

Метод синтеза управления сложными техническими системами

Р.З. Хайруллин

*Главный научный метрологический центр Минобороны России;
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;
Московский государственный строительный университет*

Аннотация: Представлен метод синтеза управления территориально распределенной сложной технической системой с метрологическим обеспечением. В основе метода синтеза лежит разработанный автором метод идентификации параметров стационарной полумарковской модели эксплуатации сложной технической системы, основанный на решении системы алгебраических уравнений, включающей выявленные в статье линейные инварианты полумарковской стационарной модели. Полученные результаты могут найти применение в системе поддержки принятия решения при управлении парком сложных технических систем за счет выбора оптимального интервала между поверками, использования резервирования и проведения стационарного технического обслуживания.

Ключевые слова: парк сложных технических систем, метод синтеза управления, стационарная полумарковская модель, инварианты системы.

Введение

Создаваемые человеком технические системы становятся всё более интеллектуальными. Это характерно как для автономных систем управления мобильными техническими системами [1], так и для стационарно располагающихся систем управления производством [2] или сложными инфраструктурными объектами [3], которые управляют изменениями состояний в объектах управления, реагируя на потоки событий. Такие системы могут быть отнесены к классу интеллектуальных систем управления [4,5], а объекты, которыми управляют интеллектуальные системы управления, будем называть сложными техническими системами (СТС), которые как правило включают средства мониторинга, диагностики и восстановления [6-8].

В настоящей статье объектом управления является распределенный парк СТС с метрологическим обеспечением [6], а в качестве управления выбран интервал между поверками (ИМП) технического состояния и различные варианты поддержания работоспособности СТС: использование резервирования и стационарного технического обслуживания.

Задача нахождения оптимального ИМП для вероятностно-детерминированной модели изменения состояний СТС с метрологическим обеспечением рассматривалась в работе [6] без учета резервирования, в [9] с учетом возможностей резервирования [9]. Используемые в них модели не учитывают текущее состояние СТС, которое, в реальности, изменяется под воздействием окружающей среды и других внешних возмущающих факторов. Поэтому задача нахождения оптимального ИМП с учетом текущего состояния СТС, изменяющегося под воздействием окружающей среды, с учетом возможностей использования резервирования, а также возможностей проведения стационарного технического обслуживания является важной практической задачей.

Целью настоящей работы является разработка метода синтеза управления, предназначенного для управления парком СТС с метрологическим обеспечением за счет выбора оптимального интервала между поверками, использования резервирования и проведения стационарного технического обслуживания.

Полумарковская модель эксплуатации СТС

Обозначим $\{E_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ - конечное множество состояний, в которых может находиться конкретный образец СТС. Коэффициент готовности СТС, процесс эксплуатации которой описывается полумарковской моделью [1], вычисляется по формуле:

$$K_T = \sum_{i=1}^n \pi_i w_i / \sum_{i=1}^n \pi_i v_i, \quad (1)$$

где π_i - относительная доля числа шагов, которые СТС находится в состоянии E_i , w_i - математическое ожидание времени работы СТС в состоянии E_i , v_i - математическое ожидание времени пребывания СТС в состоянии E_i .

При этом $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$, $v_i = \sum_{i=1}^n P_{ij} M(\tau_{ij}) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \int_0^{\infty} \tau_{ij} dF(\tau_{ij})$, где $w_i = v_i$ - для работоспособных состояний и $w_i = 0$ - для неработоспособных состояний; P_{ij} - элементы матрицы вероятностей переходов состояния $P^* = \|P_{ij}^*\|$; $F^*(\tau_{ij})$ - функция распределения вероятностей переходов; $M(\tau_{ij})$ - математическое ожидание времени нахождения в исходящих вершинах.

Непрерывно работающая СТС с периодической проверкой (контролем технического состояния) готова к применению в момент времени τ если она в этот момент работоспособна и не находится на проверке или восстановлении (ремонт). Граф переходов состояний [6] приведен на рис.1.

