

УДК 681.518.54

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.040](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.040)

Оптимизация алгоритмов синтеза контролепригодных систем

Л.С. Ломакина, С.А. Манцеров 

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,
Нижний Новгород, Российская Федерация
mca_9@nntu.ru *

Резюме. Рассмотрены обобщенная вероятностно-структурная модель и стратегия идентификации технического состояния системы по результатам измерения параметров в организованных точках получения информации для проведения диагностирования (точках контроля). Предлагается информационная мера глубины локализации дефекта, которая характеризует отношение количества информации, характеризующей полный результат диагностического эксперимента (ДЭ) к количеству информации, характеризующей общее состояние системы. На основании информационного критерия (ИК) предложены два алгоритма локализации дефектов в технических системах и технологических процессах: безусловный алгоритм, при котором тестирование осуществляется на заранее выбранном множестве точек контроля и условный алгоритм, при котором выбор каждой точки контроля зависит от результатов тестирования предыдущей. Предложенные алгоритмы определяют такую последовательность точек контроля, которая обеспечивает максимальную глубину локализации дефектов, и тем самым обеспечивают приспособленность систем к диагностированию, то есть их контролепригодность. Кроме того, рассматривается моделирование отказов блоков на основе их вероятностей, значения которых заранее известны, что позволяет оценить количество информации, которое определяет результат тестирования. Предложенные алгоритмы являются стохастическими, что позволяет диагностировать сложные системы в условиях априорной неопределенности, несоизмеримости ресурса (времени, производительности, памяти) и объема решаемой задачи. Дальнейшее развитие полученных результатов с позиций ускорения вычислений и в условиях нечеткой информации требует использования современных информационных технологий, в частности, нейро-нечеткого моделирования.

Ключевые слова: контролепригодность, информационный критерий, точка контроля, условный алгоритм, безусловный алгоритм, статистическое моделирование

Для цитирования: Ломакина Л.С., Манцеров С.А. Оптимизация алгоритмов синтеза контролепригодных систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1113> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.040

Optimization of algorithms for the synthesis of controllable systems

L.S. Lomakina, S.A. Mantserov 

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation
mca_9@nntu.ru *

Abstract: A generalized probabilistic-structural model and a strategy for identifying the technical state of the system based on the parameters measurement results at specially organized removal points of diagnostic information (control points) are considered. An information measure of the defect

localization depth (diagnosis) is proposed which specifies the ratio of information quantity, representing the comprehensive results of the diagnostic experiment, to the information quantity, characterizing the general state of the system. On account of the information criterion, two algorithms for localization of defects in technical systems and technological processes are put forward: an unconditional algorithm, in which testing is performed on a preliminarily selected set of control points, and a conditional algorithm, which implies the choice of each control point depending on the test results from the previous one. The suggested algorithms determine the sequence of control points that ensures the maximum localization depth of the defects and, thereby, facilitating the adaptability of systems to diagnosis, namely, their controllability. In addition, statistical modeling of block failures is assessed, drawing on their priori probabilities, which allows to estimate the amount of information that the test result delivers. The outlined algorithms are stochastic which makes it possible to diagnose complex systems under the conditions of a priori uncertainty, incommensurability of resource (time, performance, memory) and the volume of the problem being solved. Further development of the findings, obtained with regard to accelerated computing and under the conditions of fuzzy information, requires the use of modern information technologies, in particular, neuro-fuzzy modeling.

Keywords: controllability, information criterion, control point, conditional algorithm, unconditional algorithm, statistical modeling.

For citation: Lomakina L.S., Mantserov S.A. Optimization of algorithms for the synthesis of controllable systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1113> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.040 (In Russ).

Введение (Introduction)

Системный подход к анализу и синтезу объектов любой физической природы предполагает представление их как систем. Задача обеспечения наиболее продолжительного выполнения системой своих функций, не теряет своей актуальности и может быть решена за счет «обеспечения контролепригодности систем». [1]

Формулировка задачи «оптимального синтеза контролепригодных систем» [1] определяется в общей зависимости от выбранного критерия, но при этом существуют сложности, прежде всего связанные с оценкой глубины диагностирования (ГД). Таким образом, целью статьи является разработка и исследование метода обеспечения контролепригодности технических систем и технологических объектов, для достижения которой предлагается решение следующих задач:

1. Определение «минимального количества точек контроля, необходимое для обеспечения установленной ГД» [1].
2. Определение «ГД при установленном количестве точек контроля» [1].
3. Статистическое генерирование неисправного состояния объекта диагностирования.

