

УДК: 358.13

## О НОРМИРОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ САМОХОДНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ

### ON THE SAFETY STANDARDIZATION OF ROBOTIC SELF-PROPELLED ARTILLEY GUNS

По представлению чл.-корр. РАРАН Б.Э. Кэрта

**В.А. Чубасов<sup>1</sup>, А.С. Алешин<sup>2</sup>, А.И. Волков<sup>1</sup>, А.В. Михайлин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МВАртA, <sup>2</sup>БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

**V.A. Chubasov, A.S. Aleshin, A.I. Volkov, A.V. Mikhailin**

В статье проводится обоснование методологических подходов к нормированию безопасности функционирования роботизированных самоходных артиллерийских орудий в задаче оценки уровня их безопасной эксплуатации. Рассмотрены новые способы обеспечения безопасности сложных технических систем.

**Ключевые слова:** сложная техническая система, ракетно-артиллерийское вооружение, надежность, безопасность, роботизированное самоходное артиллерийское оружие.

The article substantiates methodological approaches to normalizing the safety of functioning of robotic self-propelled artillery guns in the task of assessing the level of their safe operation. New ways of ensuring the safety of complex technical systems are considered.

**Keywords:** complex technical system, rocket and artillery weapons, reliability, safety, robotic self-propelled artillery gun.

При эксплуатации роботизированных самоходных артиллерийских орудий (РСАО) с безэкипажными боевыми отделениями одним из важных вопросов является обеспечение безопасности их процесса функционирования. Для решения данного вопроса на практике необходимо создание системы обеспечения безопасности (СОБ), представляющей собой совокупность взаимосвязанных бортовых средств (системы блокировок, защитных средств) и организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности функционирования на уровне не ниже требуемого. Необходимость создания непосредственно бортовых СОБ обусловлена тем, что достижение требуемого уровня безопасности на перспективных РСАО невозможно без их оснащения специальными системами, позволяющими усилить защитные свойства сложной структуры взаимодействия человека с механизмами, придать ей способность актив-

но предотвращать возникновение особых ситуаций непосредственно в ходе функционирования РСАО.

Бортовая СОБ перспективного РСАО должна обеспечивать:

- исключение необходимости непрерывного контроля и точного выдерживания оператором РСАО большого числа ограничений на параметры и режимы функционирования, режимы работы систем, оборудования и вооружения;

- надежную подстраховку действий оператора и их корректировку в случае возникновения ошибок в управлении бортовым оборудованием и вооружением РСАО;

- информационную поддержку деятельности экипажа РСАО и активное вмешательство в управление РСАО при решении задач безопасности функционирования (выдерживание ограничений, парирование отказов, ошибок оператора и других опасных событий);

— возможность выявления неисправностей при использовании РСАО «не глядя в боевое отделение».

Необходимо отметить, что задача обоснования требований к СОБ может решаться как на этапе проектирования, так на этапе эксплуатации, поэтому подход, рассматриваемый в настоящей статье, применим как в том, так и другом случаях.

Обоснованию требований к СОБ РСАО предшествует этап анализа безопасности функционирования РСАО. В общем случае анализ безопасности функционирования РСАО будет включать: оценивание безопасности и выявление параметров для управления безопасностью [1, 11, 13, 14].

### Методика нормирования безопасности функционирования роботизированного самоходного артиллерийского орудия

Применяемые в большинстве работ [1, 2, 4–8] показатели безопасности (ПБ) сложных технических систем не всегда корректно могут быть применены в задачах исследования безопасности, т.к. они являются нечувствительны к тяжести последствий [10]. С учетом этого предлагается использовать систему показателей включающую  $\mathbf{P}_{<L>}$  — вектор вероятностей происшествий, возможных при функционировании РСАО, который позволяет рассмотреть объективно существующие при функционировании РСАО потенциальные опасности и учесть различие уровней потенциального ущерба от этих опасностей,  $p_1, \dots, p_l$  — вероятности возникновения причин происшествий возможных при функционировании РСАО.

Оценивание представляет собой процесс вынесения оценочного суждения об объекте оценивания. В большинстве случаев оно осуществляется по бинарной схеме, то есть возможным считаются два исхода оценивания: «функционирование РСАО на рассматриваемом интервале времени безопасно» и «функционирование РСАО на рассматриваемом интервале времени опасно». Для осуществления оценивания по такой схеме в качестве критерия оценивания в статье предложено применить критерий пригодности

$$P_{<L>} \in \left\{ P_{<L>}^{\delta} \right\}, \quad (1)$$

где  $\left\{ P_{<L>}^{\delta} \right\}$  — множество векторов допустимых значений вероятностей возникновения возможных происшествий.

