

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.652.3 + 004.827

DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_47

*А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина*ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ*

Аннотация. Для повышения эффективности процесса принятия решений при диагностировании промышленного оборудования (ПрО) предлагается имитационная сетевая модель. В качестве имитационной сетевой модели выступает сеть Петри (СП), хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании дискретных процессов, в основе которой лежат производственные правила. Применение разработанной модели позволит повысить качество управления и диагностирования ПрО, отслеживать текущее состояние системы диагностирования ПрО и формировать план диагностического обследования и ремонта.

Ключевые слова: сеть Петри, иерархические производственные правила, электротехническое оборудование.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Информационная поддержка принятия решений в системах диагностирования оборудования на основе сетевой модели / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // Вестник РГУПС. – 2021. – № 1. – С. 47–52. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_47.

Введение

Решение задач диагностирования и прогнозирования технического состояния (ТС) ПрО в условиях разнородных данных, полученных в ходе контроля управления за технологическим процессом и наблюдений за работой оборудования, невозможно без использования интеллектуальных систем. Данные системы диагностирования легко адаптируются к изменяющимся требованиям, помогают оперативному персоналу в контроле и анализе ТС ПрО, в генерации возможных решений относительно исправности оборудования на основе этого анализа.

Поэтому важную роль играет разработка и развитие гибридных методов поддержки принятия решений при диагностировании ПрО, которые позволят повысить эффективность информационной поддержки принятия решений в системах диагностирования ПрО в условиях измерительной и экспертной информации.

Существует большое количество методов поддержки принятия решений, использующихся в системах диагностирования ПрО и дополняющих друг друга с целью достижения лучшего диагностического эффекта. Однако в настоящее время наиболее часто предлагаются методы, основанные на сетях Петри (графический инструмент рассуждения) для выявления неисправностей в оборудовании, которые комбинируются с нечеткой логикой, искусственной нейронной сетью, генетическим алгоритмом, а также с другими методами и технологиями мягких вычислений [1–3].

В работе в качестве аппарата принятия решений в системах диагностирования ПрО предлагается применение СП, что позволит повысить точность и своевременность обнаружения неисправностей в ПрО.

1 Способы представления иерархических производственных правил в нечеткую сеть Петри

Для получения адекватного механизма нечеткого логического вывода (правильного заключения о ТС ПрО) была построена база знаний (БЗ), содержащая иерархические производственные правила (ИПП), составленные оперативным персоналом, которые имеют следующий вид [4]:

$$Rule_d: \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{d1} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{d2} \text{ И... } x_h = \tilde{A}_{dh} ([x_{h\min}, x_{h\max}]), \text{ ТО } y = B_{dc} \quad [\text{Ранг}_c],$$

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ: № 19-07-00195, № 19-08-00152, № 20-38-90005.

где x_i – элементы, в качестве которых выступают параметры оборудования, $i = \overline{1;h}$; A_i – четкое значение параметров; $\tilde{A}_i = \{x_i, \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)\}$ – нечеткое значение параметров, $\mu_{\tilde{A}_i}(x_i)$ – функция принадлежности значений параметров; $\tilde{A}_i([x_{i\min}, x_{i\max}])$ – значение параметров представлено в виде интервала, где $x_{i\min}, x_{i\max}$ – минимальное и максимальное значение i -го параметра; y – значение результата по поводу ТС оборудования; B – четкое и/или нечеткое значение результата, Ранг – важность правила, Ранг $\in \{1, 2, \dots, c\}$, c .

Каждое продукционное правило имеет ранг $Rang_{(d)}$, $d = 1, \dots, c$, характеризующий значимость правила. Продукционное правило, включающее наибольшее количество предусловий, которые характеризуют ТС ПрО, получает ранг 1, далее 2 и т.д. Правила, имеющие одинаковые ранги, являются равноценными.

Отметим, что продукционное правило, имеющее больший ранг (детальное описание условий), является более ценным и полезным для принятия диагностических решения об исправности ПрО, поскольку отражает полные исчерпывающие знания оперативного персонала. Таким образом, полученная система ИПП позволяет найти правильное решение относительно исправности ПрО в условиях измерительной и экспертной информации.

Для проверки эффективности рекомендаций, выдаваемых системами диагностирования оборудования, представим БЗ, содержащей ИПП в виде нечеткой сети Петри (НСП) [5, 6].