Материалы и методы (Materials and Methods)

При описании предложенных алгоритмов используются основы теории информации, ряд ключевых понятий и определений которой изложены в [2].

Определим пространство состояний системы следующим образом Каждый блок пронумеруем от 1 до n, поставим ему в соответствие значение ноль, если исправен блок или единицу в противном случае. В результате получим 2^n последовательностей из 0 и 1. Данное множество состояний S будем рассматривать как пространство событий $S_k \in S, (k = 1, 2^n)$, каждое из которых может наступить с вероятностью, равной

$$p(S_k) = \prod_{i \in I} p_i \prod_{j \in J} (1 - p_j), \quad (1)$$

где p_j – вероятность отказа j -го блока; J – множество номеров исправных блоков, I – множество номеров неисправных блоков [4].

В результате диагностического эксперимента (ДЭ) определяется вектор y_i , характеризующий состояние всей системы с точностью до некоторого подмножества, при условии, что отказ одного блока не влияет на отказы остальных блоков.

Разработку стратегии определения состояния системы будем вести с учетом свойств этих подмножеств.

Для определения количественной меры глубины поиска дефектов (ГПД) введем следующий коэффициент:

$$K = \frac{I(S, Y)}{H(S)} \quad (2)$$

$$H(S) = -\sum_{k=1}^{2^n} p(S_k) \log p(S_k) \quad (3)$$

неопределенность состояния системы, равная количеству информации, которое необходимо получить, чтобы определить, в каком из состояний находится система;

$$I(S, Y) = H(Y) - H(Y/S) \quad (4)$$

определяется как количество информации $I(S, Y)$ к количеству информации $H(S)$, которое необходимо получить, чтобы определить в каком состоянии находится система;

$$H(Y) = -\sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i) \quad (5)$$

неопределенность исхода ДЭ. Неопределенность ДЭ $H(Y/S) = 0$, т. к. неопределенность y_i является нулевой, при определенном состоянии системы $S_k \in S$.

Следовательно $I(S, Y) = H(Y)$ и

$$K = \frac{H(Y)}{H(S)} \quad (6)$$

Энтропия системы равна сумме всех энтропий отдельных блоков:

$$H(S) = -\sum_{j=1}^n H(X_j) \quad (7)$$

где X_j – множество состояний j -го блока, при этом энтропия j -го блока

$$H(X_j) = -p_j \log p_j - (1 - p_j) \log(1 - p_j). \quad (8)$$

При условии $I(S, Y) = H(S)$ коэффициент K равен единице, в случае если, вообще невозможно получить сведения о состоянии системы, $I(S, Y)$ и коэффициент K равны нулю.

ГД дефекта возрастает с увеличением $I(S, Y)$ или увеличением K . Решение задачи диагностирования сложных систем, с построением математической модели (ММ) объекта исследования приведено в [3, 4].

Вектор $y_i \in Y$, характеризующий состояние системы, определяется в результате проведения ДЭ (Рисунок 1).

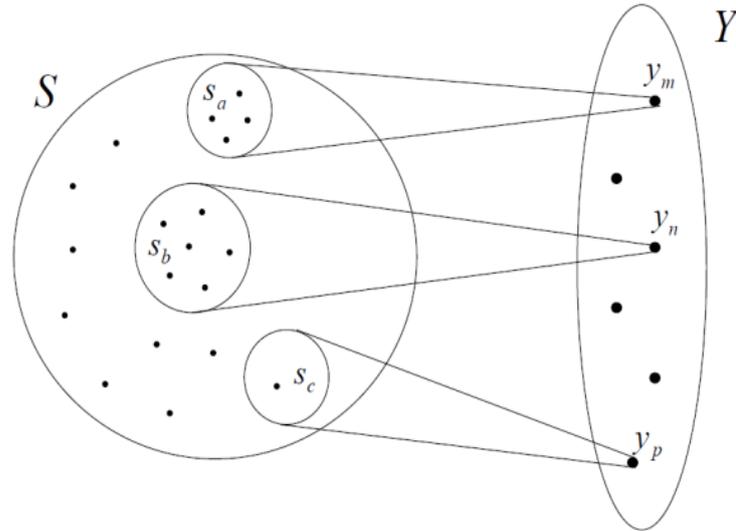


Рисунок 1 – Взаимосвязь множеств состояний S с результатами тестирования Y
 Figure 1 – The relationship of the set of states of the system S with the set of test results Y

В качестве **информационного критерия качества** диагностирования может выступать ГД, под которой подразумевается среднее количество состояний, с точностью до которых можно локализовать дефект на основании количества информации $I(\hat{S}, Y)$, которое обнаруживает ДЭ:

$$I(\hat{S}, Y) = H(Y) - H(Y/\hat{S}),$$

где $H(Y) = - \sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i)$ – величина неопределенности измерения ДЭ. Условная величина неопределенности измерения ДЭ $H(Y/\hat{S}) = 0$, поскольку величина неопределенности появления y_i при заданном состоянии $s \in \hat{S}$ равна нулю. Следовательно, $I(\hat{S}, Y) = H(Y)$ [6, 7].

