

## Математическая модель оптимального управления надежностью в охранных системах с нейросетевыми контроллерами

*Е.Г. Царькова*

*Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», НИЦ-1, Москва*

**Аннотация:** В работе рассматриваются методы повышения эффективности периметровых систем охраны за счет использования нейросетевых технологий обработки сигналов, служащих повышению информативности данных, поступающих от охранных извещателей. Предложенный подход позволяет не только своевременно устанавливать факт противоправных действий по преодолению периметра объекта, но и классифицировать нарушителя при минимальном уровне ложных срабатываний. Отдельное внимание уделено вопросам оптимального управления надежностью работы блоков обработки сигналов с логическим нейросетевым анализатором, рассматриваемых в качестве систем массового обслуживания.

**Ключевые слова:** комплексная безопасность, охранный извещатель, зона обнаружения, блок обработки сигналов, искусственная нейронная сеть, нейросетевая обработка сигналов, надежность, система массового обслуживания, оптимальное управление, принцип максимума.

Сегодня рост криминально-террористических угроз приводит к необходимости совершенствования систем охраны важных государственных объектов [1]. При этом особое значение приобретают вопросы повышения безопасности охраняемых объектов за счет совершенствования периметровых систем обнаружения, в том числе, путем внедрения нейросетевых механизмов обработки сигналов в таких системах [2–4]. Нейросетевая обработка информации реализуется в блоке обработки сигналов. Использование нейронных сетей позволяет распознавать помехи и отдельные признаки нарушителя, отделять полезный сигнал от шумов, обеспечивая рост надежности обнаружения и снижение количества ложных срабатываний [4, 5]. Обобщенная схема работы блока обработки сигналов с логическим нейросетевым анализатором приведена на рис. 1.



Рис. 1. – Обобщенная схема работы блока обработки сигналов

Для повышения вероятности обнаружения нарушителя в системах безопасности охраняемого объекта могут быть использованы комбинированные охранные извещатели, одновременно использующие несколько чувствительных элементов, функционирующих на различных физических принципах. Рост числа извещателей позволяет увеличить количество фиксируемых признаков нарушителя, что обеспечивает возможность снижения величины вероятности пропуска цели и ложных срабатываний [5–7].

Каждый из чувствительных элементов в комбинированном охранном извещателе формирует собственную зону обнаружения. На рис. 2 приведена схема работы комбинированного извещателя с общей зоной обнаружения для всех чувствительных элементов.

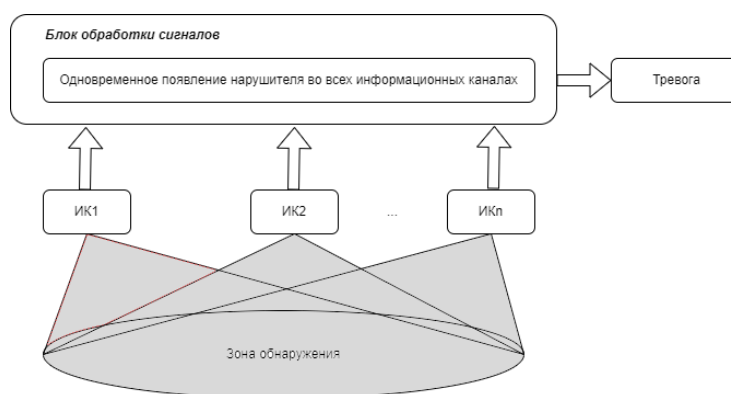


Рис. 2. – Совмещение информационных каналов комбинированного извещателя в одном объеме пространства

В рассматриваемом случае комбинированный охранный извещатель образован двумя (либо несколькими) чувствительными элементами с различными физическими принципами действия, общим блоком обработки сигналов и выделенными отдельными каналами обработки информации, поступающей от чувствительных элементов. Нейросетевая обработка информации в блоке обработки сигналов приводит к существенным затратам вычислительных ресурсов [8, 9]. Эффективная работа такой системы в режиме реального времени требует не только достаточных ресурсов для обработки данных и выполнения процедур самообучения, но и качественной настройки ее параметров [10]. В целях снижения вероятности отказа при обработке поступающих сигналов в состав системы может быть включен резервный модуль обработки сигналов, используемый в моменты пиковой нагрузки на систему. Представленная система может быть формализована в виде одноканальной системы массового обслуживания (СМО) с заявками различных типов и, в общем случае, динамическими параметрами обслуживания заявок. Рассмотрим математическую модель данной СМО.

