

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Дунаев Андрей Михайлович

Инженер, e-mail: [west-ma@yandex.ru](mailto:west-ma@yandex.ru)

Дунаев Михаил Павлович

Д.т.н., профессор

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),  
Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

**Аннотация.** В рамках настоящей статьи представлен способ обеспечения надёжности функционирования сложного электрооборудования на транспорте, основанный на разработке системы интеллектуального диагностирования промышленных преобразователей частоты, входящих в состав частотно-регулируемых электроприводов. Авторами предложена процедура получения оптимального логического алгоритма диагностирования данного оборудования и выполнена программная реализация означенной процедуры. Получен искомый алгоритм, определяющий структуру базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты. Корректность и эффективность функционирования экспертной системы, реализованной в соответствии с указанной структурой, подтверждена на практике.

**Ключевые слова:** промышленный преобразователь частоты; логический алгоритм диагностирования; структура базы знаний; экспертная система.

**Цитирование:** Дунаев А.М., Дунаев М.П. Диагностирование электрооборудования на транспорте с использованием интеллектуальных систем. //Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С.79 – 88. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.006

**Введение.** Актуальной задачей в сфере транспорта является обеспечение надёжности функционирования сложного электрооборудования (ЭО). К означенной технике принадлежат промышленные преобразователи частоты (ПЧ), входящие в состав частотно-регулируемых электроприводов [1, 7].

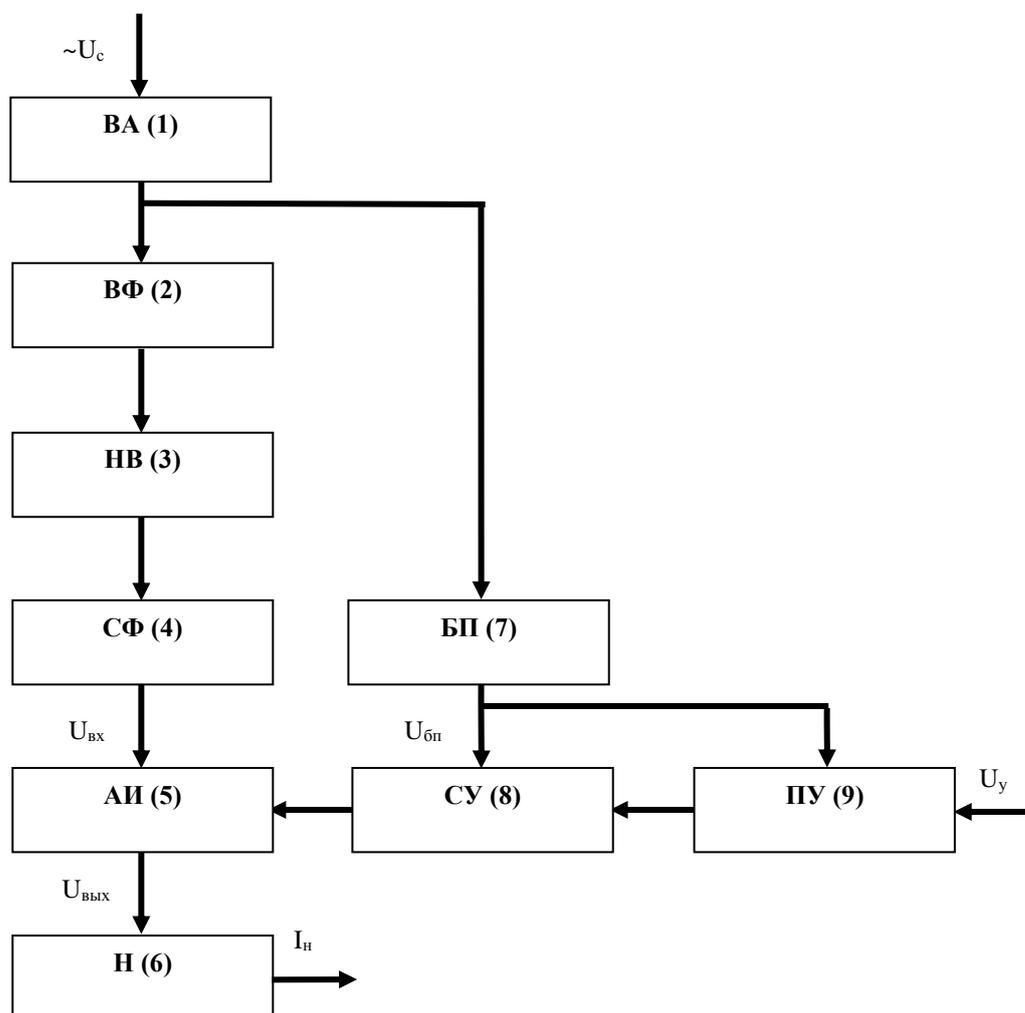
Один из перспективных способов решения вышеизложенной задачи заключается в разработке систем диагностирования оборудования, основывающихся на технологиях искусственного интеллекта, логических методах технической диагностики и эвристических знаниях экспертов [2, 6, 11, 12].