Выбор из допустимого множества точек контроля такого подмножества заданного размера, при котором ДЭ определяет максимальное количество информации о системе, определяет постановку задачи по максимизации ГЛД.

Алгоритмы локализации дефектов

Работа алгоритма условного поиска дефектов (УПД) заключается в выборе последовательности точек контроля. На Рисунке 2 представлена блок-схема работы алгоритма УПД.

«Последовательность точек контроля» [3] определяет максимальное количество информации об объекте, после чего выполняется ДЭ, и его результат определяет выбор следующей точки контроля.

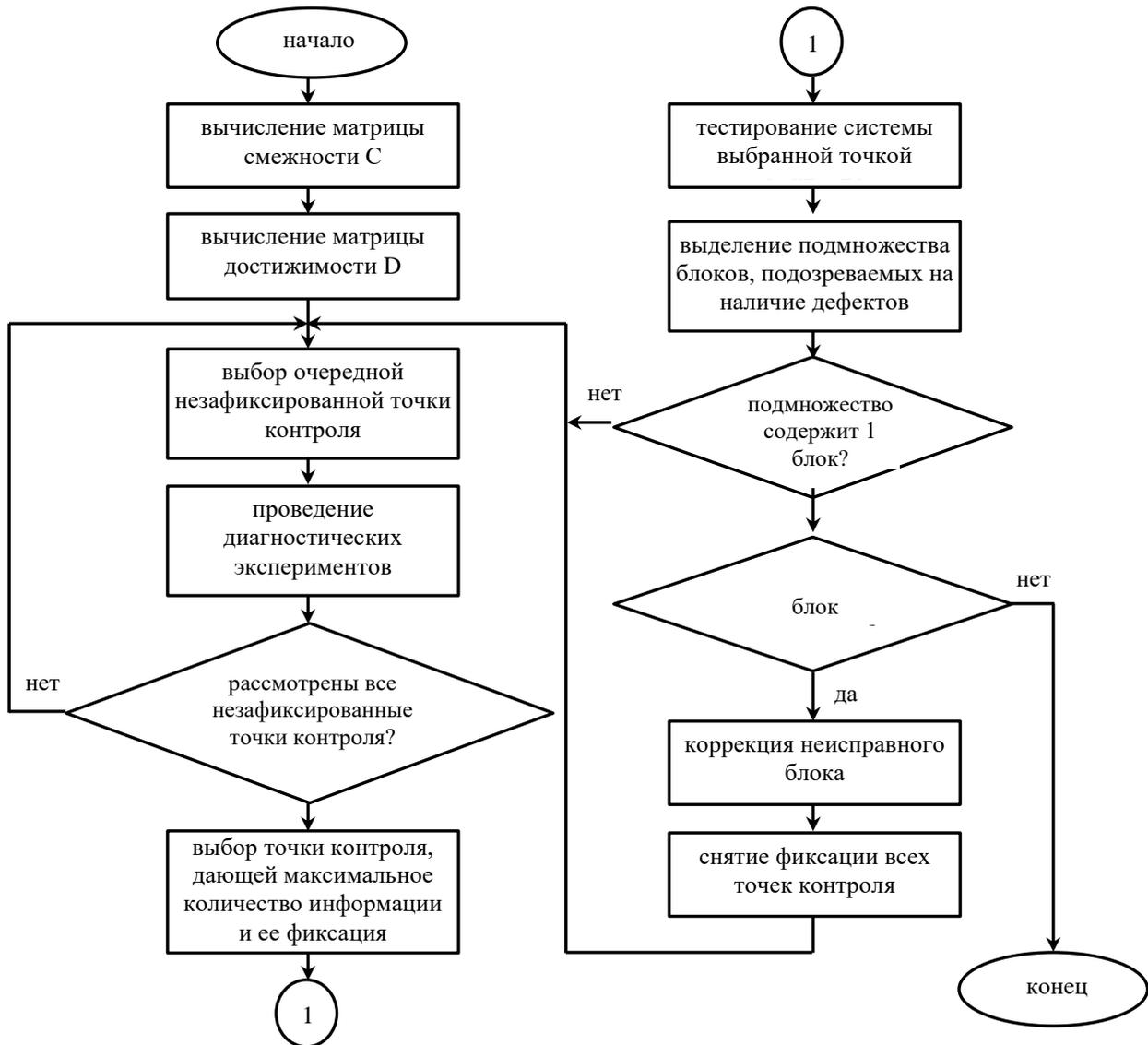


Рисунок 2 – Блок-схема работы алгоритма УПД
Figure 2 – Block diagram of the operation of the conditional algorithm

