Результаты испытаний вычислительного комплекса «ЭЛЬБРУС-90 МИКРО» на стойкость к воздействию мощных электромагнитных излучений // Сборник научных трудов ученых ПВИРЭ КВ. Пушкин: ПВИРЭ КВ, 2005.
8. Козлов Л.Н. Анализ деградиационного воздействия СВЧ излучения на элементы и устройства вычислительной техники и систем управления объектами авиационно-космической техники // Вестник РГРТУ. 2007. Вып. 21.
9. Радаев Н.Н. Методы оценки соответствия технических систем предъявляемым требованиям при малом объеме испытаний: Монография. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 1997. 390 с.
10. Разумов А.В. Экспериментальные исследования стойкости вычислительных средств к воздействию ЭМИ // Региональная информатика – 2000 (РИ-2000): Труды VII Санкт-Петербургской международной конференции, 5-8 декабря 2000 г. СПб.: СПОИСУ, 2000.