

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202392952

(13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2024.02.07

(51) Int. Cl. G05B 23/02 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2022.06.10

(54) ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСТАНОВОК

(31) LU500272

(32) 2021.06.11

(33) LU

(86) PCT/EP2022/065902

(87) WO 2022/258835 2022.12.15

(71) Заявитель:  
ПАУЛЬ БЮРТ С.А. (LU)

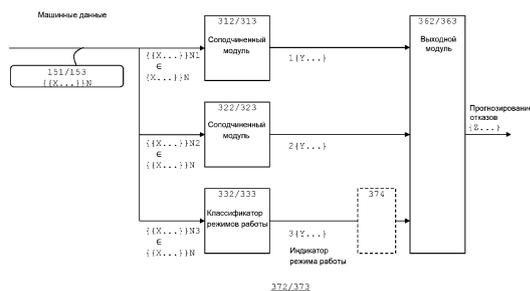
(72) Изобретатель:

Соккарт Седрик, Хансен Фабрис,  
Денглер Кристиан (LU)

(74) Представитель:

Веселицкий М.Б., Кузенкова Н.В.,  
Каксис Р.А., Белоусов Ю.В., Куликов  
А.В., Кузнецова Е.В., Соколов Р.А.,  
Кузнецова Т.В. (RU)

(57) Компьютерно-реализуемое средство прогнозирования отказов имеет модульную схему (373), в которой первый и второй соподчиненные модули (313, 323) подчинены выходному модулю (363). Первый и второй соподчиненные модули обрабатывают данные от производственной установки для выявления первого и второго промежуточных индикаторов состояния. Третий соподчиненный модуль (333) выявляет индикатор режима работы, а выходной модуль (363) обрабатывает индикаторы состояния и индикатор режима работы для прогнозирования отказов производственной установки. Модульную схему подвергают каскадному обучению, которое включает в себя обучение соподчиненных модулей (312, 322, 332), последующее функционирование обученных соподчиненных модулей и последующее обучение выходного модуля.



A1

202392952

202392952

A1

## ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСТАНОВОК

5

### Область техники

В целом, раскрытие относится к производственным установкам, а более конкретно, раскрытие относится к компьютерным системам, способам и программным продуктам для прогнозирования отказов производственных установок.

10

### Уровень техники

Производственные установки, которые работают непрерывно и без перебоев, встречаются так же редко, как и вечные двигатели.

15

Упрощая, имеются по меньшей мере две основные причины перерывов в работе. Операторы установок останавливают их для технического обслуживания, как правило, в соответствии с регулярными временными промежутками. Или же установка может остановиться вследствие неисправности.

20

В последние десятилетия компьютерные модели достигли значительного прогресса в прогнозировании отказов. Так называемые модели прогностического технического обслуживания позволяют операторам останавливать установку для технического обслуживания в момент ожидания отказа. Такой подход обеспечивает возможность увеличения общего времени работы установки и уменьшения времени ее простоя.

25

Компьютерные модели получают данные датчиков (и другие данные) от установок, и прогнозируют отказ с указанием таких параметров, как время до отказа, тип отказа и тому подобного. Компьютерные модели должны включать в себя причинно-следственные связи. Поскольку во многих случаях такие связи являются неизвестными, компьютер обучают на обучающих данных (обычно это комбинация исторических данных датчиков и исторических данных об отказах).

30

В процессе обучения происходит приближенное установление связей. При этом важное значение имеет точность предсказаний. Например, компьютер может предсказывать, что отказ произойдет в течение недели, и оператор, скорее всего, остановит установку для немедленного технического обслуживания. Неверные прогнозы являются критически важными. В случае неверного

прогноза незамедлительное техническое обслуживание на самом деле не требуется, установка может нормально, без перерывов работать.

В попытках повышения точности специалист сталкивается с множеством проблем и ограничений, среди которых потенциальная нехватка данных (например, данных датчиков или данных об отказах), возможное отсутствие экспертных аннотаций (которые идентифицируют исторические отказы), возможное различие между аннотациями разных экспертов, возможный неверный анализ соотносимости данных и тому подобное. Другие проблемы рассмотрены ниже, но в целом имеется потребность в повышении точности любого прогнозирования.

Стич и другие описывают использование нескольких компьютерных моделей, классифицирующих подкомпоненты завода по производству пластин, который представляет собой сложную промышленную систему (Stich Peter et al: «Yield prediction in semiconductor manufacturing using an AI-based cascading classification system», 2020 IEEE International conference on electro information technology (EIT), IEEE, 31 июля 2020 г. (2020-07-31), стр. 609-614).

US 2013/0132001 A1 относится к производственной установке и описывает обнаружение и прогнозирование неисправностей с помощью моделей. В данном документе подробно рассмотрены примеры, а также описано обучение моделей.

Сущность изобретения

Упрощая, прогнозирование осуществляют посредством не одного функционального модуля, который получает машинные данные и выдает прогнозные данные, но посредством модульной схемы, которая имеет выходной модуль и соподчиненные (находящиеся в зависимости) модули. В этом смысле модульная схема реализует метамодель, поскольку выходной модуль прогнозирует отказ путем обработки промежуточных индикаторов от соподчиненных модулей (или базовых моделей).

Иерархическая организация нескольких модулей имеет последствия и для обучения: соподчиненные модули обучают заблаговременно, до прохождения обучения вышестоящими модулями. Более подробно, модульная схема имеет первый и второй промежуточные модули, которые подчиняются выходному модулю. По меньшей мере, первый и второй промежуточные модули обрабатывают машинные данные для выявления первого и второго промежуточных индикаторов состояния соответственно. Такие индикаторы

состояния могут быть связаны с рабочими конфигурациями производственной установки.

Параллельно другой соподчиненный модуль, а именно классификатор режимов работы, также получает данные датчиков и выявляет режим работы производственной установки (индикатор режима работы). Выходной модуль обрабатывает промежуточные индикаторы состояния, а также индикатор режима работы и прогнозирует отказ производственной установки. По сравнению с упомянутым единственным функциональным модулем точность прогнозирования может быть повышена, поскольку отказы связаны с различными режимами работы.

На чертежах также показана компьютерная программа или компьютерный программный продукт. Компьютерный программный продукт, будучи загруженным в память компьютера и исполняемым посредством по меньшей мере одного процессора компьютера, побуждает компьютер к выполнению шагов компьютерно-реализуемого способа. Другими словами, программа содержит команды для модулей. Аналогично, компьютерная система включает в себя несколько обрабатывающих модулей, которые, при выполнении их посредством компьютерной системы, осуществляют шаги компьютерно-реализуемого способа.

Настоящее изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу прогнозирования отказов производственной установки по п. 1 формулы изобретения. Компьютерно-реализуемый способ прогнозирования отказов производственной установки представляет собой способ, в рамках которого компьютер использует схему из обрабатывающих модулей (для простоты изложения определяющий признак «обработка» иногда опущен в тексте). Компьютер получает машинные данные от производственной установки с помощью первого, второго и третьего соподчиненных обрабатывающих модулей. Эти модули расположены так, что промежуточные данные поступают в выходной обрабатывающий модуль. Схему заблаговременно подвергают каскадному обучению. Посредством первого соподчиненного модуля компьютер обрабатывает машинные данные для выявления первого промежуточного индикатора состояния. Посредством второго соподчиненного модуля компьютер обрабатывает машинные данные для выявления второго промежуточного индикатора состояния. Посредством третьего соподчиненного модуля, а именно

модуля-классификатора режимов работы, компьютер обрабатывает машинные данные для выявления индикатора режима работы производственной установки. Компьютер обрабатывает первый и второй промежуточные индикаторы состояния, а также индикатор режима работы с помощью выходного модуля.

5 Таким образом, выходной модуль прогнозирует отказ производственной установки посредством выдачи прогнозных данных.

Факультативно, компьютер может использовать схему, обученную в соответствии со следующей последовательностью обучения: обучение третьего соподчиненного модуля по историческим машинным данным,

10 функционирование обученного третьего соподчиненного модуля для получения индикатора исторического режима путем обработки исторических машинных данных, обучение первого и второго соподчиненных модулей по историческим машинным данным и по индикатору исторического режима, функционирование обученных первого и второго соподчиненных модулей для получения первого и  
15 второго индикаторов промежуточного состояния путем обработки исторических машинных данных, и обучение выходного модуля по индикатору исторического режима, по историческим машинным данным, и по историческим данным об отказах.

Факультативно, при выявлении индикатора режима работы компьютер  
20 может использовать классификатор режимов работы, обученный на основе исторических машинных данных, которые были аннотированы человеком-экспертом.

Факультативно, экспертно-аннотированные исторические машинные данные представляют собой данные датчиков.