Основная цель данной работы состоит в получении оптимального логического алгоритма диагностирования [10] промышленных преобразователей частоты, определяющего структуру базы знаний экспертной системы для диагностирования указанного оборудования.

**1. Анализ объекта диагностирования.** Логический алгоритм диагностирования опирается на функциональную схему диагностируемого устройства и представляет собой

описание последовательности выполнения элементарных диагностических проверок над его функциональными блоками [8].

Функциональная схема подключения промышленного преобразователя частоты (ПЧ) к электрической сети [6], представлена на рисунке 1.



**Рис.1.** Функциональная схема подключения промышленного ПЧ

На рисунке 1 имеют место следующие условные обозначения: ВА – вводной автоматический выключатель; ВФ – входной фильтр; НВ – неуправляемый выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; АИ – автономный инвертор; Н – нагрузка преобразователя; БП – блок питания системы управления; СУ – система управления; ПУ – панель управления;  $\sim U_c$  – напряжение питающей сети переменного тока;  $U_{вх}$  – входное напряжение силовой схемы преобразователя;  $U_{вых}$  – выходное напряжение преобразователя;  $I_n$  – ток нагрузки;  $U_{бп}$  – выходное напряжение блока питания;  $U_y$  – сигнал задания выходной частоты.

Характеристики технических состояний промышленного преобразователя частоты – вес технического состояния  $p(e_i)$  и время доступа (цена проверки)  $t(e_i)$  – указаны в таблице 1 (символом  $i$  обозначен номер функционального блока).

**Таблица 1.** Характеристики технических состояний ПЧ

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>p</i> ( <i>e<sub>i</sub></i> )	0,01	0,04	0,05	0,02	0,4	0,1	0,14	0,2	0,04
<i>t</i> ( <i>e<sub>i</sub></i> )	0,05	0,05	0,1	0,02	0,07	0,06	0,05	0,5	0,1

**2. Получение оптимального алгоритма диагностирования.** Получение оптимального логического алгоритма диагностирования промышленных преобразователей частоты представляет собой классическую задачу математической оптимизации [3].

Критерием оптимальности логического алгоритма диагностирования является минимальность средних затрат на определение одного технического состояния объекта диагностирования, вследствие чего целевая функция оптимизации может быть описана нижеизложенным выражением:

$$C(Z_0, E_T) = \sum_{i=1}^N [p(e_i) \sum_{z_0}^{z_i} t(e_k)] \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $Z_0$  – первая проверка алгоритма диагностирования;

$E_T$  – множество всех технических состояний объекта диагностирования.

Имеющие место функциональные ограничения описываются системой неравенств:

