

---

---

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ.  
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПО СВОЙСТВАМ**

---

---

УДК 355.358.1

**МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ СОСТОЯНИЕМ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ  
ОГРАНИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

© 2022 г. А. М. Попов<sup>1,\*</sup>, В. И. Филатов<sup>2</sup>, В. А. Жулего<sup>3</sup>, А. М. Бонч-Бруевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Военная академия РВСН им. Петра Великого, Московская область, Балашиха, Россия*

\*e-mail: [aproximandra@mail.ru](mailto:aproximandra@mail.ru)

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 19.08.2022 г.

В статье предложен метод, позволяющий адаптивно управлять устойчивостью автоматизированной системы управления с учетом заданных временных ограничений. Приведены результаты расчетов и математическая постановка задачи обеспечения устойчивости автоматизированной системы управления.

*Ключевые слова:* техническое состояние, важность операций технического обслуживания, ограниченное время, устойчивость, адаптивное управление состоянием

**DOI:** 10.31857/S0235711922060086

Поддержание современных комплексов средств автоматизации (КСА) и автоматизированной системы управления (АСУ) в исправном и работоспособном состоянии в условиях внешних негативных воздействий является одной из важнейших задач как органов управления, организующих техническое обслуживание (ТО), так и расчетов обслуживающего персонала и элементов управления. Исправное (работоспособное) состояние КСА и АСУ напрямую зависит от устойчивости их подсистем, качества организации эксплуатации и выполнения персоналом эксплуатационных мероприятий [1].

Несмотря на конструктивное и технологическое совершенствование и усложнение комплексов, множество сценариев негативных воздействий не позволяют обеспечить выполнение задачи АСУ с заданным качеством. Причиной данного обстоятельства являются все более эффективные средства и возможности контрфакторов, таких как целенаправленное мешающее воздействие, повышающаяся вероятность выхода из строя узлов обработки информации и каналов передачи данных. В процессе эксплуатации АСУ возможны срывы проведения технического обслуживания, несвоевременное или не полное его проведение, и, соответственно, снижение показателя устойчивости комплекса. Ухудшение технического состояния комплекса при этом снижает возможности по решению целевых задач [1, 2].

В рамках плана технического обслуживания комплексов АСУ, основанного на поддержании устойчивости техники за счет очередности и проведения работ с определенной периодичностью, необходимо учитывать случайные снижения временных требований. Такая ситуация объективно имеет место в особых условиях эксплуатации, когда по условиям обстановки отсутствует возможность проведения очередного

технического обслуживания АСУ в требуемом объеме. Причинами этого являются следующие обстоятельства [3, 9]: 1) отсутствие возможности досрочного планирования технической эксплуатации АСУ, связанное со слабой предсказуемостью тенденций и динамики развития обстановки в ходе негативных воздействий; 2) отсутствие требуемого для проведения, в заданных условиях, технического обслуживания АСУ персонала с необходимым уровнем квалификации; 3) отсутствие научно-методического аппарата для управления проведением технического обслуживания в особых условиях обстановки и в условиях ограниченного времени.

В ходе планового функционирования, когда по условиям обстановки не представляется возможным провести техническое обслуживание в требуемом объеме, в первую очередь должны быть выполнены операции, без которых АСУ не могут быть использованы по назначению [1].

В целях поддержания АСУ и КСА в исправном состоянии, в условиях внешних воздействий, мероприятия по планированию технического обслуживания и мероприятия по обслуживанию, разработанные для нормальных условий функционирования, попросту не работают в силу отсутствия свойства адаптивности системы к перманентному изменению условий и режимов эксплуатации [3]. Это связано с динамикой изменения внешней обстановки, требующей адекватной реакции системы с точки зрения интенсивности использования АСУ и КСА [3].

Таким образом, налицо насущная необходимость определения перечня операций технического обслуживания, проведение которых обеспечит максимальный вклад в достижение требуемого уровня технического состояния комплекса в конкретной эксплуатационной ситуации.

