

В. И. Потапов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, ivt@omgtu.ru,
Омский государственный технический университет

Новая математическая модель аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации

Разработана математическая модель аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации, в которую введены дополнительные ограничения, отражающие реальные условия работы технической системы, связанные с особенностью подключения резервных блоков для замены отказавших в процессе конфликта основных функциональных блоков. Модель также учитывает конечную надежность системы контроля работы технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших в процессе конфликта. Предложен метод приближенного вычисления среднего времени "жизни" технической системы, участвующей в конфликте, позволяющий находить оптимальные параметры структуры технической системы, обеспечивающие максимизацию ее среднего времени "жизни" в процессе конфликта.

Ключевые слова: математическая модель, конфликтная ситуация, техническая система, среднее время "жизни", приближенное вычисление

Введение

Вопросам поведения технических систем в конфликтных ситуациях и проблемам оптимизации их надежности в процессе конфликта за счет целенаправленного использования для защиты от атак противника аппаратной избыточности посвящено большое число научных работ отечественных и зарубежных авторов. Наиболее близкими из них по содержанию к проблемам, рассматриваемым в данной статье, являются работы [1–10]. По-видимому, монография [1] является одной из первых работ, где для защиты участвующей в конфликтной ситуации технической системы от атак противника, в качестве которого может выступать другая техническая система, используется оптимальным образом аппаратная избыточность, обеспечивающая максимизацию вероятности безотказной работы либо среднего времени "жизни" (среднего времени до полного отказа) атакуемой системы в течение времени конфликта. Ряд ранних работ [2–4] посвящен аналитическим исследованиям решения задач теории конфликта сложных систем без детализации их структуры, что затрудняет их использование на практике. В этих работах рассматриваются вопросы, относящиеся к проблемам оптимального управления подвижными объектами в конфликтных ситуациях, предложен метод направленной оптимизации вектора начальных координат в одной модели конфликта подвижных объектов, технические характеристики которых ухудшались в результате конфликтного взаимодействия с объектами противника и приводили к старению системы, что естественно, увеличивало вероятность отказа этой системы. Также в этих работах изучаются вопросы оптималь-

ного управления конфликтующими подвижными объектами для достаточно сложных моделей конфликта, в которых на надежность участвующего в конфликте объекта влияет не только взаимодействие с противостоящим подвижным объектом, но и взаимодействие с изменяющимися пространственными факторами, такими как физико-географические особенности пространства, радиационная обстановка и др. В этих работах основное внимание уделено постановке задач и разработке математических методов и моделей оптимизации управления подвижными конфликтующими объектами, при этом, к сожалению, структура самих объектов и структура системы управления, а также алгоритмы для численного решения сформулированных задач в этих работах не рассматриваются, что влияет на адекватность моделей реальным конфликтующим объектам и существенно затрудняет использование полученных алгоритмов на практике. В определенной степени указанные выше недостатки, касающиеся структуры моделей, участвующих в конфликтной ситуации технических систем, и численных алгоритмов решения задач оптимизации их надежности в процессе конфликта устранены в работах [6–10]. Однако и в этих работах для упрощения моделей конфликтующих технических систем считалось, что система контроля работы технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших функциональных в атакуемой в процессе конфликта системы пренебрежимо мала, и ее реальная надежность не учитывалась. Также полагалось, что любой резервный блок, относящийся к соответствующей группе основных и резервных блоков, может подключаться для замены любого подряд стоящего отказавшего основного функцио-

нального блока из этой группы. На самом деле это не всегда возможно в силу технических или технологических причин, а также в силу ряда причин, вызванных особенностями взаимодействия основных и резервных блоков друг с другом. Поэтому при разработке математической модели, участвующей в конфликтной ситуации аппаратно-избыточной технической системы, следует учитывать этот фактор и вводить новый дополнительный параметр, характеризующий особенности подключения резервных блоков для замены отказавших основных блоков в соответствующей группе. Это наряду с учетом конечной надежности системы контроля работы участвующей в конфликте технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших функциональных блоков повысит адекватность модели реальным условиям работы аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации и позволит вычислять характеристики надежности системы в процессе конфликта с большей точностью.