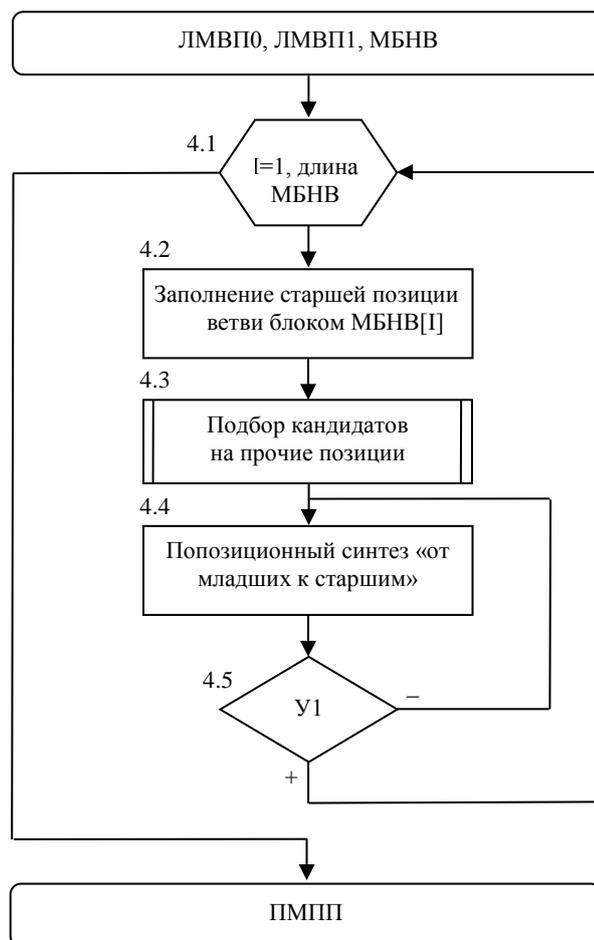
$$\left. \begin{array}{l} 0 < p(e_i) < 1 \\ 0 < t(e_k) < 1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

В качестве метода оптимизации выбран алгоритмический регулярный метод прямого перебора [3].

Процедура решения поставленной задачи [5] включает следующие этапы:

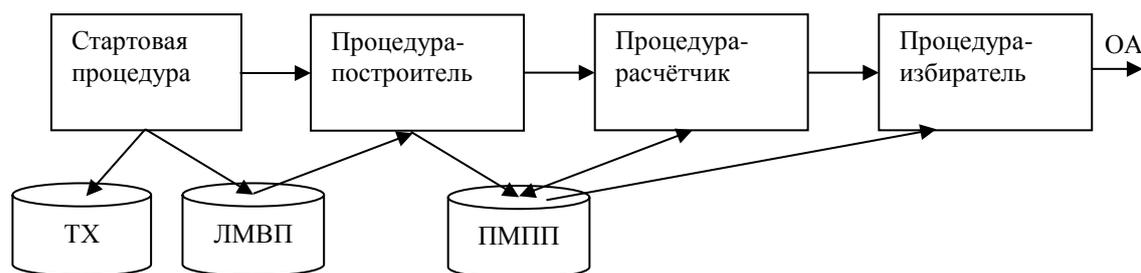
- Анализ функциональной схемы подключения диагностируемого оборудования.
- Выбор блока первой диагностической проверки.
- Построение блочных номенклатур ветвей алгоритмического дерева
- Составление полного массива последовательностей проверок (ПМПП).
- Нахождение последовательностей, удовлетворяющих критерию оптимальности.
- Синтез дерева алгоритма из полученных составных частей.

Блок-схема алгоритма составления ПМПП (ключевого этапа) [5] приведена на рис. 2, содержащем следующие условные обозначения: ЛМВП0 – логический массив выполнения проверок, формируемый на случай получения неисправных выходных сигналов; ЛМВП1 – логический массив выполнения проверок, формируемый на случай получения исправных выходных сигналов; МБНВ – множество блочной номенклатуры ветви; У1 – условие, состоящее в сочетании исчерпанности кандидатов младшего уровня с невозможностью формирования из оставшихся кандидатов такой последовательности, которая являлась бы равнозначной номенклатуре ветви без блока, соответствующего элементу МБНВ[1].



**Рис.2.** Блок-схема алгоритма составления ПМПП

Процедура реализована для промышленных ПЧ созданием приложения «FC\_ОПТИМ», структура которого показана на рис. 3, содержащем следующие условные обозначения: ТХ – таблица характеристик; ОА – оптимальный алгоритм диагностирования промышленных ПЧ.



**Рис.3.** Структура приложения для получения ОА диагностирования ПЧ

Стартовая процедура обеспечивает подготовку формы приложения к работе и исполнение первого этапа. Посредством процедуры-построителя осуществляется выполнение второго, третьего и четвёртого этапов. Процедура-расчётчик и процедура-избиратель служат реализации пятого этапа вышеизложенной методики. Для исполнения её шестого этапа отдельной процедуры не требуется.

