

# Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.896

## РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ IDEF0\*

*С.С. Верещагина*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Предлагается подход к диагностированию асинхронных электродвигателей на основе применения иерархических функциональных моделей, построенных с использованием методологии IDEF0, для комплексного учета влияния показателей качества электрической энергии. Приводится краткий анализ проблем диагностирования асинхронных электродвигателей, обосновывающий актуальность разработки новых методов и моделей диагностирования. Отличительная особенность предложенных иерархических функциональных диагностических моделей асинхронных электродвигателей состоит в формализованном представлении необходимых функций процесса с использованием методологии IDEF0. Это позволяет выявить основные потоки данных в процессе диагностирования, извлечь знания о процессе, а также вскрыть причинно-следственные связи отказов асинхронных электродвигателей, дополнив традиционные методы технической диагностики анализом соблюдения нормативных требований, регламентирующих качество электрической энергии. Приводится краткое описание разработанных методов, моделей и алгоритмов, а также результаты экспериментальных исследований, анализа эффективности предложенной методологии.*

***Ключевые слова:** асинхронные электродвигатели, функциональные модели IDEF0, разнородные данные, иерархические производственные правила, неоднородная когнитивная модель.*

### Введение

В настоящее время асинхронные электродвигатели (АЭ) широко используются в насосном оборудовании, станках, компрессорах, транспортерах, вентиляторах и т. д. в таких крупнейших энергопотребляющих отраслях промышленности, как металлургическая, химическая, нефтегазовая, машиностроительная и другие. Несмотря на высокие эксплуатационные характеристики, АЭ часто

---

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-07-00195, № 19-08-00152.

Светлана Сергеевна Верещагина, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии».

преждевременно выходят из строя из-за возможных повреждений: обрыва обмоток, дефектов изоляции, нарушения контактов и соединений и др., изменения показателей (параметров) качества электрической энергии (ПКЭ), износа деталей, а также нарушения правил технической эксплуатации. По этим причинам обычно выходит из строя 20–25 % от общего количества установленных на предприятии АЭ [1–3]. Отказы и сбои в работе АЭ приводят к нарушению технологического процесса; снижению пожаробезопасности, качества и количества выпускаемой продукции; возникновению аварийных ситуаций. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения безопасности и высокой надежности функционирования АЭ [4, 5].

Для решения этой проблемы проводится диагностирование АЭ в процессе его эксплуатации с целью выявления и предупреждения возможного возникновения неисправностей и отказов, поддержания эксплуатационных параметров в установленных пределах, а также прогнозирования технического состояния (ТС) АЭ, что позволяет снизить расходы на ремонт электродвигателя и увеличить срок его службы.

Однако такое диагностирование усложняется рядом проблем, а именно большим объемом разнородных данных, большим количеством контролируемых ПКЭ; ограниченностью доступной информации; отсутствием научно обоснованных диагностических решений [5–7]. В силу недостаточной эффективности традиционных методов диагностики и контроля для диагностирования АЭ разрабатываются различные диагностические модели и методы диагностики [8–11]. Следует отметить, однако, что, во-первых, методы основаны на использовании статистической (измерительной) информации, при этом игнорируется опыт и знания экспертов, во-вторых, не во всех методах учитывается информация о климатических условиях (перепады температур, грозы и др.), в-третьих, большинство методов и моделей основаны на механических источниках отказов и сбоев, при этом не учитывается влияние основных ПКЭ, хотя АЭ очень чувствительны к ним.

### **Постановка задачи**

Для повышения надежности АЭ и обеспечения высокого уровня их отказоустойчивости необходимо разрабатывать и применять новые методы и модели диагностирования с использованием современных информационных технологий, позволяющих не только оценивать механические и электрические неисправности, вызывающие отказы и сбои АЭ, но и извлекать и использовать для диагностики АЭ знания, накопленные оперативным и ремонтным персоналом.

Автором предложен подход к диагностированию АЭ на основе иерархических функциональных моделей с использованием методологии IDEF0, учитывающий влияние основных диагностических параметров, ПКЭ дополнительно к традиционным диагностическим показателям АЭ.

### **Разработка иерархических функциональных моделей процесса диагностирования асинхронных электродвигателей**

В настоящее время разработано большое количество методов моделирования, использование которых кроме решения основных функциональных задач дает накопление опыта и практических навыков персонала в ходе эксплуатации объекта, а также позволяет унифицировать созданные модели для взаимодействия между группами разработчиков и потребителей [12]. Важнейшими из таких подходов являются:

1) функциональный (методология *IDEF0* (диаграммы *IDEF0*)). Главной особенностью данного подхода является принцип декомпозиции диаграмм, т. е. четкое структурирование, построение иерархических и взаимосвязанных диаграмм;

2) объектно-ориентированный (диаграммы *UML*). Этот подход использует объектную декомпозицию, при этом статическая структура системы описывается в терминах объектов и связей между ними, а поведение системы описывается в терминах обмена сообщениями между объектами.

Разработка полных и непротиворечивых иерархических функциональных моделей процесса диагностирования АЭ осуществляется с использованием методологии *IDEF0*, что позволяет подробно его описывать путем введения уровней детализации. При этом упрощается не только моделирование процесса диагностирования, но и понимание моделей из-за выдачи информации небольшими частями на каждой последующей диаграмме [13]. Это позволяет устранить неоднозначность описания, возникающего из постановок задач, связанных с диагностированием АЭ.

Общее представление о диагностировании АЭ показано на контекстной диаграмме (рис. 1). Из рис. 1 видно, что в качестве *входных данных* для выполнения функции «Диагностирование АЭ» предполагается использовать архивную информацию о состоянии АЭ. Результатом выполнения данной функции (*выходные данные*) являются: принятие решений о ТС АЭ, а также разработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации АЭ.