Такая задача встает перед органом управления АСУ, несущим ответственность за техническое состояние комплекса, и требует непрерывного учета и обработки большого количества данных, характеризующих фактическое техническое состояние АСУ, текущий режим его эксплуатации, а также климатические особенности местности, оказывающие воздействие на его устойчивость [4]. Причем, решать данную задачу необходимо с учетом диапазона изменений учитываемых параметров. Это позволит обеспечить оперативное планирование технического обслуживания с целью (поддержания) поддержки ее технического состояния на требуемом уровне в широком диапазоне условий работы АСУ.

Таким образом рассматриваемая задача является оптимизационной и в общем виде ее можно представить следующим образом: разработать метод управления состоянием АСУ  $F$ , обеспечивающий максимизацию устойчивости АСУ  $W$  с учетом конкретной эксплуатационной ситуации  $C$  и текущего технического состояния  $Q$ , за счет формирования рационального варианта ее технического обслуживания и мер ответных реакций на внешние воздействия  $q^*$  в условиях недостаточного времени  $t_{\text{расп}}$

$$F : q^* = \arg \max W(q_j | Q, C), \quad X = \{x_i\}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

$$C = Z \times H, \quad q_j \subset X, \quad \text{при } t_{\text{расп}} < t_{\text{треб}},$$

где  $q^*$  – рациональный вариант ТО АСУ;  $F$  – устойчивость АСУ;  $q_i$  – вариант ТО ответных реакций;  $C$  – эксплуатационная ситуация;  $Q$  – текущее техническое состояние АСУ;  $X$  – множество операций ТО ответных реакций согласно эксплуатационной документации;  $x_i$  –  $i$ -я операция ТО ответных реакций;  $N$  – множество ТО ответных реакций согласно эксплуатационной документации;  $Z$  – задачи, стоящие перед персоналом АСУ;  $H$  – внешние факторы, оказывающие влияние на техническое состояние АСУ;  $t_{\text{треб}}$  – требуемое время на проведение ТО ответных реакций, согласно эксплуатационной документации;  $t_{\text{расп}}$  – располагаемое время на проведение ТО ответных реакций.

Под рациональным вариантом понимается перечень и последовательность операций, в совокупности вносящих наибольший вклад в обеспечение требуемого уровня показателя устойчивости АСУ [4, 9].

Исходными данными для решения этой задачи являются: конструктивные особенности комплекса, текущее техническое состояние комплекса, конструктивные особенности комплекса, проводимые операции технического обслуживания, и ответных реакций, согласно эксплуатационной документации, параметры эксплуатационной ситуации (воздействия внешней среды, задачи, стоящие перед комплексом АСУ), характеризующие режим эксплуатации АСУ, время, выделенное на проведение технического обслуживания, и ответных реакций  $t_{расп}$  [5].

Для формирования рационального варианта проведения мероприятий управления АСУ необходимо, на этапе производства, решить следующие задачи: определить предполагаемые задачи по назначению АСУ, предполагаемые воздействия внешней среды, в которых АСУ будет выполнять задачи по назначению с учетом конструктивных особенностей. Исходя из этого, определить различные варианты управляющих воздействий по приоритету проведения операций [5, 10].

На этапе эксплуатации сформировать рациональный вариант перечня операций воздействия с учетом располагаемого времени и технического состояния подсистем АСУ.

Решение такой задачи предполагает декомпозицию в виде частных: 1) разработка методики определения важности операций управляющих воздействий на АСУ и ответных реакций; 2) разработка методики формирования рационального варианта управляющих воздействий и ответных реакций.

Исходными данными методики определения важности операций управляющего воздействия и ответных реакций являются: 1) перечень предполагаемых предстоящих задач, стоящих перед персоналом АСУ; 2) вид предполагаемых климатических факторов, воздействующих на АСУ; 3) перечень систем, конструктивно входящих в данный образец техники; параметры текущего либо прогнозируемого показателя устойчивости АСУ.