В данной статье делается попытка устранить отмеченные выше пробелы в указанных работах и разработать новую математическую модель аппаратно-избыточной технической системы и метод приближенного вычисления среднего времени "жизни" технической системы, участвующей в конфликте, позволяющие находить оптимальные параметры структуры технической системы, обеспечивающие максимизацию ее среднего времени "жизни" в течение конфликта.

Особенности математической модели аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации

По аналогии с работами [6—10] будем считать, что в конфликтной ситуации участвует техническая система, состоящая из n ($n = n_1 + n_2 + \dots + n_q$) основных функциональных m ($m = s_1 + s_2 + \dots + s_q$) резервных блоков, разбитых на q групп, в каждой из которых находятся n_i ($1 \leq i \leq q$) основных и s_i ($1 \leq i \leq q$) резервных блоков, представляющих целочисленный вектор резервирования $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$, используемых для замены отказавших основных блоков только в соответствующей группе. При этом в указанных работах в целях упрощения математической модели аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации и использующей для защиты от атак противника резервные блоки, никакие другие ограничения, кроме отмеченных выше, не накладывались. На самом деле, в силу специфики организационно-структурных принципов построения и конструктивных особенностей реальных технических систем, программно-алгоритмических и технологических процессов их работы появляется дополнительное ограничение на замену отказавших основных блоков резервными, сводящееся к тому, что в силу указанных причин обеспечивается возможность подключения резервных блоков в i -й группе вместо не более чем r_i ($1 \leq r_i \leq n_i$) расположенных подряд отка-

завших основных блоков в этой группе. Очевидно, что при $q = 1$ $r_i = r$ ($1 \leq r \leq m$), а n основных и m резервных функциональных блоков технической системы объединены в одну группу. Учет этого ограничения в рассматриваемой математической модели аппаратно-избыточной технической системы делает модель более адекватной реальным техническим системам и позволяет получать более точные характеристики надежности системы при моделировании ее поведения в процессе конфликта.

При разработке математических моделей технических аппаратно-избыточных систем, участвующих в конфликтных ситуациях, в работах [6—10] считалось, что вероятность отказа системы C_{kn} контроля работы аппаратно-избыточной системы и подключения резервных блоков вместо отказавших основных функциональных блоков пренебрежимо мала, и ее, вообще говоря, конечная надежность, влияющая на надежность всей участвующей в конфликте системы, не учитывалась. Это также привело к занижению точности результатов моделирования поведения системы в конкретной конфликтной ситуации, так как не учитывалось влияние атак противника на надежность и возможный отказ системы C_{kn} контроля работы и подключения резервных блоков и в конечном итоге влияло на стратегию поведения технической системы в течение времени конфликта и оптимизацию ее надежности.

В предлагаемой математической модели аппаратно-избыточной технической системы, которую обозначим $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ учитывается конечная надежность данной системы контроля с учетом дестабилизации ее работы со стороны атак противника, стремящегося увеличить интенсивность отказов системы C_{kn} и вывести ее в состояние отказа. При этом будем полагать, что C_{kn} -система в работоспособном состоянии обнаруживает отказы работающих функциональных блоков участвующей в конфликте технической системы сразу же после их возникновения под действием атак противника, а время подключения резервного блока вместо отказавшего равно нулю.

Отказы в резервных блоках, не включенных еще в состав рабочей группы технической системы вместо основных блоков, не обнаруживаются C_{kn} -системой и не приводят к их переключению, однако они уменьшают ресурс надежности технической системы $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$. Отказ устройства C_{kn} контроля и подключения резервных блоков вместо отказавших не вызывает немедленного отказа $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ -системы, но после его появления последующий отказ любого рабочего блока приводит к отказу всей технической системы, участвующей в конфликте.

