

А.В. Разумов, доктор технических наук,  
профессор  
А.Ю. Онуфрей, доктор технических наук,  
профессор  
А.А. Орлов

## **Обеспечение стойкости образцов ВВСТ к воздействию электромагнитных излучений при формировании технико-экономических требований**

*В статье рассматривается проблема обеспечения стойкости вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) с учетом стоимости средств защиты от воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ). Предложен подход к обеспечению стойкости на основе многоуровневого представления иерархии построения образца ВВСТ и показателей, отражающих эффективность применения средств защиты от ЭМИ на каждом уровне иерархии. Представлена процедура минимизации затрат при обосновании требований по стойкости к ЭМИ, позволяющая осуществлять выбор рационального комплекса средств защиты при условии обеспечения минимальной стоимости и требуемой вероятности выполнения задачи.*

### **Введение**

Среди задач, связанных с разработкой ВВСТ, одной из проблемных является задача обеспечения стойкости к воздействию мощных электромагнитных излучений. На протяжении последних десятилетий данная задача всегда находилась в центре внимания разработчиков ВВСТ. Однако если раньше она решалась в интересах обеспечения стойкости к воздействию электромагнитных импульсов ядерных взрывов, то в современных условиях с появлением источников мощных электромагнитных излучений на неядерной основе, способных генерировать электромагнитные импульсы с пиковой мощностью от сотен мегаватт до десятков гигаватт, данная задача становится еще более актуальной [5]. Современные радиоэлектронные комплексы представляют собой сложные системы, включающие различные устройства и подсистемы, влияние ЭМИ на которые проявляется, прежде всего, в появлении массовых сбоев и отказов в работе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) устройств, что в определенных условиях эксплуатации может привести к срыву выполнения поставленных задач.

На этапах раннего проектирования исследование влияния ЭМИ на РЭА ВВСТ и определение на этой основе технических решений по обеспечению стойкости представляют собой сложную прикладную задачу. Для ее реализации необходимо исследовать влияния ЭМИ на показатели стойкости отдельных устройств образца вооружения и обосновать дополнительно к основному оборудованию аппаратно-программные средства защиты от воздействия ЭМИ. Учитывая, что применение средств защиты от воздействия ЭМИ возможно на различных уровнях иерархии построения образца ВВСТ, задача обеспечения стойкости будет заключаться в выборе комплекса аппаратно-программных методов и средств, обеспечивающих функционирование электронной аппаратуры в условиях воздействия ЭМИ с заданными показателями. Внедрение данного комплекса в ВВСТ потребует дополнительных финансовых затрат. В связи с этим, актуальным является обоснование этого комплекса с учетом его стоимости и требований по стойкости к ЭМИ. Решение этой задачи предполагает рассмотрение свойства стойкости образца ВВСТ с учетом иерархии его построения.

## 1. Стойкость ВВСТ к воздействию ЭМИ, как системное свойство

В настоящее время стойкость ВВСТ к воздействию ЭМИ рассматривается с учетом уровней иерархии ее построения. На рисунке 1 показаны уровни иерархии ВВСТ и соответствующие им свойства.