При этом построенные СП должны обладать следующими свойствами [7]:

- 1) ограниченность – число меток в любой позиции СП не превышает значения K . Если же число меток в позициях СП неограниченно растет, то существует угроза возникновения роста длин очередей;
- 2) безопасность – частный случай ограниченности, $K = 1$. Безопасной является такая СП, в которой одна метка в каждой из позиций. Физически безопасность означает отсутствие зацикливаний;
- 3) достижимость – возможность срабатывания перехода СП из одного заданного состояния в другое. Здесь же может возникнуть достижимость тупиковой разметки – это конечность функционирования структуры. Для решения данной проблемы используются специальные модели и методы [8];
- 4) живость – возникновение срабатывания любого перехода в СП при начальной маркировке. Отсутствие живости физически означает либо избыточность параметров, характеризующих ТС ПрО при диагностировании, либо свидетельствует о возможности возникновения зацикливаний, тупиков, блокировок.

Нечеткая сеть Петри C_f определяется как

$$C_f = (N, f, \lambda, m_0),$$

где $N = (P, T, I, O)$ – структура НСП аналогична структуре традиционных СП, для которой $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ – входная функция переходов; $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – выходная функция переходов;

$f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов, при этом $f_j \in [0, 1]$, $\forall j \in \{1, 2, \dots, u\}$;

$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_u)$ – вектор значений порога срабатывания переходов, при этом $\lambda_j \in [0, 1]$, $\forall j \in \{1, 2, \dots, u\}$;

$m_0(m_1^0, m_2^0, \dots, m_h^0)$ – вектор начальной маркировки, каждая компонента m_i^0 которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера, при этом $m_i^0 \in [0, 1]$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, h\}$.

Отметим, что каждое продукционное правило $Rule_{(d)}$ может быть представлено как некоторый переход $t_d \in T$, где «условию» правила соответствует входная позиция $p_i \in P$ перехода t_d , а «заключению» – выходная позиция $p_k \in P$ этого же перехода (рис. 1) [9].

На рис. 1, а представлен переход для продукционного правила, состоящего из одного предусловия. Если продукционное правило состоит из нескольких предусловий, соединенных операцией нечеткой конъюнкции **И** ($Rule_d$: ЕСЛИ $x_1 = A_{d1}$ И $x_2 = \tilde{A}_{d2}$ И... $x_h = \tilde{A}_{dh}([x_{h\min}, x_{h\max}])$), то все эти предусловия становятся как входные позиции соответствующего перехода t_d (рис. 1, б). Если же продукционное правило состоит из нескольких предусловий, соединенных операцией нечеткой дизъюнкции **ИЛИ**

($Rule_d$: ЕСЛИ $x_1 = A_{d1}$ ИЛИ $x_2 = \tilde{A}_{d2}$ ИЛИ... $x_h = \tilde{A}_{dh}([x_{h\min}, x_{h\max}])$), то все эти предусловия становятся как входные позиции отдельных переходов t_d , $d = 1, \dots, c$ (рис. 1, в).

Динамика изменения маркировок в нечеткой сети Петри (НСП) должна подчиняться правилам определения текущей маркировки, активного перехода, нечеткого срабатывания, которые подробно рассмотрены в работе [10].