25 Факультативно, классификатор режимов работы обучают на основе исторических машинных данных. В процессе обучения классификатор режимов работы группирует времена работы установки в кластеры сегментов временного ряда.

Факультативно, кластеры сегментов временного ряда соотносят с  
30 индикаторами режима работы, которые выбирают из уже соотнесенных автоматическим образом или при взаимодействии с человеком-экспертом.

Факультативно, индикатор режимов работы снабжают указателем числа изменений режима работы с течением времени.

Факультативно, индикаторы состояния выбирают из текущих индикаторов, которые указывают на текущее состояние, и из прогнозных индикаторов, которые указывают на состояние в будущем.

5 Факультативно, выходной модуль прогнозирует отказ производственной установки по параметру, выбранному из следующих: наработка на отказ, тип отказа, остаточный срок службы, временной промежуток наступления отказа.

Факультативно, индикатор режима работы дополнительно служит в качестве смещения, которое обрабатывают посредством как первого, так и второго соподчиненных обрабатывающих модулей.

10 Факультативно, компьютер получает машинные данные путем получения подмножества данных датчиков, и компьютер выявляет первый и второй промежуточные индикаторы состояния с помощью первого и второго соподчиненных модулей, которые обрабатывают содержащие данные датчиков подмножества.

15 Факультативно, компьютер получает машинные данные. Это действие включает в себя получение данных через устройства согласования данных, которые, в зависимости от вклада машинных данных в прогнозирование отказов, предоставляют машинные данные посредством виртуального датчика или фильтруют входящие машинные данные. Факультативно, компьютер получает  
20 машинные данные через устройства согласования данных. Это действие включает в себя получение машинных данных от устройств согласования, имеющих заблаговременно обученные посредством переноса обучения обрабатывающие модули.

25 Факультативно, компьютер получает машинные данные, которые, по меньшей мере, частично дополнены полученными в результате моделирования данными.

30 В более широком смысле настоящий способ прогнозирования отказов производственной установки может быть применен для случаев, когда прогнозные данные подлежат передаче на контроллер установки. Контроллер обеспечивает возможность для производственной установки перехода в режим, для которого наработка на отказ, согласно прогнозу, является наибольшей, и контроллер обеспечивает возможность/выдает разрешение производственной установке на переход в режим, для которого момент выполнения технического обслуживания установки наступает в самое позднее время.

Кроме того, производственная установка может быть выполнена для предоставления машинных данных на компьютер (который выполнен для осуществления способа). Производственная установка также может быть выполнена для получения от компьютера прогнозных данных. В таких сценариях производственная установка связана с контроллером, который переключает режимы работы производственной установки в соответствии с предварительно заданными целями оптимизации.

Факультативно, предварительно заданные цели оптимизации выбирают из следующих: откладывание технического обслуживания на наиболее длительный срок, работа в режиме, для которого прогнозируется наиболее позднее наступление отказа.

В качестве производственной установки могут быть выбраны: химические реакторы, металлургические печи, технологические емкости, насосы, двигатели и силовые установки.

Кроме того, предложен компьютерно-реализуемый способ обучения модульной схемы, имеющей соединенные с выходным модулем первый, второй и третий соподчиненные модули для наделения модульной схемы способностью к предоставлению прогнозирующего отказ производственной установки индикатора отказа. Способ включает в себя применение каскадного обучения, охватывающего собой обучение соподчиненных модулей, последующее функционирование обученных соподчиненных модулей, и последующее обучение выходного модуля.

Факультативно, каскадное обучение включает в себя: обучение третьего соподчиненного модуля по историческим машинным данным, функционирование обученного третьего соподчиненного модуля для получения исторического индикатора режима путем обработки исторических машинных данных, обучение первого и второго соподчиненных модулей по историческим машинным данным и историческому индикатору режима, функционирование обученных первого и второго соподчиненных модулей для получения первого и второго промежуточных индикаторов состояния путем обработки исторических машинных данных, обучение выходного модуля по историческому индикатору режима, по историческим машинным данным, и по историческим данным об отказах.

С другой стороны, компьютерно-реализуемое средство прогнозирования отказов имеет модульную схему, в которой первый и второй соподчиненные модули подчинены выходному модулю. Первый и второй соподчиненные модули обрабатывают данные от производственной установки для выявления  
5 первого и второго промежуточных индикаторов состояния. Третий соподчиненный модуль выявляет индикатор режима работы, а выходной модуль обрабатывает индикаторы состояния и индикатор режима работы для прогнозирования отказов производственной установки. Модульную схему подвергают каскадному обучению, которое включает в себя обучение  
10 соподчиненных модулей, последующее функционирование обученных соподчиненных модулей, и последующее обучение выходного модуля.

Краткое описание чертежей

Далее подробно описаны варианты осуществления настоящего изобретения с отсылками на прилагаемые чертежи, на которых:

15 Фиг. 1А и 1Б показывают производственную установку и модульную схему,

Фиг. 2 показывает модульную схему, в которой иерархическое положение соподчиненных модулей ниже, чем у выходного модуля,

20 Фиг. 3 показывает временные диаграммы работы производственной установки в сочетании с временными промежутками наступления отказов в рамках прогнозирования отказов,

Фиг. 4 показывает временную диаграмму работы производственной установки в сочетании со специфичными для конкретного режима временными промежутками наступления отказов в рамках прогнозирования посредством специфичных для конкретного режима модулей,

25 Фиг. 5 показывает блок-схему производственной установки,

Фиг. 6 показывает содержащие исторические данные многомерные временные ряды,

Фиг. 7 показывает упрощенную временную диаграмму каскадного обучения,

30 Фиг. 8 показывает упрощенную временную диаграмму другого варианта осуществления каскадного обучения,

Фиг. 9 показывает схему последовательности операций компьютерно-реализуемого способа прогнозирования отказов производственной установки,

Фиг. 10 в качестве примера показывает временную последовательность при наличии индикаторов режима для двух режимов для факультативного выявления скорости изменения режима работы,

5 Фиг. 11 показывает диаграмму переходов состояния для переходов режимов,

Фиг. 12 показывает несколько производственных установок, а также содержащие машинные данные исторические временные ряды и содержащие данные об отказах исторические временные ряды,

10 Фиг. 13 показывает различные производственные установки в рамках реализации подхода по согласованию машинных данных (и возможно, данных Q об отказах),

Фиг. 14 показывает машинные данные во временном ряду, который содержит данные, предоставляемые посредством датчика, и данные, предоставляемые посредством процессора обработки данных, и

15 Фиг. 15 показывает типовой компьютер.

Подробное описание

Обзор и применяемые термины

20 Описание ведется по нисходящему принципу: на фиг. 1А, 1Б и 2 показана производственная установка и модульная схема, на фиг. 3-4 проиллюстрирована точность в связи с режимами работы посредством упрощенных временных диаграмм, на фиг. 5 показана часть производственной установки. Фиг. 6 представляет содержащий машинные данные временной ряд, который разделен по режимам работы. Далее в описании рассмотрено обучение в связи с фиг. 7-8 и прогнозирование посредством схемы последовательности операций на фиг. 9.  
25 Другие аспекты представлены также на фиг. 10-15.

В описании использованы такие фразы как «функционирование модуля» или «функционирование компьютера» для описания действий компьютера, а также использующие термин «работа» фразы для описания действий установки.

Производственная установка и модульная схема

30 Фиг. 1А и 1Б представляют обзор подхода в контексте пространства (фиг. 1А) и времени (фиг. 1Б).

Фиг. 1А показывает производственную установку 113 и оснащенный модульной схемой 373 компьютер. Установка 113 выдает (текущие) машинные данные 153  $\{\{X_1...X_M\}\}_N$  (или сокращенно  $\{\{X... \}\}_N$ ) на вход модульной схемы

373. Модульная схема 373 выдает (текущие) прогнозные данные  $\{Z...\}$  на свой выход.

Термин «компьютер» (в единственном числе, без отсылки) означает вычислительную функцию или функцию компьютерно-реализуемого модуля.

5 Функции могут быть распределены между различными физическими компьютерами.

В данном случае под «модулем» понимается функциональный блок (или вычислительный блок), использующий одну или несколько внутренних, полученных в результате обучения переменных.

10 Специалистам известны разнообразные подобные модули, которые иногда называют «инструментами машинного обучения» или «ML-инструментами». В описании не использованы термины «ML» или тому подобное, попросту потому, что «М» обозначает выполняющие вычисления компьютеры. При упоминании в настоящем документе, (производственная) установка связана с машинными  
15 данными X, но сама установка не выполняет вычислений.

