

Математическое моделирование оценки защищенности объекта уголовно-исполнительной системы на основе модифицированного генетического алгоритма

Н.П. Сергеев, Л.В. Степанов, В.А. Дурденко

Воронежский институт ФСИН России

Аннотация: В статье рассматривается задача количественной оценки защищённости объектов уголовно-исполнительной системы (далее УИС) на основе математического моделирования. Авторы предлагают модифицированный генетический алгоритм, в котором традиционная функция приспособленности заменена на механизм «виртуального движения» особей в дискретном пространстве, что позволяет учитывать как индивидуальные характеристики мероприятий по обеспечению безопасности, так и их совокупное влияние. Приведён пошаговый пример применения алгоритма к выбору оптимального набора защитных мер на основе экспертных оценок по нескольким критериям. Результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода для решения многокритериальных задач оценки и повышения уровня безопасности в условиях неопределённости и отсутствия явной аналитической зависимости между параметрами системы.

Ключевые слова: безопасность, уязвимость, мероприятие, уголовно-исполнительная система, генетический алгоритм, математическое моделирование, оптимизация, экспертная оценка, критерий, защищенность, режим безопасности, дискретное пространство, коалиция, скрещивание, функция приспособленности

Проблемы обеспечения безопасности в УИС

В современном понимании безопасность сложного объекта или системы представляет собой комплекс мер, направленных на защиту его критически важных элементов от разнообразных угроз. Этот арсенал включает физическую защиту, информационную безопасность и иные аспекты, призванные предотвратить или минимизировать воздействие потенциального нарушителя. Противодействие угрозам, которые воздействуют на «болевые точки» системы – ее уязвимости (далее УС), осуществляется через реализацию мероприятий по обеспечению безопасности (далее МОБ). Именно баланс между выявленными уязвимостями и эффективностью противопоставленных им мероприятий формирует итоговый режим безопасности. Вопросы его обеспечения

становятся все более актуальными для таких сложных государственных структур, как уголовно-исполнительная система [1, 2].

Математическое моделирование задач оценки безопасности в УИС

Переход к количественным методам анализа закономерно связан с применением математического моделирования, которое играет ключевую роль в анализе и оптимизации режима безопасности. Данный подход позволяет формализовать реальность функционирования учреждения в виде целостной модели, абстрагирующей ключевые элементы: инфраструктуру, инженерно-технические средства охраны, режимные параметры и характеристики контингента. В рамках модели режим безопасности концептуализируется, как состояние системы, характеризующееся достаточным уровнем защиты и готовностью к противодействию угрозам [3].

Это состояние определяется балансом между уровнями УС и МОБ. Уязвимости, такие как слабые места в периметре, недостатки контроля доступа или «человеческий фактор», делают систему подверженной опасностям. В противовес им выставляются МОБ – комплекс заранее продуманных действий, например, установка современных систем видеонаблюдения, внедрение биометрических технологий, регулярные тренировки персонала и тому подобное. Хотя МОБ и УС являются фундаментальными «частицами пазла», понятие режима безопасности шире и не исчерпывается ими [4].

Модификация генетического алгоритма для решения задачи оценки безопасности

Традиционные методы оценки безопасности системы часто носят приближенный или экспресс-характер. В данной работе предлагается подход на основе модифицированного ГА, позволяющий агрегировать экспертные оценки и находить оптимальную МОБ, способную либо полностью

нейтрализовать УС, либо существенно снизить их негативное влияние на безопасность системы.

Предлагаемая модификация заменяет классические операторы селекции на механизм, основанный на «пространственном перемещении» особей при совершении ими «ходов» в виртуальном поле (по шкале перемещения). Это позволяет учитывать не только индивидуальную ценность всех генов в МОБ, но и их совместное влияние [5].

Пусть безопасность учреждения УИС описывается набором из n мероприятий. То есть МОБ формирует множество M - исходная популяция.

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\}, \quad (1)$$

где n – количество МОБ.

Пусть существует множество критериев K , позволяющих всесторонне охарактеризовать каждую МОБ:

$$K = \{k_1, \dots, k_j, \dots, k_q\}, j = \overline{1, q}, \quad (2)$$

где q – количество критериев.

На основе критериев из K предлагается оценить каждую МОБ из M :

$$m_i = (g_{i1}(k_1), \dots, g_{ij}(k_j), \dots, g_{iq}(k_q)), \quad (3)$$

где $g_{ij}(k_j)$ – экспертная оценка i -го мероприятия m_i по j -му критерию k_j .