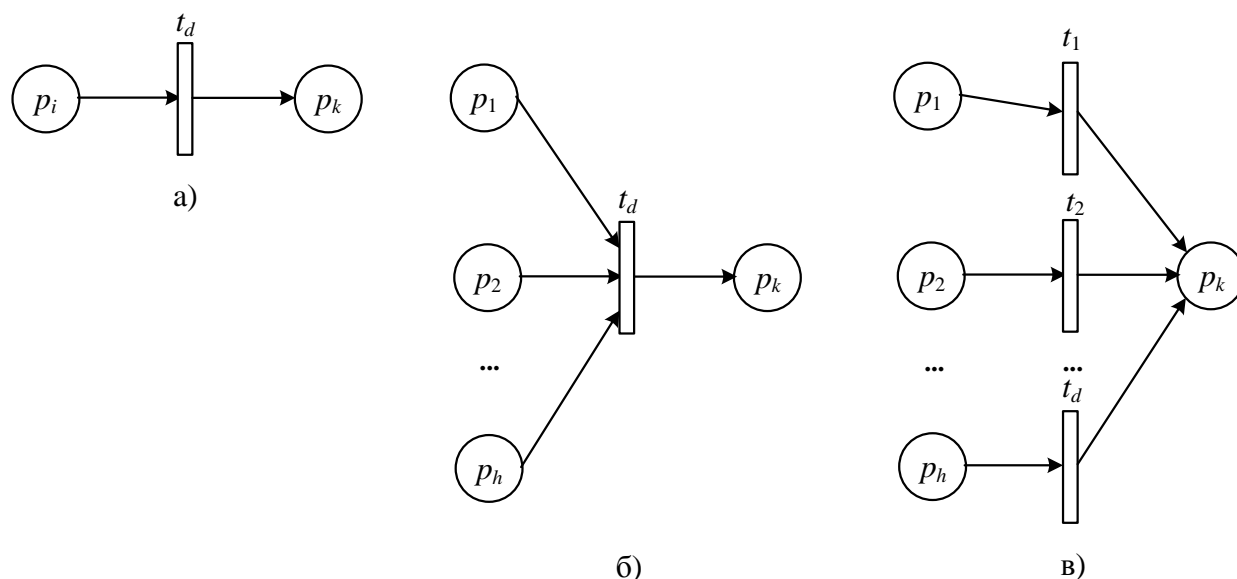


Рис. 1. Способы представления продукционных правил в сеть Петри

2 Определение технического состояния электротехнического оборудования на основе сети Петри

Предположим оперативным персоналом были разработаны ИПП, описывающие всевозможные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации электротехнического оборудования, фрагмент которых представлен ниже:

$Rule_1$: ЕСЛИ $x_2 \Rightarrow \text{норма}$ И $x_7 \Rightarrow \text{отсутствует}$ И $x_9 \Rightarrow \text{отсутствует}$, ТО $x_{11} \Rightarrow \text{исправное}$ [1],

$Rule_2$: ЕСЛИ $x_6 \Rightarrow \text{присутствует}$, ТО $x_{11} \Rightarrow \text{исправное, но с небольшими отклонениями}$ [14],

$Rule_{23}$: ЕСЛИ $x_2 = 189$ И $x_6 = -14$, ТО $x_{11} \Rightarrow \text{исправное, но с небольшими отклонениями}$ [28].

В соответствии с представлением продукционных правил в сеть Петри (см. рис. 1) был получен фрагмент СП, описывающей текущую ситуацию, связанную с ТС электрооборудования (рис. 2). Задача заключается в оценке наличия маркера в позиции p_{11} .

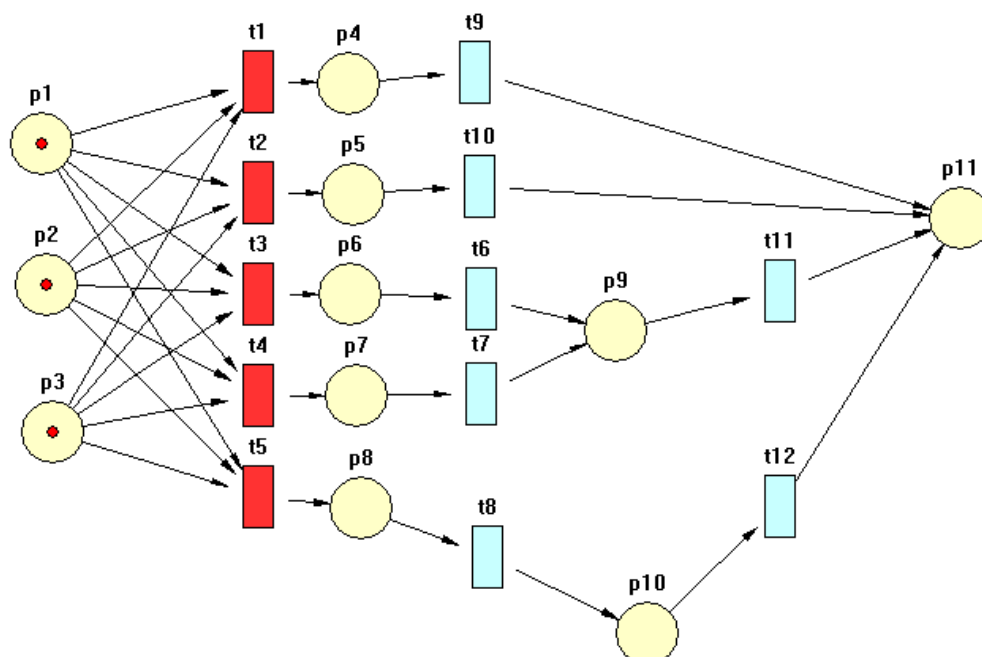


Рис. 2. Фрагмент СП, моделирующей текущее ТС электрооборудования

Здесь p_1 – напряжения по фазе C ; p_2 – напряжения по фазе A ; p_3 – напряжения по фазе B ; p_4 – коэффициент временного перенапряжения; p_5 – грозовые импульсные напряжения; p_6 – отклонение напряжения по фазам A, B, C ; p_7 – размах изменения напряжения; p_8 – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения; p_9 – колебания напряжения; p_{10} – несинусоидальность напряжения; p_{11} – исправность технического состояния ПрО.