На рис. 4 показаны результаты работы приложения «FC\_ОПТИМ».

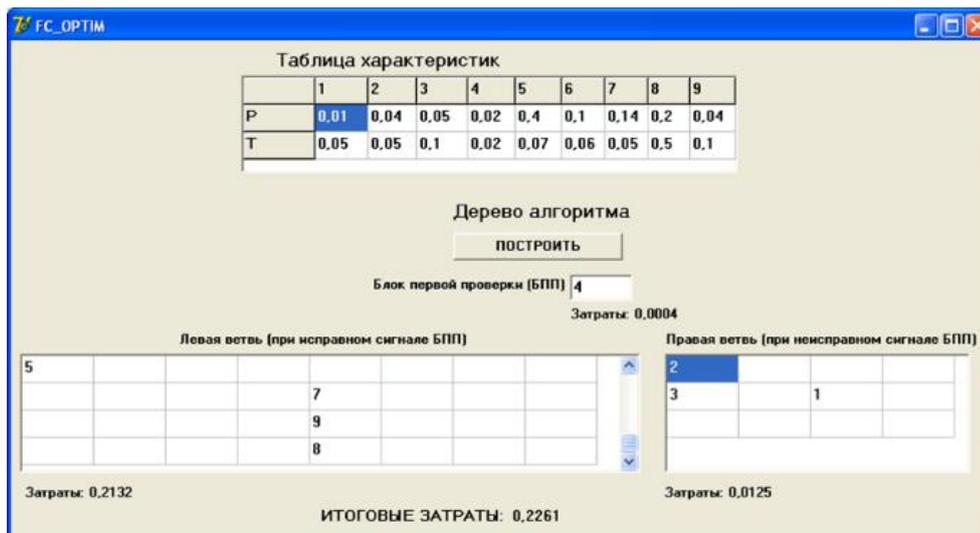


Рис.4. Результаты работы приложения для получения ОА диагностирования ПЧ

Система представления дерева алгоритма в «FC\_OPTIM» [5] такова: ячейка с номером блока, подлежащего проверке при получении исправного выходного сигнала (левая дочерняя позиция), располагается на следующей строке таблицы непосредственно под ячейкой с номером блока произведённой элементарной проверки (родительской позиции); ячейка с номером блока, подлежащего проверке при получении неисправного сигнала (правая дочерняя позиция), находится правее левой дочерней позиции на соответственно  $1, 2, 2^2, \dots, 2^{n-k}$  ячеек (где  $n$  – общее число уровней блоков-кандидатов,  $k$  – индекс уровня рассматриваемой родительской позиции,  $0$  – индекс уровня дочерних позиций БПП).

Полученное представление дерева оптимального алгоритма соответствует размещённому на рис. 5 графу нового МРТ–алгоритма диагностирования.

На рис. 5 имеют место следующие условные обозначения: круги с цифрами внутри – элементарные проверки функциональных блоков, кратко обозначаемых соответствующими номерами (см. рисунок 1); цифры 1 и 0 – результаты означенных проверок блоков (исправен – неисправен); прямоугольники – итоги диагностирования (цифра внутри прямоугольника означает номер неисправного блока).

Первая элементарная проверка при разработке рассматриваемого МРТ–алгоритма, являющегося алгоритмом метода поиска по критерию минимума времени первой проверки и с учётом характеристик технических состояний, должна обладать наименьшим значением времени проверки  $t(e_i)$ . При равенстве времён элементарных проверок в качестве первой следует выбирать такую проверку, которая контролирует функциональный элемент, расположенный ближе к центральной части функциональной схемы объекта диагностирования. Последующие проверки выбираются с учётом характеристик технических состояний, в порядке убывания значения величины  $p(e_i)/t(e_i)$ .