С позиции ГА, экспертные оценки $g_{ij}(k_j)$ можно интерпретировать, как гены хромосомы m_i . Важно отметить, что критерии для оценки всех МОБ должны применяться одни и те же.

Метод ГА требует отбора хромосом для скрещивания. В «классическом» ГА целью данного процесса является поиск такой особи m^* , которая будет иметь максимальную совокупную значимость, формализованную через функцию приспособленности $F(m_i)$, и будет являться результирующей характеристикой режима безопасности [6, 7].

В данной модификации ГА предлагается «уйти» от расчета такой функции приспособленности, так как получение аналитического выражения может быть затруднительно из-за неопределенной взаимосвязи генов особи. Кроме того, для больших m_i эта функция может быть большой и могут возникать вычислительные сложности с расчетом значения $F(m_i)$.

Зададим шкалу оценок генов хромосом O по критериям:

$$O = \{o_1, ..., o_t, ..., o_r\} t = \overline{1, r}, \quad (4)$$

где r – максимальное значение шкалы оценок хромосом.

Шкала оценок генов хромосом может быть задана различными способами. В простейшем случае можно рассматривать дискретные оценки, например, от 1 до 9. В зависимости от решаемой задачи значение 1 может интерпретироваться, как «наихудшая» оценка, а 9 – как «наилучшая» оценка.

Предлагается ввести одномерное дискретное пространство – шкалу шагов движения SH для хромосом M :

$$SH = \{sh_1, ..., sh_a, ..., sh_p\}, a = \overline{1, p}, \quad (5)$$

где p – максимальное значение шагов движения.

Максимальное значение шкалы SH предлагается выбирать равным сумме всех шагов хромосом:

$$|sh_p| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}^{sh}. \quad (6)$$

Возможны различные способы определения шкалы шагов движения. В простейшем случае количество шагов движения может соответствовать значениям оценок. Например: если $O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, то $SH = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. Однако, больший интерес представляют SH , не имеющие соответствия O . Например: если $O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, то $SH = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ или еще более сложный вариант $SH = \{0, 1, 2\}$ для $O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ [8]. Именно этот последний вариант будет рассмотрен далее. Такой вариант позволит учесть степень близости оценок, например для случая оценивания несколькими экспертами.

Рассмотрим случай, где $p < r$. Тогда в соответствие M нужно поставить множество векторов M^{SH} , элементы которого будут представлять собой векторы шагов из SH с учетом значений оценок из O из M .

Рассмотрим обобщенный пример для перехода от M к M^{SH} .

Пусть $r=9$, тогда шкала оценок задана как:

$$O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}. \quad (7)$$

Пусть $p=3$, тогда шкала шагов задана как:

$$SH = \{0, 1, 2\}. \quad (8)$$

Найдем количество интервалов для O с учетом SH :

$$d = \frac{r}{p} = \frac{9}{3} = 3. \quad (9)$$

Возможен случай, при котором $d \neq \text{цел.}$, тогда:

$$d = \left\lceil \frac{r}{p} \right\rceil. \quad (10)$$

Будем полагать, что интервалы O являются равными для случая $r \bmod p = 0$ и последний интервал меньше предыдущих для случая $r \bmod p \neq 0$. Тогда для данного примера O будет разбито на d интервалов согласно правилу:

$$o_j^{SH} = \begin{cases} sh_1, \text{ для } j = \overline{1, d}, \\ sh_2, \text{ для } j = \overline{d+1, 2d}, \\ sh_3, \text{ для } j > 2d. \end{cases} \quad (11)$$

где $j = \overline{1, 9}$.

То есть, для (7) с учетом (8) и $p = 3$ для (9) получим $d = 3$ разделение значений оценок в таблице 1.

Таблица № 1

Распределение оценок по шкале шагов.

Шкала шагов SH	0			1			2		
Шкала значений оценок по критериям O	1	2	3	4	5	6	7	8	9

В «модифицированном» ГА, в представленном случае для каждой особи m_i производится перевод значений генов в шаги движения на основе дискретизации, представленной выше [9].

Тогда суммарный шаг каждой хромосомы можно вычислить как:

$$S_i = \sum_{j=1}^m sh_{ij} . \quad (12)$$

Далее введем виртуальный оператор «Движения». Данный оператор позволит заменить традиционную селекцию, основанную на скалярной функции приспособленности, и вводит понятие виртуального пространства перемещений, организованного в виде шкалы S .