Предлагается следующий безусловный алгоритм поиска дефектов (БПД)
Рисунок 3.

Вычисление энтропии требует большого объема ресурсоемких вычислений, при этом не требуется высокая точность, так как вероятности состояний системы стремительно уменьшаются при увеличении кратности.

При условии генерации всех состояний системы, а потом удаления работоспособных, будет затрачено много вычислительных ресурсов при небольших вероятностях отказов блоков p_1, \dots, p_n .

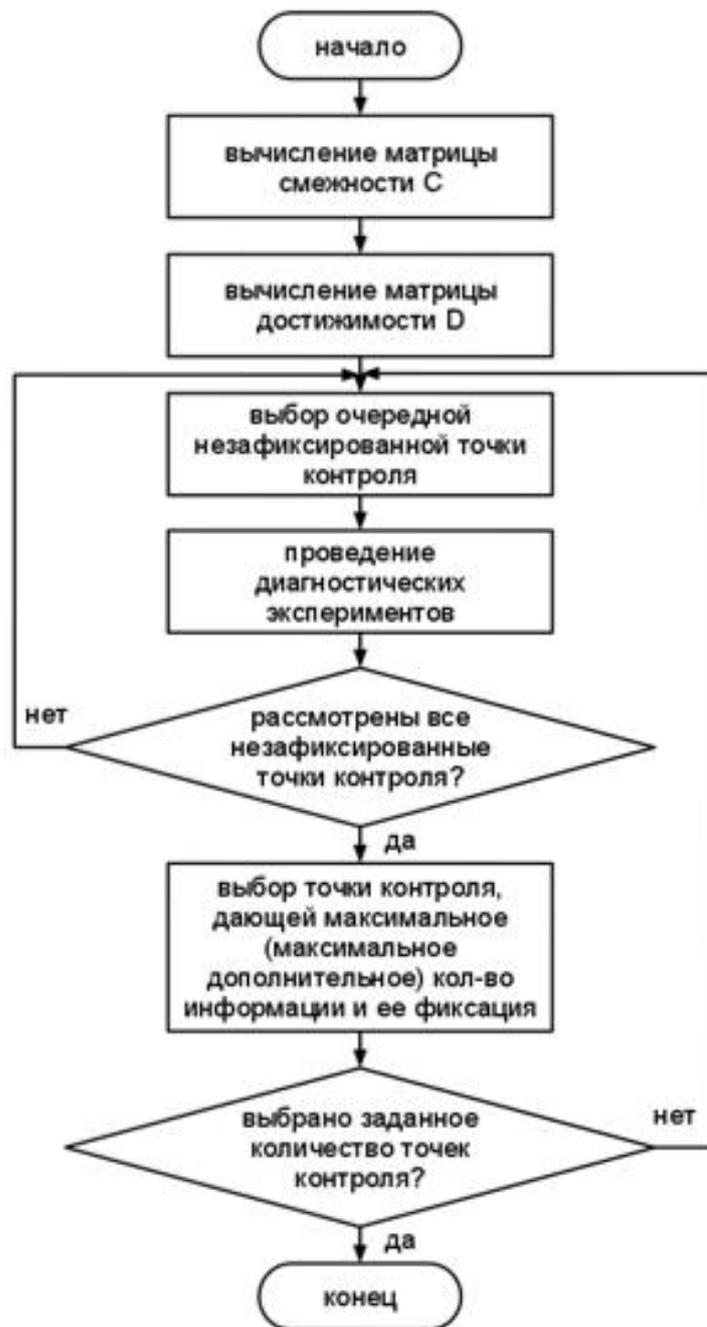


Рисунок 3 – Блок-схема работы алгоритма БПД
Figure 3 – Block diagram of the operation of the unconditional algorithm

Поэтому предлагается провести процесс моделирования непосредственно только для неисправных состояний, для этого должен быть выполнен переход от всех состояний системы S к множеству только неисправных состояний Q (Рисунок 4).