Определения этих исходных данных является задачей экспертов, и зависят от задач, в целях которых будет эксплуатироваться АСУ.

Количество, многогранность и многоуровневость факторов делает задачу планирования практически не разрешимой без применения экспертных методов, т.к. для полностью автоматизированного решения задачи требуется большое количество статистических данных. При этом, план проведения обслуживания АСУ должен учитывать текущее техническое состояние комплекса и динамически изменяющуюся внешнюю обстановку в условиях внешних воздействий [3–5].

Учитывая многокритериальность, решение задачи адаптивного управления АСУ рационально решается в несколько этапов:

**На первом этапе** формируется экспертная группа из числа наиболее подготовленного и работающего в этой отрасли персонала [6].

**Второй этап** заключается в структуризации задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями: цели–критерии–альтернативы (операции управляющего воздействия) [6].

Иерархия – определенный тип системы, основанный на предположении, что элементы подсистемы могут группироваться в несвязанные множества. Элементы каждой группы находятся под влиянием элементов некоторой вполне определенной группы и, в свою очередь, оказывают влияние на элементы другой группы [2]. Тогда структуру решаемой задачи можно представить в виде, показанном в табл. 1.

**На третьем этапе**, при попарных сравнениях, в распоряжение эксперта дается шкала словесных определений уровня важности, причем каждому определению ставится в соответствие число (табл. 2). При сравнении операций, принадлежащих одному уров-

**Таблица 1.** Распределение операции управления АСУ по степени важности

Перечни операции в условиях типа негативного воздействия	1. Перечень в условиях помехового воздействия 2. Перечень в условиях климатических воздействий на АСУ в данной климатической зоне 3. Перечень в условиях физического воздействия по подсистемам АСУ
Возможные операции	1. Изменение сигнально-кодовой конструкции 2. Изменение помехоустойчивого кода 3. Изменение несущей частоты и др.

**Таблица 2.** Шкала относительной важности

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное или сильное превосходство	5
Значительное (большое) превосходство	7
Очень большое превосходство	9

Матрица сравнений критериев выбора операций приведена в табл. 3.

**Таблица 3.** Примерная матрица для сравнения критериев

Критерий	$S_1$	$S_2$	$S_3$	Собственный вектор	Вес критерия
$S_1$	1	5	3	2.470	0.65
$S_2$	1/5	1	3	0.848	0.22
$S_3$	1/3	1/3	1	0.480	0.13

но иерархии, эксперт выражает свое мнение, используя одно из приведенных в табл. 3 определений. В матрицу сравнения заносится соответствующее число. При желании эксперт может использовать целые числа, выражая промежуточные уровни предпочтения по важности [6].

Матрица (табл. 3) соответствует следующим предпочтениям гипотетического лица запрашивающего решение (ЛЗР): критерий “ $S_1$ ” существенно превосходит критерий “ $S_2$ ” и умеренно превосходит критерий “ $S_3$ ”; критерий “ $S_2$ ” умеренно превосходит критерий  $S_3$ .

На нижнем уровне иерархической схемы сравниваются заданные альтернативы (операции) по каждому критерию отдельно [4, 10].

Табл. 4–6 позволяют рассчитать коэффициенты важности соответствующих элементов иерархического уровня. Для этого нужно вычислить собственные векторы матрицы, а затем пронормировать их.

Собственный вектор  $V$  находится путем извлечения корня  $n$ -й степени ( $n$  – размерность матрицы сравнений) из произведений элементов каждой строки.

$$V = \sqrt[n]{A \times B \times C \times D} \quad (2)$$

В предпоследнем столбце табл. 6 приведены значения собственных векторов. Нормирование этих чисел дает:  $w_1 = 0.65$ ;  $w_2 = 0.22$ ;  $w_3 = 0.13$ , где  $w_i$  – вес  $i$ -го критерия.

Таким же способом, на основе табл. 4–6, можно рассчитать важность каждой из операций по каждому из критериев. В таблицах приведены веса соответствующей операции по каждому из критериев.