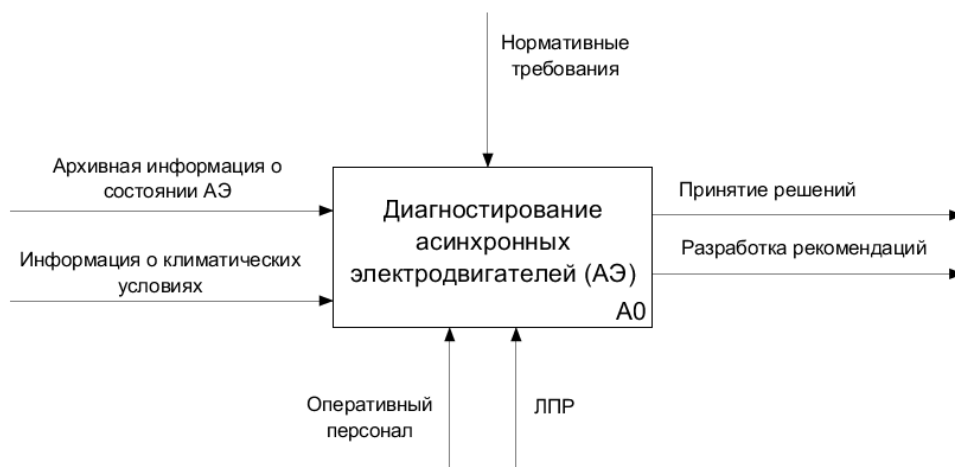


Рис. 1. Контекстная диаграмма «Диагностирование АЭ»

В качестве *управления* (регламентирования, ограничений) выступают нормативные требования (ГОСТы), где указаны условия эксплуатации, допустимые отклонения от номинальных значений основных параметров АЭ, основные КПЭ и т. п., а в качестве *механизма* – оперативный персонал, лицо, принимающее решение (ЛПР).

Далее на основе принципа иерархического упорядочивания с учетом задач, которые будут подробно рассматриваться в дальнейшем, детализируется контекстная диаграмма. Отметим, что подвергать декомпозиции функции моделей, представленных на диаграммах, можно до требуемого уровня.

На рис. 2 приведен результат декомпозиции контекстной диаграммы, предложенной автором и состоящей из шести функций А1-А6. Отметим, что предло-

женную диаграмму можно использовать для диагностирования большинства АЭ серии ВАО5К-450, -560, однако специфика конкретного АЭ учитывается в функциях А3 и А4, которая на диаграмме выделена жирным курсивом. Функции А3 и А4 осуществляются с использованием значений параметров конкретного АЭ.

Здесь стрелка «Требования и рекомендации» является туннельной и означает, что выраженные ею данные отсутствуют на контекстной диаграмме (см. рис. 1). При этом «Требования и рекомендации» поступают от ЛПР. Введение таких стрелок позволяет упростить описание модели, т. е. минимизировать загромождения диаграмм. Отметим, что первый уровень декомпозиции имеет довольно сложную структуру, поскольку диагностирование АЭ представляется многоуровневой *многоэтапной* процедурой.

*Функция А1 – Выявление контролируемых параметров, факторов.* Данная функция позволяет выявить:

1) основные диагностические параметры (технические характеристики АЭ), например, мощность, скольжение, ток статора, КПД,  $\cos \varphi$ , температуру подшипников и корпуса и др., характеризующие АЭ (например, технические условия (ТУ) 16-510.532-76, ПБ, ГОСТ 22782.0-81, ГОСТ 22782.6-81 и ГОСТ 24719-81) [14–17];

2) основные ПКЭ (отклонение частоты, доза фликера (колебания), коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и др.) в соответствии ГОСТ 32144-2013 [18] в качестве возможных первоисточников отказов и сбоев АЭ;

3) диагностические факторы (например, информацию о климатических условиях), влияющие на основные параметры АЭ.

Также данная функция позволяет выявить связи между параметрами и факторами, которые необходимо контролировать на протяжении всего процесса диагностирования.

*Функция А2 – Предварительное диагностирование АЭ.* Данная функция позволяет провести предварительное диагностирование АЭ с использованием разработанного алгоритма поиска отклонений диагностических параметров АЭ, значений ПКЭ от норм, описанных в нормативных требованиях [18], которые хранятся в разработанной базе данных (БД) (рис. 3).

Например, для параметров «напряжение фаз  $A, B, C$ » согласно [18] доверительный интервал составляет [209, 231] В, предельный интервал [198, 231] В.

Функция «Получение результатов» осуществляет сбор всей информации по поиску отклонений значений ПКЭ от норм и выдает результат, например, в следующем виде: параметр «напряжение по фазам  $A, B, C$ » – дата и время отклонений по каждой фазе, продолжительность отклонений, среднее отклонение напряжений.

Блок-схема алгоритма поиска отклонений значений ПКЭ от норм, а также модели БД подробно рассмотрены в работе [19].

*Функция А3 – Построение системы иерархических производственных правил (ИПП).* Эта функция составляет основу базы знаний (БЗ) и позволяет разрабатывать ИПП на основе групп параметров, факторов с учетом знаний и опыта оперативного персонала (рис. 4).

При разработке базы знаний (БЗ) важным является выбор способа представления знаний. Основные типы моделей представления знаний представлены в работах [20, 21].