С другой стороны, на чертежах показаны модули компьютерной системы, включающей в себя несколько обрабатывающих модулей, которые при выполнении их посредством компьютерной системы, осуществляют шаги компьютерно-реализуемого способа. Производственная установка не  
20 рассматривается в качестве компьютерного модуля.

Модули выполняют алгоритмы, решающие такие задачи, как регрессия, классификация, кластеризация и тому подобное.

По своей внутренней структуре они могут представлять собой:

25 - нейронные сети (переменные представлены весами, символы на фиг. 1A обозначают расположенные слоями узлы),

- структуры дерева решений, которые имеют одно дерево или несколько деревьев (например, случайный лес) или другие модули.

30 Специалист может реализовывать внутренние структуры с помощью фреймворков, таких как, например, Tensorflow, библиотек, таких как Keras, и языков программирования, таких как, например, Python, R или Julia.

На чертеже также символически показан возможный получатель прогнозных данных - оператор 193. Оператор (или любое другое отвечающее за производственную установку лицо) имеет возможность осуществления соответствующих мероприятий, например, своевременного обслуживания

установки, допущения ее доработки до ожидаемого отказа, изменения характеристик работы для достижения режима работы, при котором возникновение отказа может быть отложено, и тому подобное.

Однако прогнозные данные  $\{Z...\}$  могут быть переданы и на другие компьютеры для обеспечения (полу)автоматического запуска мероприятий.

Прогнозные данные  $\{Z...\}$  имеют несколько аспектов, таких как, например -  $t_{fail\_a}$  (будущий момент времени, на который прогнозируется самое раннее наступление отказа),

-  $t_{fail\_b}$  (будущий момент времени, на который прогнозируется самое позднее наступление отказа),

-  $failure\_type$  (указание типа отказа, например, путем идентификации компонента установки, который выйдет из строя) или

- прогнозирование безотказной работы установки, по меньшей мере, в течение конкретного временного промежутка в будущем.

Фиг. 1Б показывает матрицу, в которой установка, компьютер и пользователь расположены по строкам, а развитие процесса во времени - по столбцам (слева направо). Фиг. 1Б можно рассматривать как фиг. 1А, повернутую на 90 градусов.

Сильно упрощая, установка выдает машинные данные, компьютер осуществляет способы 702, 802 и 203, а пользователь получает прогнозные данные  $\{Z...\}$ .

#### Фазы

Поэтому для удобства на чертежах и в описании проведено различие, по меньшей мере, следующих фаз:

- подготовительная фаза **\*\*1**, начинающаяся примерно в момент  $t_1$  путем сбора данных в виде временных рядов в ходе работы установки,

- обучающая фаза **\*\*2**, выполняемая в момент  $t_2$  путем обучения модульной схемы, см. способы 702 или 802 на фиг. 7-8, независимо от того, работает установка в режиме **\*\*2** или нет, и

- рабочая фаза **\*\*3**, означающая работу установки и сбор данных, которые подлежат использованию для прогнозирования отказов, причем  $t_3$  является временем выполнения прогнозирования в рамках способа 203 (см. соподчиненные модули и выходной модуль, фиг. 2).

## Временные ряды

Данные (например, машинные данные) могут быть доступны в виде временных рядов, то есть рядов значений данных, индексированных во временном порядке для последовательных моментов времени. Фиг. 1А представляет временные ряды в виде компактного обозначения («прямоугольника со скругленными углами» 153) и матрицы под прямоугольником, а на фиг. 1Б обозначение в виде прямоугольника повторено в контексте времени.

Представление  $\{X_1 \dots X_M\}$  обозначает единичный (то есть, одномерный) временной ряд, который содержит элементы  $X_m$  данных (или сокращенно «элементы»). Элементы  $X_m$  доступны от момента времени 1 до момента времени  $M$ :  $X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_M$  (то есть, «временной ряд измерений»). Индекс  $m$  является индексом момента времени. За моментом  $m$  времени следует момент  $(m+1)$  времени, который обычно удален на равный временной промежуток  $\Delta t$ . Обозначение  $\{X \dots\}$  является краткой формой.

В качестве примера можно привести скорость вращения привода установки за  $M$  моментов времени:  $\{1400 \dots 1500\}$ . Специалисты в данной области могут предварительно обработать значения данных, например, до нормализованных значений  $[0,1]$ , или  $\{0,2 \dots 1\}$ . Формат данных не ограничен скалярами или векторами,  $\{X_1 \dots X_M\}$  может также обозначать последовательность из  $M$  изображений или образцов звука, взятых с момента времени 1 до момента времени  $M$ .

Обозначение  $\{\{X_1 \dots X_M\}\}_N$  (или  $\{\{X \dots\}\}_N$  в сокращенной форме) указывает на многомерный временной ряд, содержащий векторы  $\{X_m\}_N$  элементов данных от момента времени 1 до момента времени  $M$ . Векторы имеют кардинальное число  $N$  (число переменных, то есть параметров, для которых доступны данные), что означает для любого момента времени от 1 до  $M$  доступность  $N$  элементов данных. В матрице индекс  $n$  переменной указан в качестве индекса строки (от  $x_1$  до  $x_N$ ).

Например, единственный временной ряд для вращения может сопровождаться единственным временным рядом для температуры, еще одним единственным временным рядом для данных по химическому составу материалов или тому подобным.

Специалист в данной области техники должен понимать, что описание является упрощенным. Реальные числа  $N$  переменных могут достигать нескольких тысяч или более. Временные ряды не являются идеальными. Иногда какой-либо элемент отсутствует, но специалист может разрешать такие ситуации.

Выбор временного промежутка  $\Delta t$  и числа моментов  $M$  времени зависит от выполняемых посредством установки процесса или деятельности. Общая продолжительность  $\Delta t * M$  временного ряда (то есть, размер окна) соответствует тому изменению параметров установки, которое занимает наибольшее время.

Поскольку моменты  $t_m$  времени задают время обработки данных посредством модульной схемы (или ее компонентов), некоторые данные могут быть предварительно обработаны. Например, датчик температуры может выдавать данные каждую минуту, но для  $\Delta t = 15$  минут (например) часть данных может быть отброшена, усреднена по  $\Delta t$  или обработана иным образом.

Обозначение временных рядов  $\{...\}$  применимо для следующего:

- машинные данные  $\{X...\}$  в соответствии с пояснениями,
- промежуточные данные  $\{Y...\}$ , формирующиеся в процессе обработки компьютером в модулях, прежде всего, в соподчиненных модулях,
- прогнозные данные  $\{Z...\}$  об отказах на выходе модульной схемы,
- данные  $\{Q...\}$  об отказах, которые представляют отказы, которые реально происходят или произошли ( $\{Q...\}$  не является прогнозом).

Данные  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $Q$  также могут быть представлены в виде многомерных временных рядов.

Однако одномерные и многомерные временные ряды являются всего лишь примерами форматов данных, специалист может обрабатывать данные и в других форматах.

#### Машинные данные $X$

Как показывает метка, машинные данные  $X$  относятся к производственной установке. Данные  $X$  обрабатывают, поскольку прогнозируемый отказ связан с работой установки. Поскольку не все переменные машинные данные вносят вклад в прогнозирование, существует грубая дифференциация в зависимости от связи источников данных с установкой.

Машинные данные могут быть подразделены на данные, полученные от датчиков, связанных с установкой («данные датчиков»), и данные, полученные из других источников («дополнительные данные» или «данные признаков»).

5 Дополнительные данные могут представлять обрабатываемые посредством установки объекты (имеющие такие свойства, как тип объекта, материал объекта, условия нагрузки и тому подобное), или принадлежащие установкам инструменты (прежде всего, если они подвержены замене с течением времени).  
10 Дополнительные данные могут представлять данные по окружающей среде во время работы (например, по температуре). В качестве еще одного примера можно привести данные по техническому обслуживанию.

Возможным является скрывание данных датчиков от оператора установки или других пользователей в том смысле, что оператор/пользователь не может соотносить конкретные данные датчиков с конкретными значениями. Как следствие, пользователи-эксперты могут оказаться не в состоянии маркировать  
15 такие данные. Другие данные предположительно являются более открытыми. Например, отображающие вибрацию определенного компонента показания датчика могут не иметь смыслового значения для эксперта, но он может хорошо понимать влияние температуры окружающей среды на работу установки.

#### Календарное время

20 Как уже упоминалось, индекс  $t$  является индексом момента времени, представление в виде временных рядов является удобным в обращении, и специалист может легко преобразовывать представление времени в реальные календарные моменты времени. Временные ряды могут быть представлены в виде последовательностей (на фиг. 1Б последовательно представлены  $Q$   
25 временных рядов), а календарные временные промежутки могут оказаться гораздо более длинными, чем  $\Delta t * M$ .