Критерий (1) формально означает

$$G : P_{<L>} \in P_{<L>}^{\delta} \Leftrightarrow G : \begin{cases} p_1 \leq p_1^{\delta}; \\ p_2 \leq p_2^{\delta}; \\ \dots \\ p_L \leq p_L^{\delta}. \end{cases}$$

Таким образом, оценивание безопасности функционирования РСАО включает в себя три основных этапа:

1. Определение требований к безопасности  $\left\{ P_{<L>}^{\delta} \right\}$ ;
2. Расчет величин компонентов показателя безопасности  $P_{<L>}$ ;
3. Оценивание безопасности по критерию (1).

Очевидно, что для реализации первого этапа необходимо выполнить нормирование безопасного функционирования РСАО. Сущность предлагаемого подхода состоит в том, что требования к допустимой вероятности возникновения происшествия должны определяться индивидуально, с учетом возможного ущерба в результате данного типа происшествия и критериев экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации РСАО с учетом безопасности.

Применение РСАО по назначению имеет своей целью получение какого-либо полезного эффекта —  $\Delta C_{\text{пп}}$  (состояние  $S_k$ ). Однако применение РСАО по назначению связано с риском возникновения происшествия, оцениваемого ущербом и его размером —  $(W_n + \Delta C_{\text{пп}})P$  (состояние  $S_{\text{пп}}$ ). Данные рассуждения могут быть представлены в виде графа состояний РСАО, представленного на рисунке.

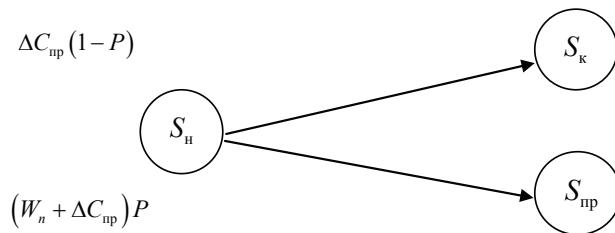


Рис. Граф состояния РСАО

Таким образом, представляется возможным утверждать, что безопасность функционирования РСАО может считаться допустимой в том случае, если полезный эффект от применения РСАО по назначению будет больше риска возникновения происшествия, то есть для происшествий, при которых ущерб наносится РСАО, сопрягающим системам или окружающей среде.

$$P^\delta = \frac{K_{\text{пр}} \Delta C_{\text{пр}}}{(1 + K_{\text{пр}}) \Delta C_{\text{пр}} + W_n} I_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $\Delta C_{\text{пр}} = (\Sigma 3 + A) K_{\text{рех}}$  — полезный эффект от применения РСАО;

$\Sigma 3 = (3_{\text{pm}} + 3_{\text{тсм}} + 3_{\text{эн}} + 3_{\text{зис}} + 3_{\text{то}}) K_{\text{общ}} K_{\text{прч}}$  — затраты направленные на применение (расходные материалы, горюче-смазочные материалы, энергия, эксплуатация зданий и сооружений, ремонт и проведение ТО);

$K_{\text{общ}} = 1 + \gamma$ ,  $\gamma$  — расходы верхнего уровня в долях от 1 ( $\sim 0,05\%$ );

$K_{\text{прч}} = 1 + \omega$ ,  $\omega$  — расходы не связанные с применением в долях от 1 ( $\sim 0,03\%$ );

$A$  — амортизация элементов РСАО;

$K_{\text{рех}}$  — коэффициент рентабельности;

$I_{\text{пр}} = I_{\text{план}} / I_{\text{проект}}$  — интенсивность применения РСАО по назначению в рассматриваемый период;

$I_{\text{план}}$  — количество запланированных применений в рассматриваемый период;

$I_{\text{проект}}$  — количество применений в рассматриваемый период, предусмотренное эксплуатационной документацией на РСАО.

$$W_n = W_{\text{непоср}} + W_{\text{стр}} + C_{\text{пст}} = (AC_{\text{зл}} + C_{\text{вост}} + C_{\text{рвр}}) + (\Sigma C_{\text{об}}) + [t(\Delta C_{\text{пр}}^{\text{пл}} - \Sigma_i^N (C_{\text{ил}} - C_{\text{ифакт}}))],$$

$W_n$  — возможный ущерб, при реализации происшествия  $n$ -го типа.

