

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.039, 331.44:519:62.50

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫРОЖДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ С ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ В СВОЕМ СОСТАВЕ

© 2023 г. М. В. Сержантова^а, *, Н. А. Дударенко^б, О. С. Нуйя^а, С. В. Солёный^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000 Россия

^бНациональный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

*E-mail: 12noch@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

После доработки 13.02.2023 г.

Принята к публикации 13.04.2023 г.

Одной из причин вырождения технической системы управления высокотемпературными процессами с человеком-оператором в своем составе может быть уставание, как следствие интеллектуальной перегрузки, которая вызвана процессом непрерывного принятия решения высокого уровня значимости. Это связано с тем, что в момент устания антропокомпонент-оператор полагается на свои внутренние установки, которые не всегда могут быть объективным разрешением ситуации в том числе 3 критической. В статье решается задача контроля вырождения системы в он-лайн режиме, что дает возможность оперативно корректировать работоспособность технической системы с учетом усталости человека-оператора.

Ключевые слова: техническая система, вырождение, управления высокотемпературными процессами, человек-оператор, критериальная матрица, интервальные параметры

DOI: 10.56304/S2079562923010232

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования данной статьи являются технические системы управления высокотемпературными процессами с участием человека-оператора [1–14]. Предметом исследования являются факторы, порождающие вырождение системы в следствие влияния определенных характеристик (свойств) человека-оператора. Задача рассматривается в двух постановках. Первая — в исследовании влияния на процесс вырождения отдельной персоналии, вторая — в исследовании влияния коллектива операторов на вырождение системы. Размерность технической системы определяется количеством операторов, задействованных в ее обслуживании. Описание деятельности человека-оператора строится на основе аддитивной математической модели процесса “вработывание—максимальная производительность—уставание” в течение технологической полусмены. Выделены причины возникновения вырождения, основные из которых — антропогенный фактор и техническая составляющая. Оценка вырождения строится на базе критериальной матрицы технической системы с применением к ней функционала вырождения. Нормальное функционирование технической системы с антропогенным факто-

ром характеризуется диагональной критериальной матрицей.

Предполагается, что внедиагональные элементы являются индикаторами, показывающими склонность системы к вырождению. Следовательно, диагональность критериальной матрицы технической системы, является одним из условий сохранения синхронности функционирования каналов системы. Человек-оператор характеризуется интервальностью своих параметров, которая в свою очередь приводит к нарушению синхронности работы технической системы, что в крайнем своем проявлении вызывает вырождение системы. Для контроля вырождения предлагается использовать функционал вырождения в интервальной форме, что позволит с помощью мультипликативного элемента отслеживать на выходе изменение выработки технической системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается проблема вырождения технической системы, предназначенной для управления высокотемпературными процессами. Отметим, что управление высокотемпературными процессами происходит под контролем человека-оператора.

Исследование влияния человеческого фактора на бесперебойную работу такого рода систем является предметом исследования данной статьи.

Для диагностики процесса вырождения исследуемой многоканальной системы в рассмотрение вводится линейный оператор, отображающий отношения вход-выход исследуемой системы. Сведение многоканальной системы к линейной алгебраической задаче позволяет сформировать критериальную матрицу системы, которая используется для исследования свойств технической системы типа “многомерный вход-многомерный выход” и позволяет оценить ее склонность к вырождению [15]. Склонность системы к вырождению оценивается с помощью функционала вырождения, который формируется на спектре сингулярных чисел критериальной матрицы системы и в глобальном смысле представляет собой величину, обратную значению числа обусловленности [16] критериальной матрицы и именуется глобальным функционалом вырождения. С пользовательской точки зрения функционал вырождения обладает рядом преимуществ по сравнению с числом обусловленности. Во-первых, функционал вырождения варьируется в пределах от нуля до единицы, что более удобно для последующего анализа системных свойств. Во-вторых, дополнительные исследования поведения сепаратных функционалов вырождения критериальной матрицы системы позволяют осуществлять мониторинг эволюции многоканальной системы в сторону вырождения, в то время как число обусловленности не имеет такой технической возможности.