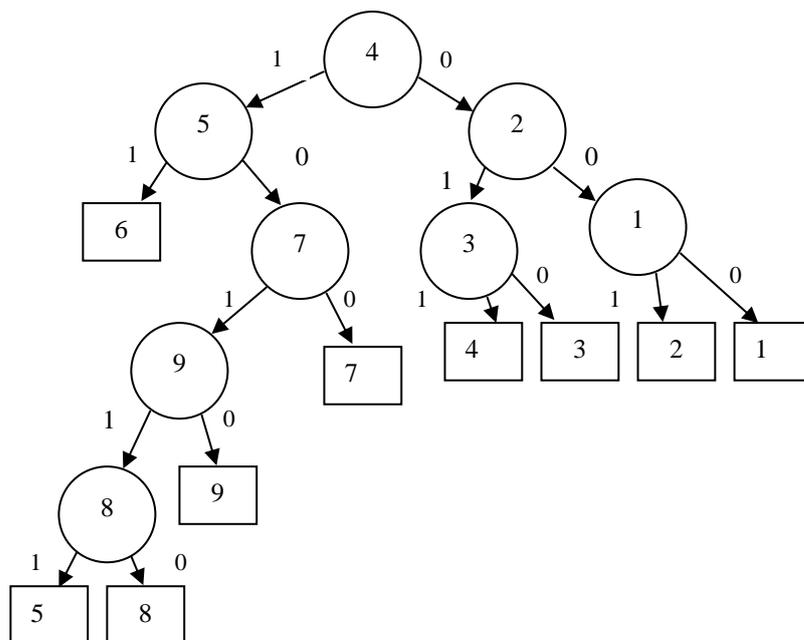


Рис.5. Граф ОА диагностирования ПЧ

**3. Реализация диагностической экспертной системы.** В соответствии с порядком выполнения элементарных диагностических проверок, регламентированным МРТ-алгоритмом, построена структура базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты [4]. Графическое представление означенной структуры приведено на рис. 6.