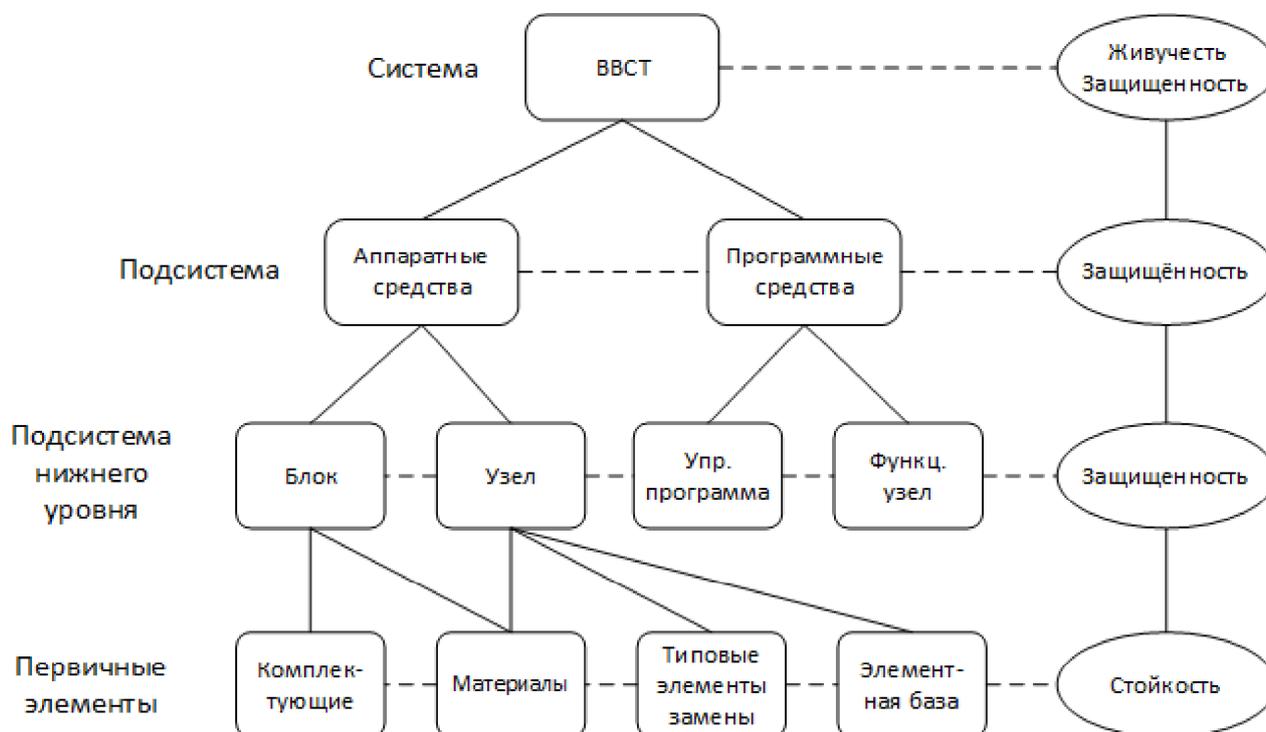


Рисунок 1 – Структуризация понятий стойкости, защищенности, живучести

В соответствии с многоуровневым иерархическим представлением структуры системы вооружения понятию «чистой» стойкости соответствуют первичные элементы радиоэлектронной аппаратуры: элементная база, материалы, типовые элементы замены, комплектующие изделия. На уровне подсистем, включающих блоки, узлы, функциональные модули отдельных устройств, устройства в целом, стойкость обеспечивается за счет внедрения в аппаратуру устройств аппаратно-программных методов и средств защиты от воздействия ЭМИ. Функциональной нагрузки они не несут, а предназначены только для предотвращения электромагнитных воздействий или снижения их влияния. В этом смысле блоки, узлы и устройства в сочетании со стойкостью обладают свойством защищенности. На верхнем уровне (системном) ВВСТ наделяют свойством живучести, так как на этом уровне, в силу сложности и многообразия решаемых задач, возможно некоторое снижение качества функционирования при сохранении общей цели. Для того чтобы установить взаимоотношения между этими свойствами необходимо рассмотреть ряд основных понятий и определений. В самом общем случае понятие «стойкость» определяется как свойство некоторой системы сохранять параметры, определяющие его работоспособность в пределах установленных норм и осуществлять нормальное функционирование во время и после действия поражающего фактора<sup>1</sup>. Применительно к электромагнитным излучениям понятие стойкости может быть сформулировано следующим образом: «стойкость – это свойство системы выполнять заданные функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия мощных электромагнитных помех, больших токов и напряжений до опреде-

1 ГОСТ Р 51317.1.5-2009 (МЭК 61000-1-5, 2004) Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействие электромагнитные большой мощности на системы. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2009.

ленного уровня»<sup>1</sup>. Исходя из данного определения, можно отметить ряд факторов, ограничивающих данное свойство:

- фактор качества, ограниченного некоторым набором функций, выполняемых с сохранением значений параметров в пределах установленных норм;
- фактор времени, предусматривающий выполнение заданных функций во время и после воздействия;
- фактор условий применения мощных электромагнитных помех, больших токов и напряжений до определенного уровня.<sup>2</sup>

С учетом ограничивающих факторов модель, определяющая свойство стойкости, может быть описана функционалом ( $\Phi$ ) вида:

$$S = \Phi \{ \mathcal{E}(F), \bar{B} \}, \quad (1)$$

где  $S$  – показатель стойкости;

$\mathcal{E}(F)$  – уровень качества функционирования системы, определяемый набором функций

$F = \{ f_i \}, i=1..m$ , выполняемых с сохранением параметров в пределах установленных норм;

$\bar{B}$  – вектор характеристик ЭМИ.