Очевидно, ключевой задачей при исследовании технической системы управления высокотемпературными процессами с человеком-оператором в своем составе является построение критериальной матрицы. Особенностью формирования критериальной матрицы для данного типа процессов является тот факт, что она формируется на моделях временного представления аддитивной композиции вратывания и уставания человека-оператора.

Для оценки степени вырожденности индивидуумов, составляющих многоканальную функциональную систему, введем следующие понятия. Вырождение человека-оператора — это сокращение с течением времени его функциональных возможностей, предельным проявлением которого является невозможность нормального функционирования, т.е. частичная или полная потеря работоспособности (глобальное вырождение).

Первичным показателем вырождения коллектива операторов технической системы является потеря равнотемповости функционирования отдельных индивидуумов, образующих многоканальную функциональную систему.

Глобальное вырождение проявляется в случае нарушения равнотемповости отдельных каналов

(операторов) многоканальной функциональной системы, что снижает производительность труда и влечет за собой полную потерю работоспособности системы в крайнем ее проявлении.

Причиной вырождения нормально функционирующей многоканальной функциональной системы могут быть и внешние факторы. Например, прекращение энергоснабжения системы.

В целях дальнейших исследований введем разделение многоканальной функциональной системы на однородную и неоднородную. В однородной системе нет функции замены компонентов из внешней среды, вырождение которых очевидно. Неоднородная система обладает функцией замены из внешней среды своих компонентов, обладающих признаками вырождения.

ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, В СОСТАВЕ КОТОРОЙ ПРИСУТСТВУЕТ ЧЕЛОВЕК-ОПЕРАТОР

Особенность формирования критериальной матрицы рассматриваемой многоканальной технической системы состоит в том, что в состав ее сепаратных каналов входят индивидуумы (один или более). Зададим многоканальную техническую систему в форме линейного оператора с матрицей H , который отображает командный вектор g размерности m в выходной вектор $h(t)$ размерности m элементами которого являются текущие значения производительности j -х индивидуумов.

Следовательно, в этом описании командный вектор g будет представлять собой вектор-столбец, составленный из единиц.

$$g(t) = \text{col}\{g_j(t); j = \overline{1, m}\}. \quad (1)$$

Запишем выходной вектор $h(t)$ в соответствии с (1) в форме

$$h(t) = \text{col}\{h_j(t); j = \overline{1, m}\}.$$

Сформируем векторно-матричное представление многофункциональной системы в виде

$$h(t) = H(t)g(t),$$

где $H(t)$ — $m \times m$ квадратная диагональная матрица, элементами которой являются $h_j(t)$, что позволяет задать ее описание в форме

$$H(t) = \text{diag}\{h_j(t); j = \overline{1, m}\}.$$

Представление производительности $h_j(t)$ функциональной деятельности человека-оператора для первой половины рабочей смены может быть представлено в аддитивной форме

$$h_j(t) = h_{\text{пд}}(t) - h_{\text{св}}(t),$$

где $h_j(t)$ — функция изменения производительности j -го человека-оператора внутри многофункциональной технической системы в предположении отсутствия усталости.

$$h_{\text{ПД}j}(t) = K_j \left(1 - e^{-t/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{i=0}^{n_{\text{ПД}}-1} (i!)^{-1} (t/T_{\text{ва}j})^i \right) \right). \quad (2)$$

Запишем $h_{yj}(t)$ — функцию накопления усталости j -м человеком-оператором:

$$h_{yj}(t) = K_j \left(1 - e^{-t/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{l=0}^{n_y-1} (l!)^{-1} (t/T_{\text{ва}j})^l \right) \right). \quad (3)$$

На основе представленной функции накопления усталости и функции производственной деятельности запишем полное представление:

$$h_j(t) = K_j \left\{ \left(e^{-t/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{l=0}^{n_y-1} (l!)^{-1} (t/T_{\text{ва}j})^l \right) \right) - e^{-t/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{i=0}^{n_{\text{ПД}}-1} (i!)^{-1} (t/T_{\text{ва}j})^i \right) \right\}. \quad (4)$$

В выражениях (2)–(4) K_j — номинальная производительность j -го человека-оператора, представленная в относительной форме, в доле сменной выработки за единицу времени; $T_{\text{ва}j}(t)$ — постоянная времени $n_{\text{ПД}}$ однотипных аperiodических звеньев, отражающих процесс накопления усталости человеком-оператором, что проявляется в падении его производительности $h_j(t)$ на одну треть к концу первой половины восьмичасовой рабочей смены, при длительности первой полусмены $t = 4$ ч.