Постановка и решение задачи

Будем считать, что аппаратно-избыточная техническая система $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ оказалась в конфликтной ситуации, когда противник преследует цель дестабилизировать ее работу, т. е. уменьшить ресурс работоспособности системы, что с точки зре-

ния теории надежности означает увеличить в течение времени конфликта вероятность отказа системы, либо уменьшить среднее время ее "жизни" до полного отказа, т. е. "гибели" системы. В качестве средства атаки противник имеет возможность влиять на увеличение в процессе конфликта интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ ($1 \leq i \leq n$) основных функциональных блоков и интенсивности отказов не включенных в работу резервных блоков $\lambda_0(t)$ технической системы, а также на увеличение интенсивности отказов $\lambda_c(t)$ системы C_{kn} контроля работы и подключения резервных блоков вместо отказавших. При этом в зависимости от стратегии атакующего противника закон возрастания интенсивности отказов может изменяться, например от линейного до экспоненциального.

Учитывая вероятностный характер поведения участвующей в конфликтной ситуации $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы обозначим $p_i(t)$ — вероятность нахождения системы в состоянии с i ($0 \leq i \leq m$) отказами в работающих функциональных блоках; $p_{kn}(t)$ — вероятность нахождения рассматриваемой системы в состоянии отказа системы C_{kn} контроля ее работы и подключения резервных блоков вместо отказавших основных функциональных блоков.

Обозначим A_k ($1 \leq k \leq m$) — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния с $(k-1)$ отказами в основных работающих функциональных блоках в состояние с k подобными отказами; B_k ($1 \leq k \leq m+1$) — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния с $(k-1)$ отказами в состояние "гибели", т. е. полного отказа системы; B_{kn} — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния отказа системы C_{kn} контроля ее работы и подключения резервных блоков вместо отказавших в состояние "гибели" системы.

Аппроксимируя поведение участвующей в конфликте технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ марковским процессом в предположении простейшего потока отказов, нетрудно получить по известной методике [11, 12] систему дифференциальных уравнений Колмогорова, описывающих функционирование рассматриваемой технической системы в условиях конфликта:

$$\begin{aligned} p'_0(t) &= -D_1 p_0(t); \\ p'_k(t) &= A_k p_{k-1} - D_{k+1} p_k(t), \\ k &= 1, 2, \dots, m; \\ p'_{kn}(t) &= \lambda_c(t)[p_0(t) + p_1(t) + \dots + p_m(t)] - B_{kn} p_{kn}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = \dots = p_m(0) = p_{kn}(0) = 0,$$

где

$$\begin{aligned} D_k &= A_k + B_k, \quad 1 \leq k \leq m; \\ D_{m+1} &= B_{m+1}; \\ B_{kn} &= n\lambda_c(t). \end{aligned}$$

Теперь необходимо определить коэффициенты A_k и B_k из системы уравнений (1).

С учетом разработанной математической модели аппаратно-избыточной технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$, участвующей в конфликтной ситуации, коэффициенты A_k и B_k для каждой i -й ($1 \leq i \leq q$) группы основных и резервных блоков рассматриваемой системы имеют следующий вид:

$$A_k = z_k(\alpha_i - k + 1)\lambda_i(t), \quad 1 \leq k \leq m;$$

$$B_k = (1 - z_k)(\alpha_i - k + 1)\lambda_i(t); \quad 1 \leq k \leq m,$$

где $\alpha_i = n_i + m_i$ — общее число блоков в i -й группе;

$$z_k = \begin{cases} 1, & \text{если } 1 \leq k \leq r, \\ \binom{\alpha_i}{k}^{-1} d(\alpha_i, r_i, k), & \text{если } r_i + 1 \leq k \leq m_i, \end{cases}$$

а $d(\alpha_i, r_i, k)$ — число расстановок k единиц на α_i местах таких, что ни в одной расстановке нет более, чем r_i подряд стоящих единиц. При этом отказавшему блоку (элементу) системы ставится в соответствие число 1, а не отказавшему — число 0. Легко понять, что $d(\alpha_i, r_i, k)$ есть число решений диофантова уравнения

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{\alpha_i - k + 1} = k \quad (2)$$

с ограничениями

$$0 \leq x_1 \leq r_i, \quad 0 \leq x_2 \leq r_i, \quad \dots, \quad 0 \leq x_{\alpha_i - k + 1} \leq r_i.$$

Физическая интерпретация диофантова уравнения (2) следующая: x_1 — число отказов в строке до первого неотказавшего блока; x_2 — число отказов между первым и вторым неотказавшими блоками и т. д.