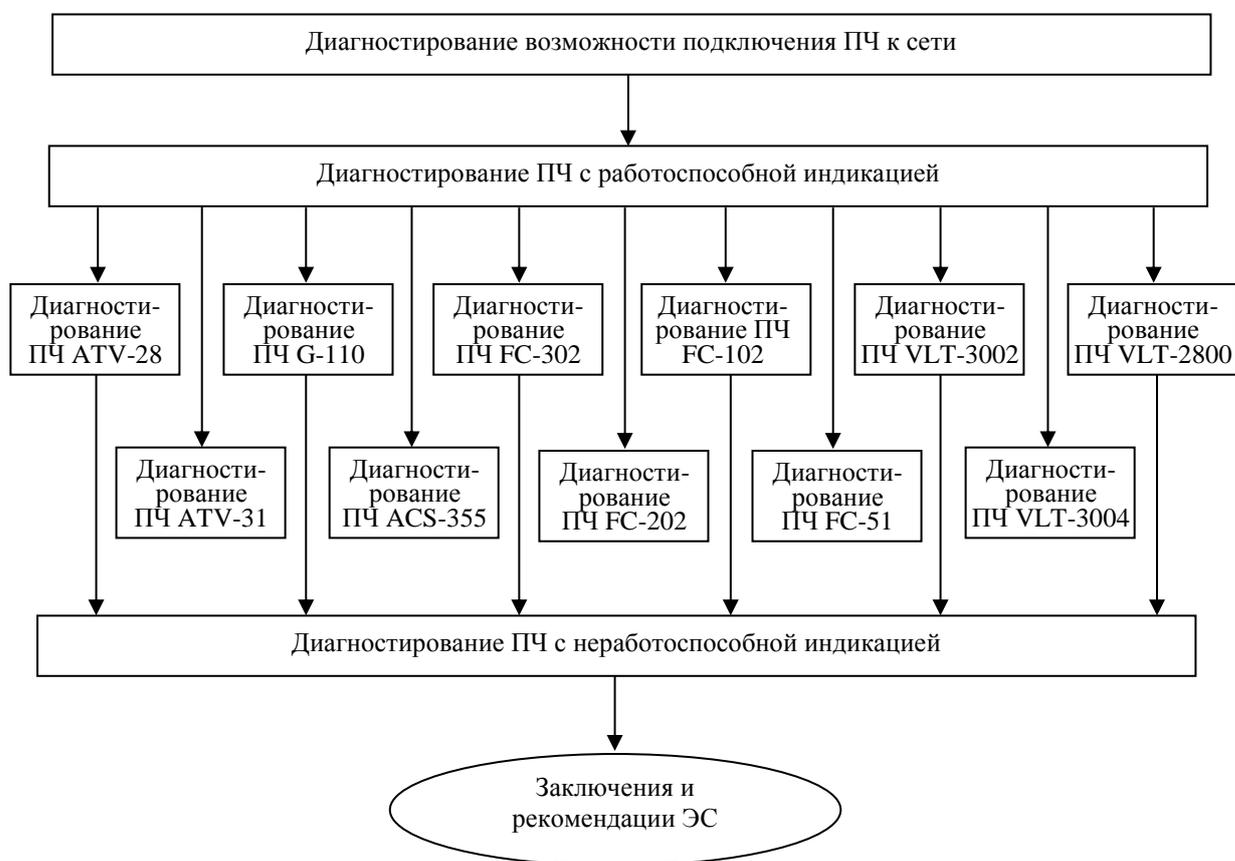
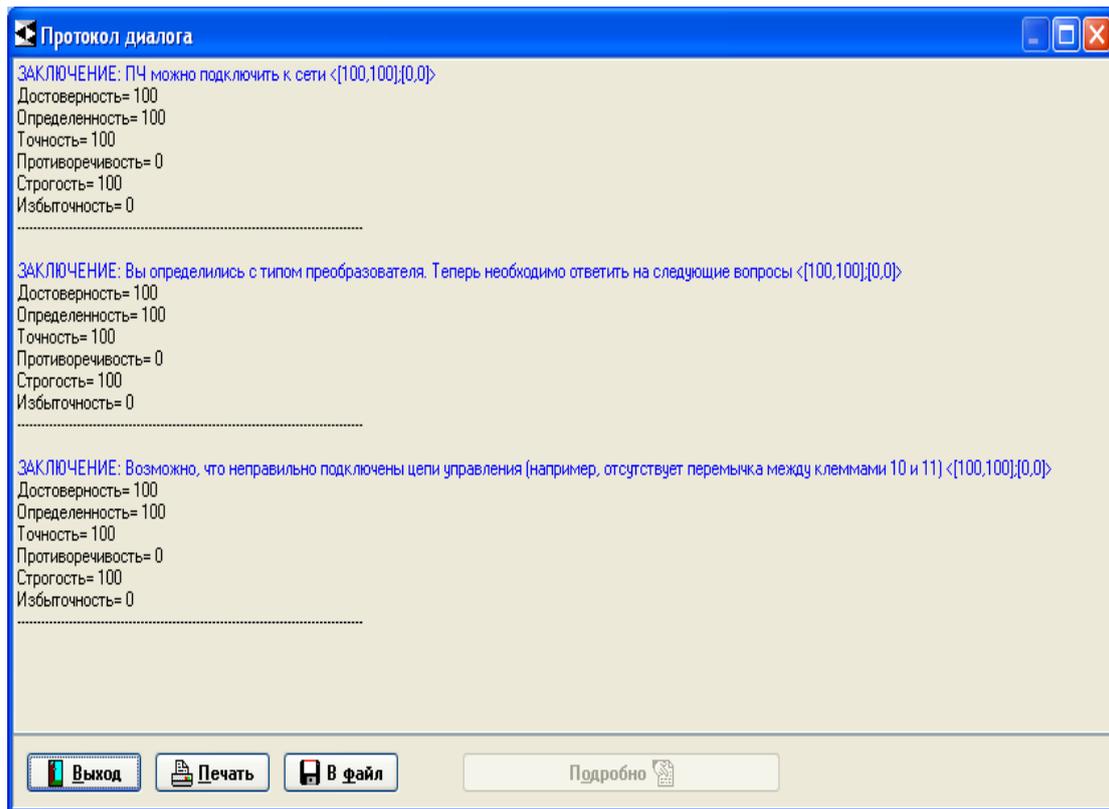


Рис. 6. Наиболее эффективная структура базы знаний ЭС для диагностирования ПЧ

В качестве инструментального средства построения базы знаний ЭС в соответствии с предложенной структурой выбрана разработанная Леонидом Вадимовичем Аршинским система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой «Гераклит» [9].

Корректность и эффективность работы реализованной экспертной системы «FCTD1» подтверждена серией экспериментов, проведённых в лабораторных условиях.

