

М. А. ПОЛЯКОВ, И. А. АНДРИЯС, С. П. КОНОГРАЙ, В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ

КОГНИТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК МАСЛОНАПОЛНЕННОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрена многоуровневая структура системы управления жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора, которая состоит из базы знаний и подсистем познания, когнитивности и деятельности. Впервые предложены теоретико-множественные модели баз знаний в формах от данных до мудрости, модели уровней деятельности от целевого до уровня управления операцией. Построение системы управления жизненным циклом изоляции обмоток силовых трансформаторов с использованием когнитивных возможностей уменьшает требования к квалификации оператора системы и исключает повышение расхода ресурса изоляции, связанного с ошибками оператора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, изоляция обмоток, система непрерывного контроля, жизненный цикл, когнитивное управление.

Розглянуто багаторівнева структура системи управління життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора, яка складається з бази знань і підсистем пізнання, когнітивності і діяльності. Вперше запропоновано теоретико-множинні моделі баз знань в формах від даних до мудрості, моделі рівнів діяльності від цільового до рівня управління операцією. Побудова системи управління життєвим циклом ізоляції обмоток силових трансформаторів з використанням когнітивних можливостей зменшує вимоги до кваліфікації оператора системи і виключає підвищення витрати ресурсу ізоляції, пов'язаної з помилками оператора.

Ключові слова: силовий трансформатор, ізоляція обмоток, система неперервного контролю, життєвий цикл, когнітивне управління.

Purpose. The purpose of the article is to reduce the complexity of designing life-cycle control systems for power transformers windings insulation based on the use of typical functional structures and elements of cognitive control systems. **Methodology.** We have applied concepts cognitive control systems, graph theory, and mathematical modeling. **Results.** We have obtained a multi-level structure of the life-cycle control system of an oil-immersed power transformers winding insulation, which consists of a knowledge base and subsystems of knowledge, cognition and activity. The data base is built on the principle of the DIKUW knowledge form pyramid and contains the knowledge accumulated and processed during the monitoring of the transformer parameters. The knowledge subsystem consists of converters of some forms of knowledge into others, beginning with signals and ending with wisdom. The subsystem of activity includes a hierarchical structure of finite state machines providing target management, adaptive scenarios for achieving the goal, flexible behavior management in operations affecting the resource consumption of isolation. **Originality.** For the first time, we have established a set-theoretic models of knowledge bases in the forms from data to wisdom, models of activity levels from the target to the level of operation management. **Practical value.** The construction of a control system for the winding insulation cycle of power transformers using cognitive capabilities reduces the requirements for the qualification of the operator of the system and the increased consumption of the isolation resource associated with operator errors.

Key words: power transformer, insulation of windings, online monitoring system, life cycle, cognitive management.

Введение. Силовой трансформатор (СТ) это есть сложная и дорогостоящая электромеханическая система, часть элементов которой заменяются после отработки своего ресурса в процессе эксплуатации. В то же время, такой элемент СТ как изоляция обмоток (ИО) имеет не возобновляемый ресурс, так как стоимость его замены является экономически нецелесообразной [1].

Ресурс ИО СТ – это характеристика применения СТ, поэтому расход ресурса зависит от многих факторов, которые изменяются в процессе эксплуатации. Например, температура и влажность бумажной изоляции и трансформаторного масла и другие [2, 3, 4].

Управление текущими значениями некоторых параметров, с целью уменьшения расхода ресурса ИО СТ, возможно с задействованием системы управления охлаждением. Управляющее воздействие на трансформатор определяется на основе информации, полученной от первичных датчиков и/или системы непрерывного контроля (СНК), которую часто называют системой мониторинга [5, 6, 7]. СНК выполняют измерения текущих значений параметров первичной сети, нагрузки, окружающей среды и самого СТ. Результаты измерений сохраняются на машинном носителе и используются для расчета вторичных параметров и визуализации этой информации в форме удобной для восприятия оператором. Информация от СНК используется также для прогнозирования технического состояния СТ [8, 9] и управления жизненным цик-

лом СТ [10, 11].

Таким образом, эффективность управления жизненным циклом (ЖЦ) ИО СТ зависит от содержания и объема знаний о его техническом состоянии и методах его прогнозирования.