Пусть в одноканальную СМО поступают заявки двух типов: заявки 1-го типа – сигналы, формируемые 1-ым чувствительным элементом, заявки 2-го типа – формируемые 2-ым элементом.

В результате поступления сигналов система может находиться в одном из трех состояний:  $S_0, S_1, S_2$  с вероятностями, соответственно,  $P_0, P_1, P_2$ :  $S_0$  – необслуженных заявок нет;  $S_1$  – поступила заявка 1-го типа, обслуживается в канале обслуживания (КО);  $S_2$  – поступила заявка 2-го типа, обслуживается в КО. Для оценки качества СМО необходимо рассмотрение значений вероятностей следующих событий:  $S_0$  – проблемных ситуаций не возникло (заявок нет), все каналы обслуживания свободны;  $S_n$  – хотя бы один из каналов обслуживания свободен и может обслужить заявку (обработать

---

поступивший сигнал);  $S_{отк}$  – все каналы обслуживания заняты, поступивший сигнал не может быть обработан. Вероятности данных событий равны, соответственно,  $p_0, p_n, p_{отк}$ .

На рис. 3 приведен граф переходов для состояний  $S_0, S_1, S_2$  рассматриваемой СМО.

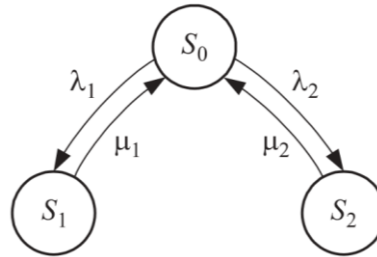


Рис. 3. – Граф переходов одноканальной СМО с двумя типами заявок

С учетом сделанных предположений для состояний  $S_0, S_n, S_{отк}$  имеем следующие соотношения:

$$S_n = S_0, S_{отк} = S_1 \cup S_2. \quad (1)$$

Согласно теореме Колмогорова, система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний системы имеет следующий вид:

$$\frac{dP_0}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \quad \frac{dP_1}{dt} = \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1; \quad \frac{dP_2}{dt} = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2. \quad (2)$$

Графики вероятностей при значениях параметров:  $\lambda_1 = 0,0001$ ,  $\lambda_2 = 0,0003$ ,  $\mu_1 = 0,009$ ,  $\mu_2 = 0,008$  приведены на рис. 4-6.

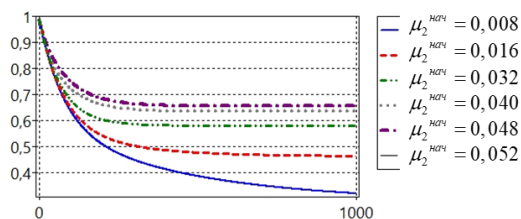


Рис. 4. – Графики  $P_0(t)$

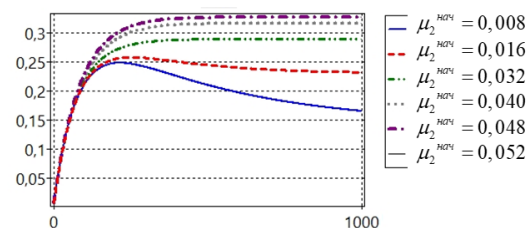


Рис. 5. – Графики  $P_1(t)$

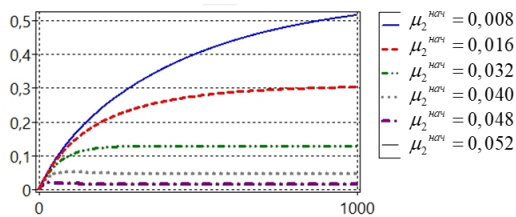


Рис. 6. – Графики  $P_2(t)$

Графики вероятностей при значениях параметров:  $\lambda_1 = 0,00001$ ,  $\lambda_2 = 0,00003$ ,  $\mu_1 = 0,009$ ,  $\mu_2 = 0,008$  приведены на рис. 7-9.