#### Обучение и различение исторических данных от текущих

Поскольку модули получают внутренние переменные (например, веса или другие связанные с машинным обучением переменные) в процессе обучения  
30 702/802 с использованием данных, в описании проведено различие между «историческими данными» и «текущими данными». Исторические данные являются данными, которые могут быть использованы для обучения модуля (фиг. 1Б с помощью способов 702 и 802 на фиг. 7-8). Поэтому исторические данные должны быть доступны до начала обучения. Другими словами,

показанные слева от способа 702/802 данные являются историческими данными (историческими машинными данными и историческими данными об отказах).

Фиг. 1Б показывает обучение с помощью одного блока 702/802, а оперативное время между  $t_2$  и  $t_2'$  обозначено шириной этого блока. Обучение может быть повторено на основе вновь поступающих данных (что «размножает» блок справа, как показано на чертеже с помощью блока в момент  $t_2'$ ). С течением времени объем исторических данных увеличивается, поэтому модули могут быть переобучены (путем повторения способов 702, 802) для достижения более точного прогнозирования. Фиг. 1Б показывает последовательные временные ряды с индексами (1), (2)... (Q). Удобным является, когда за один раз обрабатывают исторические данные за одну общую продолжительность  $\Delta t * M$  (то есть,  $N * M$  значений данных на  $N * M$  входов обучаемой схемы, плюс  $M$  значений данных для Q), но специалист может применять данные к модулям и иным образом. Число Q (временных рядов) со временем увеличивается.

Напротив, текущие данные являются данными, которые обученный модуль может обрабатывать для прогнозирования возможного в будущем отказа (способ 203 фиг. 9). Фиг. 1Б иллюстрирует это обстоятельство посредством временного ряда 153, где  $\{X...\}$  подлежит обработке в процессе выполнения способа 203 прогнозирования. Теоретически, возможной является обработка текущих данных, которые фактически перекрываются историческими данными (см. второй, заканчивающийся в момент  $t_2'$  блок).

#### Исходные данные

Как показано, модуль получает исходные данные, то есть еще не обработанные посредством модуля данные (за исключением предварительной обработки для согласования форматов данных). В процессе обучения в рамках способа 702/802 модуль получает исходные исторические данные и присваивает переменные (или «веса»). После обучения, в рамках способа 203 прогнозирования модуль получает исходные текущие данные и выдает прогнозные данные  $\{Z...\}$ . Исходные данные упоминаются уже здесь потому, что в процессе обучения 702/802 и в процессе прогнозирования 203 модули схемы предоставляют и обрабатывают промежуточные данные. Как правило, исторические данные остаются историческими, а текущие - текущими.

Прогнозирование и различие прошлого и будущего

Оперативное время выполняющего способ 203 прогнозирования компьютера может быть незначительным/кратким (по сравнению с временными промежутками  $M$  во временном ряду). Поэтому в описании в качестве самого раннего момента времени, когда оператор может быть проинформирован о прогнозе отказа  $\{Z...\}$ , принят  $t_3$ . Фиг. 1Б показывает прогноз также в виде временного ряда. Как пояснено ниже, одним из элементов прогнозных данных  $\{Z...\}$  об отказах является выявление момента ( $t_{fail}$ ) времени отказа.

Начиная с  $t_3$  (но не ранее), оператор может видеть/знать прогноз.

Будущие моменты времени также могут быть заданы относительно оперативного времени компьютера (ср.  $t_3$  на фиг. 3). Время «наработки на отказ» обозначает временной промежуток или продолжительность от момента  $t_3$  до самого раннего момента времени отказа.

Точность прогнозирования выходного результата может быть рассмотрена как точность определения временных промежутков, точность определения типа и тому подобное. Эти аспекты связаны друг с другом. Для простоты объяснения в данном описании основное внимание уделено повышению точности определения временных промежутков.

Сбор данных для обучения

Фиг. 1А также показывает отсылку 111 на производственную установку в процессе исторической эксплуатации и отсылку 151 на исторические машинные данные (и исторические данные об отказах) на фазе  $**1$ . Также показана ссылка 372 для обучаемой схемы.

Модульная схема

Фиг. 2 показывает модульную схему 373, содержащую соподчиненные модули 313, 323, 333, которые (по иерархии) подчиняются выходному модулю 363 (относительно более высокому по рангу). Соподчиненный модуль 333 имеет специальную функцию классификатора режимов работы.

Для простоты объяснения в описании использовано обозначение «классификатор», однако оно охватывает также и функцию «кластеризации». Соподчиненный модуль 333 может работать как классификатор (который относит время работы установки к классам, например,  $MODE\_1$  или  $MODE\_2$ ), но модуль 333 может также работать как инструмент кластеризации (который разделяет время работы установки в соответствии с наблюдаемыми во время

различных режимов работы данными). Соотнесение конкретных кластеров с конкретными режимами не является обязательным.

Например, модуль 333 может обрабатывать данные и группировать времена работы (то есть, моменты  $m$  времени) в первый и второй кластеры. Затем компьютер может автоматически соотносить эти кластеры с первым и вторым режимом работы (выступающими в качестве классов). Другими словами, между понятиями «кластер» и «режим» существует семантическое различие. Модуль наблюдает за работой установки и разделяет время работы на (непересекающиеся) кластеры. При этом происходит соотнесение (первого кластера первому режиму, второго кластера второму режиму и тому подобное), а режим может быть задан в качестве цели классификации. Затем модуль может быть обучен различению времен работы в соответствии с поставленной целью (уже не кластеризация, а классификация). При последующих повторениях с различными данными модуль 333 может выявлять, работает ли установка в первом или втором режиме.

В распределении кластеров по классам могут принимать участие эксперты (например, эксперт может попросту присваивать кластерам названия режимов, эксперт может признавать относимость к отказам или тому подобное). Соотнесение может оказаться более сложным (два кластера могут относиться к одному и тому же режиму). Но в целом, привлечение эксперта-человека не является обязательным. Может оказаться выгодным отказ от привлечения пользователя. Различия между режимами работы могут быть «невидимыми» для эксперта (или, по меньшей мере, трудноуловимыми, см., например, фиг. 5). Другими словами, кластеры и/или режимы могут оказаться скрытыми от экспертов. Но различия могут оказывать влияние на прогноз (и на работу машины, см. фиг. 4), и компьютер может распознавать существование таких различий. Опять-таки, различия могут оказаться скрытыми от пользователя, но не от компьютера.

Кластеризация не является обязательной, возможным также является, что эксперт аннотирует режим работы по отношению к историческим данным установки, например, путем предоставления аннотаций к данным датчиков.

Различные модули

Различные модули выполняют различные задачи (например, регрессию и классификацию/кластеризацию). Использование в схеме соподчиненных

модулей (которые специализированы на выполнении конкретных задач) может повысить точность прогнозирования по сравнению с одиночными модулями (то есть, модулями без соподчиненных модулей). Точность прогнозирования пояснена на примере временной точности в связи с фиг. 3-4.

5           Поскольку модульная схема 373 имеет несколько компонентов, которые в качестве входных данных могут потребовать конкретные данные, в дальнейшем описании рассмотрены дополнительные подходы, среди которых можно выделить следующие:

10           - компенсация недостатка данных за счет использования данных от виртуальных датчиков (см. фиг. 13),

              - компенсация недостатка экспертных знаний по различению режимов работы путем автоматической классификации режимов (см. фиг. 7-8 по использованию таких автоматически полученных данных), факультативно, начиная с кластеризации,

15           - побуждение к проведению каскадного обучения модульной схемы в конкретной последовательности (начиная с классификатора режимов работы, см. фиг. 7-8),

20           - компенсация недостатка данных посредством, по меньшей мере, частичной имитации поведения производственной установки (см. фиг. 14), или посредством предсказания поведения установки иным способом,

              - расширение обучающих данных за счет аннотированных человеком меток (подробно не рассмотрено),

25           - компенсация недостатка (или избытка) данных путем их преобразования, например путем согласования доступности вариантов данных, когда обработке подлежат данные от разных физических машин (см. пояснения к фиг. 13 в отношении исторических данных), или

30           - побуждение различных модулей к соревнованию за точность с использованием смещения (вместо бинарной классификации), которое указывает на степень достоверности входных данных для обучения выходного модуля (например, как объяснено ниже, индикатора обособленного режима или вероятностного индикатора).

С общей точки зрения, модульная схема 373 получает машинные данные 153 от производственной установки 113 (см. фиг. 1А) и прогнозирует отказ производственной установки (данные {Z...}).