Пусть задана конечная дискретная шкала:

$$S = \{s_1, \dots, s_a, \dots, s_p\}, \quad (13)$$

где p - длина шкалы.

Если текущая позиция S_i хромосомы m_i превышает $|S|$, то хромосома с конца шкалы перемещается в позицию s_1 на этой шкале.

Таким образом, каждая хромосома совершает «маршрут» по шкале, и её конечная позиция S_i определяет её пространственное положение. Эта позиция используется далее для формирования коалиций: особи, оказавшиеся в одной и той же точке на шкале, считаются «близкими» и допускаются к скрещиванию между собой. Такой подход позволяет учитывать не только абсолютные значения генов, но и их совокупный направленный эффект, а также обеспечивает естественную периодичность и замкнутость пространства поиска.

Следующим на очереди применяется оператор скрещивания. Скрещивание в модифицированном генетическом алгоритме осуществляется не случайным образом и не на основе глобальной функции приспособленности, а локально, в рамках так называемых коалиций — подмножеств особей, оказавшихся в одной позиции на виртуальной шкале движения.

Для каждой сформированной коалиции G_k применяются следующие правила скрещивания:

1. Если $|G_k|=1$ — особь не участвует в скрещивании и без изменений переходит в следующее поколение.

2. Если $|G_k|=2$ — между двумя особями выполняется одноточечное скрещивание: случайным образом выбирается точка разрыва $t \in \{1, 2, \dots, q-1\}$, после чего формируются два потомка.

3. Если $|G_k| \geq 3$ — из коалиции выбираются две особи: одна с максимальным, другая с минимальным значением S . Между ними выполняется одноточечное скрещивание. В следующее поколение включается лучший из двух полученных потомков, а все остальные особи коалиции переходят в новое поколение без изменений. Это позволяет сохранить генетическое разнообразие и избежать преждевременной сходимости [10].

Пусть после скрещивания получены два потомка m'_1 и m'_2 . Обозначим их суммарные шаги как s'_1 и s'_2 соответственно. Тогда:

$$m_{new} = \begin{cases} m'_1, & \text{если } S'_1 \geq S'_2, \\ m'_2, & \text{если } S'_1 \leq S'_2. \end{cases} \quad (14)$$

В следующее поколение включается только потомок с максимальным значением S , а родители «погибают». Данный вариант отбора является наиболее оптимальным, так как максимально идентичен реальному «природному» отбору: «Выживает сильнейший». Но также для решения специфичных задач отбор может быть направлен и в меньшую сторону, где для определения потомка, попадающего в следующее поколение будет выбираться особь с наименьшим значением суммы оценок генов. Это позволяет выбирать между поиском максимального или минимального направления оптимизации.

Такой подход обеспечивает локальный обмен генетическим материалом между решениями, демонстрирующими схожую «траекторию поведения» в пространстве критериев, что особенно важно при наличии нелинейных и взаимозависимых факторов безопасности в УИС. При этом сохраняется возможность эволюционного улучшения решений даже в условиях отсутствия явной аналитической функции приспособленности.

Для проверки работоспособности предложенного модифицированного ГА был рассмотрен практический пример, который подтвердил работоспособность предложенной модели.

Данный подход может быть применен и к уязвимостям на рассматриваемом объекте. Соотнесение мероприятий по обеспечению безопасности и уязвимостей системы позволит оценить степень защищенности объекта.

Заключение

Обеспечение безопасности объектов уголовно-исполнительной системы сопряжено с многочисленными вызовами, включая высокую концентрацию лиц с девиантным поведением, износ инфраструктуры и ограниченность ресурсов. Традиционные подходы часто носят реактивный характер и не позволяют своевременно выявлять и нейтрализовать угрозы. В

этих условиях особенно актуальным становится переход к проактивным, научно обоснованным стратегиям, способным количественно оценивать уровень защищённости.

Математическое моделирование позволяет формализовать сложные процессы обеспечения безопасности, абстрагируя ключевые параметры системы — от физической инфраструктуры до человеческого фактора. Оно даёт возможность анализировать взаимодействие уязвимостей и защитных мер в едином количественном поле. Такие модели способствуют прогнозированию последствий различных сценариев и выбору оптимальных решений в условиях неопределённости. Кроме того, использование моделирования открывает путь к автоматизации анализа безопасности и повышению адаптивности систем защиты. В контексте подобных задач перспективным инструментом является ГА [11].