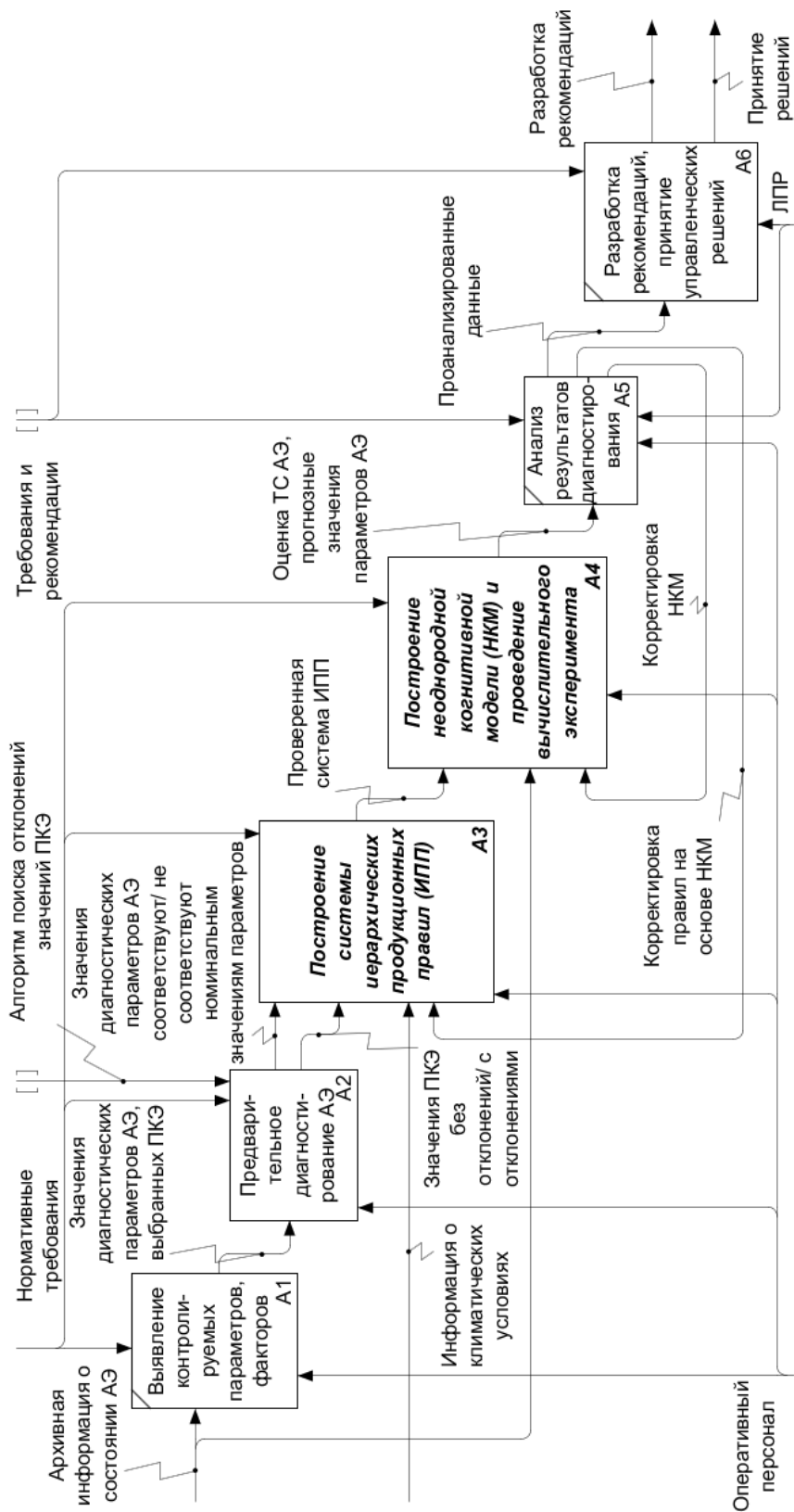


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции «Диагностирование АЭ»



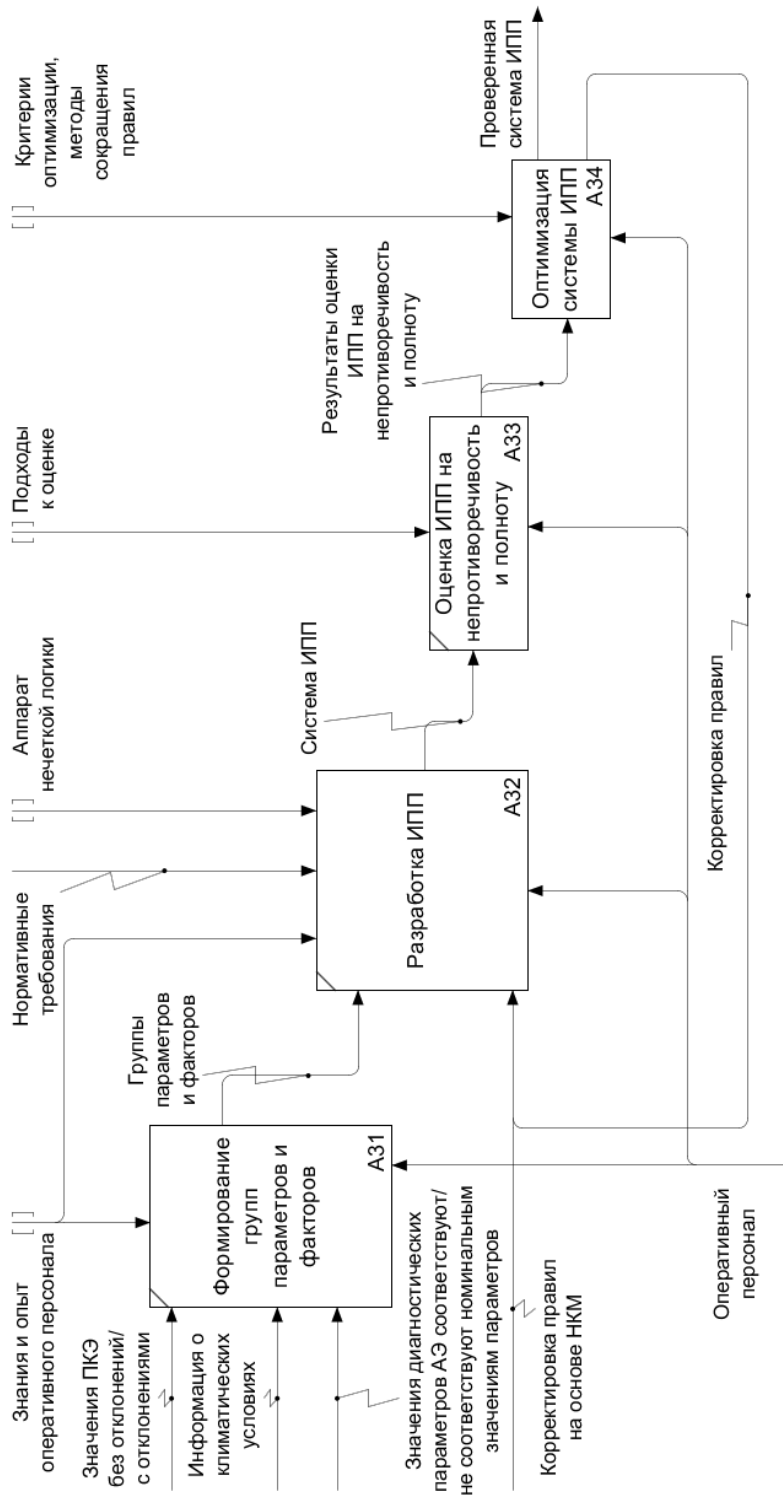


Рис. 4. Диаграмма декомпозиции «Построение системы ИПП»

В настоящей работе в качестве модели представления знаний предлагается использовать продукционные правила. Структура продукционного правила бывает нескольких типов, так как зависит от количества входных переменных в условиях и количества выходных переменных в заключениях [22]:

- 1) структура с одним входом и одним выходом (*Single Input – Single Output (SISO)*);
- 2) структура со многими входами и одним выходом (*Multi Inputs – Single Output (MISO)*);
- 3) структура со многими входами и многими выходами (*Multi Inputs – Multi Outputs (MIMO)*).

Поскольку в рассматриваемом случае на ТС АЭ влияют множество групп параметров, факторов (входные переменные), а в качестве выхода выступает единственное решение (выходная переменная), то для разработки продукционных правил применяется *MISO*-структура (рис. 5).

На рис. 5  $\vec{x}_{\text{вх}_1}, \vec{x}_{\text{вх}_2}, \dots, \vec{x}_{\text{вх}_k}$  – векторы входных параметров, факторов, значения которых можно изменять в определенных пределах,  $k = \overline{1, c}$ , влияющих на выходные параметры, факторы  $x_{\text{вых}_1}, x_{\text{вых}_2}, \dots, x_{\text{вых}_k}$ , которые могут быть получены в перспективе;  $U_k$  – группы параметров, факторов,  $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_c\}$ ,  $U_k = \{\vec{x}_{\text{вх}_k}, x_{\text{вых}_k}\}$ , где  $c < h$ ,  $h$  – общее количество параметров и факторов, которые наиболее полно описывают ТС АЭ. Методика формирования групп параметров и факторов подробно описана в работе [23].