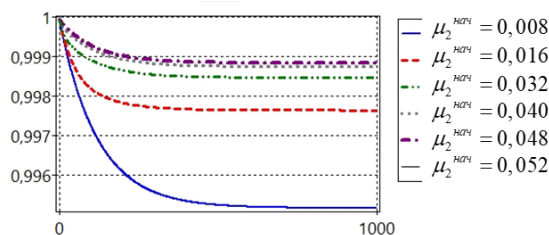


Рис. 7. – Графики  $P_0(t)$

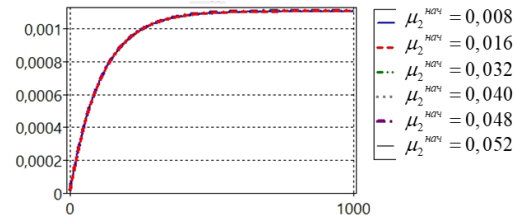


Рис. 8. – Графики  $P_1(t)$

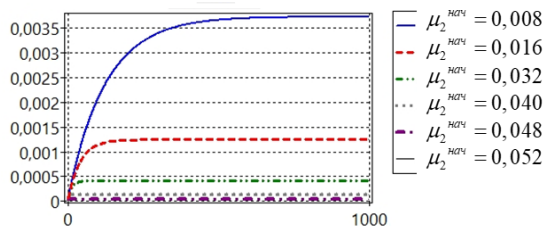


Рис. 9. – Графики  $P_2(t)$

Для вычисления предельных вероятностей системы рассматриваем систему линейных уравнений следующего вида:

$$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \quad 0 = \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1; \quad 0 = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2. \quad (3)$$

Пусть  $\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}, \alpha_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$  – приведенные нагрузки,  $\sum_{i=0}^C p_i = 1, C = C_{2m}^m - 1, m = 2$ . Тогда

аналитическое решение принимает вид:

$$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2; \quad p_1 = \alpha_1 p_0; \quad p_2 = \alpha_2 p_0; \quad p_n = p_0; \quad p_{отк} = p_1 + p_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) p_0. \quad (4)$$

Рассмотрим постановку оптимизационной задачи повышения надежности системы СМО в условиях ограничения ресурсов, связанных с затратами на периодическую работу резервных модулей обработки

информации. На рис. 10-13 приведены графики состояний системы в случае периодического включения резервного модуля обработки сигналов при значениях параметров:  $\lambda_1 = 0,004$ ,  $\lambda_2 = 0,002$ ,  $\mu_1 = 0,008$ ,  $\mu_2 = 0,001$ .