Анализ исследований. Роль знаний в ускорении научно – технического прогресса мировой экономики такова, что возник термин «когнитивная революция». Прогнозируется, что в ближайшие десятилетия человека будут окружать искусственные интеллектуальные системы, функционирующие на основе знаний. Применительно к системам управления предложен термин «когнитивные системы управления» (КСУ) [12].

Функциональные структуры таких КСУ содержат ряд уровней, на которых происходит изменение формы знаний, приобретенных системой, и детализация ее деятельности [13]. Формы знаний, используемых в КСУ, описываются пирамидами форм знаний DIKW [14] или DIKUW (Data (Данные) – Information (Информация) – Knowledge (Знания) – Understanding (Понимание) – Wisdom (Мудрость)). А формы деятельности – пирамидой TSBOD (Target (Цель) – Scenario (Сценарий) – Behavior (Поведение) – Operation (Операция) – Data (Данные)).

С точки зрения форм знаний известные СНК СТ являются автоматизированными информационно – управляющими системами. В них в основном используются знания оператора уровней «данные», «инфор-

© М.А. Поляков, И.А. Андрияс, С.П. Конограй, В.В. Василевский, 2018

мация», а деятельность относится к уровням «поведение», «операция», «данные». Знания более высоких уровней («знание», «понимание» и «мудрость») и действия для анализа полученной СНК информации, выбора целей функционирования СТ и СНК, сценариев достижения выбранных целей, рационального поведения системы управления в рамках выбранного сценария и другие обрабатываются в контуре «СНК - оператор». То есть когнитивные функции в системе выполняет человек, что связано с высокими требованиями к квалификации оператора и вероятностью принятия не оптимальных решений.

В доступной авторам литературе не описаны структуры когнитивных систем управления применительно к системам управления ЖЦ ИО СТ, что затрудняет их проектирование и выбор.

Целью работы является уменьшение трудоемкости проектирования систем управления ЖЦ ИО СТ на основе использования типовых функциональных структур и элементов КСУ.

Задачей работы является разработка теоретико-множественных моделей элементов и структур таких систем управления.

Функциональная структура когнитивной системы управления ЖЦ ИО СТ. Как отмечено в [1] ресурс ИО закладывается на этапе проектирования СТ, материализуется в процессе изготовления (здесь возможно некоторое уменьшение ресурса относительно запланированного в процессе проектирования из-за несовершенства технологических процессов изготовления) и расходуется в процессе эксплуатации.

У КСУ есть два механизма воздействия на скорость расхода ресурса:

1. Изменять температуру изоляции, управляя охлаждением трансформатора.

2. Выполнять техническое обслуживание изоляции в составе СТ (сушка, замена масла и др.).

Когнитивность системы управления заключается в обосновании этих воздействий на основе имеющихся в системе управления знаний об объекте управления, окружающей среде и целей функционирования КСУ. Эти цели могут вступать в конфликт друг с другом и изменяться в ходе эксплуатации СТ. Примерами таких целей могут служить:

Цель 1. Максимально увеличить срок службы ИО.

Цель 2. Увеличить срок службы ИО за счет улучшения охлаждения СТ и технического обслуживания ИО и трансформаторного масла.

Цель 3. Максимизировать доход от эксплуатации СТ.

Цель 4. Обеспечить работоспособность СТ при любых значениях тока нагрузки игнорируя повышенный расход ресурса ИО.

Цель 5. Предотвратить аварию СТ из-за пробоя ИО.

Кроме того следует учитывать, что выбранная (текущая) цель может быть достигнута различными способами, которые описываются соответствующими сценариями. Например, для предотвращения аварии можно направить деятельность системы на уменьшение температуры наиболее нагретой точки изоляции, а можно уменьшить влажность бумаги, из которой изготовлена ИО.

Таким образом, в функции КСУ входит получение знаний, их когнитивная обработка и формирование воздействий на объект управления. Схема функциональной структуры КСУ ЖЦ ИО СТ приведена на рис. 1.

Теоретико-множественная модель функциональной структуры это кортеж

$$\langle Si, MDB, K, C, A \rangle, \quad (1)$$

где Si – модель сигналов;

MDB – модель базы данных;

K – модель подсистемы познания;

C – модель подсистемы когнитивности;

A – модель подсистемы деятельности.

В модели Si содержится информация о типе (дискретный, аналоговый), направлении передачи (входной, выходной) и параметрах (ток, напряжение и др.) сигналов.