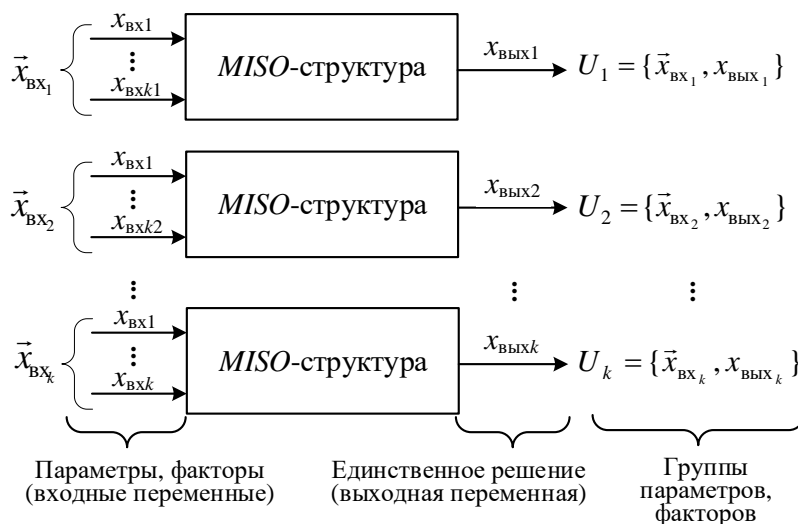


Рис. 5. *MISO*-структура для разработки продукционных правил

Для простоты входные параметры и факторы будем обозначать  $x$ , а выходные –  $y$ . Тогда модель продукционного правила с учетом *MISO*-структуры может быть представлена в виде [23]:

$$\text{Rule}_d : \text{Если } \underbrace{x_1 = A_{d1}}_{\text{чёткое значение}} \text{ и } \underbrace{x_2 = \tilde{A}_{d2}}_{\text{нечёткое значение}} \text{ и } \dots \underbrace{x_h = \tilde{A}_{dh}([x_{h \min}, x_{h \max}])}_{\text{интервал}}, \text{ то } \underbrace{y = B_{dc}}_{\text{чёткое/нечёткое значение}} \quad [Rang_c],$$

входные переменные
выходная переменная



где  $x_i$  – значения основных диагностических параметров, ПКЭ, факторов,  $i = \overline{1;h}$ ;

$A_i$  – четкое значение диагностических параметров, ПКЭ, факторов;

$\tilde{A}_i = \{x_i, \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)\}$  – нечеткое значение диагностических параметров, ПКЭ,

факторов,  $\mu_{\tilde{A}_i}(x_i)$  – функция принадлежности значений диагностических параметров, ПКЭ, факторов;

$\tilde{A}_i([x_{i\min}, x_{i\max}])$  – значение диагностических параметров, ПКЭ, факторов представлено в виде интервала, где  $x_{i\min}, x_{i\max}$  – минимальное и максимальное значение  $i$ -го диагностического параметра, ПКЭ, фактора;

$y$  – значение результата по поводу исправности АЭ;

$B$  – четкое и/или нечеткое значение результата,

$Rang$  – значимость правила, которая устанавливается в соответствии с длиной правила (количество входных переменных в «условиях»),  $Rang \in \{1, 2, \dots, c\}$ ,  $c$  – количество продукционных правил.

Отметим, что чем длиннее продукционное правило, тем больший ранг оно имеет и тем ценнее правило для принятия диагностических решений.

Для диагностирования АЭ серии ВАО5К-450-315-2 оперативным персоналом на основе основных диагностических параметров, ПКЭ были составлены продукционные правила, фрагмент которых представлен ниже:

$Rule_1$  : ЕСЛИ  $x_{10} = < \text{норма} >$  И  $x_{14} = < \text{отсутствует} >$  И

$x_{16} = < \text{отсутствует} >$ , ТО  $x_{19} = < \text{исправное} >$  [1],

$Rule_2$  : ЕСЛИ  $x_1 = < \text{присутствует} >$ ,

ТО  $x_{19} = < \text{исправное, но с небольшими отклонениями} >$  [5],

$Rule_3$  : ЕСЛИ  $x_9 = < \text{низкое} >$  И  $x_{10} = < \text{низкое} >$  И  $x_{11} < \text{низкое} >$ ,

ТО  $x_{23} = < \text{уменьшается} >$  [2],

$Rule_4$  : ЕСЛИ  $x_{23} = < \text{уменьшается} >$ ,

ТО  $x_{19} = < \text{исправное, но с небольшими отклонениями} >$  [6],

$Rule_5$  : ЕСЛИ  $x_9 = < \text{высокое} >$  И  $x_{10} = < \text{высокое} >$  И

$x_{11} = < \text{высокое} >$ , ТО  $x_{25} = < \text{увеличивается} >$  [3],

...

$Rule_d$  : ЕСЛИ  $x_{10} = 189$  И  $x_{13} = -14$ , ТО

$x_{19} = < \text{исправное, но с небольшими отклонениями} >$  [4].

Здесь  $x_1$  – отклонение частоты;

$x_9$  – напряжения фазы С;

$v_{10}$  – напряжения фазы А;

$x_{11}$  – напряжения фазы В;

$x_{14}$  – размах изменения напряжения;

$x_{16}$  – колебания напряжения;

$x_{19}$  – исправность технического состояния АЭ;

$x_{23}$  – коэффициент полезного действия;

$x_{25}$  – момент на валу.

Под *корректировкой правил* понимается изменение количества входных параметров, факторов либо изменение терма-множества для какого-либо парамет-

ра, фактора. Под *корректировкой правил на основе НКМ* понимается добавление новых правил с учетом структуры модели (новых маршрутов).

*Функция А4 – Построение неоднородных когнитивных моделей (НКМ) и проведение вычислительного эксперимента.* Данная функция позволяет строить НКМ, а также проводить вычислительный эксперимент НКМ на основе системы ИПП с участием оперативного персонала (рис. 6).