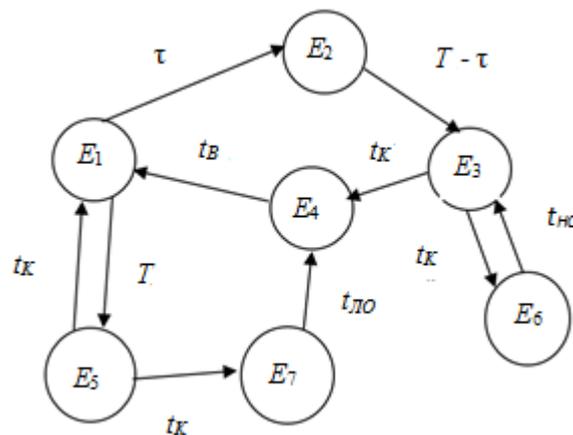


Рис.1. – Граф переходов состояний.

Возможные состояния СТС: E_1 - работоспособное состояние, E_2 - состояние отказа, E_3 - проверка отказавшей СТС, E_4 - восстановление (в том числе с использованием зарезервированных элементов СТС), E_5 - проверка работоспособной СТС, E_6 - обнаруженный отказ, E_7 - ложный отказ.

Матрица вероятностей переходов имеет следующий вид:

$$P^*(\alpha, \beta, F(T)) = \begin{pmatrix} 0 & F(T) & 0 & 0 & 1-F(T) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-\beta & 0 & \beta & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где $F(t)$ - интегральная функция распределения времени отказа, $F(T)$ - вероятность отказа на интервале времени $t \in [0; T]$ между поверками, T - продолжительность ИМП, α - условная вероятность ложного отказа, β - условная вероятность необнаруженного отказа.

Предполагается, что продолжительность поверки и продолжительность восстановления являются детерминированными величинами, равными соответственно t_K и t_B .

Система уравнений для нахождения π_i , $i = 1, 2, \dots, 7$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_4 + (1-\alpha)\pi_5, \quad \pi_2 = F(T)\pi_1, \quad \pi_3 = \pi_2 + \pi_6, \\ \pi_4 &= (1-\beta)\pi_3 + \pi_7, \quad \pi_5 = [1-F(T)]\pi_1, \quad \pi_6 = \beta\pi_3, \quad \pi_7 = \alpha\pi_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Метод идентификации параметров и построения оптимального ИМП

Заменим первое уравнение условием нормировки:

$$\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_7 = 1 \quad (3)$$

и решим полученную систему относительно неизвестных вероятностей:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 1/A, \quad \pi_2 = F(T)/A, \quad \pi_3 = (F(T)/(1-\beta))/A, \quad \pi_4 = (F(T)(1-\alpha) + \alpha)/A, \\ \pi_5 &= (1-F(T))/A, \quad \pi_6 = (F(T)\beta/(1-\beta))/A, \quad \pi_7 = (\alpha - \alpha F(T))/A, \end{aligned} \quad (4)$$

где $A = F(T)(1-2\alpha) + F(T)(1+\beta)/(1-\beta) + 2\alpha + 2$.

Полученные вероятности зависят от вектора параметров СТС: $Q = (\alpha, \beta, \lambda)$ и значения функции распределения отказов $F(t)$ в момент времени T . В дальнейшем для определенности примем экспоненциальный

закон распределения отказов: $F(T) = 1 - \exp(-\lambda T)$.

Система уравнений (4) задает стационарные значения вероятностей для вероятностно-детерминированной модели [6].

Выразим из (4) компоненты вектора параметров системы через стационарные вероятности $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_6, \pi_7$:

$$\alpha = \pi_7 / \pi_5, \quad \beta = \pi_6 / \pi_3, \quad \lambda = \frac{\ln|\pi_1 / (\pi_1 - \pi_2)|}{T}. \quad (5)$$

Формулы (5) позволяют определить текущие значения параметров, если известны стационарные вероятности нахождения в состояниях системы.