Процесс изменения производительности человека-оператора в рамках выполнения функциональной деятельности для второй половины рабочей смены получит представление

$$h_j(t - (4 + \tau)) = K_j (1 - \Delta(\tau)) \times \left(1 - e^{-(t-(4+\tau))/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{l=0}^{n_y-1} (l!)^{-1} (t - (4 + \tau)/T_{\text{ва}j})^l \right) \right) - e^{-(t-(4+\tau))/T_{\text{ва}j}} \left(\sum_{i=0}^{n_{\text{ПД}}-1} (i!)^{-1} (t - (4 + \tau)/T_{\text{ва}j})^i \right),$$

где τ — длительность обеденного перерыва, $\Delta(\tau)$ — параметр, характеризующий некомпенсированную усталость за время восстановительного интервала τ .

Производительность во второй полусмене по аналогии с первой, опишем векторно-матричным представлением:

$$h(t - (4 + \tau)) = H(t - (4 + \tau)) g(t - (4 + \tau)),$$

где $H(t - (4 + \tau)) = m \times m$ — квадратная диагональная матрица, элементами которой являются h_j такие, что

$$h_j(t - (4 + \tau)), \quad g(t - (4 + \tau)) = \text{col} \{g_j(t - (4 + \tau)) = 1, \quad j = \overline{1, m}\}.$$

Текущие значения производительности в первой и второй полусменах имеют различные представления, в связи с чем оценивать вырождение каждой полусмены необходимо по отдельности. При этом в задаче контроля вырождения $H(t)$ и $H(t - (4 + \tau))$ являются критериальными матрицами.

ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ. ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛОВ ВЫРОЖДЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Функционалы вырождения $J_{D_j}(N)$ многоканальной функциональной системы, сведенной к линейной алгебраической задаче, с критериальной матрицей N будем конструировать на базе сингулярных чисел критериальной матрицы

$$J_{D_j}(N) = \alpha_j(N)/\alpha_1(N), \quad j = \overline{m, 1}, \quad (5)$$

где $J_{D_j}(N)$ — локальный функционал вырождения, $\alpha_j(N)$ — сингулярное число матрицы N , $\alpha_1(N)$ — максимальное сингулярное число; при этом если матрица N — диагональная с положительными вещественными компонентами, то ее сингулярные числа совпадают с собственными числами, которыми являются ее диагональные элементы.

Отметим, что функционал вырождения $J_{D_j}(N)$ для всех j определен на интервале

$$0 \leq J_{D_j}(N) \leq 1.$$

Глобальный функционал вырождения сформируем в виде соотношения

$$J_{GD_j}(N) = \alpha_{\min}(N)/\alpha_1(N), \quad (6)$$

где $\alpha_{\min}(N)$ — минимальное сингулярное число критериальной матрицы N .

Применительно к решаемой задаче, в которой $N = H(t)$ для первой половины рабочей полусмены и $N = H(t - (4 + \tau))$ для второй полусмены, в силу диагональной природы сингулярные числа этих матриц являются функциями времени t и могут быть вычислены как

$$\alpha_j(H(t)) = h_j(t), \\ \alpha_j(H(t - (4 + \tau))) = h_j(t - (4 + \tau)).$$

Функционалы вырождения, представленные в (5) зависят от времени

$$J_{D_j}(t) = h_j(t)/h_1(t), \quad j = \overline{m, 1} \quad (7)$$

$$J_{D_j}(t - (4 + \tau)) = h_j(t - (4 + \tau)) / h_1(t - (4 + \tau)), j = \overline{m, 1}, \quad (8)$$

где производительность с индексом "1" — это отображение максимальной производительности функциональной деятельности в текущий момент времени.