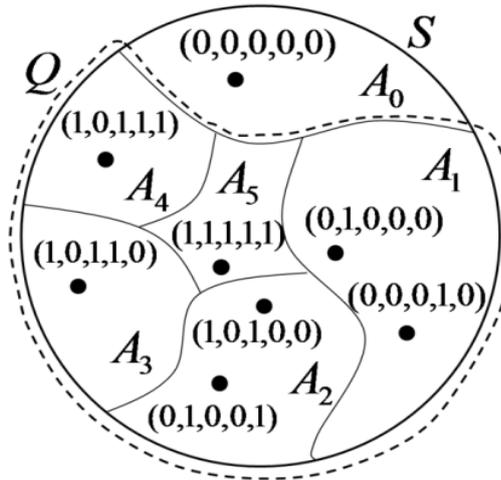


Рисунок 4 – Общее пространство всех состояний системы (S) и пространство неисправных состояний (Q).

Figure 4 – Space of states of the system (S) and the space of faulty states of the system (Q)

В результате из рассмотрения исключаются множество исправных состояний системы S, что позволяет существенно снизить объем ресурсоемких вычислений. В связи с этим предлагается алгоритм статистического генерирования (АСГ) неисправного состояния системы (Рисунок 5).

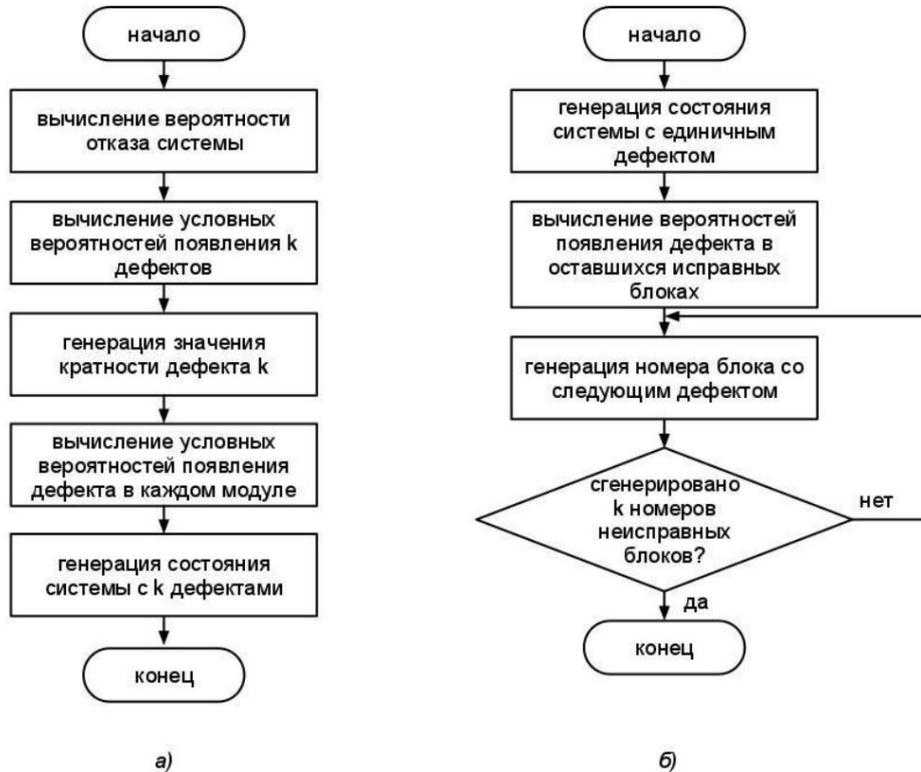


Рисунок 5 – Блок-схемы работы АСГ: а – генерация неисправного состояния системы; б – генерация состояния системы с дефектом кратности k.

Figure 4 – ASG flowcharts: a – generation of the faulty state of the system; b – generation of the state of the system with a defect of multiplicity k.

Результаты (Results)

Для подтверждения и проверки эффективности предложенных алгоритмов была использована функциональная модель системы импульсно-фазового управления тиристорного электропривода серии КТЭ 100/220 (СИФУ ТЭП).

Построена логическая модель в формате ориентированного графа (Рисунок 3). Допустим, что в процессе диагностирования системы возможно снимать только внешний выходной сигнал. Также предположим, что вероятности отказов блоков равны и имеют значение 0.001 [1]. При таких условиях точками контроля будут все сочетания выходного и входных блоков: (12, 9), (13, 9), (1, 9), (4, 9), (11, 9), (10, 9).