$AC_{\text{зл}}$  — стоимость поврежденных элементов (систем) с учетом амортизации;

$C_{\text{вост}}$  — стоимость элементов необходимых для восстановления работоспособности РСАО;

$C_{\text{рвр}}$  — стоимость ремонтно-восстановительных работ;

$\Sigma C_{\text{об}}$  — ущерб, причиненный прилегающим объектам;

$C_{\text{пст}}$  — неполученный эффект в результате простоя;

$t$  — время вынужденногоостоя;

$\Delta C_{\text{пр}}^{\text{пл}}$  — планируемый полезный эффект за время  $t$ ;

$C_{\text{ил}}$  — максимальная производительность за рассматриваемый период;

$C_{\text{ифакт}}$  — фактическая производительность за рассматриваемый период;

$K_{\text{пр}} = 1 - \Pi_\Sigma / n$  — коэффициент приемлемости риска, область возможных значений лежит в интервале от 0 до 1, определяется в зависимости от уровня развития производственных сил, близости потенциально опасных объектов, возможных последствий, а также перспектив дальнейшего применения РСАО [10];

$\Pi_\Sigma$  — суммарный показатель приемлемости риска для данной РСАО (определяется по данным экспертного опроса).

Для происшествий, при которых ущерб наносится людям, допустимая вероятность устанавливается как для практически невозможных событий —  $10^6$  (например ГОСТ Р 12.3.047 [12]).

Следовательно, выражение (2) отражает не только технико-экономический аспект обеспечения безопасности функционирования РСАО, но и принятый на текущий момент уровень «приемлемости риска».

Для реализации второго этапа необходимы модели возникновения возможных происшествий и исходные данные к ним. При этом, если модели могут быть построены как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации РСАО, то необходимые исходные данные к ним можно получить только на этапе эксплуатации. Целесообразно для реализации второго этапа применять подход предложенный в работе [2].

Таким образом, поэтапное оценивание безопасности функционирования РСАО на выходе дает  $\mathbf{P}_{\text{<L>}}$  — вектор вероятностей происшествий, возможных при функционировании РСАО.  $P_1^\delta, \dots, P_{\text{<L>}}^\delta$  — допустимые вероятности возникновения происшествий возможных при функционировании РСАО.

Не менее важным при этом будет поиск новых способов обеспечения безопасности функционирования, так РСАО как сложная техническая система является системой с временной избыточностью. С точки зрения безопасности эксплуатации они обладают специфическими чертами. В таких системах отказы при соблюдении некоторых условий могут не приводить

к срыву функционирования [3, 4]. При выполнении определенных требований к продолжительности восстановления работоспособности последствия отказов могут быть устранены и не отразятся на качестве и своевременности выполняемого системой задания [6]. Следовательно, нормальное функционирование таких систем может быть обеспечено не только вследствие повышения безотказности или увеличения объема аппаратуры, но и путем создания резерва времени и его использования для восстановления технических характеристик системы непосредственно в процессе ее эксплуатации. Примером могут служить системы с защитой, которые применяются в РСАО. В этих системах возможны два типа отказов: отказы-остановки и отказы-аварии [7]. К остановкам относятся отказы, когда функционирование системы прекращается, но это не сопровождается большими ее повреждениями и существенными материальными затратами. Аварии характеризуются значительными повреждениями системы и влекут за собой материальный ущерб. Авария, как правило, возникает не мгновенно. Вначале создается некоторая аварийная ситуация, которая имеет объективные симптомы и может быть обнаружена и устранена в течение некоторого допустимого времени, определяемого используемым в системе резервом времени. Этую задачу и выполняют устройства защиты. При отсутствии резерва времени и устройств защиты каждая аварийная ситуация в таких системах переходит в аварию [8, 9].

Новизна указанного подхода к анализу и обеспечению безопасности РСАО состоит во «взвешивании» отказов по критичности и признаку расходования времени на устранение их последствий. Это позволяет вскрыть и использовать для обеспечения нормального функционирования РСАО внутренние резервы (в частности, временные), заложенные в самих системах. Таким образом, учет такого важного эксплуатационного фактора, как времененная избыточность, дает возможность по новому подойти к оценке безопасности функционирования РСАО, обосновать мероприятия по совершенствованию конструкций систем и методики отработки действий экипажа, направленных на уменьшение вероятности аварии.