Коэффициент готовности имеет вид:

$$K_G = \frac{\psi_1 \pi_1}{\psi_1 \pi_1 + \psi_2 \pi_2 + \psi_3 \pi_3 + \psi_4 \pi_4 + \psi_5 \pi_5 + \psi_6 \pi_6 + \psi_7 \pi_7}, \quad (6)$$

где ψ_i - средние времена нахождения системы в состояниях π_i .

Оптимальный ИМП T может быть найден из уравнения: $\partial K_G / \partial T = 0$ при выполнении достаточного условия максимума: $\partial^2 K_G / \partial T^2 < 0$.

Инварианты полумарковской стационарной модели

Исследования показали, что между стационарными вероятностями π_i , $i = 1, 2, \dots, 7$ существуют три линейные зависимости (инварианты) [10]:

$$\pi_1 - \pi_2 - \pi_5 = 0, \quad \pi_2 - \pi_3 + \pi_6 = 0, \quad \pi_2 - \pi_4 + \pi_7 = 0, \quad (7)$$

которые характеризуют свойства рассматриваемой модели и остаются неизменными при любых значениях вектора параметров СТС..

Метод синтеза управления парком СТС

Блок-схема метода синтеза управления приведена на рис. 2.

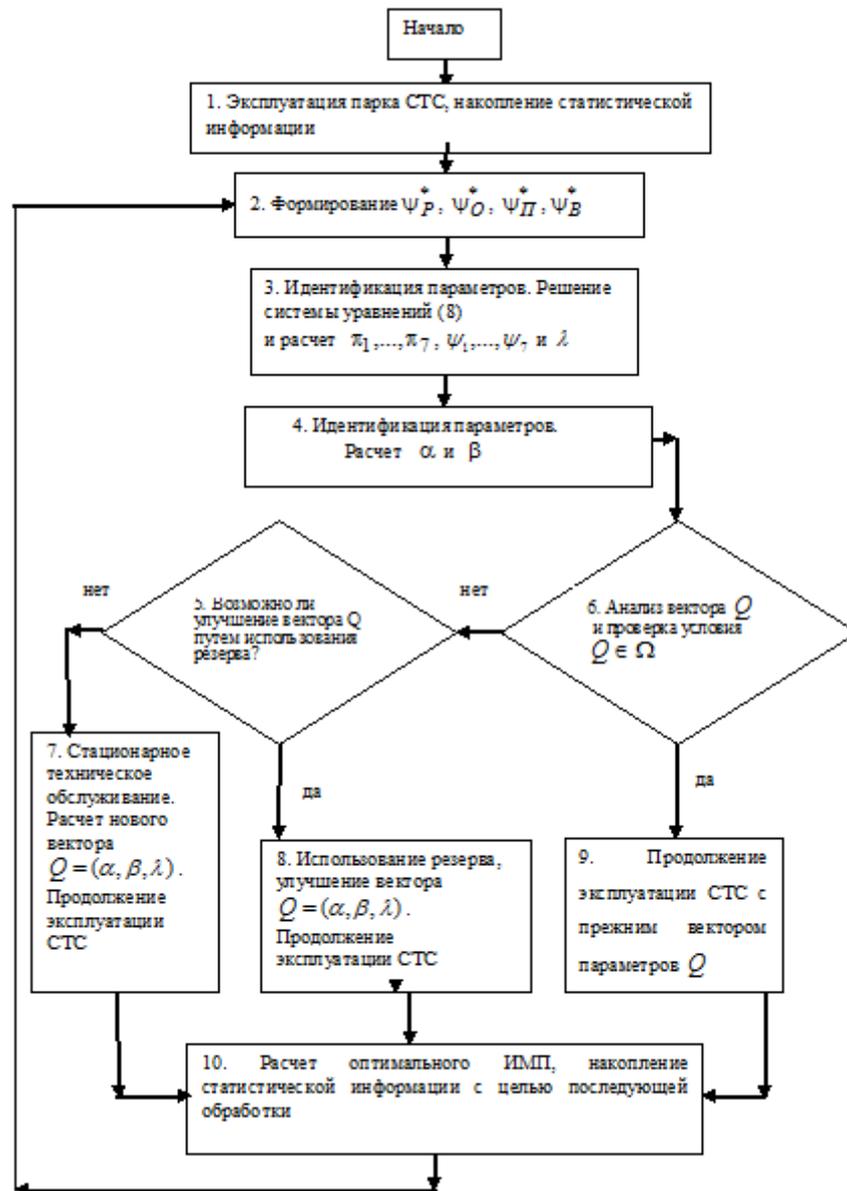


Рис. 2. – Блок-схема метода синтеза управления парком СТС.

Пусть после определенного этапа эксплуатации парка СТС и при наличии достаточного объема статистических данных в результате обработки информации построены оценки: ψ_P^* - среднего времени нахождения в работоспособном состоянии (в “истинно работоспособном” состоянии и состоянии необнаруженного отказа), ψ_O^* - среднего времени нахождения в состоянии отказа (в состоянии “истинного отказа” и состоянии ложного

отказа), ψ_{II}^* - среднего времени нахождения в состоянии поверки (суммарно, как поверки работоспособной СТС, так и отказавшей СТС), ψ_B^* - среднего времени нахождения в состоянии восстановления. Отметим, что с точки зрения наблюдения параметров СТС состояния работоспособное и состояние необнаруженного отказа являются неразличимыми, также неразличимыми являются состояния отказа и ложного отказа.