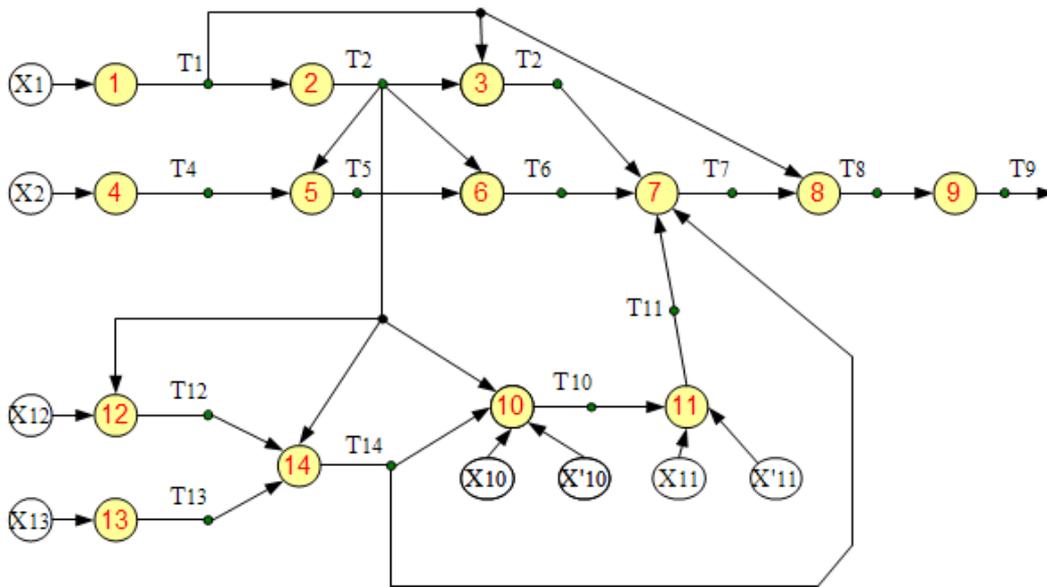


Рисунок 3 – Логическая модель СИФУ ТЭП

Figure 3 – Logical model pulse-phase control systems thyristor electric drive series KTE 100/220

Логическая модель и значения вероятностей отказов блоков необходимы для работы алгоритма БПД. Особенность алгоритма позволяет его применять на модели, без доступа к действующей системе.

Получены результаты работы алгоритма БПД (таблица 1). Выделены максимальные значения коэффициента К.

Таблица 1 – Значения коэффициента ГЛД на каждой итерации алгоритма БПД

Table 1 – The values of the coefficient the depth of localization of the defect at each iteration of the unconditional algorithm

Точка контроля	№ итерации				
	1	2	3	4	5
(12,9)	0.1808	-	-	-	-
(4,9)	0.1739	0.3528	-	-	-
(1,9)	0.1796	0.3306	0.4966	-	-
(13,9)	0.1807	0.3086	0.4624	0.5832	-
(11,9)	0.1516	0.2971	0.4357	0.5706	0.6469
(10,9)	0.1647	0.2946	0.4426	0.5756	0.6441

Точки контроля принадлежат искомому множеству и обеспечивают представленные значения коэффициента К. Если точка контроля уже была зафиксирована на одной из предыдущих итераций, то ставится прочерк и она не рассматривается на текущей итерации.

В результате были выбраны следующие точки контроля (1, 9), (4, 9), (12, 9), (13, 9), (11, 9). Коэффициент ГЛД на выбранном множестве точек контроля $K = 0.6$ [1, 5].

На Рисунке 4 представлена диаграмма зависимости коэффициента ГЛД от очередной точки контроля. Результаты работы алгоритма УПД представлены в таблице 2 [9, 10].

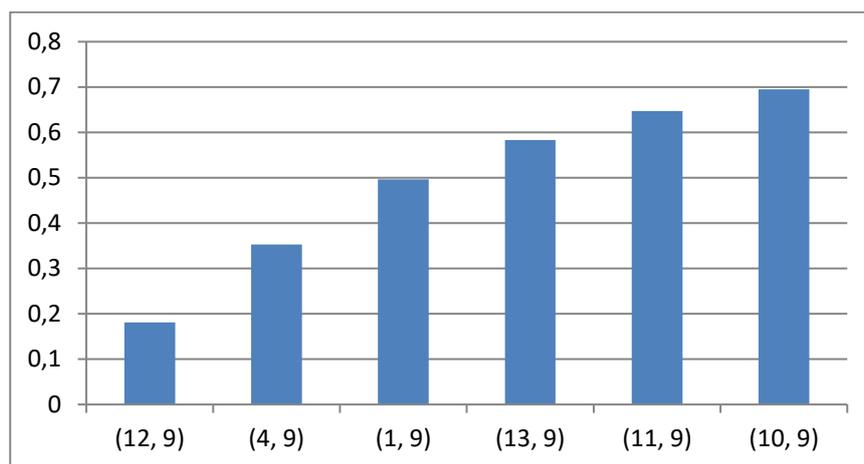


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости коэффициента К от очередной точки контроля
Figure 4 – Diagram of the dependence of the coefficient K on the next control point