В аспекте топологии, модульная схема 373 включает в себя два или более модулей, соподчиненных выходному модулю. Соподчиненные модули могут отличаться (между собой) следующим образом:

5 - Происхождение машинных данных может быть специфичным для конкретного модуля. Например, соподчиненные модули 313 и 323 могут обрабатывать машинные данные от различных компонентов установки, например, модуль 313 может получать данные  $\{\{X...\}\}N1$ , являющиеся подмножеством  $G$  от  $\{\{X...\}\}N$ , модуль 323 может получать подмножество  $\{\{X...\}\}N2$  и так далее (см. фиг. 2).

10 - Наборы весов (или других переменных машинного обучения), которые соподчиненные модули применяют в процессе обработки, могут быть различными.

15 - Промежуточные данные (например,  $\{Y...\}$ ) также могут быть специфичными для каждого модуля. Чертеж показывает  $1\{Y...\}$  на выходе модуля 313 в качестве первого промежуточного индикатора состояния,  $2\{Y...\}$  на выходе модуля 323 в качестве второго промежуточного индикатора состояния, а  $3\{Y...\}$  на выходе классификатора режимов работы 333 в качестве индикатора режима работы.

20 Топология влияет на доступность данных. Выходной модуль получает возможность обработки промежуточных данных по мере получения к ним доступа (конвейерная структура, на чертеже слева направо).

25 Топология также влияет на процесс обучения. Как показано ниже в связи с фиг. 7-8, перед обучением выходного модуля происходит обучение соподчиненных модулей. Этот же принцип применим и для иерархии с большим числом рангов - для обучения в порядке соподчиненных модулей, нижестоящих модулей и вышестоящих модулей.

30 Топология может быть адаптирована к отдельным, выполняющим различные задачи модулям. Например, модуль 333 обеспечивает кластеризацию (или классификацию по MODE) и тем самым предоставляет выходному модулю смещение.

#### Различные аспекты

В связи с фиг. 1 в описании уже были представлены модули для выполнения таких задач, как регрессия, классификация, кластеризация и тому подобное. Различение задач является удобным, но не обязательным. Прогнозные

данные {Z...} об отказах имеют аспекты регрессии (наработка на отказ, получаемая из непрерывного времени в будущем), и имеют аспекты классификации (конкретный тип отказа или тому подобное). Аналогично, модуль 333 может предоставлять индикаторы режимов, которые могут быть обособленными (например, либо MODE\_1, либо MODE\_2, как результат классификации), или могут быть представлены вероятностными классификаторами (подробности ниже).

#### Фазы

Если не указано иное, производственная установка и модульная схема показаны в рабочей фазе \*\*3. Обучение \*\*2 описано в связи с фиг. 7-8. Для удобства фиг. 2 также показывает отсылки на применяемые в процессе обучения объекты: обучаемую модульную схему 372, содержащую соподчиненные модули 312, 322 и 322, а также выходной модуль 362 (подробнее см. фиг. 7-8).

Фиг. 2 также показывает факультативный модуль 374 вычисления индикатора, который ниже описан в связи с фиг. 9-10.

Точность прогнозирования времени наработки на отказ

Фиг. 3 показывает временные диаграммы работы производственной установки 113 (на фиг. 1А и 1Б) в сочетании с временными промежутками наступления отказа при прогнозировании отказов посредством модуля. Модуль может быть представлен обычным модулем (без подчинения) или он может представлять собой модульную схему 373.

Горизонтальные линии показывают работу производственной установки в упрощенных сценариях эксплуатации.

Сценарий 1: установка работает до отказа в момент времени  $t_{fail\_1} < t_{fail\_a}$ . Модуль не обеспечил приемлемой индикации.

Сценарий 2: установка работает до отказа в течение прогнозируемого временного промежутка наступления отказа  $[t_{fail\_a}, t_{fail\_b}]$ . Модуль выдал приемлемую индикацию, но оператор решил не проводить техническое обслуживание установки.

Сценарий 3: установка работает до отказа после прогнозируемого временного промежутка наступления отказа  $[t_{fail\_a}, t_{fail\_b}]$ , в момент времени  $t_{fail\_3}$ .

Сценарий 4: Установка работает до «остановки» на техническое обслуживание. Техническое обслуживание начинается незадолго до

прогнозируемого  $t_{fail\_a}$ . Установка возобновляет работу, и, в конце концов, выходит из строя в момент времени  $t_{fail\_4}$ . Это является почти идеальной ситуацией.

5 Требуется повышение точности прогноза. На чертежах это проиллюстрировано посредством измененного прогнозного временного промежутка наступления отказа [ $t_{fail\_a}$ ,  $t_{fail\_b}$ ], который короче исходного. Оператор может отложить техническое обслуживание до момента незадолго до наступления  $t_{fail\_a}$ . Такое улучшение является возможным для модульной схемы (каскадирование модулей, см. фиг. 2).

10 Модуль работает в течение оперативного времени  $t_3$  (см. фиг. 2), а длительностью вычислений (необходимым компьютеру для вычисления  $\{Z...\}$  временем) можно пренебречь. Временной промежуток [ $t_{fail\_a}$ ,  $t_{fail\_b}$ ] является прогнозированным временным промежутком наступления отказа.

15 Иллюстрация является упрощенной, специалист в данной области может вывести другие метрики, среди которых:

- Остаточный срок службы (RUL). Отказы могут быть различными, и не все виды отказов выводят установку из эксплуатации. Например, индикация «отсутствует масло» для подшипника дает оператору возможность провести техническое обслуживание этого подшипника, и установка может продолжать работу. Оператор может получить RUL посредством сбора дополнительные указывающих на отказы данных, которые выходят за рамки простого отсутствия масла (например, отказ двигателя).

20 - Нарботка на отказ (TTF) является временным промежутком от  $t_3$  до  $t_{fail\_a}$  (малая TTF) или до  $t_{fail\_b}$  (большая TTF).

25 - Опасность отказа как показатель его серьезности, который может быть получен из  $t\_type$  (факультативно, также с учетом времени).

30 Как показано далее, один модуль, получающий данные практически от всех доступных машинных данных  $\{\{X...\}\}_N$ , может выдавать прогнозные данные  $\{Z...\}$ , которые не подходят оператору для принятия соответствующих решений.

Фиг. 4 показывает временную диаграмму работы производственной установки (на фиг. 1A) в сочетании со специфичными для конкретного режима временными промежутками наступления отказа при прогнозировании посредством специфичных для конкретного режима модулей.

В модульной схеме предусмотрена возможность разделения прогнозных временных промежутков наступления отказа по режимам, чертеж по отдельности показывает ( $t_{fail\_1}$ ,  $t_{fail\_2}$ ) для MODE\_1 и для MODE\_2.

5 Операторы установок могут понимать режимы работы как отображение легко обнаруживаемых состояний, таких как ON (установка работает), STAND-BY (установка в режиме ожидания), FULLY-LOADED (установка работает с полной нагрузкой) или тому подобное. Однако прогноз об отказах зависит от используемых режимов, а в обязанности оператора не входит осведомленность о переключении установкой режимов. Отсутствует также требование реализации 10 установкой переключения режимов. Режимы являются определяющими признаками, которые отображают работу установки.

В упрощенном примере установка в режиме MODE\_1 выходит из строя раньше, чем установка в режиме MODE\_2. Эта информация может быть важной для оператора. Как показано ниже, в момент  $t_3$  (время работы модульной схемы) 15 оператор получает информацию о прогнозируемых временных промежутках наступления отказа для обоих режимов по отдельности и, факультативно, для обоих режимов в сочетании («MODE\_1 OR \_2»).

До момента  $t_3$  оператор может управлять установкой для ее работы в режиме MODE\_1 или MODE\_2, или установка может переходить в любой из 20 режимов без явного управления для перехода в конкретный режим.

Возможным является продолжение оператором работы в режиме MODE\_2 до момента  $t_4$  (незадолго до  $t_{fail\_1}$  для MODE\_1). Техническое обслуживание может быть отложено, или примерно с момента  $t_4$  оператор разрешает установке 25 работать исключительно в режиме MODE\_2.

Иллюстрация существенно упрощена: во время работы установки после  $t_3$  (представленной текущими данными, взятыми с  $t_3$  по  $t_4$ ) компьютер обновляет прогноз. Продолжение работы установки в режиме MODE\_1 (после  $t_3$ ) может привести к смещению  $t_{fail\_1}$  (для MODE\_1) влево. Поэтому оператор может 30 принять решение о переходе в MODE\_2 только вскоре после  $t_3$  (а не в  $t_4$ ).

Следует отметить, что оператор не должен обязательно знать режим предварительно, он может переключать установку на другой режим работы, а индикатор режима подскажет ему подходящий режим.