Стойкость характеризует способность системы сохранять заданный уровень качества в течение определенного времени (во время и после воздействия) в заданных условиях применения. При этом стойкость является внутренним свойством системы, которым она наделяется на этапе проектирования.

Для ВВСТ это свойство относят к:

- ВВСТ в целом;
- функциональным подсистемам;
- блокам и узлам;
- элементной базе, материалам, комплектующим изделиям.

Предлагаемая модель стойкости (1) предполагает нахождение системы в полностью исправном состоянии, так как иначе невозможно выполнение всех функций  $F = \{ f_i \}, i=1..m$  с заданным качеством  $\mathcal{E}(F)$ . Однако опыт разработки и экспериментальной проверки воздействия ЭМИ на ВВСТ показывает, что уровень качества бывает ниже требуемых значений [6]. При этом утрачивается способность системы выполнять заданные функции в полном объеме. Такое состояние характеризуется, как частично исправное и для его описания вводятся понятия «защищенность» и «живучесть». Соотношение рассмотренных понятий с учетом состояний системы показано на рисунке 2. В отличие от стойкости защищенность и живучесть являются внешними и более гибкими свойствами, так как они закладываются и изменяются как во время проектирования, так и при эксплуатации системы.

Таким образом, стойкость, защищенность и живучесть как системные свойства взаимно дополняют друг друга и характеризуют стойкость ВВСТ в различных состояниях. Защищенность может трактоваться как частный случай понятия стойкости при рассмотрении подсистем ВВСТ и как живучести – при рассмотрении ВВСТ на системном уровне. В связи с этим защищенность и живучесть могут быть охарактеризованы теми же показателями, что и стойкость.

## 2. Показатели стойкости ВВСТ к воздействию ЭМИ и их характеристика

В соответствии с иерархией построения на первом уровне: элементная база, материалы, комплектующие изделия, в качестве показателей используют максимальные значения характе-

1 Там же.

2 ГОСТ Р 54618-2011: Глобальная навигационная спутниковая система. – М.: Стандартинформ, 2011.

ристик ЭМИ, при которых параметры элементов  $r$  с заданной вероятностью сохраняются в пределах допусков  $\Theta_r \in \Theta_r^{don}$  при определенном уровне гарантии:

$$X_{maxr} : P(\Theta_r \in \Theta_r^{don}) = P^{треб}, \quad (2)$$

где  $X_{maxr}$  – значения характеристик ЭМИ;

$\Theta_r$  – параметр состояния элемента по выходному значению;

$r$  – номер параметра (крутизна фронта, длительность импульса);

$\Theta_r^{don}$  – допустимые значения  $r$ -го параметра, определяемое экспериментально с заданной доверительной вероятностью  $P^{треб}$ .

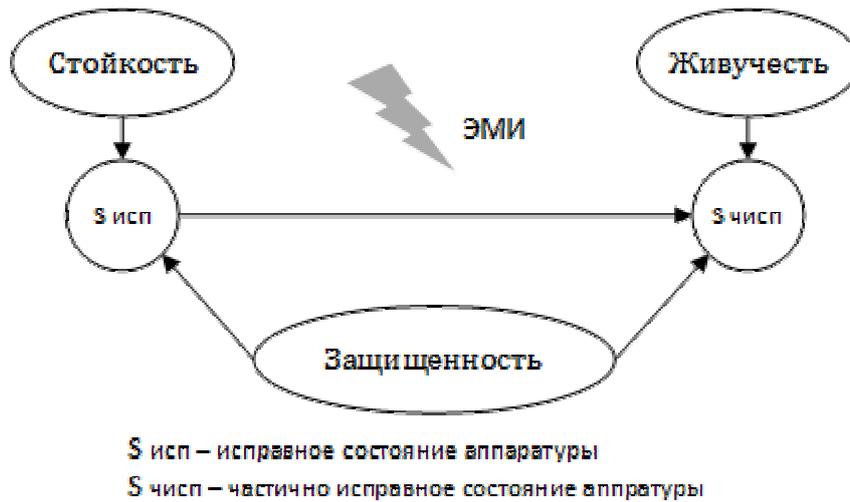


Рисунок 2 – Соотношение свойств стойкости, защищенности и живучести ВВСТ в зависимости от состояния