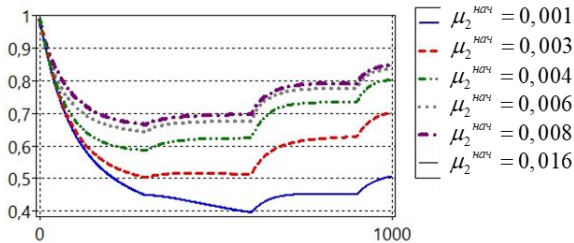


Рис. 10. – Графики  $P_0(t)$

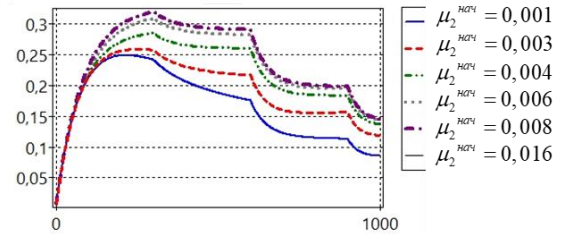


Рис. 11. – Графики  $P_1(t)$

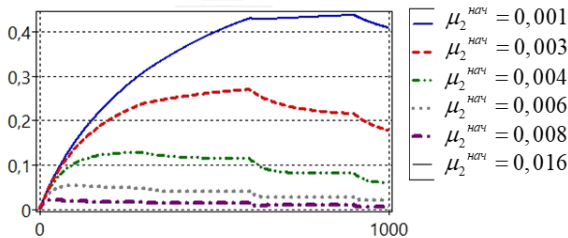


Рис. 12. – Графики  $P_2(t)$

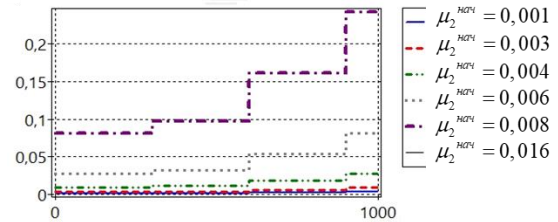


Рис. 13. – Графики  $\mu_2$

При использовании подобного режима работы обеспечивается обслуживание заявок с надежностью не ниже заданного уровня за счет использования динамических параметров обслуживания.

Для обеспечения необходимого качества СМО вводятся следующие требования к надежности:  $p_0 \geq p_0^{\text{дон}}$  и(или)  $p_n \geq p_n^{\text{дон}}$  и(или)  $p_{\text{отк}} \leq p_{\text{отк}}^{\text{дон}}$ .

Тогда, с учетом (4), для вычисления граничных значений управляющих воздействий получаем соотношение:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min \left( \frac{1}{p_0^{\text{дон}}} - 1; \frac{1}{p_n^{\text{дон}}} - 1; \frac{p_{\text{отк}}^{\text{дон}}}{1 - p_{\text{отк}}^{\text{дон}}} \right). \quad (5)$$

Пусть в рассматриваемой задаче проектируется одноканальная СМО с частотами заявок  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и заданными пороговыми значениями вероятностей:

$p_0^{\text{дон}} = 0,95$ ,  $p_n^{\text{дон}} = 0,99$ ,  $p_{\text{отк}}^{\text{дон}} = 0,001$ . Тогда при нахождении скоростей

обслуживания  $\mu_1, \mu_2$ , обеспечивающих выполнение данных ограничений, получаем:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min\left(\frac{1}{0,95} - 1; \frac{1}{0,99} - 1; \frac{0,001}{1-0,001}\right) = \min(0,0526; 0,0101; 0,001) = 0,001.$$

Заметим, что согласно полученному соотношению критичным является условие:  $p_{отк} \leq p_{отк}^{дон} = 0,001$ , что говорит о необходимости предъявления достаточно жестких требований к скоростям обслуживания:  $[\mu_1, \mu_2]^T > 1000[\lambda_1, \lambda_2]^T$ . Данному условию соответствуют графики вероятностей, приведенные на рис. 7–9, не соответствуют – вероятности, графики которых представлены на рис. 4–6. Исходя из неравенства, получаем ограничения:  $\mu_i > 1000 \cdot \lambda_i, i = 1, 2$ . Таким образом, найдены ограничения для скоростей обслуживания, обеспечивающих выполнение заданных требований по надежности, предъявляемых к системе.

Значения интенсивностей обслуживания полагаем зависящими от времени  $t, t \in [0, T]$ , и выбираем в качестве управляющих параметров в задаче оптимального управления рассматриваемой СМО. Вводим обозначения:

$$x_1(t) = P_0(t), x_2(t) = P_1(t), x_3(t) = P_2(t), u_i(t) = \mu_i(t), i = 1, 2, t \in [0, T],$$
$$x_1(0) = P_0(0) = 1, x_2(0) = P_1(0) = 0, x_3(0) = P_2(0) = 0, u_1(0) = u_1^0, u_2(0) = u_2^0,$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – затраты на обслуживание заявок 1-го и 2-го типа соответственно,  $\delta$  – дисконтирующий множитель,  $M$  – весовой коэффициент.