Таблица 2 – Результаты алгоритма УПД

Table 2 – Results of the conditional defect search algorithm

№ эксперимента	точки контроля		подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта	
	выбранная	исключенная из рассмотрения	до проверки системы	после проверки системы
1	(12,9)	-	{1,2,3,4,5,6, 7,8,9,10,11, 12,13,14}	{12,14,10, 11,7,8,9}
2	(11,9)	-	{12,14,10,11, 7,8,9}	{12,14,10}
3	(10,9)	(4,9)	{12,14,10}	{10}
4	(12,9)	-	{1,2,3,4,5,6, 7,8,9,11,12, 13,14}	{1,2,3,4,5, 6}
5	(4,9)	(13,9), (10,9), (11,9)	{1,2,3,4,5,6}	{4,5,6}
6	(1,9)	-	{4,5,6}	{5,6}

По итогам работы алгоритма были выбраны следующие точки контроля (12, 9), (11, 9), (10, 9), (4, 9), (1, 9).

В результате проведенного эксперимента был определен неисправный блок № 10.

Обсуждение (Discussion)

Благодаря сформулированному информационному критерию ГД удалось построить обобщенную вероятностно-структурную модель и выработать «стратегию определения состояния системы» [2, 10].

Для точного определения состояния системы необходимо, чтобы $I(S, Y)$ было равно $H(S)$, при этом $K = 1$, а если нельзя получить какие-либо сведения о состоянии системы, $I(S, Y) = 0$ и коэффициент $K = 0$. Таким образом, становится очевидным, что с увеличением «количества информации» [3] $I(S, Y)$ или с увеличением коэффициента K , ГД возрастает.

Для получения конструктивных решений предлагается, например, следующий алгоритм последовательного выбора точек контроля.

На первом шаге выбирается такая, которая определяет максимальное количество информации о системе. На последующих шагах выбирается такая точка, которая определяет максимальное количество информации. Выбор точек контроля завершается, как только будет выбрано заданное количество.

Методика расчета коэффициента K существенно влияет на эффективность работы алгоритма, при этом точный метод расчета для систем большой размерности, является крайне трудоемким. Можно рассматривать только наиболее вероятные состояния из подмножеств S_k , отбросив те состояния, которые вносят «малый» вклад в соответствующую вероятность $p(y_i)$. Таким образом, на вычисление коэффициента K затрачивается значительно меньше вычислительных ресурсов при незначительной потере точности вычислений.

Заключение (Conclusion)

На основании ИК разработаны оптимизационные алгоритмы синтеза контролепригодных сложных технических объектов: алгоритм БПД, при котором тестирование производится на выбранном множестве точек контроля: алгоритм УПД, в рамках которого выбор точки контроля зависит от результата тестирования на предыдущей точке контроля и алгоритм статистического моделирования неисправного состояния объекта.

Эффективность предложенных алгоритмов диагностирования технических систем и технологических процессов с произвольной кратностью дефекта и учетом известных сведений о вероятностях отказов блоков, подтверждена в результате проведенных экспериментов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на вычисление ГЛД затрачивается значительно меньше вычислительных ресурсов при незначительной потере точности вычислений.

Дальнейшее развитие полученных результатов требует использования современных информационных технологий, в частности, использование нейро-нечеткой системы классификации состояний с позиции ускорения вычислений и в условиях нечеткой информации [14].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ломакина Л.С., Уваров П.И. Информационный синтез контролепригодных систем. *Системы управления и информационные технологии*. 2007;(2):53–57.
2. Ломакина Л.С., Уваров П.И. Структурный синтез контролепригодных систем. *Системы управления и информационные технологии*. 2007;(3):57–62.