Безопасность РСАО будет обеспечена, если время  $T_1$  фактически затраченное на устранение

аварийной ситуации, не превышает предельно допустимого времени  $T_2$ . Причем время  $T_1$  складывается из времени обнаружения аварийной ситуации и времени собственно ее устранения. Тогда условие безопасности в рассматриваемой системе может быть записано (считаем  $T_1$  и  $T_2$  случайными элементами) в виде

$$P\{T_1 - T_2\} >> 0 \gg a, \quad (3)$$

где  $a$  — вероятность, с которой гарантируется безопасность в системе.

Величины  $T_1$  и  $T_2$  определяются эксплуатационно-техническим состоянием РСАО, ее конструктивной отработанностью, степенью изношенности, условиями эксплуатации, квалификацией обслуживающего персонала и множеством других причин.

На основании (3) имеем

$$\begin{aligned} P\{T_1 < T_2\} &= \int_0^{\infty} F(t) dG(t) = \\ &= V = \int_0^{\infty} F(t) g(t) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{где } F(t) &= P\{T_1 < t\}; G(t) = P\{T_2 < t\}; \\ g(t) &= G'(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) можно использовать при любых законах распределения случайных величин  $T_1$  и  $T_2$ , принимающих только положительные значения и имеющих плотности распределения, равные нулю при отрицательных значениях аргументов. Вместе с тем, эти формулы получены исходя из того, что за время эксплуатации или выполнения задания возникает не более одной аварийной ситуации.

В реальных условиях за весь срок службы РСАО или за время выполнения задания длительностью  $t$ , угроза аварийной ситуации может возникать неоднократно. В этом случае безопасность расчета РСАО в течение времени эксплуатации или выполнения задания будет обеспечена при следующих возможных событиях:

- аварийные ситуации отсутствуют;
- возникла одна аварийная ситуация, которая была устранена за допустимое время;
- возникло две аварийные ситуации, каждая из которых также была устранена за допустимое время.

Обозначим через  $\xi_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) — интервал времени между  $i$ -м в  $i + 1$ -м отказами, а через  $F_i(t) = P\{\xi_i < t\}$  — функцию распределения  $\xi_i$ . Предположим, что поток отказов образует поток с ограниченным последействием ( $\xi_i$  независимы в совокупности). Тогда в соответствии с определением отказа системы по формуле полной вероятности можно записать вероятность обеспечения безопасности обслуживающего персонала в течение времени  $t$ :

$$P(t) = \bar{F}_1(t) + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^t \int_0^{t-x_1} \cdots \int_0^{t-\sum_{s=1}^{k-1} x_s} \bar{F}_k \left( t - \sum_{s=1}^k x_s \right) \times \\ \times \prod_{s=1}^k dF_s(x_s) W\left(t - \sum_{s=1}^k x_s\right), \quad (6)$$

где  $\bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t)$ .

Здесь  $W(t)$  — вероятность того, что появившийся в некоторый момент времени отказ не приведет через время  $t$  к аварии. Определим эту вероятность. Очевидно

$$W(t) = P\{T_1 > t\} + \int_0^t P\{T_1 < u\} dP\{T_1 < u\} = \\ = \bar{G}(t) + \int_0^t F(u) dG(u). \quad (7)$$

Выражение (7) получено в предположении, что каждый отказ устраняется независимо. Часто предполагают, что поток отказов системы образует простейший поток с параметром  $\lambda$ . В этом случае

$$F_i(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & \text{при } t > 0; \\ 0, & \text{при } t \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Подставляя (8) в равенство (6), получаем искомую вероятность

$$P(t) = e^{-\lambda t} + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^k e^{-\lambda t} \int_0^t \int_0^{t-x_1} \cdots \\ \cdots \int_0^{t-\sum_{s=1}^{k-1} x_s} \prod_{s=1}^k W\left(t - \sum_{l=1}^s x_l\right) dx_s. \quad (9)$$

На практике иногда имеет место ситуация, когда может быть устранен только один отказ и наличие двух отказов в системе приводит к аварии. Очевидно, появление некоторого отказа в момент  $\sum_{l=1}^s x_l$  не приводит к аварии либо тогда, когда