Пример функционирования системы проиллюстрирован рис. 7.



**Рис. 7.** Пример функционирования ЭС для диагностирования ПЧ

В рассматриваемом случае взаимодействие экспертной системы «FCTD1» с пользователем позволяет ей выявить возможность корректного подключения промышленного преобразователя частоты к электрической сети, работоспособность его предупреждающей индикации, и, наконец, искомую неисправность.

**Заклучение.** В рамках настоящего исследования получен оптимальный логический алгоритм диагностирования промышленных преобразователей частоты, входящих в состав частотно-регулируемых электроприводов на транспорте.

С опорой на порядок выполнения диагностических проверок, предписываемый данным алгоритмом, а также эвристические знания экспертов в сфере диагностирования сложного электрооборудования, построена структура базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты.

Корректность и эффективность функционирования экспертной системы «FCTD1», реализованной в соответствии с предложенной структурой, подтверждена на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин, А.С. Опыт внедрения частотно-регулируемого электропривода на базе преобразователя частоты VACON на самоходный вагон в 15 К / А.С. Аникин // Известия ТулГТУ. Технические науки. 2010. № 3. С. 220-226.
2. Васюченко, П.В. Повышение надёжности работы электрооборудования путём применения методов диагностики / П.В. Васюченко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 5(123). С. 27-34.
3. Вентцель, Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. М. : Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. 208 с.
4. Дунаев, А.М. Метод структурирования базы знаний экспертной системы для диагностирования электрического оборудования / А.М. Дунаев, М.П. Дунаев, С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 86-89.
5. Дунаев, А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования / А.М. Дунаев // Вестник ИрГТУ. 2018. № 9(140). С. 82-90.
6. Дунаев, М.П. Экспертные системы для наладки электропривода / М.П. Дунаев. Иркутск : ИрГТУ, 2004. 138 с.
7. Кузькин, В.И. Высоковольтный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей / В.И. Кузькин, В.Н. Мелешкин, С.В. Мясищев, Д.В. Симоненков, С.Н. Шипаева // Электротехника. 2004. № 10. С. 19-24.
8. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства): учебное пособие / П.П. Пархоменко. М. : Энергия, 1981. 320 с.
9. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ программы для ЭВМ «Гераклит 2.Х». № 2013616260 от 02.07.2013, Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой / Л.В. Аршинский; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения.
10. Фандеев, В.П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования микромеханических датчиков: учебное пособие / В.П. Фандеев, В.С. Волков, И.Н. Баринев. Пенза : ПГУ, 2013. 56 с.
11. Babak, V.P. Diagnostic Systems For Energy Equipments / V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M. Zvaritch. Warsaw : Springer, 2020. 133 p.
12. Recent Advances in Automation, Robotics And Measuring Techniques / Edited by R. Szewczyk [et al.]. Warsaw : Springer, 2014. 744 p.

**UDK 621.314.5**

**DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN TRANSPORT  
USING INTELLIGENT SYSTEMS**

**Andrey M. Dunaev**

Engineer, e-mail: [west-ma@yandex.ru](mailto:west-ma@yandex.ru)

**Mikhail P. Dunaev**

D. of T.S., Professor

Irkutsk National Research Technical University (ISTU),  
Russian Federation, Irkutsk, Lermontov Str., 83

**Abstract.** As part of this article, a method for ensuring the reliability of the operation of complex electrical equipment in transport is presented. The method consists in developing an intelligent diagnosis system for industrial frequency converters that are part of frequency-controlled electric drives. The authors proposed a procedure for obtaining the optimal logical algorithm for diagnosis of this equipment and performed a software implementation of this procedure. The desired algorithm is obtained. It determines the structure of the knowledge base of the expert system for diagnosis of industrial frequency converters. The correctness and efficiency of the expert system, implemented in accordance with the specified structure, is confirmed in practice.