Рекуррентная формула для числа решений уравнения (2) может быть получена методом производящей функции [13, 14]. Однако, как показал опыт, этот метод достаточно громоздкий и не удобен для программирования. Поэтому воспользуемся более удобным для программирования методом, приведенным в работе [15], который в применении к уравнению (2) дает следующий результат:

$$d(\alpha_i, r_i, k) = \sum_{i=0}^{\alpha_i - k + 1} (-1)^i \binom{\alpha_i - k + 1}{i} \binom{\alpha_i(r_i + 1)i}{k - (r_i + 1)i}.$$

Очевидно, что при $i = 1$ $\alpha_i = \alpha = (n + m)$, а $r_i = r$ ($1 \leq r \leq m$). Полученные выражения для коэффициентов системы уравнений (1) указывают на то, что для исследования поведения и оптимизации с точки зрения надежности участвующей в конфликтной ситуации технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ в соответствии с разработанной математической моделью необходимо решать систему дифференциальных уравнений с переменными во времени коэффициентами, сложность которых практически исключает использование напрямую аналитических методов. Поэтому в силу принятого предположения о простейшем потоке отказов в работе предлагается следующий метод приближенного вычисле-

ния среднего времени T "жизни" участвующей в конфликте технической $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы:

$$T = \sum_{l=0}^{m-1} T_l,$$

где T_l — среднее время работы технической системы между l -м и $(l+1)$ -м отказами в процессе конфликта, а m — число резервных блоков в системе.

В силу принятых предположений поведение рассматриваемой $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы после отказа l -го ($1 \leq l \leq m-1$) функционального рабочего блока и замены отказавших блоков резервными можно описать следующей системой дифференциальных уравнений, полученной из системы (1) путем смещения начала отсчета времени в точку $\tau = T_0 + T_1 + \dots + T_{l-1}$, считая при этом, что интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, $\lambda_0(t)$ и $\lambda_c(t)$ являются постоянными и равными среднему значению интенсивности отказов на рассматриваемом временном интервале (в зависимости от целей исследования указанные интенсивности отказов могут быть приняты равными значениям на границах временного интервала):

$$\begin{aligned} p'_{l,l}(t) &= -D_l p_{l,l}(t); \\ p'_{i,l}(t) &= A_i p_{i-1,l}(t) - D_{i+1} p_{i,l}(t), \\ i &= l+1, l+2, \dots, m; \\ p'_{kn,l}(t) &= \lambda_{c,l} p_{l,l}(t) + p_{l+1,l}(t) + \dots + \\ &+ p_{m,l}(t) - B_{kn} p_{kn,l}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$p_{l,l}(0) = 1, p_{l+1,l}(0) = p_{l+2,l}(0) + \dots + p_{m,l}(0) + p_{kn,l}(0) = 0.$$

Решение системы уравнений (3) имеет вид

$$p_{l,l}(t) = \exp(-D_l t); \quad (4)$$

$$p_{i,l}(t) = F_{i,l} \sum_{v=l}^i \exp(-D_v t) \left[\prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1}; \quad (5)$$

$(l+1 \leq i \leq m);$

$$F_{i,l} = \prod_{j=l}^{i-1} A_j; \quad (6)$$

$$p_{kn,l} = \lambda_{c,l} \left\{ \exp(-D_l t) (B_{kn} - D_l)^{-1} - R_l \exp(-B_{kn} t) + \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \exp(-D_v t) \left[(B_{kn} - D_v) \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1} \right\}, \quad (7)$$

где

$$R_l = (B_{kn} - D_l)^{-1} + \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \left[(B_{kn} - D_v) \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Используя выражения (4)–(8), нетрудно вычислить среднее время работы $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы между l -м и $(l+1)$ -м отказами по формуле

$$T_l = \int_0^{\infty} p_{kn,l}(t) dt + \sum_{i=l}^{m-1} \int_0^{\infty} p_{i,l}(t) dt. \quad (9)$$

После соответствующих преобразований имеем

$$T_l = \left(\frac{\lambda_{c,l}}{B_{kn}} + 1 \right) \times \left\{ \frac{1}{D_l} + \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \left[D_v \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1} \right\}, \quad (10)$$

$l = 0, 1, \dots, m-1.$

Теперь не представляет особого труда численным методом вычислить приближенное значение среднего времени "жизни" рассматриваемой системы или, иными словами, среднее время T работы технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ до полного отказа в процессе конфликта.