Способная к различению режимов работы модульная схема может оказаться более точной при выявлении (общего) временного промежутка

наступления отказа. В данном описании подробно рассмотрено повышение точности прогнозирования в связи с фиг. 5, но при этом сделан краткий экскурс в сценарий применения, в рамках которого для управления установкой могут быть использованы прогнозные данные {Z...} об отказах и данные идентификации режимов в их сочетании.

#### (Полу)автоматическая адаптация режимов

Фиг. 4 и пояснения к ней могут быть рассмотрены в качестве примера установления правил управления. Контроллер установки может путем обработки прогнозных данных {Z...} об отказах (доступных в момент  $t_3$ ) генерировать фактические управляющие команды для управления работой установки. Правила могут быть дополнены целями оптимизации более высокого уровня. Например, для достижения цели оптимизации «откладывание технического обслуживания на наиболее длительный срок» контроллер разрешает установке работать до  $t_4$  в любом режиме, но не разрешает работать в режиме MODE\_1, начиная с  $t_4$ .

Участие человека-эксперта является минимальным (например, для задания  $t_4$  как предшествующего  $t_{fail}$  с некоторым предварительно заданным окном).

Путем отправки управляющих команд на установку контроллер может изменять режим. Однако, по существу, в любой момент времени (обученная) модульная схема (или, по меньшей мере, ее классификатор режимов работы) являются способными к установлению режима (или, по меньшей мере, кластера) так, что обеспечена возможность отмены изменения команд при необходимости. Или же контроллер проверяет свои команды на предмет возможного влияния на режим.

Другими словами, выполняемое посредством схемы прогнозирования (способ 203 на фиг. 1Б), может быть использовано путем передачи {Z...} в контроллер установки, который позволяет установке переход в режим, для которого прогнозируется самое длительное время наработки на отказ, переход в режим, для которого прогнозируется самое позднее время проведения обслуживания, или в соответствии с другими критериями. С другой стороны, производственная установка может быть связана с контроллером, который переключает режим работы в соответствии с предварительно заданными целями оптимизации. Указанные критерии также могут быть сформулированы в виде целей, например, таких как откладывание технического обслуживания (на наиболее длительный срок) или эксплуатация установки в режиме, для которого

прогнозируется наиболее позднее наступление отказа (по сравнению с другими режимами).

Пример для установки

Фиг. 5 показывает блок-схему производственной установки 110. Установка  
5 является воображаемой в том смысле, что имеет символические компоненты, которые представляют реальные компоненты реальных установок. Примерами реальных установок являются химические реакторы, металлургические печи, технологические емкости, насосы, двигатели и силовые установки.

Установка 110 имеет привод 120. На приводе закреплен датчик 130  
10 вибрации, который выдает сигнал в виде временного ряда  $\{X...\}$ . В этом упрощенном примере машинные данные должны включать в себя только данные датчика. В установке используется сменный инструмент (или исполнительный механизм) 140-1/140-2. На чертеже инструмент проиллюстрирован при показе способности установки к работе как с инструментом 1, так и с инструментом 2  
15 («инструмент-стрелка» или «инструмент-треугольник»). Установки взаимодействуют с объектом 150 (в данном примере посредством инструмента). В процессе взаимодействия объект должен менять свою форму (установка представлена, например, токарным металлообрабатывающим станком), положение (транспортирующая установка), цвет (покрасочный робот) или тому  
20 подобное.

На упрощенной иллюстрации на фиг. 5 выбор инструмента задает конфигурацию установки (например, первую и вторую конфигурации). В более реалистичных сценариях установки могут иметь гораздо большее число компонентов, что приводит к появлению множественных конфигураций.  
25 Сложность конфигурации увеличивает сложность вышеупомянутых причинно-следственных связей и, тем самым, сложность прогнозирования отказов. Для простоты описания в качестве единственной предполагаемой причины возможного отказа рассмотрены вибрации. Возникновение механических вибраций (представленных сигналом  $\{X...\}$ ) в процессе работы является  
30 нормальным явлением. Сильно упрощая, производственные установки издадут звуки. Издаваемый установкой звук различается в зависимости от комбинации или конфигурации инструмента/объекта (см. различные частотные диаграммы).

На чертеже также показаны значительно упрощенные частотные диаграммы (полученные, например, из сигнала датчика с помощью хорошо известного в

данной области техники быстрого преобразования Фурье). В любом случае, распределение частот со временем может меняться по разным причинам (например, вследствие изменения объектом своей формы), но диаграмма дает примерное представление о преобладающих частотах.

5           В общем случае вибрации не всегда должны приводить к отказу. Однако существует заметное исключение. На собственной частоте (или резонансной частоте, обозначенной в данном случае  $f_R$ ) колебания имеют относительно высокую амплитуду, что приводит к увеличению опасности отказа. Опять-таки, описание упрощено: в реальных сценариях известны различные резонансные  
10 частоты.

          Как показано на чертеже, при использовании инструмента 1 («стрелка») установка может вибрировать вблизи резонансной частоты, а при использовании инструмента 2 («треугольник») возникают вибрации на других частотах. Такое упрощенное представление не исключает опасности того, что в конечном итоге  
15 установка будет вибрировать на частоте  $f_R$ , но для инструмента 1 эта опасность выше. Может произойти незначительное изменение (каких-то свойств, например, модуля упругости Юнга инструмента или тому подобного), и вибрация может перейти на  $f_R$ . Специалист в данной области может провести исследование вибраций и найти корреляцию между использованием различных  
20 инструментов и различными частотами. Однако в упомянутых реалистичных сценариях, когда производственная установка является достаточно сложной (множество различных инструментов, множество различных объектов), экспертные знания, как правило, являются недоступными.

          Как показано далее, компьютер может различать режимы работы (или, по  
25 меньшей мере, сгруппировать времена работы по кластерам) также и для режимов, которые эксперт различать не способен. Упрощенное описание ограничено рассмотрением только первого и второго режимов работы, а связанная с использованием инструмента семантика для компьютера не имеет значения.

30           В упрощенном примере два режима работы различаются различным распределением частот. Сильно упрощая, для первого режима преобладают частоты в нижней полосе (ниже  $f_R$ ), а для второго режима преобладают частоты в верхней полосе (выше  $f_R$ ).

Резонансная частота может быть достигнута в обоих режимах, хотя и с разной вероятностью.

Возвращаясь к фиг. 2, классификатор 333 режимов работы выдает индикатор  $3\{Y\dots\}$  режима работы. Хотя в описании термин «индикатор»  
5 использован в единственном числе, следует отметить, что он может изменяться во времени. Поэтому он приведен в виде временного ряда. Примеры изменения  $3\{Y\dots\}$  во времени приведены на фиг. 10-11.

В принципе, имеются несколько вариантов.

10 - Классификатор 333 режимов работы может работать как исключаящий классификатор, который выводит переменную, соответствующую режиму работы (например, режим 1 XOR режим 2). Или, в случае нескольких режимов работы, классификатор 333 режимов работы представляет собой предварительно заданное значение из набора значений  $\{MODE\_1, MODE\_2, MODE\_3$  и тому подобное). В другом варианте число режимов не задано предварительно, но  
15 может быть выявлено как число кластеров.

- Классификатор 333 режимов работы может работать как вероятностный классификатор, который выдает переменную с вероятностью режима работы (например, режим 1 - 80%, режим 2 - 20%).

20 - Классификатор 333 режимов работы может представлять собой комбинацию обоих вариантов. Он может быть представлен комбинацией предварительно заданного значения и диапазона вероятностей. Например,  $3\{Y\dots\}$  может быть реализован как вектор с двумя переменными, двумерный временной ряд  $3\{\{Y\dots\}^2$ : первая переменная указывает на режим, а вторая указывает на вероятность. Например, для заданного момента времени  $t_m$  с  
25 вероятностью 80% режим представлен  $MODE\_1$ .

**Факультативное разбиение исторических машинных данных**

При условии, что классификатор 332/333 режимов работы (см. фиг. 2), по меньшей мере, путем предварительного обучения уже обучен, он может преобразовывать исторические машинные данные  $\{\{X\dots\}^N$  (многомерные  
30 временные ряды, или  $\{\{X\dots\}^N$ ) в исторические машинные данные в составе двух подрядов. Подробнее об этом рассказано в связи с фиг. 6 и 8.

Фиг. 6 показывает исторический многомерный временной ряд  $\{\{X\dots\}^N$ , как на фиг. 1Б. Классификатор режимов работы может различать режимы (в данном случае  $MODE\_1$  и  $MODE\_2$ ) в индикаторе  $3\{Y\dots\}$  режима работы.

В результате, X-данные могут быть распределены на два (или более) многомерных временных ряда. В примере для  $m = 1, 2, 3, \dots$  был обнаружен  $MODE\_1$ , а для  $m = 4, 5, 8, 9$  -  $MODE\_2$ .