Тогда система уравнений (4) может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \pi_1\psi_1(\lambda, T) + \pi_6\psi_6 = \psi_p^*, \quad \pi_2\psi_2(\lambda, T) + \pi_7\psi_7 = \psi_o^*, \quad \pi_3\psi_3 + \pi_5\psi_5 = \psi_{II}^*, \\ \pi_4\psi_4 = \psi_B^*, \quad \pi_1 - \pi_2 - \pi_3 = 0, \quad \pi_2 - \pi_3 - \pi_6 = 0, \quad \pi_2 - \pi_4 - \pi_7 = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\psi_1 = \psi_1(\lambda, T)$, $\psi_2 = \psi_2(\lambda, T)$ - заданные функции своих аргументов; $\psi_3 = t_{II}$, $\psi_4 = t_B$, $\psi_5 = t_{II}$, $\psi_6 = t_{HO}$, $\psi_7 = t_{ЛО}$ - заданные величины.

В результате решения (8) находятся вероятности π_i (проводится идентификация состояний системы). В случае нарушения условия нормировки (3) производится корректировка π_i , $i = 1, 2, \dots, 7$. Вычисляются

компоненты вектора параметров Q : $\alpha = \frac{\pi_4 - \pi_2}{\pi_1 - \pi_2}$, $\beta = \frac{\pi_6}{\pi_3}$, $\lambda = \frac{\ln|\pi_1 / (\pi_1 - \pi_2)|}{T}$.

Обозначим через Ω множество допустимых значений для вектора Q . При выполнении условия $Q \in \Omega$ рассчитывается новый оптимальный ИМП и продолжается эксплуатация парка СТС. В противном случае при $Q \notin \Omega$, в случае возможности улучшения вектора параметров за счет использования резерва, применяется резервирование и вектор $Q = (\alpha, \beta, \lambda)$ улучшается. Далее пересчитывается оптимальный ИМП, и процесс эксплуатации парка СТС продолжается с улучшенным вектором Q и новым оптимальным ИМП. Под улучшенным в результате технического обслуживания и восстановления вектором $Q = (\alpha, \beta, \lambda)$ понимается такой вектор, для которого вероятности отказов СТС при эксплуатации λ ниже, вероятность ложного отказа α ниже

и вероятность необнаруженного отказа β также ниже.