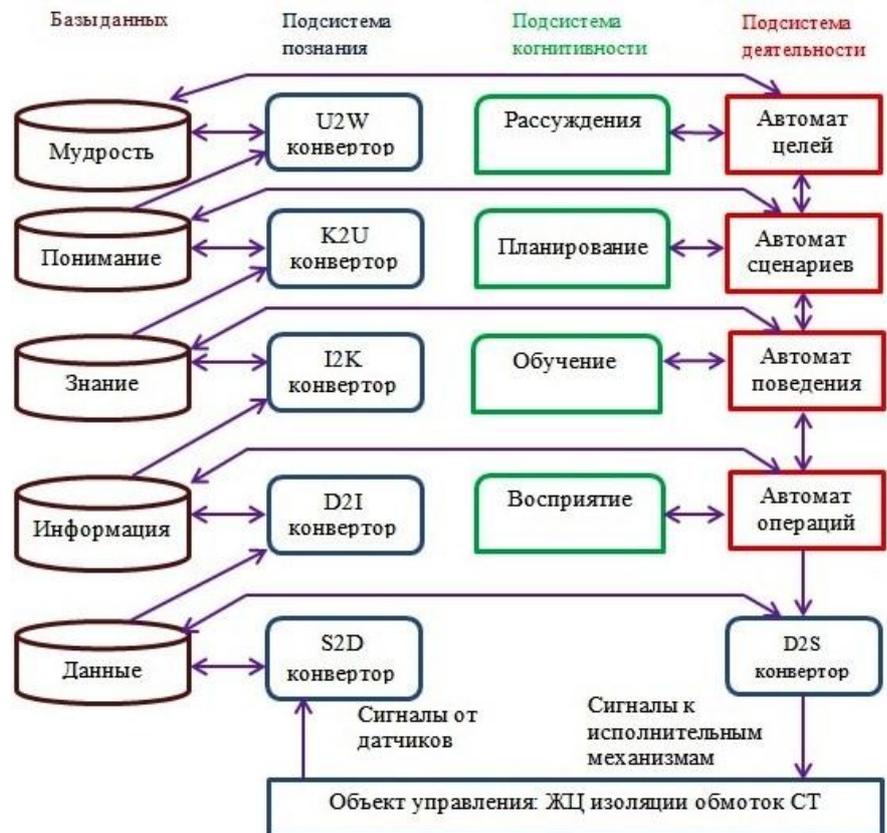


Рис. 1 – Структурная схема функциональной структуры КСУ ЖЦ ИО СТ

Модель MDB задает структуру баз данных на различных уровнях форм знаний:

$$MDB = \{D, I, K, U, W\}, \quad (2)$$

где D – структура базы знаний в форме данных;
I, K, U, W – структура базы информации, знаний, пониманий и мудрости, соответственно.

Запись в базе D имеет поля числовых значений кода одного или нескольких сигналов и кода системного времени в момент записи сигнала.

Запись в базе I имеет поля наименования параметра объекта управления, окружающей среды или вторичного параметра (например, среднее значение в массиве величин), значение, погрешность измерения, единицы измерения, значения атрибутов астрономического времени в момент записи сигнала – источника информации.

Структура записей в базе K зависит от типа знаний. Это могут быть наименования знаний и результаты:

сравнения (например, наименование - «входной ток превысил допустимое значение», результат – «истина»);

аппроксимации (например, наименование «суточные колебания температуры окружающей среды описываются синусоидой с параметрами...»);

определения тенденций (например, наименование «среднесуточный расход ресурса изоляции устойчиво возрастает в течение недели»);

выявления корреляций (например, наименование «с ростом температуры масла уменьшается влажность бумажной изоляции»);

определения значений лингвистических переменных, которые задаются наименованием, областью определения, терм множеством, нечетким множеством для каждого терма, значением и другими параметрами (например, наименование терма «Аварийная нагрузка» лингвистической переменной «Ток нагрузки»; значение степени принадлежности равно 0.4)

Структура записей в базах U и W аналогична структуре в базе K. Каждая запись в базах U и W также содержит поля наименования знаний и оценки его истинности. Отличия этих баз заключаются в семантике знаний.

Знания в базе U отображают отношения, в том числе нечеткие продукции между различными знаниями из базы K, а также отношения между знаниями из базы K и значениями входов автоматов сценариев подсистемы деятельности. В последнем случае истинность знаний вычисляется с помощью конвертора K2U, без привлечения блоков подсистемы когнитивности. Пример наименования знания: из базы U: «ЕСЛИ «тенденция роста температуры изоляции сохраняется» ТО «в ближайшие сутки возможен пробой изоляции»».