На рис. 3 представлены результаты анализа инвариантов для СП при начальной маркировке $m_0 = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$. Для построения таблиц множества S и T инвариантов СП использовался TSS-алгоритм над множеством натуральных чисел [11].

Matrix of incidence: A =												
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
p1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
p2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
p3	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
p4	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
p5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
p6	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
p7	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
p8	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0
p9	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-1	0
p10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1
p11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
T-invariant Transp(T) =												
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
t1 =	0	0	-1	1	0	-1	1	0	0	0	0	0
t2 =	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
t3 =	-1	0	1	0	0	1	0	0	-1	0	1	0
t4 =	-1	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	1
S-invariant : S =												
	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	
s1 =	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
s2 =	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s3 =	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	

Рис. 3. Результаты инвариантов для СП

Сеть Петри задается матрицей инцидентности A , где элемент $a_{ij} = 1$ соответствует ситуации, когда метка добавляется в позицию i при срабатывании перехода j сети; элемент $a_{ij} = -1$ – метка удаляется из позиции i при срабатывании перехода j сети; $a_{ij} = 0$ – число меток в позиции i не изменяется при срабатывании перехода j .

Результаты анализа инвариантов для приведенной сети Петри позволяют установить следующие свойства:

- 1) СП является ограниченной, так как все позиции сети соответствуют положительным значениям (множество S -инвариантов), т.е. все метки не могут накапливаться в позициях;
- 2) СП является безопасной, поскольку число меток в каждой позиции не превышает 1;
- 3) СП является живой, так как отсутствуют столбцы с нулевыми значениями (множество T -инвариантов) при начальной маркировке, т.е. каждый переход СП срабатывает хотя бы один раз. Тупики в СП отсутствуют (невозможно запустить один или несколько переходов);
- 4) СП является правильной, поскольку сеть безопасная и живая;
- 5) все позиции в СП достижимы, т.е. в модели отсутствуют лишние позиции.

Если задать вектор начальной маркировки $m_0 = (0.5, 0.5, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ и $f = (0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.6, 0.5, 0.5, 0.95, 0.95, 0.9, 0.9)$ для СП, то при последовательном рассмотрении всех активных переходов и результатов их срабатывания будет определена новая маркировка НСП $m = (0.5, 0.5, 0.5, 0.3, 0.2, 0.8, 0.6, 0.2, 0.6, 0.5, 0.7)$. Степень истинности нечеткого высказывания «исправность технического состояния оборудования» m_{11} составляет 0.7 (исправное состояние), что совпало с рекомендацией, выданной системой диагностирования оборудования.

Заключение

В настоящей работе для повышения эффективности процесса принятия решений при диагностировании ПрО предлагается нечеткая сеть Петри. Рассмотрен способ представления иерархических продукционных правил в СП, который позволяет увидеть все промежуточные результаты определения

ТС ПрО. Полученные результаты анализа СП показали, что построенная модель является ограниченной, живой и безопасной. Результат, полученный посредством сетевой модели, совпал с результатом, выданным системой диагностирования оборудования, что подтверждает адекватность разработанной СП. Применение разработанной модели позволит повысить качество управления и диагностирования ПрО, отслеживать текущее состояние ПрО и формировать план диагностического обследования и ремонта.

Список литературы

- 1 **Chengyan, Xu.** The fault diagnosis of the wireless sequence control system based on fuzzy Petri nets / Chengyan Xu, Yan Bai, Renshu Wang // Computer Engineering & Science. – 2014. – Vol. 36. – P. 1512–1518.
- 2 **Dai, Kong.** Fuzzy Petri nets and its application in fault diagnosis of compressor / Dai Kong, Hongwei Li // Computer Engineering and Design. – 2018. – Vol. 39. – P. 271–275.
- 3 **Qiang, Chen.** The analysis method of power grid fault based on hierarchical transition weighted fuzzy Petri net / Qiang Chen, Xuezhen Cheng, Jianhang Liu // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2016. – Vol. 31. – P. 125–135.
- 4 **Колоденкова, А. Е.** Использование нейронной сети для обучения неоднородной когнитивной модели диагностирования состояния электротехнического оборудования / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 163–171. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Котов, В. Е.** Сети Петри / В. Е. Котов. – Москва : Наука, 1984. – 160 с.
- 6 **Леоненков, А. Ю.** Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ, 2003.
- 7 **Рудаков, И. В.** Программный комплекс верификации алгоритмов программного обеспечения с помощью иерархических сетей Петри / И. В. Рудаков, А. В. Пашенкова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронное издание, 2013. – № 2 (14). – С. 12.
- 8 Sensitivity analysis and the what-if problem in simulation analysis / H. Arsham, A. Feuerverger, D. McLeish, J. Kreimer, R. Rubinstein // Mathematical and Computer Modelling, 1989. – Vol. 12 (1). – P. 193–219.
- 9 **Shaowen, Wan.** The fault diagnosis of smart substation equipment based on fuzzy Petri nets // 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering, 2018. – Vol. 149. – P. 389–394
- 10 **Исупов, А. Б.** Моделирование процесса функционирования телекоммуникационной сети в условиях программно-аппаратных воздействий / А. Б. Исупов. – Текст : электронный. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/07.pdf> (дата обращения: 20.02.2021).