**Таблица 4.** Сравнение по критерию  $S_1$ 

Операция ТО	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	Собственный вектор	Вес
<i>A</i>	1	0.2	0.14	0.11	0.23	0.04
<i>B</i>	5	1	0.33	0.2	0.76	0.13
<i>C</i>	7	3	1	1/3	1.63	0.27
<i>D</i>	9	5	3	1	3.40	0.56

**Таблица 5.** Сравнение по критерию  $S_2$ 

Операция ТО	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	Собственный вектор	Вес
<i>A</i>	1	0.11	0.2	0.14	0.23	0.05
<i>B</i>	9	1	3	1	2.28	0.43
<i>C</i>	5	0.33	1	1	1.14	0.22
<i>D</i>	7	1	1	1	1.63	0.30

**Таблица 6.** Сравнение по критерию  $S_3$ 

Операция ТО	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	Собственный вектор	Вес
<i>A</i>	1	3	5	9	3.40	0.56
<i>B</i>	0.33	1	3	7	1.63	0.27
<i>C</i>	0.20	0.33	1	5	0.76	0.13
<i>D</i>	0.11	0.14	0.2	1	0.23	0.04

**На четвертом этапе** осуществляется синтез полученных коэффициентов важности, который рассчитывается по формуле [6, 10]

$$\omega_j = \sum_{i=1}^n w_i V_{ji}, \quad (3)$$

где  $\omega_j$  – показатель качества  $j$ -й операции ТО;  $w_i$  – вес  $i$ -го критерия;  $V_{ji}$  – важность  $j$ -й операции ТО по  $i$ -му критерию.

Для четырех операций проведенные вычисления позволяют определить

$$\omega_{(A)} = 0.65 \times 0.04 + 0.22 \times 0.05 + 0.13 \times 0.56 = 0.11;$$

$$\omega_{(B)} = 0.65 \times 0.13 + 0.22 \times 0.43 + 0.13 \times 0.27 = 0.215;$$

$$\omega_{(C)} = 0.65 - 0.27 + 0.22 - 0.22 + 0.13 - 0.13 = 0.241;$$

$$\omega_{(D)} = 0.65 - 0.56 + 0.22 - 0.3 + 0.13 - 0.04 = 0.431.$$

Таким образом, операция с максимальным показателем качества  $D$  является наиболее важной при проведении адаптивного управления состоянием АСУ, а операция  $A$ , наименее. Путем ранжирования операций определяем очередность их проведения от максимального значения показателя к минимальному значению. Исходя из практического опыта, можно заметить, что некоторые операции можно выполнить только в полном объеме, а некоторые операции можно прервать, не изменяя интенсивность отказов основных элементов АСУ. Поэтому “непрерывным” операциям можно при-

своить признак “непрерывности операций” – “0”, а “прерывным” – “1”. Этот “признак” будет учитываться в дальнейшем при построении очередности проведения операций управления устойчивым состоянием АСУ [1–3], когда выделенное время будет меньше требуемого.

Задача методики формирования рационального варианта управляющих воздействий и ответных реакций заключается в своевременном формировании очередности операций с учетом важности их проведения и достижения максимальной эффективности, заключающееся в повышении устойчивости АСУ в ограниченное время [5, 8].

В качестве исходных данных используется перечень оптимально расставленных операций с признаками “прерывности” или “непрерывности”  $X$  ( $x = “1”$ ,  $x = “0”$ ); время на проведение  $i$ -й операции  $t_{ЭДi}$  согласно эксплуатационной документации; показатель качества  $i$ -й операции  $\omega_i$ ; время, выделяемое на  $i$ -ю операцию ТО для  $j$ -го блока АСУ в данный момент времени  $t_{распi}$ .