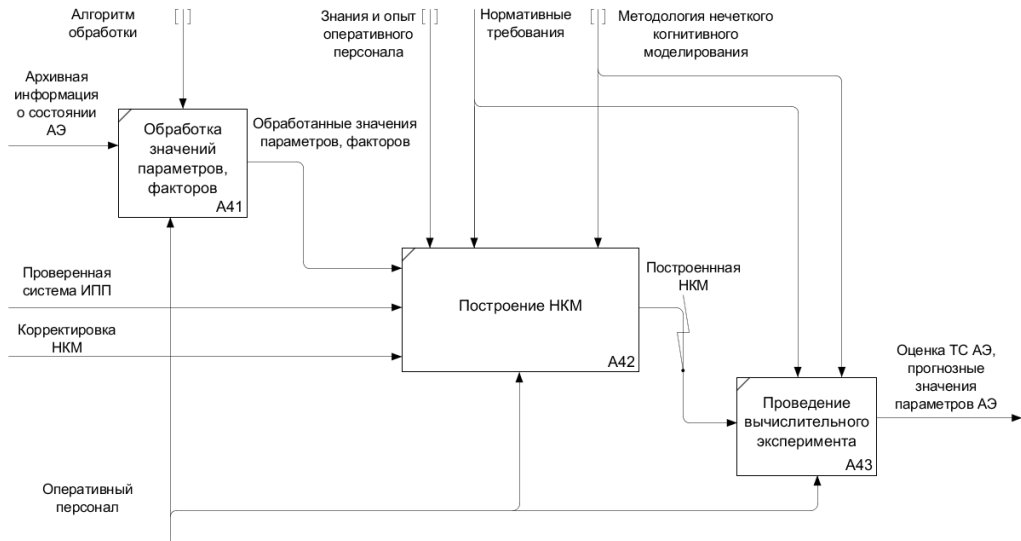


Рис. 6. Диаграмма декомпозиции  
«Построение НКМ и проведение вычислительного эксперимента»

Поскольку оперативный персонал при диагностировании АЭ сталкивается с разнородными данными (численные значения отличаются единицами измерения и порядком величин), то необходима обработка этих данных [24] с целью проведения вычислительного эксперимента НКМ с использованием методологии нечеткого когнитивного моделирования.

Пока работа не ведется с НКМ как с математическим аппаратом, оперируем понятием «параметр» либо «фактор». Как только начинается работа с НКМ, то вводится понятие «вершина».

Под НКМ понимается ориентированный взвешенный граф, вершинами которого являются ПКЭ и факторы, влияющие на работу АЭ, а ребрами – нечеткие причинно-следственные связи между параметрами и факторами [24–26]. При этом значения вершин могут не только определяться на основе опыта оперативного персонала, измерительных приборов, но и вычисляться с помощью функций, которые сопоставлены вершинам и могут зависеть как от единственного аргумента (от одной вершины), так и от нескольких переменных (нескольких вершин).

На рис. 7 представлен локальный фрагмент НКМ диагностирования АЭ серии ВАО5К-450-315-2 на предприятии нефтяной промышленности.

Неоднородная когнитивная модель, представленная на рис. 7, состоит из следующих 28 вершин:

1) ПКЭ:  $x_1$  – отклонение частоты,  $\Delta f$ , Гц;  $x_2$  – длительность провала напряжения,  $\Delta t_n$ , с;  $x_3$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности,  $K_{2U}$ , %;  $x_4$  – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности,  $K_{0U}$ , %;  $x_5$  – несимметрия напряжений;  $x_6$  – доза фликера,  $P_{st}$ ;

$x_7$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения,  $K_{U(n)}$ , %;  $x_8$  – коэффициент временного перенапряжения;  $x_9$  – напряжения фазы  $C$ ,  $U_C$ , В;  $v_{10}$  – напряжения фазы  $A$ ,  $U_A$ , В;  $x_{11}$  – напряжения фазы  $B$ ,  $U_B$ , В;  $x_{12}$  – грозовые импульсные напряжения,  $U_{имп}$ , В;  $x_{13}$  – отклонение напряжения по фазам  $A, B, C$ ,  $\delta U_v$ , %;  $x_{14}$  – размах изменения напряжения,  $\delta U_v$ , %;  $x_{15}$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения,  $K_U$ , %;  $x_{16}$  – колебания напряжения;  $x_{17}$  – несинусоидальность напряжения),  $K_{НС}$  [18];

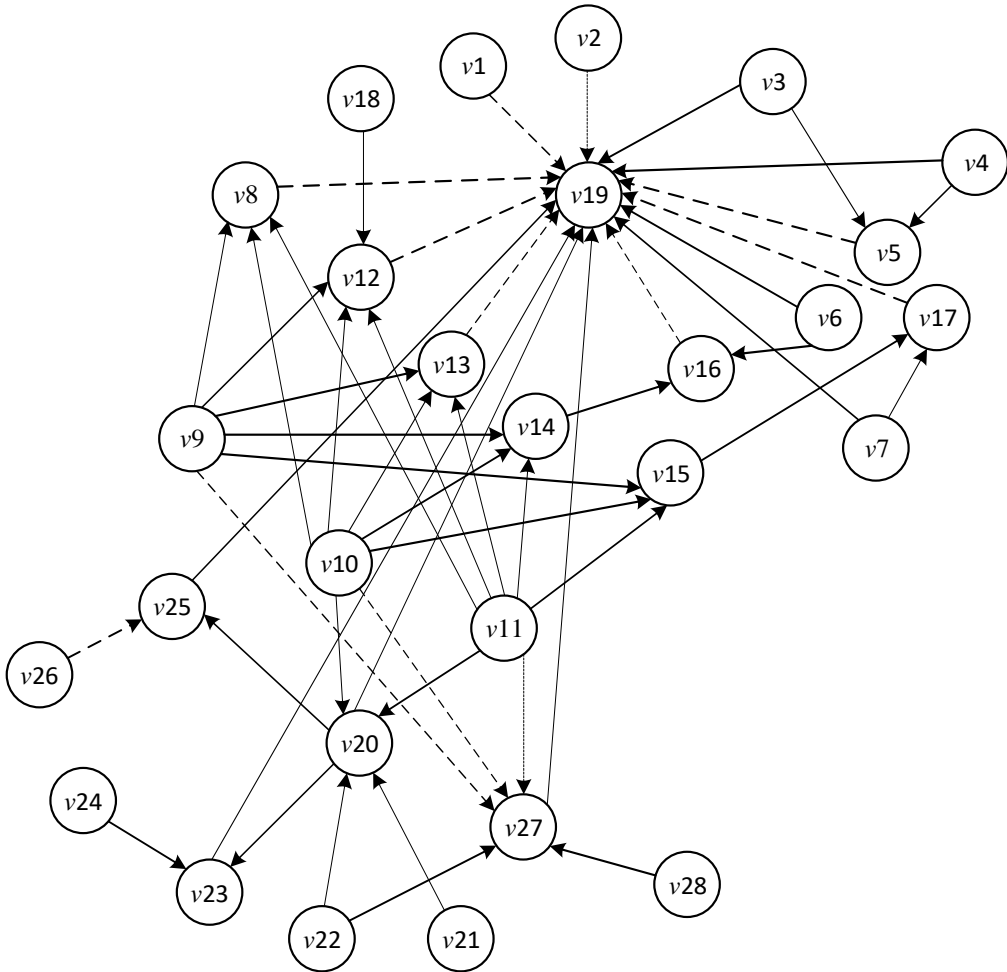


Рис. 7. Неоднородная когнитивная модель диагностирования АЭ серии ВА05К-450-315-2