Из совокупности значений параметров ЭМИ, соответствующих допуску параметров, в качестве показателя стойкости выбирается наименьшее граничное значение:  $X_r = \min[X_{maxr}^{треб}]$  для  $\Theta_r$  и его допусков. Показателями стойкости на этом уровне могут быть минимальные (пороговые) значения напряженностей полей ЭМИ, при которых появляются ложные срабатывания и сбои в работе РЭА ВВСТ:

$$\begin{aligned}
 E_{сб}(\Theta_r) &= \min\{E(\Theta_{ri})\}, \Theta_r \in \Theta; \\
 H_{сб}(\Theta_r) &= \min\{H(\Theta_{ri})\}, \Theta_r \in \Theta,
 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $E_{сб}(\Theta_r)$ ,  $H_{сб}(\Theta_r)$  – минимальные значения напряженности электрической и магнитной составляющих полей ЭМИ, приводящих к сбою при изменении  $r$ -го выходного параметра.

На верхних иерархических уровнях (подсистема, система) использование показателей (3) является весьма затруднительным. Это объясняется прежде всего отсутствием строгих математических методов синтеза сложных систем по заданным функциям сбоев. Учитывая данное обстоятельство, стойкость ВВСТ на данных уровнях может быть охарактеризована сложной функцией, содержащей зависимости:

- от системных показателей (СП) ВВСТ, отражающих степень выполнения требований по готовности, устойчивости и вероятности выполнения поставленной задачи  $\mathcal{E}_{сн}$ ;
- от видов затрат ресурсов –  $\mathcal{E}_{зр}$ .

В этом случае обобщенная функция стойкости ВВСТ может быть представлена:

$$\mathcal{E}_{ввст} = \varphi\{\mathcal{E}_{сн}, \mathcal{E}_{зр}\}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{cn}(t) &= \psi_{cn} \{K_z(t), R_{ycm}(t), P_{\bar{e}3}(t)\}, \\ \mathcal{E}_{zp}(t) &= \psi_{zp} \{S_{p1}(t), S_{p2}(t), \dots, S_{pk}(t)\}, \end{aligned}$$

где  $K_r(t), R_{ycm}(t), P_{\bar{e}3}(t)$  – показатели функциональной готовности, устойчивости и вероятности выполнения задачи;

$S_{p1}(t), S_{p2}(t), \dots, S_{pk}(t)$  – показатели затрат по видам ресурсов.

В зависимости от цели оценки стойкости выделяют одну из функций в качестве основной, а остальные переводят в разряд ограничений. Среди системных характеристик наиболее точно отражает целевое предназначение ВВСТ вероятность выполнения задачи ( $P_{\bar{e}3}$ ), которая в условиях воздействия ЭМИ будет являться функцией от следующих параметров:

$$P_{\bar{e}3} = \varphi(\bar{T}, \bar{B}, \bar{Z}), \quad (5)$$

где  $\varphi$  – оператор функциональной зависимости;

$\bar{T}$  – вектор структурных параметров ВВСТ;

$\bar{B}$  – вектор параметров ЭМИ;

$\bar{Z}$  – вектор характеристик средств защиты.

Для оценки эффективности применения средств защиты необходимо установить зависимость вероятности выполнения задачи от характеристик средств защиты.