Заключение

Используя разработанную в статье математическую модель аппаратно-избыточной технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$, участвующей в конфликтной ситуации, зная (или предполагая) стратегию поведения атакующей стороны, которая заключается в соответствующем воздействии на техническую систему, приводящем к возрастанию во время конфликта интенсивностей отказов блоков системы $\lambda_i(t)$, $\lambda_0(t)$, $\lambda_c(t)$ по выбранному атакующей стороне закону, и применяя предложенный метод приближенного вычисления среднего времени работы атакуемой технической системы между отказами и среднего времени "жизни" системы в процессе конфликта с помощью компьютерного моделирования, можно найти оптимальные параметры структуры аппаратно-избыточной $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы при заданных значениях n, m, r_j , обеспечивающие максимизацию времени "жизни" технической системы в процессе конфликта.

Список литературы

1. **Потапов В. И., Братцев С. Г.** Новые задачи оптимизации резервированных систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 112 с.
2. **Nartov В. К.** Conflict of Moving Systems. AMSE Press, France, 1994. 87 p.
3. **Нартов В. К., Братцев С. Г., Мурзин Ф. А., Пунтус А. А.** Конфликт сложных систем. Модели и управление. М.: Изд-во МАИ, 1995. 120 с.
4. **Нартов В. К.** Управление подвижными объектами. Формализация и модели. Омск: Изд-во ОмГУ, 2002. 83 с.
5. **Лефевр В. А.** Конфликтующие структуры. М.: Сов. радио, 1973. 159 с.
6. **Потапов В. И.** Модель и алгоритм численного решения задачи противоборства двух избыточных, восстанавливаемых после отказов технических систем // Проблемы управления и информатики. 2015. № 4. С. 70–78.
7. **Потапов В. И.** Математическая модель и алгоритм оптимального управления подвижным объектом в конфликтной си-

туации // Мехатроника, автоматика, управление. 2014. № 7. С. 16–22.

8. **Потапов В. И.** Задачи и численные алгоритмы оптимизации надежности аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации при различных стратегиях защиты от атак противника // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 16. 2015. № 9. С. 617–624.

9. **Potapov V. I.** Model and Numerical Solving Algorithm of Counteraction Problem for Two Restored after Failure Redundant Engineering Systems // Journal of Automation and Information Sciences. Vol. 47. P. 41–51.

10. **Потапов В. И.** Противоборство технических систем в конфликтных ситуациях: модели и алгоритмы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 168 с.

11. **Вентцель Е. С.** Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 550 с.

12. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.

13. **Риордан Дж.** Введение в комбинаторный анализ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 287 с.

14. **Холл М.** Комбинаторика. М.: Мир, 1970. 424 с.

15. **Сачков В. Н.** Комбинаторные методы дискретной математики. М.: Наука, 1978. 486 с.

A New Mathematical Model of a Hardware-Redundant Technical System Involved in a Conflict Situation

V. I. Potapov, ivt@omgtu.ru✉, Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation

Corresponding author: **Potapov Victor I.**, D. Sc., Professor, The Head of the Department of Informatics and computer engineering, Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: ivt@omgtu.ru

Received on February 26, 2016

Accepted on March 11, 2016

A new mathematical model of the hardware-redundant technical system has been developed, containing the main functional and redundant units, for their plug-in instead of the failed main ones, in a conflict situation. In the proposed model, besides the restrictions associated with the replacement of the failed units, the backup only in the group, to which they relate, has further restrictions, reflecting the real working conditions and organizational and structural principles of the technical systems associated with the external backup units intended to replace the failed the main functional units in the corresponding group of the units in the process of a conflict. The aim of these restrictions is to ensure that the reasons to connect the redundant power in the relevant group are not less than certain constructive and technical features of the system, the number of the main units arranged in a row, failed in the process of a conflict in this group. The model also takes into account the reliability of the system of the final control over the technical system and connection of the redundant power instead of the failed one during a conflict. Due to its behavior involved in a conflict situation, the technical system is described by a system of differential equations with the variable in time coefficients, while the study of this system by analytical methods is not possible. Therefore, in this paper the authors propose a method of approximate calculation of the average lifetime of a technical system involved in a conflict, allowing numerical methods to determine the optimal structure parameters of the technical system, which ensures maximization of its average lifetime in the process of a conflict.