2) диагностические факторы:  $x_{18}$  – климатические условия;  $x_{19}$  – исправность технического состояния АЭ;

3) основные диагностические параметры:  $x_{20}$  – мощность потребления из сети,  $P_1$ , кВт;  $x_{21}$  – коэффициент мощности,  $\cos \varphi$ ;  $x_{22}$  – ток статора,  $I_1$ , А;  $x_{23}$  – коэффициент полезного действия,  $\eta$ ;  $x_{24}$  – номинальная мощность,  $P_2$ , кВт;  $x_{25}$  – момент на валу,  $M_2$ , Нм;  $x_{26}$  – частота вращения,  $n$ ;  $x_{27}$  – скольжение,  $s$ ;  $x_{28}$  – сопротивление статорной обмотки,  $r_2$ , Ом [27].

Фрагмент описания основных диагностических параметров и факторов, влияющих на работу АЭ серии ВА05К-450-315-2, представлен в табл. 1.

Для построения функций принадлежности лингвистических переменных  $v_1, \dots, v_{28}$  применяется метод экспертных оценок [28].

Здесь, например, зная значения вершин  $v_9 (U_C)$ ,  $v_{10} (U_A)$  и  $v_{11} (U_B)$ , через функцию  $K_{\text{пер}U} = \frac{U_{(ABC)\text{max}}}{\sqrt{2}U_{\text{норм}}}$  можно вычислить значение в вершине  $v_8$  и через

функцию  $\delta U_0 = \frac{U_{(ABC)} - U_{\text{норм}}}{U_{\text{норм}}}$ ,  $U_{\text{норм}} = 220$  В вычислить значение в вершине  $v_{13}$ .

Таблица 1

**Описание ПКЭ и факторов, влияющих на работу АЭ серии ВАО5К-450-315-2**

Обозначение	Название лингвистической переменной (параметра, фактора)	Нормируемые значения, ед.изм. (по ГОСТу)	Метод /средство измерения	Термножество
$x_1$	Отклонение частоты	Предельно допустимые $\pm 0,4$ Гц /Нормально допустимые $\pm 0,2$ Гц	Измерительный Прибор ПКЭ-А	Предельно допустимые /Нормально допустимые
$x_8$	Климатические условия	Отсутствие или присутствие дождя, грозы, обледенения	Визуально	Отсутствует /присутствует
...	...	...	...	...
$x_{14}$	Отклонение напряжения фаз А, В, С	$\pm 5\%$ предпочтительный диапазон $\pm 10\%$ предельный диапазон	Прибор ПКЭ-А, измерительные трансформаторы, токоизмерительные клещи	Предельно допустимые /Нормально допустимые
...	...	...	...	...
$x_{19}$	Исправность технического состояния АЭ	[80-100]%	Комплект приборов согласно ТУ, инструкции по эксплуатации, методы к оценке ТС АЭ	Исправное /Исправное, но с небольшими отклонениями /Неисправное
...	...	...	...	...
$x_{27}$	Скольжение, $s$	1,0 %	Тахогенератор	Норма
$x_{28}$	Сопротивление статорной обмотки, $r_2$	—	Комплект приборов согласно ТУ, инструкции по эксплуатации	Норма

Фрагмент матрицы отношений НКМ (см. рис. 7) представлен в виде табл. 2.

Таблица 2

**Фрагмент матрицы отношений НКМ**

	$v_1$	$v_2$	...	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{18}$	$v_{19}$	...	$v_{20}$	$v_{28}$
$v_1$	0	0	...	0	0	...	0	-0,3	...	0	0
$v_2$	0	0	...	0	0	...	0	-0,7	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$v_{11}$	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0,7	0
$v_{12}$	0	0	...	0	0	...	0	-0,5	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$v_{18}$	0	0	...	0	0,7	...	0	0	...	0	0
$v_{19}$	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$v_{20}$	0	0	...	0	0	...	0	0,7	...	0	0
$v_{28}$	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0

Отметим, что для определения связей между параметрами и факторами, влияющими на работу АЭ, был проведен сбор и анализ знаний оперативного персонала в области диагностирования АЭ. Для установления причинно-следственных связей между параметрами и факторами (вершинами) определена шкала для оценки их характера (положительный или отрицательный) и силы связей (табл. 3) [24].

Таблица 3

**Оценка характера и силы связей между вершинами, представленными в виде вербальных описаний**

Вербальное описание	Численное значение
Отсутствует	0
Очень слабо усиливает	[0,1, 0,3]
Очень слабо ослабляет	[- 0,1, - 0,3]
Слабо усиливает	[0,31, 0,5]
Слабо ослабляет	[- 0,31, - 0,5]
Умеренно усиливает	[0,51, 0,7]
Умеренно ослабляет	[- 0,51, - 0,7]
Сильно усиливает	[0,71, 0,9]
Сильно ослабляет	[- 0,71, - 0,9]
Очень сильно усиливает	[0,91, 1]
Очень сильно ослабляет	[- 0,91, - 1]

Под *корректировкой НКМ* понимается добавление или удаление вершин; установление новых связей между вершинами; изменение значений вершин.

После построения НКМ проводится вычислительный эксперимент, который включает следующие системные задачи: анализ структуры НКМ (анализ циклов модели, поиск собственных чисел, анализ устойчивости процесса, анализ структурной устойчивости к возмущающим и управляющим воздействиям, топологический анализ структуры модели, расчет системных показателей НКМ (влияние факторов друг на друга)), а также импульсное моделирование и сценарный анализ для прогнозирования ТС АЭ [21, 26].

Результаты вычислительного эксперимента для АЭ серии ВАО5К-450-315-2 представлены в работе [26].

*Функция А5 – Анализ результатов диагностирования.* Данная функция позволяет проводить анализ полученных результатов диагностирования АЭ. Если результаты диагностирования АЭ у ЛПР вызывают сомнения, то он поручает персоналу задание, например, подкорректировать НКМ либо производственные правила.

*Функция А6 – Разработка рекомендаций и принятие диагностических решений.* Данная функция позволяет разрабатывать рекомендации и принимать диагностические решения с учетом выявленных неисправностей при работе АЭ.