С целью определения эффективности применения средства защиты введем показатели количественной меры применения средств защиты, которые могут быть выражены как в абсолютных значениях ( $\Delta P_{\bar{e}3}$ ), так и в относительных ( $K_{защ}$ ):

$$\Delta P_{\bar{e}3} = P_{\bar{e}3} - P_{\bar{e}3}^{ЭМИ}; \quad (6)$$

$$K_{защ} = P_{\bar{e}3}^{ЭМИ} / P_{\bar{e}3}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что  $K_{защ}$  имеет вероятностный смысл и в предельных случаях меняется от 0 до 1. При отсутствии защиты и максимальных значениях параметров ЭМИ вероятность выполнения задачи может быть сведена к нулю, что соответствует нулевой защищенности, а при  $P_{\bar{e}3} = P_{\bar{e}3}^{ЭМИ}$ , что может произойти при абсолютной защищенности,  $K_{защ}$  будет равен 1.

Рассмотренные показатели (6, 7) могут быть использованы для сравнительной оценки эффективности применения средств защиты. Предположим, что в нашем распоряжении из общего комплекса  $M$  средств имеется  $m-1$  – количество средств защиты, суммарный эффект применения которых равен:

$$\Delta P_{\bar{e}3} = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta P_{\bar{e}3}^i,$$

где  $\Delta P_{\bar{e}3}^i$  – прирост вероятности выполнения задачи при использовании  $i$ -го средства защиты.

Отсюда, весомость  $i$ -го средства можно определить как:

$$K_{защ}^i = \left( \sum_{i=1}^m P_{\bar{e}3}^i - \sum_{i=1}^{m-1} \Delta P_{\bar{e}3}^i \right) / \sum_{i=1}^m \Delta P_{\bar{e}3}^i, \quad (8)$$

где  $K_{защ}^i$  – коэффициент защищенности  $i$ -го средства защиты.

Таким образом, при обосновании стоимости образца ВВСТ с учетом требований по стойкости к ЭМИ необходимо дополнительно к основному оборудованию обосновать стоимость разработки средств защиты. При этом мерой полноты решения задач за счет применения средств защиты является  $P_{\bar{e}3}$ , а ее приращения, выраженные в абсолютной или относительной формах, есть мера вклада, вносимого отдельным средством или комплексом средств в общую задачу.

В формализованном виде задача обоснования стоимости будет сводиться к минимизации стоимости комплекса средств защиты, обеспечивающего требуемую вероятность выполнения задачи:

$$C_{\text{защ}}^{\Sigma} = \operatorname{argmin} \{C_{\text{защ}}(Z)\}; \quad (9)$$

$$P_{\text{вз}}^{\text{эм}}(I, \mathcal{E}, Z) \in P_{\text{вз}}^{\text{треб}}$$

где  $P_{\text{вз}}^{\text{треб}}$  – требуемое значение вероятности выполнения задачи.

### 3. Расчет стоимости образца ВВСТ с учетом требований по стойкости к ЭМИ

В настоящее время при определении стоимости разработки перспективных образцов ВВСТ и обоснования требований к их ТТХ используют следующие методы [1, 2]:

- калькуляционный метод, позволяющий оценить стоимость по всей совокупности работ при разработке образца ВВСТ;
- аналого-сопоставительный метод, основанный на определении стоимости разработки перспективного образца ВВСТ по данным имеющихся аналогов;
- агрегатный метод, основанный на суммировании стоимости отдельных конструктивных элементов образца ВВСТ;
- метод регрессионного анализа, заключающийся в определении зависимости стоимости разработки ВВСТ от значений его ТТХ;
- метод экспертных оценок (балльный метод), заключающийся в определении для каждой ТТХ числа баллов с последующим их суммированием при интегральной оценке стоимости.

Наиболее подходящими для нашего случая являются аналого-сопоставительный и агрегатный методы. Аналого-сопоставительный метод может быть использован при наличии зависимости стоимости от уровня стойкости. Это возможно на основе анализа и обработки больших объемов информации, связанных с установлением зависимости уровня стойкости от затрат в существующих аналогах ВВСТ и прогнозирования стоимости перспективных образцов ВВСТ с учетом новых требований. Это довольно сложная задача, требующая сбора и обобщения показателей стойкости РЭА к воздействию ЭМИ на протяжении длительного периода сбора статистической информации. Данных о сопоставлении цены и качества в зависимости от требований стойкости в известной литературе недостаточно, поэтому предпочтительнее использовать агрегатный метод, позволяющий путем суммирования стоимости отдельных конструктивных элементов получить искомую сумму.