Знания в базе W отображают отношения между различными знаниями из баз U, K и между этими знаниями и значениями входов автомата целей подсистемы деятельности. Эти знания вычисляются с помощью конвертора U2W. Пример наименования знания: из базы W: «ЕСЛИ «сохранится такая большая скорость расхода ресурса изоляции» ТО «цель сохране-

ния работоспособности СТ в пределах назначенного интервала времени становится недостижимой».

Кроме того базы K, U и W могут содержать процедурные знания, которые задаются наименованием и полями элементов представляющего это знание конечного автомата входами, выходами, состояниями, таблицами переходов и выходов.

Подсистема познания, представленная на рис.1 конверторами описывается моделью:

$$K = \{S2D, D2I, I_12I_2, I_2K, K_12K_2, K_2U, U_12U_2, U_2W, D_2S\},$$

где в скобках перечислены обозначения конверторов знаний, которые рассмотрены ниже.

Знания поступают в подсистему познания в форме сигналов от первичных датчиков параметров окружающей среды, первичной сети и нагрузки СТ и самого СТ, а также в форме сообщений по сети с информацией от интеллектуальных информационно – измерительных приборов.

Конвертор сигналов в данные (в английской нотации “Signal to Data”, S2D) преобразует эти сигналы в электрическую форму, выполняет аналоговую фильтрацию, выполняет аналогово-цифровое преобразование и сохраняет код каждого сигнала вместе с кодом системного времени момента фиксации сигнала в базе данных. При необходимости, выполняется цифровая фильтрация сигналов. Неэлектрическая, например, оптическая, форма сигналов используется для передачи сигналов от сенсоров в условиях сильных электромагнитных полей в СТ.

Конвертор данных в информацию (D2I) проводит расшифровку данных с учетом схемы подключения конвертора сигналов к датчикам, моделей датчиков и режимов аналогово-цифрового преобразования. Код системного времени преобразуется к астрономическому времени и синхронизируется со временем узла системы обладающего вычислительным ресурсом (промышленного компьютера или программируемого контроллера). При этом определяется (оценивается) погрешность полученной информации. К информации, полученной из БД, добавляется полученная по сети информация от интеллектуальных информационно - измерительных приборов. Примерами таких приборов могут служить анализаторы параметров электрической сети, анализаторы параметров влажности и хроматического анализа газов в трансформаторном масле. К информации, полученной системой управления добавляются результаты моделирования. Это позволяет при конвертации информации в знания учитывать значения ненаблюдаемых параметров.

Конвертор I₁2I₂ (не показан на рис.1) преобразовывает первичную информацию во вторичную. В результате преобразования определяется среднее, максимальное, минимальное, наиболее вероятное значение, координаты центров кластеров векторов анализируемых величин, тенденции их изменения, относительные скорости старения изоляции и другие результаты обработки.

Конвертор информации в знания (I2K) выполняет процедуры сравнения, аппроксимации, нахождения корреляций, определения тенденций и другие опера-

ции обработки информации, которая хранится в базе информации. Результатом этой обработки являются знания в форме суждений. Например, «величина X входит/не входит в диапазон Y (соответствует/не соответствует норме)», «тег X перешел в состоянии тревоги третьей степени в момент времени t ».

Конвертор K_1K_2 получает вторичные знания из первичных с использованием процедур логического программирования. Например [15], с помощью системы логического вывода на основе языка Пролог можно выявить противоречивость следующего набора знаний о тенденциях изменения комплекса взаимосвязанных параметров: нагрузка СТ - растет, температура окружающей среды - увеличивается, температура масла - уменьшается, время охлаждения - уменьшается.

Конвертор знаний в понимания (K2U) выполняет поиск взаимосвязей в приобретенных знаниях. С этой целью проводится обработка множества накопленных знаний с помощью процедур логического вывода. В результате этих процедур находятся нечеткие продукции, отражающие взаимосвязи между знаниями и воздействиями подсистемы деятельности на объект управления.

Конвертор U_1U_2 анализирует систему продукций первичных пониманий в базе U . При этом также используются процедуры логического программирования.

Конвертор $U2W$ определяет степень истинности входов конечного автомата целей подсистемы деятельности. При этом используются инструменты логического программирования для обработки знаний в базе понимания.