Управление надежностью осуществляется при условии обеспечения необходимой надежности системы на интервале  $[0, T]$ :

$$x_1(t) \geq a, t \in [0, T]. \quad (6)$$

Получаем задачу оптимального управления следующего вида. Требуется построить оптимальные управления, минимизирующие функционал:

$$I(u) = \int_0^T \left( e^{-\delta t} (\gamma_1 u_1(t) + \gamma_2 u_2(t)) + M \max^2 \{a - x_1(t), 0\} \right) dt \rightarrow \min ,$$

при динамических ограничениях:

$$\dot{x}_1(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)x_1(t) + u_1(t)x_2(t) + u_2(t)x_3(t), \quad (7)$$

$$\dot{x}_2(t) = \lambda_1 x_1(t) - u_1(t)x_1(t), \quad \dot{x}_3(t) = \lambda_2 x_1(t) - u_2(t)x_2(t),$$

начальных условиях:

$$x_1(0) = 1, \quad x_i(0) = 0, \quad i = \overline{2,3}, \quad (8)$$

ограничения на управления:

$$u_1(t) > 1000 \cdot \lambda_1, \quad u_2(t) > 1000 \cdot \lambda_2, \quad t \in [0, T]. \quad (9)$$

С использованием численных методов может быть построено приближенное решение Парето-оптимальной задачи, обеспечивающее снижение расходов на обслуживание заявок в БОС с сохранением необходимого уровня надежности системы обработки сигналов.

### Литература

1. Иванов И.В. Охрана периметров. – 2. М.: Паритет Граф, 2000. 196 с.
2. Зенов А.Ю. Комплексный подход к обнаружению, классификации и распознаванию нарушителя на охраняемой территории // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2012, №2. С. 23-32.
3. Мясникова Н.В., Берестень М.П. Теоретические основы экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2006, №6. С.117-123.
4. Зенов А.Ю., Мясникова Н.В. Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2012, №3. С. 15-24.



5. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y. Technical Diagnostics of Equipment Using Data Mining Technologies // Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. pp. 345-356. URL: [link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30).

6. Саламатин А.А. Алгоритм поддержки принятия решений в задачах выбора элементов системы безопасности объектов недвижимости // Инженерный вестник Дона, 2021, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6999](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6999).

7. Васильев А.В., Васильев Г.В. Разработка нейросетевого контроллера для устройства динамического восстановления напряжения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки, 2022, №1-2. С. 18-22. URL: [nauteh-journal.ru/files/d44fcc80-5d1f-4ca7-8768-f21b661b8211](https://nauteh-journal.ru/files/d44fcc80-5d1f-4ca7-8768-f21b661b8211).

8. Махнев С.А. Применение нейронной сети методом обратного распространения ошибки для текстового набора данных // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки, 2022, №1-2. С. 38-42. URL: [nauteh-journal.ru/files/52f33390-e0f5-4da1-b73a-dff970d79036](https://nauteh-journal.ru/files/52f33390-e0f5-4da1-b73a-dff970d79036).

9. Дали Ф.А. Методологические аспекты обследования объектов защиты на соответствие требованиям пожарной безопасности в проблемно-ориентированных системах управления // Инженерный вестник Дона, 2021, № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7114](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7114).

10. Tsarkova E. Intellectualization of decision making in security systems of protected objects // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 2021. pp. 042004. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/4/042004](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/4/042004).

## References

1. Ivanov I.V. Ohrana perimetrov - 2 [Perimeter security - 2]. M.: Paritet Graf, 2000. 196 p.
2. Zenov A.Yu. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki, 2012, №2. pp. 23–32.
3. Myasnikova N.V., Beresten' M.P. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki, 2006, № 6. pp. 117-123.
4. Zenov A.Yu., Myasnikova N.V. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki, 2012, № 3. pp. 15-24.
5. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y. Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. URL: [link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30).
6. Salamatin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6999](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6999).
7. Vasil'ev A.V., Vasil'ev G.V. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 2022, № 1-2. URL: [nauteh-journal.ru/files/d44fcc80-5d1f-4ca7-8768-f21b661b8211](https://nauteh-journal.ru/files/d44fcc80-5d1f-4ca7-8768-f21b661b8211).
8. Mahnev S.A. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 2022, № 1-2. URL: [nauteh-journal.ru/files/52f33390-e0f5-4da1-b73a-dff970d79036](https://nauteh-journal.ru/files/52f33390-e0f5-4da1-b73a-dff970d79036).
9. Dali F.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7114](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7114).
10. Tsarkova E. Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 2021. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/4/042004](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/4/042004).