Допустим, в распоряжении разработчика имеется  $M$  средств защиты от воздействия ЭМИ, каждый из которых обеспечивает некоторый прирост показателя стойкости. Задана матрица  $X$  – двоичных переменных, характеризующих применение средств защиты в элементах ВВСТ, в которой  $x_{ij} = 1$ , если средство применяется, и  $x_{ij} = 0$ , если не применяется.

Заданы затраты на проектирование и разработку каждого средства защиты от ЭМИ –  $C_j$ . Определены  $N$  устройств из состава образца ВВСТ, в которых необходимо осуществлять мероприятия по защите.

Требуется отыскать матрицу  $X^* = \{X_{ij}^*\}$ , обеспечивающую минимум целевой функции:

$$\min(C_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_j X_{ij}^* \quad (10)$$

при заданном ограничении:

$$P_{\text{вз}}(I, \mathcal{E}, Z) \in P_{\text{вз}}^{\text{треб}}, \quad (11)$$

где  $C_{\Sigma}$  – суммарные затраты на разработку и внедрение средств защиты от ЭМИ.

Выражения (10), (11) представляют собой задачу нелинейного целочисленного программирования. Наиболее общим подходом к решению таких задач является использование методов ограниченного перебора, среди которых наиболее известными являются методы ветвей и границ. Однако объем вычислений в этих методах имеет тенденцию к экспоненциальному росту

при увеличении числа переменных. Поэтому большое внимание уделяется эвристическим и приближенным методам решения задач данного типа. В частности, для определения рационального набора средств защиты используем приближенный метод оптимизации в целочисленных задачах с неаддитивным критерием [7]. Метод является итерационным, в каждой итерации которого выполняется  $K$  однотипных шагов, суть которых сводится к исследованию на основе моделирования эффективности применения средств защиты на всех уровнях иерархии построения образца ВВСТ, начиная последовательно от первого уровня (элементная база, комплектующие изделия), уровня подсистем (блоки, устройства) и заканчивая уровнем системы.

Алгоритм, реализующий предлагаемый метод, представлен на рисунке 3.