Глобальные функционалы вырождения вида (6) для каждой из рабочих полусмен получают представления

$$J_{GD}(N) = h_{\min}(N) / h_1(N), \quad (9)$$

$$J_{GD}(t - (4 + \tau)) = h_{\min}(t - (4 + \tau)) / h_1(t - (4 + \tau)), \quad (10)$$

где $h_{\min}$ — минимальная производительность функциональной деятельности в текущий момент времени.

Глобальные функционалы вырождения, представленные в выражениях (9) и (10) позволяют контролировать такой вид вырождения как выход системы из равновесности. Сепаратные функционалы вырождения, имеющие представления (7) и (8), отражают процесс локального вырождения в бинарных структурах многоканальной функциональной системы.

Для диагностики процесса вырождения необходимо учесть, что реальные математические модели функциональной деятельности человека-оператора обладают интервальными параметрами, так что функции $h_j(t)$ и $h_j(t - (4 + \tau))$ получают интервальное представление:

$$[h_j(t)] = [K_j] \left\{ \left(e^{-t/[T_{yaj}]} \left(\sum_{l=0}^{n_y-1} (l!)^{-1} (t/[T_{yaj}])^l \right) \right) - e^{-t/[T_{vaj}]} \left(\sum_{i=0}^{n_{пл}-1} (i!)^{-1} (t/[T_{vaj}])^i \right) \right\} \times \\ \times [h_j(t - (4 + \tau))] = [K_j] (1 - \Delta(\tau)) \times \\ \times \left\{ \left(e^{-t-(4+\tau)/[T_{yaj}]} \left(\sum_{l=0}^{n_y-1} (l!)^{-1} (t - (4 + \tau)/[T_{yaj}])^l \right) \right) - e^{-t-(4+\tau)/[T_{vaj}]} \left(\sum_{i=0}^{n_{пл}-1} (i!)^{-1} (t - (4 + \tau)/[T_{vaj}])^i \right) \right\}.$$

В соответствии с правилами интервальной арифметики [17–19] функционалы вырождения описываются интервальными величинами

$$[J_{D_j}(t)] = [h_j(t)] / [h_1(t)], j = \overline{m, 1}, \quad (11)$$

$$[J_{D_j}(t - (4 + \tau))] = [h_j(t - (4 + \tau))] / [h_1(t - (4 + \tau))], j = \overline{m, 1}. \quad (12)$$

Представим интервальный функционал (11), (12) вырождения в трехкомпонентной форме

$$[J_{D_j}(t)] = [J_{D_j}(t), \overline{J_{D_j}(t)}] = [J_{D_{0j}}(t)] + [J_{D_j}(t), \overline{J_{D_j}(t)}], j = \overline{m, 1}, \quad (13)$$

$$[J_{D_j}(t - (4 + \tau))] = [J_{D_j}(t - (4 + \tau)), \overline{J_{D_j}(t - (4 + \tau))}] = [J_{D_{0j}}(t - (4 + \tau))] + [J_{D_j}(t - (4 + \tau)), \overline{J_{D_j}(t - (4 + \tau))}], j = \overline{m, 1}. \quad (14)$$

Опираясь на представление (13), (14) введем в оценку относительной интервальности δ функционала вырождения

$$\delta J_{D_j}(t) = \overline{\Delta J_{D_j}(t)} / \Delta J_{D_j}(t), j = \overline{m, 1}, \\ \delta J_{D_j}(t - (4 + \tau)) = \overline{\Delta J_{D_j}(t - (4 + \tau))} / \Delta J_{D_j}(t - (4 + \tau)). \quad (15)$$

В соответствии с соотношениями (15) интервальное представление функционалов вырождения (13) и (14) можно записать в форме

$$[J_{D_j}(t)] = J_{D_{0j}}(t) (1 \pm \delta J_{D_j}(t)), \quad (16)$$

$$[J_{D_j}(t - (4 + \tau))] = J_{D_{0j}}(t - (4 + \tau)) \times (1 \pm \delta J_{D_j}(t - (4 + \tau))), j = \overline{m, 1}. \quad (17)$$