### **Исследование системы иерархических производственных правил для диагностирования АЭ**

В процессе разработки БЗ формируется огромное количество производственных правил, при этом БЗ оказывается избыточной, что усложняет работу оперативного персонала по интерпретации результатов.

Например, в решаемой задаче БЗ содержала бы  $N = 3^{11} * 2^{17} * 1^5 = 242\,683$  правил, поскольку на вход подается 11 параметров, каждый из которых содержит одинаковое число термов, равное трем, и 17 параметров – число термов, равное двум. При таком огромном числе правил процедура проверки непротиворечивости правил и корректности работы системы становится *неосуществимой* вообще. Поэтому число производственных правил, с которыми работают реальные интеллектуальные системы, не превышает одной тысячи.

Для решения данной проблемы оперативному персоналу было предложено составить производственные правила на основе своего опыта и знаний, описывающие всевозможные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации АЭ серии ВАО5К-450-315-2. В результате было получено 237 иерархических производственных правил, на основе которых была построена НКМ (см. рис. 7), которая исследовалась с применением вычислительного эксперимента.

Таблица 4

#### **Результаты сопоставления значений, полученных с/без применением разработанного программного обеспечения**

№	Наименование фактора	Без применения ПС	С применением ПС
1	Время диагностирования АЭ (день)	14	9
2	Количество исполнителей, участвующих в диагностировании АЭ (чел.)	6	3

Для автоматизированного построения производственных правил и работы с ними была разработана программная система (ПС) с использованием языка программирования C#. В табл. 4 приведены результаты сопоставления значений, полученных с/без применением разработанной ПС при диагностировании АЭ машиностроительного производства.

### Заключение

В статье предлагается подход к диагностированию асинхронных электродвигателей на основе применения иерархических функциональных моделей, построенных с использованием методологии *IDEFO* для комплексного учета влияния ПКЭ. Разработанные иерархические функциональные модели представлены в наглядной и доступной форме, тем самым показывая, какие функции необходимо выполнить для диагностирования АЭ. Выполнение предложенных функций позволяет обнаруживать на ранней стадии возникающие неисправности, предотвращать аварийные ситуации, приводящие к серьезным негативным последствиям. При этом модели обеспечивают возможность обмена информацией о рассматриваемом процессе с учетом нормированных требований на языке, понятном не только оперативному персоналу, но и ЛПП.

Разработанная система ИПП, полученная в результате ранжирования правил, отражает обобщенные знания оперативного персонала о работе конкретного АЭ, что позволяет уменьшить объем БЗ, содержащей производственные правила, и принять научно обоснованные диагностические решения относительно исправности конкретного АЭ.

Разработанная ПС для автоматизированного построения производственных правил и работы с ними, которая применялась при диагностировании АЭ серии ВАО5К-450-315-2 на одном из предприятий нефтяной промышленности, позволила сократить время проведения диагностирования АЭ в 1,6 раза и уменьшить количество исполнителей, участвующих в диагностировании, в 2 раза.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крупенин Н.В., Голубев А.В., Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин // *Электричество*. – 2011. – № 9. – С. 45–47.
2. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // *Новости электротехники*. – 2011. – № 2 (68) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.news.elteh.ru/project/neuron.php> (дата обращения: 05.06.2020).
3. Баширов М.Г., Бахтизин Р.Н., Баширова Э.М., Миронова И.С. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств // *Нефтегазовое дело*. – 2011. – № 3. – С. 26–40.
4. Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б., Булгакова И.В. Методы и анализ диагностики асинхронных электродвигателей // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2014. – № 15 (91). – С. 306–310.
5. Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 3. – С. 198–203.
6. Катасев А.С., Емалетдинова Л.Ю. Нечетко-производственная каскадная модель диагностики состояния сложного объекта // *Программные системы и вычислительные методы*. – 2013. – № 1(2). – С. 69–81.
7. Балобанов Р.Н., Зацаринная Ю.Н. Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – № 2. – С. 257–258.
8. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // *Системы. Методы. Технологии*. – 2014. – № 2 (22). – С. 61–69.

9. Куприянов И.С., Бельский И.О., Лукьянов А.В. Математическое моделирование параметров асинхронных двигателей при электрических дефектах ротора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 154–163.
10. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 127–137.
11. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Дмитриевский А.А., Казакбаев В.М. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 34–39.
12. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.
13. Соколов Е.В., Костырин Е.В. Функциональная модель системы управления медицинскими диагностическими услугами // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2009. – № 3 [Электронный ресурс]. – URL: <https://engineering-science.ru/doc/121943.html> (дата обращения: 07.04.2020).
14. ГОСТ 22782.0-81 Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний (с Изменениями № 1, 2, 3) [Электронный ресурс]. URL: <https://nproris.ru/wp-content/uploads/2015/04/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2-22782.0-81.pdf> (дата обращения: 07.04.2020).
15. ГОСТ 22782.6-81 Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка». Технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13834/> (дата обращения: 07.04.2020).
16. ГОСТ 24719-81 Электрооборудование рудничное. Изоляция, пути утечки и электрические зазоры. Технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/45673/> (дата обращения: 07.04.2020).
17. ТУ 16-526.553-84 Двигатели асинхронные типов ВА02-280, ВА02-315 и ВА02-355 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.laborant.ru/eltech/01/2/0/09-98.htm> (дата обращения: 07.04.2020).
18. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
19. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Алгоритм и программная реализация поиска отклонений значений параметров от норм промышленного оборудования // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 11. – С. 91–95.
20. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
21. Ковалев С.М., Колоденкова А.Е. Построение базы знаний интеллектуальной системы контроля и предупреждения рисков ситуаций для этапа проектирования сложных технических систем // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7. – № 4 (26). – С. 398–409.
22. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
23. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Разработка системы иерархических производственных правил для диагностирования электротехнического оборудования // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10. – № 1(35). – С. 63–72.
24. Колоденкова А.Е. Моделирование процесса реализуемости проекта по созданию информационно-управляющих систем с применением нечетких когнитивных моделей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 6 (144). – С. 10–17.
25. Ginis L.A., Gorelova G.V., Kolodenkova A.E. Cognitive and simulation modeling of Socioeconomic systems // Proceedings of the International Research Conference Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSM 2017). – 2017. – Vol. 72. – P. 50–54.
26. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, 2020. – P. 1–5.
27. Каталог электротехнической продукции. Росэнергомаш [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ventilator.kiev.ua/rozenberg/catalog.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).
28. Каид В.А.А. Методы построения функций принадлежности нечетких множеств // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 144–153.