5 Возможны различные варианты. Например, если различие режимов может быть установлено только с относительно низкой вероятностью (см. выше), конкретные данные могут быть отнесены к обоим режимам.

10 Для специфичных для конкретного режима временных рядов пропущенные временные интервалы могут быть проигнорированы так, что ход времени оказывается представленным на непрерывной последовательности временных интервалов. Специалист может вводить и иные системы отсчета времени или тому подобное.

В этом смысле исторические данные  $\{\{X\}\}_N$  могут быть преобразованы в аннотированные по режиму исторические данные  $\{\{X\ @1\}\}_N$  и  $\{\{X\ @2\}\}_N$ . При этом не требуется контроль со стороны экспертов-людей.

15 Хотя в настоящем документе это не показано, разделение может быть применено и к данным об отказах. В исторических данных могут присутствовать отказы, произошедшие во время работы в режиме 1 или в режиме 2.

Разделение исторических машинных данных (или данных об отказах) может быть использовано на шаге 852 на фиг. 8.

20 Разделение исторических данных (машинных данных или отказам) можно рассматривать как кластеризацию. В результате кластеризации получают сегменты временного ряда, которые можно различать (например, по  $3\{Y\}$ ). Удобным является автоматическое соотнесение конкретных кластеров с конкретными режимами. В примере использованы два кластера, соотнесенные с  
25 двумя режимами.

На чертеже исключительно в качестве примера показаны  $segm\_1$  (в режиме  $MODE\_1$ ),  $segm\_2$  (в режиме  $MODE\_2$ ),  $segm\_3$  (вновь в режиме  $MODE\_1$ ),  $segm\_4$  (вновь в режиме  $MODE\_2$ ) и так далее. Сегменты временного ряда могут иметь различную длительность (например,  $segm\_1 - 3*\Delta t$ ,  $segm\_2 - 2*\Delta t$  и тому  
30 подобное). Сегменты могут быть разделены на первый кластер ( $segm\_1$ ,  $segm\_3, \dots$ ) и второй кластер ( $segm\_2$ ,  $segm\_4, \dots$ ).

Кластеризация с точки зрения разделения времен работы (производственной установки) на различные кластеры удобна тем, что режим работы является функцией времени ( $3\{\dots\}$  - временной ряд).

### Повторное рассмотрение исходных данных

Как уже упоминалось выше (фиг. 1Б), модуль может быть обучен, а затем использован для обработки данных. В процессе обучения модульной схемы (см. на фиг. 2 пример двухуровневой иерархии) соподчиненные модули преобразуют исходные данные (машинные данные  $\{X...\}$ , данные  $\{Q...\}$  об отказах и тому подобное) в промежуточные данные  $\{Y...\}$ , причем все данные являются историческими данными. Выходной модуль обрабатывает промежуточные и исходные данные, которые также являются историческими.

После того как модуль обучен, он получает исходные данные (например,  $\{\{X...\}\}N$ ) и выдает прогноз  $\{Z...\}$ , который является текущими данными. Однако, по меньшей мере, выходной модуль может получать исходные данные и промежуточные данные, которые являются текущими.

Может быть выгодным:

- что модули более высокого ранга (например, выходной модуль) получают исходные данные (то есть, еще не обработанные) в сочетании с промежуточными данными,
- что промежуточные данные имеют конкретную функцию, и
- что доступ к таким промежуточным данным может быть расположен в виде каскада (при обучении и при прогнозировании).

Приведен по меньшей мере один пример сценария. Поскольку аннотирование исходных данных силами людей-экспертов затруднено, промежуточные данные, например индикатор режима, могут выступать в качестве фактической аннотации. При этом последовательность действий остается неизменной: выходной модуль использует фактические аннотации по мере того, как они становятся доступными, но не ранее.

Подход далее описан для двухуровневой иерархии (см. фиг. 2), но могут быть введены и другие уровни.

### Каскадное обучение

Фиг. 7 показывает упрощенную временную диаграмму каскадного обучения 702. Жирные горизонтальные линии указывают на доступность данных во время обучения. Вертикальные стрелки указывают на использование данных во время обучения. Хотя несколько вертикальных линий могут исходить из одной и той же горизонтальной линии, это не означает, что для их использования требуются одни и те же данные. Иногда повторное использование данных может

предполагать привлечение различных переменных (ср.  $\{\{X...\}\}N$ , возможно не всех  $N$  переменных, но из различных подмножеств переменных). После использования данных они остаются доступными: горизонтальные линии превращаются из сплошных в пунктирные. Повторное использование данных удобно в случае повторения некоторых шагов обучения.

Ход времени направлен слева направо, причем момент времени  $t_2$  указывает на начало фазы  $**2$ , а момент времени  $t_3$  на рабочую фазу  $**3$  (ср. фиг. 3,  $t_3$  обозначает оперативное время компьютера для выполнения прогнозирования).

Блоки символизируют шаги 712, 722, 732 способа, причем ширина блоков не масштабирована по времени. Справа от них могут располагаться жирные вертикальные линии 742 и 762, символизирующие функционирование обученного (соподчиненного) модуля для получения выходных данных.

В описании периодически делаются обратные отсылки на фиг. 1А (отсылка 111 на установку, предоставляющую исторические машинные данные 151), на фиг. 2 (топология, применяются отсылки  $**2$ ) и на фиг. 5 (пример установки с двумя режимами работы).

В описании термин «предварительный» использован для обозначения необязательных повторений шагов способа. Другими словами, отдельные шаги обучения могут быть повторены. Для удобства в описании упоминается семантика данных (например, частота или отказ при  $fR$ ), однако компьютер не обязан учитывать такую семантику.

Исторические данные являются доступными с самого начала (то есть, до  $t_2$ ). Исторические данные могут иметь, например, вид временных рядов. На чертеже исторические данные подразделены на исторические данные  $\{Q...\}$  об отказах и исторические машинные данные  $\{\{X...\}\}N$  (полученные от производственной установки 111 или от другой установки).

Хотя данные об отказах представлены в виде одномерного временного ряда  $\{Q...\}$ , различные типы отказов (то есть, переменные отказов) могут быть представлены многомерным временным рядом (например,  $\{\{Q...\}\}$ ).

Шаги 712/742

На шаге 712 компьютер использует исторические машинные данные (и факультативно, данные об отказах, не показано) для (предварительного) обучения классификатора режимов работы (то есть, соподчиненного модуля 333

на фиг. 2). После обучения, классификатор режимов работы 333 может использовать исторические машинные данные для вычисления исторических индикаторов  $3\{Y...\}$  режимов работы. На этом этапе наблюдение (то есть, обработка экспертных аннотаций) не требуется.

5 На шаге 742 компьютер вычисляет исторические индикаторы  $3\{Y...\}$  режимов работы. Поскольку исторические машинные данные  $\{\{X...\}\}N$  становятся доступными синхронно с историческими индикаторами  $3\{Y...\}$  режимов работы, моменты времени  $tm$  не изменяются, при этом два вида данных образуют пары данных (в смысле автоматически сгенерированных аннотаций, в  
10 данном случае для индикаторов режимов работы).

Например,  $3\{Y...\}$  может представлять собой временной ряд, указывающий на альтернативный режим работы 1 в течение первого 24-часового промежутка, а режим 2 - в течение второго 24-часового промежутка.

15 Выгодным может быть то обстоятельство, что не требуется идентификация причины (например, использование инструмента 1 или 2 или другая семантика). Компьютер использует имеющиеся данные, а обучение с наблюдением или другие формы привлечения экспертов не требуются.

Шаги 722/762

20 На шаге 722 компьютер использует исторические машинные данные  $\{\{X...\}\}N$  и (факультативно) исторический индикатор  $3\{Y...\}$  режимов работы для обучения соподчиненных модулей 313, 323. После обучения соподчиненные модули 313, 323 могут выдавать промежуточные индикаторы  $1\{Y...\}$  и  $2\{Y...\}$  состояния. Например, промежуточные индикаторы  $1\{Y...\}$  и  $2\{Y...\}$  состояния могут быть представлены значениями, которые указывают на изменение с  
25 течением времени частоты, например ее повышение или понижение.

Хотя на чертеже этот шаг проиллюстрирован одним блоком, он подлежит выполнению для обоих соподчиненных модулей по отдельности (последовательно или параллельно).

30 На шаге 762 компьютер вновь использует исторические машинные данные  $\{\{X...\}\}N$  для вычисления промежуточных индикаторов  $1\{Y...\}$  и  $2\{Y...\}$  состояния, разумеется, исторических индикаторов. Например, оба промежуточных индикатора состояния указывают на историческое повышение частоты. (Хотя семантика не имеет значения.)