**Keywords:** industrial frequency convertor; logical diagnosis algorithm; knowledgebase structure; expert system.

**References**

1. Anikin, A.S. Opyt vnedreniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda na baze preobrazovatelya chastoty VACON na samohodnyj vagon v 15 K [Experience in introducing a frequency-controlled electric drive based on a VACON frequency converter to a self-propelled carriage of 15 K] / A.S. Anikin // Izvestiya TulGTU. Tekhnicheskie nauki = News of TulSTU. Technical science. 2010. No. 3. Pp. 220-226. (In Russian).
2. Vasyuchenko, P.V. Povyshenie nadyozhnosti raboty ehlektrooborudovaniya putyom primeneniya metodov diagnostiki [Improving the reliability of electrical equipment through the use of diagnostic methods] / P.V. Vasyuchenko // Ehnergoberezhenie. Ehnergetika. Ehnergoaudit = Energy saving. Energy. Energy audit. 2014. No. 5(123). Pp. 27-34. (In Russian).
3. Ventcel', E.S. Issledovanie operacij: zadachi, principy, metodologiya [Operations research: tasks, principles, methodology] / E.S. Ventcel'. – M. : Gl. Red. Fiz. Mat. Lit. = The Main Red. of Phys. and Math. Lit. Publ., 1988. 208 p. (In Russian).
4. Dunaev, A.M. Metod strukturirovaniya bazy znaniy ekspertnoj sistemy dlya diagnostirovaniya elektricheskogo oborudovaniya [The method of structuring the knowledge base of an expert system for diagnosing electrical equipment] / A.M. Dunaev, M.P. Dunaev, S.K. Kargapol'cev,

- V.E. Gozbenko // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2017. No. 1(53). Pp. 86-89. (In Russian).
5. Dunaev, A.M. Procedura postroeniya optimal'nogo logicheskogo algoritma diagnostirovaniya [The procedure for constructing an optimal logical diagnostic algorithm] / A.M. Dunaev // *Vestnik IrGTU [ISTU Bulletin]*. 2018. No. 9(140). Pp. 82-90. (In Russian).
  6. Dunaev, M.P. Ekspertnye sistemy dlya naladki elektroprivoda [Expert systems for setting up an electric drive] / M.P. Dunaev. – Irkutsk : ISTU = ISTU Publ. 2004. 138 p. (In Russian).
  7. Kuz'kin, V.I. Vysokovol'tnyj preobrazovatel' chastoty dlya pitaniya asinhronnyh dvigatelej [High-voltage frequency converter for powering induction motors] / V.I. Kuz'kin, V.N. Meleshkin, S.V. Myasishchev, D.V. Simonenkov, S.N. Shipaeva // *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2004. No. 10. Pp. 19-24. (In Russian).
  8. Parhomenko, P.P. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (Optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva): uchebnoe posobie [Fundamentals of technical diagnostics (Optimization of diagnostic algorithms, hardware): a training manual] / P.P. Parhomenko. M. : Energiya = Energy Publ. 1981. 320 p. (In Russian).
  9. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii v Reestre programm dlya EHVM programmy dlya EHVM «Geraklit 2.X». № 2013616260 ot 02.07.2013, Rossijskaya Federaciya, Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti (Rospatent). Sistema modelirovaniya pravdopodobnyh rassuzhdenij na osnove logik s vektornoj semantikoj / L.V. Arshinskij; zayavitel' i patentoobladatel' – Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. [Certificate of official registration in the Register of Computer Programs for the computer program "Heraclit 2.X". No. 2013616260 of 02.07.2013, the Russian Federation, the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). A simulation system for plausible reasoning based on logics with vector semantics. Arshinsky; the applicant and the patent holder are the Irkutsk State University of Communications]. (In Russian).
  10. Fandeev, V.P. Modeli, metody i algoritmy optimizacii diagnostirovaniya mikromekhanicheskikh datchikov: uchebnoe posobie [Models, methods and algorithms for optimizing the diagnosis of micromechanical sensors: a training manual] / V.P. Fandeev, V.S. Volkov, I.N. Barinov. Penza : PGU = PGU Publ., 2013. 56 p. (In Russian).
  11. Babak, V.P. Diagnostic Systems For Energy Equipments / V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M. Zvaritch. Warsaw : Springer = Springer Publ., 2020. 133 p. (In English).
  12. Recent Advances in Automation, Robotics And Measuring Techniques / Edited by R. Szewczyk [et al.]. Warsaw : Springer = Springer Publ., 2014. 744 p. (In English).