Reference

- 1 **Chengyan, Xu** The fault diagnosis of the wireless sequence control system based on fuzzy Petri nets / Chengyan Xu, Yan Bai, Renshu Wang // Computer Engineering & Science. – 2014. – Vol. 36. – P. 1512–1518.
- 2 **Dai, Kong** Fuzzy Petri nets and its application in fault diagnosis of compressor / Dai Kong, Hongwei Li // Computer Engineering and Design. – 2018. – Vol. 39. – P. 271–275.
- 3 **Qiang, Chen** The analysis method of power grid fault based on hierarchical transition weighted fuzzy Petri net / Qiang Chen, Xuezhen Cheng, Jianhang Liu // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2016. – Vol. 31. – P. 125–135.
- 4 **Kolodenkova, A.E.** Using a neural network for training a heterogeneous cognitive model for diagnosing the state of electrical equipment / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Vestnik RGUPS. – 2020. – № 2. – P. 163–171. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Kotov, V. E.** Petri nets / V. E. Kotov. – Moscow: Nauka, 1984. – 160 p.
- 6 **Leonenkow, A.** Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTech / A. Leonenkow. – SPb.: Byhwd, 2003. – 720 p.
- 7 **Rudakov, I. V.** Software package for verification of software algorithms using hierarchical Petri nets / I. V. Rudakov, A. V. Paschenkova // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University: electronic edition. – 2013. – № 2 (14). – P. 12.
- 8 Sensitivity analysis and the what-if problem in simulation analysis / H. Arsham, A. Feuerverger, D. McLeish, J. Kreimer, R. Rubinstein // Mathematical and Computer Modelling, 1989. – Vol. 12 (1). – P. 193–219.
- 9 **Shaowen, Wan.** The fault diagnosis of smart substation equipment based on fuzzy Petri nets // 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering, 2018. – Vol. 149. – P. 389–394
- 10 **Isupov, A. B.** Modeling of the process of functioning of the telecommunication network under software and hardware impacts / A. Isupov. – Text : electronic. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/07.pdf> (date of the application: 20.02.2021).

11 **Krivoi, S.** A criteria of compatibility systems of linear diophantine constraints // Lecture Notes in Comp. Science. – 2002. – № 2328. – P. 264–271.

11 **Krivoi, S.** A criteria of compatibility systems of linear diophantine constraints // Lecture Notes in Comp. Science. – 2002. – № 2328. – P. 264–271.

A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina

INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN EQUIPMENT DIAGNOSTICS SYSTEMS BASED ON THE NETWORK MODEL

Abstract. To improve the efficiency of the decision-making process when diagnosing industrial equipment (IE), a simulation network model has been proposed. Petri net (PN) based on production rules is used as a simulation network model which is well proven in modeling of the discrete processes. The application of the developed model will improve the quality of the IE management and diagnostics, monitor the current state of the IE diagnostics system and form a plan for diagnostic testing and repair.

Keywords: Petri net, hierarchical production rules, electrical equipment.

For citation: Kolodenkova, A. E. Information support for decision-making in equipment diagnostics systems based on the network model / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Vestnik RGUPS. – 2021. – № 1. – P. 47–52. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_47.

Сведения об авторах

Колоденкова Анна Евгеньевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информационные технологии»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Верещагина Светлана Сергеевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информационные технологии»,
старший преподаватель,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Information about the authors

Kolodenkova Anna Evgenievna

Samara State Technical University
(Samara Polytech),
Chair «Information Technology»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor, Head of the Chair,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Vereshchagina Svetlana Sergeevna

Samara State Technical University
(Samara Polytech),
Chair «Information Technology»,
Senior Lecturer,
e-mail: werechaginass@mail.ru