Таким образом, исследование поведения функционалов вырождения критериальной матрицы многоканальной функциональной системы с человеком-оператором в своем составе позволяет выполнить диагностику склонности исследуемой системы к вырождению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг процесса вырождения технической системы управления высокотемпературными процессами с человеком-оператором в своем составе предлагается решать в два этапа: на первом этапе формируется критериальная матрица исследуемой системы и ее функционалы вырождения, оценивается равновесность системы для медианных значений системных параметров; на втором этапе рассчитываются оценки относительной интервальности функционалов вырождения, что позволяет сделать вывод о соответствии системы заданным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10 (3). С. 263–270 [Кузенов В.В.,

- Ryzhkov S.V.* // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82 (10). P. 1341–1347].
2. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012049.
3. *Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V.* // J. Fusion Energy. 2012. V. 31. P. 7–12.
4. *Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A.* // Fusion Sci. Technol. 2003. V. 43 (1T). P. 304–308.
5. *Кузенов В.В., Рыжков С.В.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10 (5). С. 423–428 [*Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82 (12). P. 1621–1626].
6. *Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A.* // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63 (1T). P. 135–138.
7. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012124.
8. *Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В.* // ВАНТ. 2015. № 4 (98). P. 53–56.
9. *Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В.* // ВАНТ. 2015. № 1 (95). P. 97–99.
10. *Рыжков С.В.* // Известия РАН. Сер.: физ. 2014. Т. 78 (5). С. 647–653.
11. *Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В.* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 6 (70). С. 32–36.
12. *Дударенко Н.А., Полинова Н.А., Сержантова М.В., Ушаков А.В.* // Известия вузов. Приборостроение. 2014. № 7. Т. 57. С. 12–17.
13. *Сержантова М.В., Ушаков А.В.* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. № 2. Т. 15. С. 329–337.
14. *Вундер Н.А., Дударенко Н.А., Сержантова М.В., Ушаков А.В.* // Тр. XII Всеросс. совещ. пробл. управл. 16–19 июня 2014. Москва. 2014. № 1. С. 6372–6383.
15. *Dudarenko N.A., Ushakov A.V.* // J. Autom. Inform. Sci. 2011. V. 43 (6) P. 30–39.
16. *Wilkinson J.* The Algebraic Eigenvalue Problem. 1995. Oxford: Clarendon; *Golub G., Van Loan C.* Matrix Computations. 1996. Baltimore: Johns Hopkins Univ.
17. *Дударенко Н.А., Нуйя О.С., Сержантова М.В., Слита О.В., Ушаков А.В.* Математические основы теории систем: лекционный курс и практикум. Уч. пособ. высш. уч. завед. Под ред. А.В. Ушакова. Изд. 2е. 2014. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО.
18. *Рыжков С.В., Чирков А.Ю.* Системы альтернативной термоядерной энергетики. 2017. Москва: Физматлит.
19. *Даниленко А.В., Сержантова М.В.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (5). С. 470–475.

Simulation of a Degeneration Process of a Technical Control System for High-Temperature Processes with a Human Operator

M. V. Serzhantova¹, *, N. A. Dudarenko², O. S. Nuya¹, and S. V. Solony¹

¹St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000 Russia

²ITMO National Research University, St. Petersburg, 197101 Russia

*e-mail: I2noch@mail.ru

Received January 27, 2023; revised February 13, 2023; accepted April 13, 2023

Abstract—One of the reasons of degeneration of a technical control system with a human operator for high-temperature processes can be tiredness, as a consequence of intellectual overload, which is caused by the process of continuous decision-making of a high level of significance. This is due to the fact that at the moment of tiredness, a human operator relies on its internal installations, which may not always be an objective resolution of the situation, including critical. The article solves the problem of the degeneration diagnostics of the system in online mode, which makes it possible to promptly adjust the operability of the technical system taking into account the tiredness of the human operator.

Keywords: technical system, degeneration, control of high-temperature processes, human operator, criterion matrix, interval parameters