Одной из важных особенностей ГА является возможность поиска оптимального значения без «застревания» на локальных оптимумах. Кроме того, методологическая основа ГА допускает введение полезных для решаемой задачи модификаций.

По этим причинам предложено модифицировать ГА для задачи оценки защищённости объекта УИС. Предложенные модификации состоят в отказе от определения аналитического вида функции приспособленности и в использовании шкалы «пространственного перемещения» для реализации отбора хромосом. Кроме того, предложено использовать шкалу шагов, значений в которой меньше, чем количество значений оценок по критериям. Это позволяет учесть степень схожести оценок, в случае их выставлении несколькими независимыми экспертами.

Литература

1. Дурденко В.А., Бобров В.Н., Калач А.В., Соловьев А.С. Поддержка принятия управленческих решений при обеспечении безопасности в

чрезвычайных ситуациях // Инженерный вестник Дона, 2025, №11. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10503

2. Северцев Н.А. Определение безопасности сложной технической системы на основе измерения и наблюдения её параметров. Обобщённый показатель безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Математика. Информатика. Физика». 2013. №3. С. 68-71.

3. Сергеев Н.П., Степанов Л.В. Математическая модель и численный метод определения оптимальных мероприятий по обеспечению безопасности и их очередности // Вестник воронежского института ФСИИ России, 2025, №3, С. 128-136.

4. Пучков Е.В. Сравнительный анализ алгоритмов обучения искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2135

5. Parinov A.V, Korotkikh L. P., Koltsov A. S. and Stepanov L. V. Approach to estimation of level of information security at enterprise based on genetic algorithm // International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 18–20 January 2018, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, 2018. - DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032141

6. Stepanov L. V., Koltsov A. S., Parinov A. V. and Dubrovin A.S. Mathematical modeling method based on genetic algorithm and its applications // International Conference «Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems» 17–19 December 2018, Voronezh, Russian Federation, 2019. - DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012082

7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер.с польск. И.Д. Рудинского.. 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.

8. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.

9. Панфилов И.А., Базанова Е.П., Сопов Е.А. Исследование эффективности работы генетического алгоритма оптимизации с альтернативным представлением решений // Сибирский аэрокосмический журнал. 2013. №4. С. 68-71.

10. Меньших А.В., Лихобаба А.В. Выбор мер устранения угроз информационной безопасности с использованием генетического алгоритма // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. №4. С. 114-120.

11. Космачева, И. М., Егорова А. В. Разработка системы защиты на основе методов эволюционного и имитационного моделирования // Десятая национальной (всероссийская) научно-практическая конференция «Наука, образование, инновации: пути развития», Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2019. С. 74-77.

References

1. Durdenko V.A., Bobrov V.N., Kalach A.V., Solov'ev A.S., Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/105

2. Severcev N.A. Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Serija «Matematika. Informatika. Fizika». 2013. №3. pp. 68-71.

3. Sergeev N.P., Stepanov L.V. Vestnik voronezhskogo instituta FSIN Rossii, 2025, №3, pp. 128-136.

4. Puchkov E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2135

5. Parinov A.V, Korotkikh L. P., Koltsov A. S. and Stepanov L. V. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 18–20 January 2018, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032141.

6. Stepanov L. V., Koltsov A. S., Parinov A. V. and Dubrovin A.S. International Conference «Applied Mathematics, Computational Science and

Mechanics: Current Problems» 17–19 December 2018, Voronezh, Russian Federation, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012082.

7. Rutkovskaja D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: Per.s pol'sk. I.D. Rudinskogo. [Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy Systems: Translation from Polish by I.D. Rudinsky]. 2-e izd. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2013. 384 p.

8. Gladkov L.A., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. 2-e izd. Moskva: FIZMATLIT, 2010. 368 p.

9. Panfilov I.A., Bazanova E.P., Sopov E.A. Sibirskij ajerokosmicheskij zhurnal. 2013. №4. pp. 68-71.

10. Men'shih A.V., Lihobabina A.V., Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2023. №4. pp. 114-120.

11. Kosmacheva, I. M., Egorova A. V. Desjataja nacional'noj (vserossijskaja) nauchno-prakticheskaja konferencija: «Nauka, obrazovanie, innovacii: puti razvitija». Petropavlovsk-Kamchatskij: 2019. pp. 74-77.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 7.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025