$T_2 > t - \sum_{l=1}^s x_l$ , если  $x_{s+1} >> t - \sum_{l=1}^s x_l$ , то есть больше отказов не было до момента  $t$  и допустимое время  $T_2$  достаточно велико, либо тогда, когда следующий отказ появился до момента  $t$ , то есть  $x_{s+1} < t - \sum_{l=1}^s x_l$ , но предыдущий отказ был к этому моменту устранен ранее допустимого времени  $T_2$ . Другими словами, в этом случае имеет место событие

$$\{T_1 < \min(T_2, T_2)\}.$$

В первом случае вероятность отсутствия аварии равна  $W\left(t - \sum_{l=1}^s x_l\right)$ , во втором случае вероятность события (9) такова

$$W^*(x_{s+1}) = \int_0^{x_{s+1}} \bar{G}(x) dF(x).$$

Формулы (6) и (9) принимают вид

$$P(t) = \bar{F}_1(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{t-\sum_{s=1}^{k-1} x_s} \bar{F}_k \left( t - \sum_{s=1}^k x_s \right) \times \\ \times \prod_{s=1}^k dF_s(x_s) \prod_{s=1}^{k-1} W^*(x_s) W\left(t - \sum_{s=1}^k x_s\right);$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} + e^{-\lambda t} \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^k \int_0^t \int_0^{t-\sum_{s=1}^{k-1} x_s} \times \\ \times \prod_{s=1}^{k-1} W^*(x_s) W\left(t - \sum_{s=1}^k x_s\right) dx_1 \dots dx_k.$$

## Выводы и рекомендации

Предложенный подход к анализу безопасности РСАО позволит нормировать вероятности возникновения происшествий при построении логико-вероятностной модели в условиях недостаточности исходных данных и в последующем структурном анализе.

Новый подход к обеспечению безопасности позволит учесть такой важный фактор, как временную избыточность изделия, повышающую безопасность функционирования рассматриваемых систем, при заданных показателях эффективности боевого применения. Кроме того, количественная оценка временной избыточности позволит определить степень влияния конкретных мероприятий по совершенствованию конструкции изделия на безопасность функционирования РСАО.

### Литература

1. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового энергетического комплекса: теория, проектирование, применение / Н.Н. Макаров. — М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет. 2009. 760 с.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб: Политехника. 2000. 248 с.
3. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа. 1976. 406 с.
4. Переездчиков И.В. Анализ опасностей промышленных систем человек – машина – среда и основы защиты: учебное пособие / И.В. Переездчиков. — М.: КНОРУС. 2011. 784 с.
5. Северцев Н.А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации. Учебное пособие для акад. бакалавриата // Н.А. Северцев. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ИЮРАЙТ. 2019. 435 с.
6. Северцев Н.А. Исследование операций. Принципы принятия решений и обеспечения безопасности. Учебное пособие для вузов / Н.А. Северцев, А.Н. Катулев. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ИЮРАЙТ. 2020. 319 с.
7. Майоров А.В. Безопасность функционирования автоматизированных объектов / А.В. Майоров, Г.К. Москатов, Г.П. Шибанов. — М.: Машиностроение. 1988. 264 с.
8. Бирюков Г.П. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов / Г.П. Бирюков, Ю.Ф. Кукушкин, А.В. Торпачев. — М.: Изд-во МАИ. 2002. 264 с.
9. Остяков Ю.А. Проектирование механизмов и машин. Эффективность, надежность и техногенная безопасность: учебное пособие / Ю.А. Остяков, И.В. Шевченко. — М.: ИНФРА-М. 2018. 260 с.
10. Гера В.И. О нормировании безопасности сложных технических систем и критериях приемлемого риска. — СПб: БГТУ «Военмех». Материалы конференции «II-е Уткинские чтения». Том. 2. 2005. 260 с.
11. Чубасов В.А., Михайлин А.В., Алешин А.С. Показатели безопасности эксплуатации сложных технических систем в рамках новых подходов к стандартам по безопасности // Известия РАРАН. 2020. № 2 (112). С. 105–109.
12. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда пожарная безопасность технологических процессов общие требования методы контроля. — М.: Стандартинформ 2014. 65 с.
13. Чубасов В.А., Кежаев В.А., Алешин А.С. Концептуальная модель прогнозирования изменения технического состояния ракетно-артиллерийского вооружения при различных режимах его эксплуатации // Известия РАРАН. 2019. № 4 (109). С. 95–102.
14. Алешин А.С., Сазыкин А.М. Оценка надежности комплексов артиллерийского вооружения по годам выпуска в условии неопределенности // Известия РАРАН. 2017. № 3. С. 40–44.