В случае невозможности улучшения вектора параметров за счет использования резервирования, эксплуатация СТС приостанавливается, производится замена неработоспособных и деградированных элементов СТС на новые или модернизированные. После этого процесс эксплуатации продолжается.

Результаты расчетов

Изменения параметров СТС и оптимального ИМП в зависимости от порядкового номера шага идентификации $N_{ид}$ в обобщенном виде показаны на рис. 3. Для наглядности на графике приведено значение оптимального ИМП T с коэффициентом 10^{-3} . Множество допустимых значений вектора параметров имеет вид $\Omega = \{(\alpha, \beta, \lambda) : \alpha \leq 0,03; \beta \leq 0,03; \lambda \leq 0,005\}$.

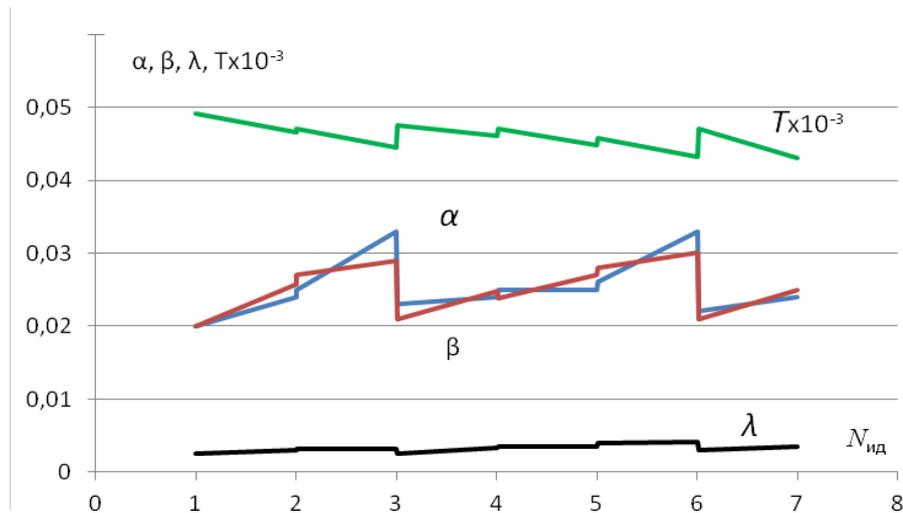


Рис. 3. – Изменения параметров СТС и оптимального ИМП в зависимости от порядкового номера шага идентификации $N_{ид}$.

Из рис. 3 видно, что, в целом, в процессе эксплуатации СТС, условные вероятности ложного и необнаруженного отказов увеличиваются,

интенсивность отказов увеличивается, а оптимальное значение ИМП уменьшается.

На 1,2,4,5,7 шагах идентификации условие $Q \in \Omega$ выполняется, и после проверки и восстановления процесс эксплуатации СТС продолжается. На 3 и 6 шаге идентификации после нарушения условия $Q \in \Omega$ применяется резервирование, в результате которого вектор параметров СТС снова попадает в область допустимых значений $Q \in \Omega$, а далее процесс эксплуатации парка СТС продолжается с текущими значениями компонентов вектора параметров Q .

Заключение

В статье представлен метод синтеза управления парком СТС в части формирования оптимального интервала между поверками, с учетом текущего состояния парка СТС и возможности использования резервирования и стационарного технического обслуживания.

Разработан эффективный метод, позволяющий идентифицировать вероятности состояний и параметры парка СТС..

Установлен факт существования трех линейных инвариантов для стационарной полумарковской модели эксплуатации СТС, включающей 7 состояний.