Keywords: mathematical model, conflict situation; technical system; average lifetime, approximate calculation

For citation:

Potapov V. I. A New Mathematical Model of the Hardware-Redundant Technical Systems, Involved in the Conflict Situation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 363–367.

DOI: 10.17587/mau.17.363-367

References

1. **Potapov V. I., Bratcev S. G.** *Novye zadachi optimizatsii rezervirovannykh sistem* (New optimization problem of the redundant systems), Irkutsk, Publishing house of Irkut. University, 1986, 112 p. (in Russian).

2. **Nartov B. K.** Conflict of Moving Systems, AMSE Press, France, 1994, 87 p.

3. **Nartov B. K., Bratcev S. G., Murzin F. A., Puntus A. A.** *Konflikt slozhnykh sistem. Modeli i upravlenie* (Conflict of complex systems. Models and management), Moscow, Publishing house of MAI, 1995, 120 p. (in Russian).

4. **Nartov B. K.** *Upravlenie podvizhnymi ob"ektami. Formalizatsiya i modeli* (Management of mobile objects. Formalization and models), Omsk, Publishing house of OmGTU, 2002, 83 p. (in Russian).

5. **Lefevr V. A.** *Konfliktuyushchie struktury* (Conflicting structures), Moscow, Sov. radio, 1973, 159 p. (in Russian).

6. **Potapov V. I.** *Model' i algoritm chislenogo resheniya zadachi protivoborstva dvuh izbytochnykh, vosstanavlivaemykh posle otkazov tekhnicheskikh sistem* (Model and algorithm of numerical solution of the problem of confrontation between two redundant, recoverable after failure of technical systems), *Problemy Upravleniya i Informatiki*, 2015, no. 4, pp. 70–78 (in Russian).

7. **Potapov V. I.** *Matematicheskaya model' i algoritm optimal'nogo upravleniya podvizhnym ob"ektom v konfliktnoy situatsii* (Mathematical

model and algorithm of optimal control of a movable object in a conflict situation), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 16–22 (in Russian).

8. **Potapov V. I.** *Zadachi i chislennyye algoritmy optimizatsii nadezhnosti apparatno-izbytochnoy tekhnicheskoy sistemy v konfliktnoy situatsii pri razlichnykh strategiyyah zashchity ot atak protivnika* (Tasks and numerical algorithms of optimization of reliability of a hardware-redundant technical systems in a conflict situation in different strategies of protection from the attacks of the enemy), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 617–624 (in Russian).

9. **Potapov V. I.** Model and Numerical Solving Algorithm of Counteraction Problem for Two Restored after Failure Redundant Engineering Systems, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, vol. 47, p. 41–51.

10. **Potapov V. I.** *Protivoborstvo tekhnicheskikh sistem v konfliktnykh situatsiyah: modeli i algoritmy* (Confrontation of technical systems in conflict situations: models and algorithms), Omsk, Publishing house of OmGTU, 2015, 168 p. (in Russian).

11. **Venttsel' E. S.** *Issledovanie operatsij* (Operations Research), Moscow, Sov. radio, 1972, 550 p. (in Russian).

12. **Kozlov B. A., Ushakov I. A.** *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* (Handbook of reliability calculation apparatus of radio electronics and automatics), Moscow, Sov. radio, 1975, 472 p. (in Russian).

13. **Riordan Dzh.** *Vvedenie v kombinatornyj analiz* (Introduction to combinatorial analysis), Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1963, 287 p. (in Russian).

14. **Holl M.** *Kombinatorika* (Combinatorics), Moscow, Mir, 1970, 424 p. (in Russian).

15. **Sachkov V. N.** *Kombinaturnye metody diskretnoy matematiki* (Combinatorial methods of discrete mathematics), Moscow, Nauka, 1978, 486 p. (in Russian).