Конвертор $D2S$ преобразует данные воздействий на объект управления в параметры (токи, напряжения и т.п.) сигналов управления.

Теоретико-множественные модели конверторов подсистемы познания приведены в [13].

Подсистема когнитивности выполняет в системе управления те же задачи, что и подсистема познания – обеспечение знаниями подсистемы деятельности. Но, если проводить аналогию действий системы управления с процессами мышления в мозге, то подсистема познания отражает «бессознательное», жестко запрограммированное получение знаний, а подсистема когнитивности моделирует сознательные, когнитивные возможности мозга.

Теоретико-множественная модель подсистемы когнитивности содержит модели когнитивных способностей:

$$C = \{Re, Pl, Tr, Pe\}, \quad (3)$$

где Re – рассуждения (reasoning);
 Pl – планирование (planning);
 Tr – обучение (training);
 Pe – восприятие (perception).

Предметом рассуждений в КСУ ЖЦ ИО СТ служат цели ее функционирования. Анализ достижимости этих целей связан с поиском «за» и «против» сценариев их реализации. Результатом рассуждения является выбор текущей цели. Таким образом, модель рассуждения может быть представлена в виде:

$$Re = \{ Sub, Rea, Res \}, \quad (4)$$

где Sub – тема (subject);
 Rea – доводы (reasons);
 Res – результат (result).

Причем методы нахождения доводов определяют содержательность блока рассуждений. Например, пусть темой рассуждения выбрано уменьшение скорости старения изоляции путем удаления влаги из бумаги методом сушки. Доводы «за»: меньший расход ресурса изоляции после операции сушки. Доводы «против»: во время сушки расходуется ресурс изоляции; выполнение операции потребует затрат и связано с выводом СТ из эксплуатации. Результат рассуждений это есть решение системы управления, подтверждающее текущую цель, например «не отключать трансформатор» или решение о переходе к цели «уменьшить скорость старения путем сушки». Это решение оформляется как текущее значение входа автомата целей подсистемы деятельности.

В данном примере рассуждений доводы формируются относительно некоторых событий в будущем, что возможно в том случае, если исполняется другой блок когнитивной подсистемы – блок планирования. Модель планирования может быть представлена в виде:

$$Pl = \{ KM, OM, PM \}, \quad (5)$$

где KM – модель входных знаний (knowledge model);
 OM – модель объекта или процесса планирования (object model);
 PM – модель результата планирования (planning model).

Например модель планирования расхода ресурса на следующие сутки может иметь параметры: KM – знания о прогнозах суточных циклах нагрузки СТ и температуры окружающей среды; OM – термодинамическая модель СТ, влагодинамическая модель бумажно-масляной изоляции, динамическая модель кислотности масла; PM – параметры «интеграла старения» изоляции СТ.

Из приведенного примера видно, что в ходе планирования требуются знания о прогнозируемых процессах в объекте управления. Эти знания могут быть получены в результате работы блока обучения подсистемы когнитивности. Модель блока обучения может быть представлена в виде:

$$Tr = \{ MK, TT, TM \}, \quad (6)$$

где MK – результаты мониторинга процесса управления (monitoring knowledge) – знания о динамике его входных и выходных параметров;

TT – средства обучения (training tools);

TM – модель процесса (training model).

Например, пусть MK это массив среднечасовых токов нагрузки СТ, TT – средство *anfisedit* из пакета Матлаб. ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System) – адаптивная сеть, функционально эквивалентная системе нечеткого вывода. Тогда TM – нечеткая модель прогнозируемого значения тока.

При определении блока восприятия подсистемы когнитивности будем придерживаться трактовки восприятия как процесса категоризации воспринимаемо-

го, то есть отнесения воспринимаемых предметов к тому или иному классу (категории) объектов. Модель блока восприятия может быть представлена в виде:

$$Pe = \{PSO, PT, CL\}, \quad (7)$$

где PSO – параметры множества объектов (parameters of a set of objects);

PT – инструменты восприятия (perception tools);

CL – кластер (cluster) воспринимаемого объекта.

Например, PSO – параметры суточных графиков токов нагрузки за некоторый период;

PT – процедуры кластеризации fcm, findcluster из пакета Матлаб; CL – степень принадлежности данного объекта кластерам «рабочий день», «выходной» и др.