3. Ломакина Л.С. *Теория контролепригодности структурно связанных технических и технологических объектов и оптимизация алгоритмов их синтеза*. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.14. Таганрог; 1993. 33 с.
4. Ворон А.М. *Модели и алгоритмы диагностирования технических систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры (КИА)*. Дисс. канд. техн. наук: 05.13.01. Н. Новгород; 2016. 122 с.
5. Ломакина Л.С., Ворон А.М. Информационный синтез контролепригодных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры. *Датчики и системы*. 2013;(11):27–32.
6. Robert G., Control flow graphs and code coverage. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2010;20(4):739–749.
7. Ломакина Л.С., Сагунов В.И. Оптимизация глубины диагностирования непрерывных объектов. *Автоматика и телемеханика*. 1986;(3):146–152.
8. Сагунов В.И., Ломакина Л.С. *Контролепригодность структурно связанных систем*. М.: Энергоатомиздат; 1990. 112 с.
9. Пархоменко П.П., Карибский В.В., Согомоян Е.С., Калчев В.Ф. *Основы технической диагностики*. М.: Энергия; 1976. 460 с.
10. Осипов, О.И., Усынин Ю.С. *Техническая диагностика автоматизированных электроприводов*. М.: Энергоатомиздат; 1991. 160 с.
11. Isserman R. Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2005; 71–85.
12. Lomakina L.S., Silianov N.V., Nadezhkin M. A. Fault-tolerant onboard computer systems designing based on symmetry groups modeling. *IV International Research Conf. Information Technologies in Science, Management, Social Sphere, Medicine*. 2017;72:21–25.
13. Lomakina L.S., Silianov N.V. Diagnosability Provision for Fault Location in Process and Control Module. *RUSAUTOCON IEEE*. 2019. DOI: 10.1109/2019.8867717
14. Mantserov S. A., Gavriiliuk E. A. Fuzzy Reliability Model of Systems for Decision Support in Technical Diagnostics. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2258:222–234.

REFERENCES

1. Lomakina L.S., Uvarov P.I. Informatsionnyi Synthesis of Controllable Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Automation and remote control*. 2007;(2):53–57. (In Russ.)
2. Lomakina, L.S., Uvarov P.I. Structural Synthesis of Controllable Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Automation and remote control*. 2007;(3):57–62. (In Russ.)
3. Lomakina L.S. *Theory of controllability of structurally related technical and technological objects and optimization of algorithms for their synthesis*. Abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences: 05.13.14. Taganrog; 1993. 33 p. (In Russ.)
4. Voron, A.M. Models and algorithms of diagnostics of technical systems taking into account errors of control and measuring equipment (KIA). Dis. Candidate of Technical Sciences: 05.13.01. N.Novgorod; 2016. 122 p.
5. Lomakina L.S., Voron, A.M. Information synthesis of controllable systems taking into account errors of control and measuring equipment. *Datchiki i sistemy = Sensors & Systems*. 2013;(11):27-32. (In Russ.)
6. Robert, G., Control flow graphs and code coverage. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2010;20(4):739–749.
7. Lomakina L.S., Sagunov V.I. Optimization of the depth of diagnostics of continuous

- objects. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics*. 1986;(3):146–152.(In Russ.)
8. Sagunov V.I., Lomakina L.S. *Traceability of structurally related systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 112 p. (In Russ.)
 9. Parkhomenko P.P., Karibskii V.V., Sogomonyan E.S., Kalchev V.F. *Fundamentals of technical diagnostics*. Moscow: Energiya; 1976. 460 p. (In Russ.)
 10. Osipov O.I., Usynin Y.S. *Technical diagnostics of automated electric drives*. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 160 p. (In Russ.)
 11. Isserman R. Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control. Elsevier Science Publishing Company, Inc.* 2005;71–85.
 12. Lomakina L.S., Silianov N.V., Nadezhkin M. A. Fault-tolerant onboard computer systems designing based on symmetry groups modeling. *IV International Research Conf. "Information Technologies in Science, Management, Social Sphere, Medicine.* 2017;72:21–25.
 13. Lomakina L.S., Silianov N.V. Diagnosability Provision for Fault Location in Process and Control Module. *RUSAUTOCON IEEE*. 2019. DOI: 10.1109/2019.8867717
 14. Mantserov S.A., Gavriiliuk E.A. Fuzzy Reliability Model of Systems for Decision Support in Technical Diagnostics. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2258:222–234.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ломакина Любовь Сергеевна, доктор технических наук, профессор Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: llomakina@list.ru

Liubov S. Lomakina, Doctor Of Technical Science, Professor of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Манцеров Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация
e-mail: mca_9@nntu.ru

Sergey A. Mantserov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 16.12.2021; одобрена после рецензирования 24.12.2021; принята к публикации 27.12.2021.

The article was submitted 16.12.2021; approved after reviewing 24.12.2021; accepted for publication 27.12.2021.