Разработанные методы и алгоритмы могут найти применение в системе поддержки принятия решения и/или в системе интеллектуального управления [2,3] эксплуатацией парка СТС [6].

Литература

1. Wang Y., Plataniotis K. N., Kwong S., Leung H., Yanushkevich S., Karray F., Hou M., Howard N., Fiorini R., Soda P., Tunstel E., Wang J., Patel S. On autonomous systems: from reflexive, imperative and adaptive intelligence to autonomous and cognitive intelligence // 18-th International Conference on

Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI* CC). Milan. 2019. pp. 7–12.

2. Shojaeinasab A., Charter T., Jalayer M., Khadivi M., Ogunfowora O., Raiyani N., Yaghoubi M., Najjaran H. Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review // Journal of Manufacturing Systems. 2022. pp. 62:503–522.

3. Ghosal A., Halder S. Building intelligent systems for smart cities: issues, challenges and approaches. In book: Smart Cities. Springer. 2018. pp. 107–125.

4. Sukhobokov A., Belousov E., Gromozdov D., Zenger A., Popov I. A. universal knowledge model and cognitive architectures for prototyping AGI // Cognitive Systems Research. 2024. P. 88:101279.

5. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Пугачев И.В. Синтез систем фазовой автоподстройки частоты в условиях возмущений на основе модели объединенного принципа максимума и дискретного метода инвариантного погружения // Инженерный вестник Дона. 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710/.

6. Хайруллин Р.З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Вестник метролога. 2023. №1. С.11-17.

7. Боев В.К., Доля В.К., Круглов А.К., Фомушкин А.В., Шаблицкий А.Ю. Портативный прибор для наладки, калибровки и поверки измерительных каналов, содержащих пьезоэлектрический преобразователь // Инженерный вестник Дона. 2010, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/208/.

8. Боровой В.В., Наугольников О.А., Мыслимов Д.А., Шахов Д.В., Киллер А.И., Ланкин И.М. Математические модели погрешности измерения основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали // Инженерный вестник Дона. 2021, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7173/.

9. Мищенко В.И., Кравцов А.Н., Мамлеев Т.Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учётом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22-27.

10. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. Москва. Наука. 1977. 560 с.

References

1. Wang Y., Plataniotis K. N., Kwong S., Leung H., Yanushkevich S., Karray F., Hou M., Howard N., Fiorini R., Soda P., Tunstel E., Wang J., Patel S. On autonomous systems: from reflexive, imperative and adaptive intelligence to autonomous and cognitive intelligence // 18-th International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI* CC). Milan. 2019. pp. 7–12.

2. Shojaeinasab A., Charter T., Jalayer M., Khadivi M., Ogunfowora O., Raiyani N., Yaghoubi M., Najjaran H. Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review // Journal of Manufacturing Systems. 2022. P. 62:503–522.

3. Ghosal A., Halder S. Building intelligent systems for smart cities: issues, challenges and approaches. In book: Smart Cities. Springer. 2018. pp. 107–125.

4. Sukhobokov A., Belousov E., Gromozdov D., Zenger A., Popov I. A. universal knowledge model and cognitive architectures for prototyping AGI // Cognitive Systems Research. 2024. P. 88:101279.

5. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Pugachev I.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710/.

6. Khayrullin R.Z. Vestnik metrologa. 2023. №1. P. 11-17.

7. Boyev V.K., Dolya V.K., Kruglov A.K., Fomushkin A.V., Shablitskiy A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2010, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/208/.



8. Borovoy V.V., Naugol'nov O.A., Myslimov D.A., Shakhov D.V., Killer A.I., Lankin I.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7173/.

9. Mishhenko V.I., Kravcov A.N., Mamleev T.F. Izmeritel'naja tehnika. 2021. № 4. С.22-27.

10. Суркин Ja.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh system [Fundamentals of the theory of automatic systems]. Moskva. Nauka. 1977. 560 p.

Дата поступления: 12.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025