Для формирования очереди операций управляющего воздействия с учетом коррекции времени, производится расчет эффективности проведения комплекса операций [6, 7]

$$W_i = \sum_{i=1}^n K_{оэi}, \quad (4)$$

где  $K_{оэ}$  – аддитивный критерий, в качестве такого критерия используется коэффициент операционной эффективности, который в свою очередь рассчитывается как

$$K_{оэi} = K_{рTi} \omega_i, \quad (5)$$

где  $\omega_i$  – показатель качества  $i$ -й альтернативы (операции).

$K_{рTi}$  – коэффициент реализации временных требований, представляет собой отношение времени, заданного лицом, запрашивающим решение, и временем проведения  $i$ -й операции

$$K_{рTi} = \frac{t_{распi}}{t_{ЭДi}}. \quad (6)$$

В связи с тем, что такая задача имеет линейный вид, проведем расчет симплекс-методом оптимального варианта построения очередности проведения (не проведения) операций, входными данными для которого являются время, выделенное на операцию элементом управления  $t_{расп}$ , время, выделяемое на операцию согласно регламентирующего документа  $t_{ЭД}$ , целевая функция, а также ограничения по признаку “непрерывности операций”

$$W_i = \sum_{i=1}^n K_{оэimax} \rightarrow \max, \quad (7)$$

для  $x_i “1” - t_{распi} \leq t_{рTi}$ ; для  $x_i “0” - t_{распi} \geq t_{рTi}$ ; если  $t_{распi} < t_{рTi}$ , то “0”.

Таким образом, в первую очередь проводятся операции с  $K_{рT} = 1$  и  $W_i$ , в порядке не возрастания, в последнюю очередь “прерывная” операция ( $x_i “1”$ ) с  $K_{рT} < 1$ , при  $W_i \rightarrow \max$ .

Далее определяется техническое состояние подсистем АСУ и присваивается “признак устойчивости (не устойчивости)” подсистемы. Подсистема, имеющая “признак неустойчивости”, обслуживается в первую очередь согласно важности ее проведения [6, 9].

В случае внезапного прекращения операций повышения устойчивости, операции, проведенные частично и не проведенные полностью, переносятся на следующий этап, где им вновь присваивается “признак непрерывности операций”.

Предложенный метод значительно сокращает временные трудозатраты на решение поставленной задачи повышения устойчивости АСУ в ограниченное время и его можно включить в состав программного обеспечения системы поддержки принятия решений при планировании прогнозирования состоянием АСУ.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karp T., Fliege N.J.* Modified DFT Filter Banks with Perfect Reconstruction // IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, 1999. V. 46 (11). P. 1404. <https://doi.org/10.1109/82.803480>
2. *Пескова С.А.* Сети и телекоммуникации. Учебник. М.: Academia, 2017. 416 с.
3. *Скляр О.К.* Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 268 с.
4. *Тоускин В.С. Жук А.П.* Системы документальной электросвязи. Учебное пособие. М.: Риор, 2018. 318 с.
5. *Шарангович С.Н.* Многоволновые оптические системы связи. Учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 120 с.
6. *AlDairi A., Tawalbeh L.* Cyber security attacks on smart cities and associated mobile technologies // Procedia Comput. Sci., 2017. V. 109. P. 1086.
7. *Osadchy S.I., Zozulya V.A., Ladanyuk A.P.* Optimal Robust Control of a Robots Group // Aut. Control Comp. Sci. 2019. V. 53. P. 298.
8. *Vasil'ev Yu.S., Zegzhda D.P., Poltavtseva M.A.* Problems of security in digital production and its resistance to cyber threats // Autom. Control Comput. Sci., 2018. V. 52. № 8. P. 1090.
9. *Filatov V.I., Khokhlachev Y.N., Nekrasov A.S., Sidorov N.V.* Expense evaluation and optimization for providing communication system sustainability // T-Comm. 2020. T. 14. № 7. С. 57.
10. *Попов А.М., Валиев Р.М.* Система статистических методов обработки экспериментальных данных в машиностроении. Монография. М.: ООО "Технологии стратегического менеджмента", 2018. 384 с.