*Статья поступила в редакцию 10 апреля 2020 г.*



# DEVELOPMENT OF HIERARCHICAL FUNCTIONAL MODELS FOR DIAGNOSTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS USING IDEF0 METHODOLOGIES

*S.S. Vereshchagina*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper proposes an approach to diagnostics of asynchronous electric motors based on the application of hierarchical functional models that are built using the IDEF0 methodology for integrated consideration of the influence of electric power quality indicators. A brief analysis of the problems of diagnostics for asynchronous electric motors is given, which justifies the relevance of developing new methods and models of diagnostics. A distinctive feature of the proposed hierarchical functional diagnostic models of asynchronous electric motors is a formalized representation of the necessary process functions using the IDEF0 methodology. This allows one to identify the main data flows in the diagnosis process, extract knowledge about the process, and reveal the cause-and-effect relationships of failures of asynchronous electric motors, complementing traditional methods of technical diagnostics by analyzing compliance with regulatory requirements concerning the electrical energy quality. A brief description of the developed methods, models and algorithms, as well as the results of experimental research, efficiency analysis of the proposed methodology is provided.*

**Keywords:** *electrical equipment, IDEF0 functional models, measuring and expert information, hierarchical production rules, heterogeneous cognitive model.*

## REFERENCES

1. Krupenin N.V., Golubev A.V., Zaviday V.I. New opportunities in diagnostics of electric machines // *Electricity*, 2011. No. 9. Pp. 45–47 (In Russian).
2. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. Complex method of diagnostics of asynchronous electric motors based on the use of artificial neural networks // *Electrical engineering news*. 2011. № 2 (68). – URL: <http://www.news.elteh.ru/proect/neuron.php> (accessed June 05, 2020) (In Russian).
3. Bashirov M.G., Bakhtizin R.N., Bashirova E.M., Mironova I.S. Automation system for managing the technical condition of technological equipment for oil and gas production // *Oil and Gas business*, 2011. No. 3. Pp. 26–40 (In Russian).
4. Lutay S.N., Kolomiyyets V.V., Kobylansky B.B., Bylgakova I.V. Methods and analysis of diagnostics of asynchronous electric motors // *Electrical and computer systems*, 2014. No. 15 (91). Pp. 306–310 (In Russian).
5. Bobrov V.V. Evaluating the effectiveness of basic diagnostics methods for asynchronous motors // *Polzunovskij vestnik*, 2012. No. 3. Pp. 198–203 (In Russian).
6. Katasev A.S., Emaletdinova L.Y. Fuzzy-production cascade model for diagnosing the state of a complex object // *Software systems and computational methods*, 2013. Vol. 1. Pp. 69–81 (In Russian).
7. Balabanov R.N., Zatsarinnyi Yu.N. Peculiarities of diagnostics of high voltage equipment gas-insulated // *Bulletin of Kazan technological University*, 2015. No. 2. Pp. 257–258 (In Russian).
8. Lukyanov A.V., Mukhachev Yu. S., Belsky I.O. Investigation of the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors // *Systems. Methods. Technologies*, 2014. No. 2 (22). Pp. 61–69 (In Russian).
9. Kupriyanov I.S., Belskii I.O., Lukyanov A.V. Mathematical modeling of parameters of asynchronous motors with electric defects of the rotor // *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2019. Vol. 63. No. 3. Pp. 154–163 (In Russian).
10. Sidelnikov L.G., Afanasiev D.A. Overview of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors in operation // *Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2013. No. 7. Pp. 127–137 (In Russian).
11. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostics of induction motors based on spectral analysis of stator currents // *Energy security and energy saving*, 2014. No. 3. Pp. 34–39 (In Russian).

---

*Svetlana S. Vereshchagina, Senior Lecture.*

12. Vendrov A.M. CASE-technology. Modern methods and tools for designing information systems. – Moscow: Finansy i statistika, 1998. 176 pp. (In Russian).
13. Sokolov E.V., Kostyrin E.V. Functional model of the medical diagnostic services management system // Mechanical engineering and computer technologies, 2009. No. 3. URL: <https://engineering-science.ru/doc/121943.html> (accessed June 05, 2020) (In Russian).
14. GOST 22782.0-81 explosion-proof electrical Equipment. General technical requirements and test methods (with Changes N 1, 2, 3). URL: <https://npopris.ru/wp-content/uploads/2015/04/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2-22782.0-81.pdf> (accessed April 07, 2020).
15. GOST 22782.6-81 explosion-proof electrical Equipment with the type of explosion protection "Explosion-proof shell". Technical requirements and test methods. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13834/> (accessed April 07, 2020).
16. GOST 24719-81 Electrical equipment for mining. Insulation, leakage paths and electrical gaps. Technical requirements and test methods. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/45673/> (accessed April 07, 2020).
17. TU 16-526. 553-84 asynchronous Motors of types VA02-280, VA02-315 and VA02-355. URL: <http://www.laborant.ru/eltech/01/2/0/09-98.htm> (accessed April 07, 2020).
18. GOST 32144-2013 Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of quality of electric energy in General-purpose power supply systems. – Moscow: Standardinform, 2014 (In Russian).
19. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Algorithm and software implementation for searching the parameter values deviations from industrial equipment norms // Software & Systems, 2020. Vol. 33. No. 11. Pp. 91–95 (In Russian).
20. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. Knowledge base of intelligent systems. Saint Petersburg: Piter, 2000. 384 pp. (In Russian).
21. Kovalev S.M., Kolodenkova A.E. Creation of the knowledge base of the intelligent control system and preventions of risk situations at design complex technical systems // Ontology of designing, 2017. No. 4. Pp. 398–409 (In Russian).
22. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Fuzzy models and networks. – Moscow: Telecom, 2007. 284 pp. (In Russian).
23. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Development of a system of hierarchical production rules for diagnosing electrical equipment // Ontology of designing, 2020. Vol. 10. No. 1. – Pp. 63–72 (In Russian).
24. Kolodenkova A.E. The process modeling of project feasibility for information management systems using the fuzzy cognitive models // Herald of computer and information technologies, 2016. No. 6. Pp. 10–17 (In Russian).
25. Ginis L.A., Gorelova G.V., Kolodenkova A.E. Cognitive and simulation modeling of Socioeconomic systems // Proceedings of the International Research Conference Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2017), 2017. Vol. 72. Pp. 50–54.
26. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, 2020. Pp. 1–5.
27. Catalog of electrical products. Rosenergomash. – URL: <http://www.ventilator.kiev.ua/rozenberg/catalog.pdf> (accessed: 05.06.2020) (In Russian).
28. Qaid W.A.A. Methods construction membership function of fuzzy sets // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2013. No. 2 (139). Pp. 144–153 (In Russian).