Подсистема деятельности является потребителем знаний, добытых подсистемами познания и когнитивности. Она содержит иерархию управлений в виде управляющих автоматов целей, сценариев, поведения и операций (см. рис. 1). Модели управляющих автоматов описываются кортежами входов, выходов, состояний, функций переходов и выходов. Действия выходов вышестоящего автомата могут активизировать нижестоящий автомат, изменить его параметры и функции. Выходы нижестоящего автомата могут быть входами вышестоящего. Например, модель дискретного автомата целей имеет вид:

$$FSM^t = \langle X^t, Y^t, S^t, \mu^t, \delta^t \rangle, \quad (8)$$

где X^t – множество дискретных (принимающих одно из двух возможных значений) входов;

Y^t – множество выходов;

S^t – множество состояний;

μ^t – функция выходов;

δ^t – функция переходов.

Пример автомата целей 1 - 5 сформулированных выше приведен на рис. 2 в виде графа автомата.

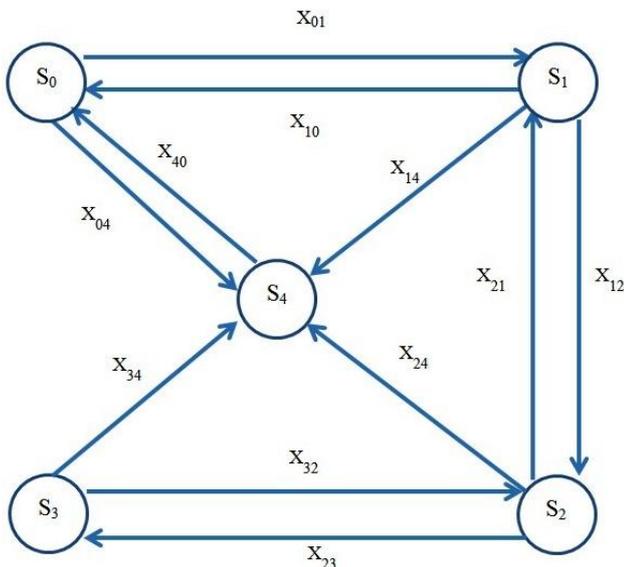


Рис. 2 – Пример графа автомата целей

Состояния S0-S4 на рис. 2 соответствуют целям 1-5 описанным выше. Условия переходов имеют следующие значения: X_{01} – недостаточно ресурсов для выполнения цели 1; X_{12} – доход от эксплуатации СТ перекрывает потери от сокращения срока службы ИО;

X_{23} – непрерывность энергоснабжения важнее увеличения доходов; X_{04} , X_{14} , X_{24} , X_{34} , – предотвращение аварии важнее, чем достижение целей 1 – 4, соответственно; X_{40} – авария маловероятна; $X_{10} = !X_{01}$, $X_{21} = !X_{12}$, $X_{32} = !X_{23}$, где «!» – знак инверсии условия. Каждому состоянию соответствует один выход, который активизирует соответствующий автомат сценария достижения цели. Эти выходы не показаны на рис. 2.

Модели других автоматов подсистемы деятельности по структуре аналогичны рассмотренному выше автомату целей. Выводы.

1. Управление жизненным циклом ИО СТ связано с получением и интеллектуальной обработкой значительного количества знаний выраженных в различных формах. Поэтому такое управление реализуется с помощью когнитивных систем.

2. Когнитивная система управления жизненным циклом ИО СТ состоит из базы знаний и подсистем познания, когнитивности и деятельности.

3. База знаний построена по принципу пирамиды форм знаний DIKUW и содержит знания, накопленные и обработанные в процессе мониторинга параметров СТ.

4. Подсистема познания состоит из конверторов одних форм знаний в другие, начиная от сигналов и заканчивая мудростью. Эта подсистема «бессознательно» накапливает знания, которые используются для управления.

5. Алгоритмы блоков подсистемы когнитивности моделируют такие способности человеческого мозга как рассуждения, планирование, обучение и восприятие

6. Подсистема деятельности включает иерархическую структуру конечных автоматов обеспечивающих целевое управление, адаптивные сценарии достижения цели, гибкое управление поведением в операциях воздействия на расход ресурса изоляции.