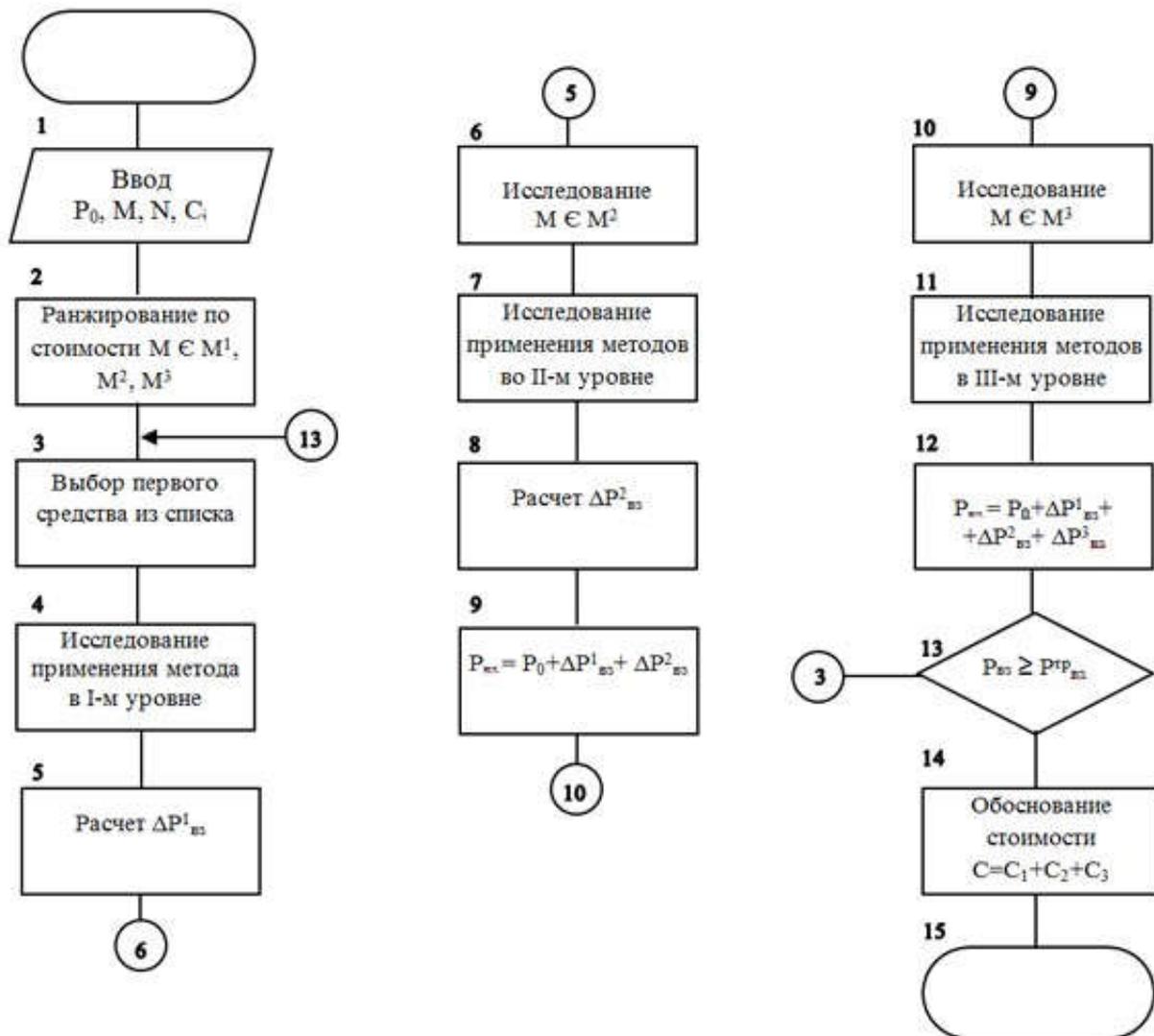


Рисунок 3 – Схема алгоритма выбора рационального комплекса средств защиты по критерию минимума стоимости образца ВВСТ

В алгоритме минимизация стоимости комплекса средств защиты достигается за счет ранжирования по стоимости средств, используемых на каждом уровне иерархии построения образца

ВВСТ ( $M^1, M^2, M^3$ ), исследования путем моделирования эффективности их применения, начиная с наиболее дешевого средства и определения прироста вероятности выполнения задачи  $\Delta P_{\text{вз}}$ . Данная процедура решается циклически с последующим выбором очередного средства из списка ранжированных по стоимости до тех пор, пока не выполнится условие достижения требуемого значения вероятности выполнения задачи ( $P_{\text{тп}}$ ).

Допустим, на  $i$ -м шаге  $n$ -й итерации условие (11) выполнилось. В этом случае производится расчет суммарной стоимости разработки средств обеспечения стойкости к ЭМИ на каждом уровне:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3,$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – стоимость разработки средств защиты, применяемых на уровнях иерархии ВВСТ.

Полученная сумма не в полной мере является оптимальной с точки зрения минимизации затрат по причине того, что расчет стоимости проводился отдельно для каждого уровня построения ВВСТ без учета влияния применения средств защиты на других уровнях. Однако на этапах формирования технико-экономических требований такой подход может быть использован для обоснования стоимости ВВСТ с учетом требований по стойкости к воздействию мощных ЭМИ.

### Выводы

1. Рассмотрена проблема обеспечения стойкости ВВСТ к воздействию мощных ЭМИ и ее значимость в современных условиях в связи с развитием и совершенствованием средств электромагнитного воздействия.

2. На основе выбранной модели стойкости и структуры ВВСТ предложена система показателей стойкости, учитывающая многоуровневое иерархическое построение систем вооружения.

3. Предложен подход к обоснованию стоимости ВВСТ по обеспечению требований стойкости к воздействию мощных электромагнитных излучений с учетом комплекса мероприятий по защите на всех уровнях иерархии образца ВВСТ – от элементной базы, комплектующих изделия до уровня блоков, устройств и системы в целом.

### Список использованных источников

1. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие военных технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация. – Тверь: Издательство ООО «КУПОЛ», 2009. – 624 с.

2. Военно-экономический анализ / Под ред. С.Ф. Викулова. – М.: Военное издательство, 2001. – 350 с.

3. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.

4. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.

5. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. – М.: Советское радио, 1976. – 344 с.