7. Построение системы управления ЖЦ ИО СТ с использованием когнитивных возможностей уменьшает требования к квалификации оператора системы и повышенный расход ресурса изоляции, связанный с ошибками оператора

8. Предложенные теоретико-множественные модели элементов системы управления ЖЦ ИО СТ упрощают проектирование таких систем. Потенциально могут быть использованы при совершенствовании систем непрерывного контроля ООО «Энергоавтоматизация».

Список литературы

1. Поляков М. А., Василевский В. В. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation // Технічна електродинаміка – 2014. – № 5. – С. 65-67.
2. Василевский В. В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / Василевский В. В. // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 18-21.
3. Поляков М. А., Климов С. И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинга параметров силового трансформатора // Електроенергетичні та електромеханічні системи Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 637. – С. 70-73.

4. Martin D. Improving the determination of water content of power transformer insulation paper near the end of its functional life // 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, – 2016. – pp. 1-6. doi: **10.1109/AUPEC.2016.7749280**.
5. Рассальский А. Н. Системы мониторинга силовых трансформаторов // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2003. – № 3. – С. 40-43.
6. Василевский В. В. Автоматизация оценки ресурса бумажной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов на разных стадиях жизненного цикла // В. В. Василевский, М. А. Поляков // *Електротехнічні та енергозберігаючі системи*. – 2015. – № 3. – С. 110-116.
7. Андриенко П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Коноград, Л. С. Скрупская // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2014. – № 2. – С. 32-40.
8. Андриенко П. Д. Определение нагрузочной способности силовых трансформаторов с использованием систем непрерывного контроля и стохастической оптимизации / П. Д. Андриенко, С. П. Коноград // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2015. – № 19. – С. 119-124.
9. Поляков М. А. От мониторинга параметров – к мониторингу состояний силового трансформатора // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – №1. – С.49-52.
10. Eva Müllerová Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies / Eva Müllerová, Jan Hruža, Jiří Velek, Ivo Ullman, František Stříška // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – Vol. 22, No. 4. – August 2015. – pp. 2379 - 2389.
11. Ballal M. S. Online condition monitoring system for substation and service transformers / M. S. Ballal, G. C. Jaiswal, D. R. Tutkane, P. A. Venikar, M. K. Mishra and H. M. Suryawanshi // *IET Electric Power Applications*. – 2017. – vol. 11, no. 7. – pp. 1187-1195. doi: **10.1049/iet-epa.2016.0842**.
12. Поляков М. А. Теоретико-множественные модели функциональных структур систем когнитивного управления // *Системные технологии*. – 2017. – № 3(110). – С. 16-23.
13. Поляков М. А. Когнитивные системы управления: структуры и модели // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2017. – № 25(101). – С. 387-393.
14. Rowley J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy // *Journal of Information and Communication Science*. – 2007. – 33 (2). – pp. 163-180. doi: **10.1177 / 0165551506070706**.
15. Poliakov M., Morshchavka S., Lozovenko O. Training in Research on Cognitive Control Systems // In proceeding of 20th International Conference on Interactive Collaborative Learnig (ICL2017, 27-29 September 2017, Budapest, Hungary). – 2017. – pp. 432-441.
16. Poliakov M. A., Vasilevskij V. V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamic*, 2014, № 5, pp. 65-67.
17. Vasilevskij V. V. Otsenka raskhoda resursa bumazhnoi izoliatsii silovogo maslonapolnennogo transformatora s pomoshch'iu utochennoi formuly integrala stareniiia [Evaluation of the resource consumption of oil-immersed power transformers paper insulation basing on updated aging integral] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 18-21.
18. Poliakov M. A., Klimov S. I. Metody i informatsionnye tekhnologii obrabotki dannykh monitornykh parametrov silovogo transformatora [Methods and information technologies for data processing of power transformers monitor parameters] *Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi. Visnik natsional'nogo universitetu «Lviv's'ka politekhnika» – Electric power and electromechanical systems. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, 2009, no. 637, pp. 70-73.
19. Martin D. Improving the determination of water content of power transformer insulation paper near the end of its functional life *Proceedings of the 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, 2016*, pp. 1-6. doi: **10.1109/AUPEC.2016.7749280**.
20. Rassal'skii A. N. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov [Power transformers monitoring systems] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no. 3, pp. 40-41.
21. Vasilevskii V. V. Avtomatizatsiia otsenki resursa bumazhnoi izoliatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov na raznykh stadiiakh zhiznennogo tsikla [Automation of resource assessment of oil-immersed power transformers paper insulation at different phases of lifecycle] *Elektromekhanichni ta energozberigaiuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*, 2015, no. 3, pp. 110-116.
22. Andrienko P. D., Sakhno A. A., Konogray S. P., Skrupskaia L. S. Osobennosti nepreryvnogo kontroliia kharakteristik vlagosoderzhaniia izoliatsii maslonapolnennogo elektrooborudovaniia [Online monitoring of the insulation water content characteristics of the oil immersed electrical equipment] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no. 2, pp. 32-40.
23. Andrienko P. D., Konogray S. P. Opredelenie nagruzochnoi sposobnosti silovykh transformatorov s ispol'zovaniem sistem nepreryvnogo kontroliia i stokhasticheskoi optimizatsii [Determination of the load capacity of power transformers using continuous control systems and stochastic optimization] *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy – Electrotechnical and computer systems*, 2015, no. 19, pp. 119-124.
24. Poliakov M. A. Ot monitoringa parametrov – k monitoringu sostoianii silovogo transformatora [From monitoring parameters to monitoring the states of a power transformer] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no. 1, pp. 49-52.
25. Eva Müllerová, Jan Hruža, Jiří Velek, Ivo Ullman, František Stříška Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 4, August 2015, pp. 2379 - 2389.
26. Ballal M. S., Jaiswal G. C., Tutkane D. R., Venikar P. A., Mishra M. K. and Suryawanshi H. M. Online condition monitoring system for substation and service transformers *IET Electric Power Applications*, 2017, vol. 11, no. 7, pp. 1187-1195. doi: **10.1049/iet-epa.2016.0842**.
27. Polyakov M. A. Teoretiko-mnozhestvennye modeli funktsional'nykh struktur sistem kognitivnogo upravleniia [Set-theoretic models of functional structures of cognitive control systems] *Sistemnye tekhnologii – System technologies*, 2017, no. 3(110), pp. 16-23.
28. Poliakov M. A. Kognitivnye sistemy upravleniia: struktury i modeli [Cognitive management systems: structures and models] *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy – Electrotechnical and computer systems*, 2017, no. 25(101), pp. 387-393.
29. Rowley J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy *Journal of Information and Communication Science*, 2007, 33 (2), pp. 163-180. doi: **10.1177 / 0165551506070706**.
30. Poliakov M., Morshchavka S., Lozovenko O. Training in Research on Cognitive Control Systems In proceeding of 20th International Conference on Interactive Collaborative Learnig (ICL2017, 27-29 September 2017, Budapest, Hungary), 2017, pp. 432-441.

Поступила (received) 13.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Когнітивне управління життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора / М. О. Поляков, І. А. Андріяс, С. П. Коноград, В. В. Василевський // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 90-96. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора / М. А. Поляков, И. А. Андрияс, С. П. Конограй, В. В. Василевский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 90-96. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Cognitive management of oil-immersed power transformers winding insulations life cycle / M. O. Poliakov, I. A. Andriias, S. P. Konogray, V. V. Vasilevskij // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electro-mechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 90-96. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Поляков Михайло Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, професор кафедри електричних та електронних апаратів, тел. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.

Поляков Михаил Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов, тел. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.

Poliakov Mykhailo Oleksiiiovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Professor at the Department of Electrical and electronic apparatuses, tel. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.

Андрияс Ирина Аркадьевна – кандидат технических наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок, e-mail: tryf-03@rambler.ru.

Андрияс Ирина Аркадьевна – кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, e-mail: tryf-03@rambler.ru.

Andriias Irina Arkad'evna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Associate Professor at the Department of electric drive and automation of industrial plants, e-mail: tryf-03@rambler.ru.

Конограй Сергій Петрович – кандидат технічних наук, ТОВ «Енергоавтоматизація», e-mail: konogray@gmail.com.

Конограй Сергей Петрович – кандидат технических наук, ООО "Энергоавтоматизация", e-mail: konogray@gmail.com.

Konogray Sergei Petrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), EnergyAutomation Ltd., e-mail: konogray@gmail.com.

Василевський Володимир Валентинович – здобувач кафедри електричних та електронних апаратів, Запорізький національний технічний університет, тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.

Василевский Владимир Валентинович – соискатель кафедры электрических и электронных аппаратов, Запорожский национальный технический университет, тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.

Vasilevskij Vladimir Valentinovich – Applicant at the Department of Electrical and electronic apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, tel. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.