### Шаг 732

Исторические данные об отказах  $Q$  (реальные данные об отказах) становятся доступными даже ранее, и они могут быть использованы для сравнения с промежуточными индикаторами состояния. Получение таких данных об отказах может быть автоматическим. В прямолинейной реализации отказ представлен сигналом  $\{Q\dots\}$  датчика, опять-таки в виде временного ряда, указывающего на время отказа (реального его возникновения).

На шаге 732 компьютер использует исторические данные  $\{Q\dots\}$  об отказах, промежуточные индикаторы  $1\{Y\dots\}$  и  $2\{Y\dots\}$  состояния и индикатор  $3\{Y\dots\}$  режимов работы для обучения выходного модуля 362.

В результате обучения выходной модуль 362 преобразуется в выходной модуль 363 (фиг. 2), а соподчиненные модули преобразуются в модули с отсылками  $**3$ . Если придерживаться семантики примера, модуль 373 оказывается способным к обнаружению отказа в  $MODE\_1$  для возрастания частоты, причем  $t\_fail\_a$  и  $t\_fail\_b$  могут происходить между 10 и 14 часами с момента изменения режима работы (частота приближается к  $fR$ ). Для режима  $MODE\_2$  частоты также растут (но в сторону от  $fR$ ), и  $t\_fail$  имеет другое значение.

Другими словами, за счет разграничения режимов работы модульная схема 373 является способной к обеспечению прогнозирования с повышенной точностью по времени.

Каскадное обучение с разделением исторических данных

Фиг. 8 показывает упрощенную временную диаграмму каскадного обучения 802 в описанном на фиг. 7 варианте обучения.

Шаги соответствуют описанному на фиг. 7 шагу, но компьютер выполняет дополнительный шаг 852 (разделение исторических машинных данных, см. фиг. 6), а шаг 722 (фиг. 7) выполняется как шаг  $822@1$  для соподчиненного модуля 312/313 и как шаг  $822@2$  для соподчиненного модуля 322/323.

После обучения модуля классификатора режимов работы (на шаге 812) компьютер на шаге 842 вычисляет исторические индикаторы  $3\{Y\dots\}$  режимов работы. Затем  $3\{Y\dots\}$  могут быть использованы для разделения исторических машинных данных на аннотированные по режиму исторические данные  $\{\{X\dots @1\}\}N$  и  $\{\{X\dots @2\}\}N$ , как поясняет фиг. 6. (Шаги 842 и 852 могут быть реализованы в комбинации.)

В дальнейшем соподчиненные сети могут быть обучены по отдельности (шаг 822@1, 822@2) для получения промежуточных индикаторов  $1\{Y\dots\}$  и  $2\{Y\dots\}$  состояния.

5 Удобным является отсутствие разбиения исторических данных  $\{Q\dots\}$  об отказах. (Отказ, вызванный обстоятельствами в режиме  $MODE\_1$ , может произойти при работе установки в режиме  $MODE\_2$ , и наоборот).

Обзор способа

10 Фиг. 9 показывает схему последовательности операций компьютерно-реализуемого способа 203 прогнозирования отказа производственной установки. При осуществлении способа 203 компьютер использует схему обрабатывающих модулей, например модульную схему 373 на фиг. 2 или схему с дополнительными уровнями иерархии. Для удобства на чертеже показана схема последовательности операций совместно с условным представлением показанных на фиг. 2 данных  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

15 На приемном шаге 213 компьютер получает машинные данные ( $\{\{X\dots\}\}N$ ) от производственной установки 113 через первый, второй и третий соподчиненные обрабатывающие модули 313, 323, 333, которые предназначены для выдачи промежуточных данных  $1\{Y\dots\}$ ,  $2\{Y\dots\}$ ,  $3\{Y\dots\}$  в выходной обрабатывающий модуль 363. Схема 373 была предварительно обучена каскадным способом, см. 702/802 на фиг. 7-8.

20 Компьютер с помощью первого соподчиненного модуля 313 обрабатывает машинные данные 223А для выявления первого промежуточного индикатора  $1\{Y\dots\}$  состояния, с помощью второго соподчиненного модуля 323 обрабатывает машинные данные 223В для выявления второго промежуточного индикатора  $2\{Y\dots\}$  состояния, и с помощью третьего соподчиненного модуля 333, а именно модуля классификатора режимов работы, обрабатывает машинные данные 223С для выявления индикатора  $3\{Y\dots\}$  режима работы производственной установки 113 (для всех индикаторов дерева).

30 На шаге 243 компьютер обрабатывает первый и второй промежуточные индикаторы  $1\{Y\dots\}$ ,  $2\{Y\dots\}$  состояния и индикатор  $3\{Y\dots\}$  режима работы посредством выходного модуля 363. Таким образом, выходной модуль 363 прогнозирует отказ производственной установки 113, выдавая прогнозные данные  $\{Z\dots\}$ .

### Пример работы

Теперь модульная схема 373 при получении текущих машинных данных 153 (см. фиг. 1-2) оказывается способной к выявлению для фактического момента времени  $t_3$  (см. фиг. 3) индикаторов режима работы (модуль 333) и индикаторов состояния (модули 313, 323).

### Выбор машинных данных

Как уже было упомянуто, машинные данные  $\{\{X...\}\}$  могут представлять собой данные датчиков и другие данные.

Предполагается, что человек-эксперт не способен к выбору подмножества относящихся к делу (для прогнозирования отказов) машинных данных.

Поэтому выбор осуществляют модули (в процессе их обучения). При этом одни машинные данные могут быть обработаны с большим весом, а другие данные датчиков могут быть обработаны с меньшим весом.

Для данных, которые не относятся к данным датчиков, люди-эксперты могут обладать большей проницательностью в выборе (в этом случае эксперт может пометить некоторые данные как неотносящиеся к делу).

В некоторых реализациях подмножества  $\{\{X...\}\}N_1$  и  $\{\{X...\}\}N_2$  могут быть дополнительно разделены путем группировки временных рядов по переменным, см. элемент обозначения € на фиг. 2.

Использование созданных на основе модулей индикаторов (например, индикатора режима работы)

В современных промышленных условиях можно ожидать, что производственные установки окажутся подвержены частому изменению режимов работы. Одной из причин этого может быть тенденция к понижению серийности производства. Не для всех установок, но для некоторых, частота изменения режима работы (число изменений режима работы за единицу времени) может быть связана с отказами.

Изменения режимов работы в качестве производных индикаторов режимов

На фиг. 10 показана содержащая индикаторы  $3\{Y...\}$  режима работы временная последовательность для двух режимов (MODE\_1 «черный» и MODE\_2 «белый»). Временные окна (одинаковой длительности, имеющие предварительно заданное число временных промежутков  $\Delta t$  в каждом окне) связаны с числом изменений режима работы (от MODE\_1 до MODE\_2 или

наоборот). Данный подход можно рассматривать как получение функции режима по времени.

Компьютер может определять скорости изменения режима работы путем обработки выходных данных классификатора режимов работы (см. фиг. 2), и скорость может быть другим входным значением для выходного модуля 363. Скорость изменения режимов работы может быть рассчитана для текущих данных и для исторических данных. Фиг. 2 в качестве иллюстрации этой дополнительной операции показывает модуль 374 вычисления индикатора режима работы, расположенный между классификатором 333 и выходным модулем 363.

Хотя фиг. 10 является упрощенной за счет показа только двух режимов, количественная оценка изменения режимов работы может быть проведена и для других сценариев.

Альтернативно, число временных промежутков не обязательно должно быть задано предварительно. Возможной также является кластеризация, позволяющая выделять кластеры по различным длительностям окна и/или по различным частотам при осуществлении изменений режима работы.

Фиг. 11 показывает диаграмму переходов состояний (для 5 режимов или состояний), иллюстрирующую переходы между режимами. Одна диаграмма может быть применена к одному временному окну (фиг. 10) и может показывать осуществление переходов между режимами (например, А в В, В в С, С в D и наоборот, и тому подобное). На чертеже число осуществлений переходов обозначено толщиной линий, причем наиболее заметным является переход D в А. В любом случае, для других временных окон эти числа могут быть отличными. Опять-таки, число осуществления переходов для каждого конкретного перехода может являться входными данными для выходного модуля 362/363.

Расчет может быть выполнен, например, посредством модуля 374 вычисления индикатора (см. фиг. 2).

Альтернативно, в данном случае также является возможной кластеризация, например, для группировки переходов и, например, для выделения режимов с высоким или низким уровнем подрежимных переходов. Несколько предоставляющих исторические данные установок

Фиг. 12 показывает несколько производственных установок  $111\alpha$ ,  $111\beta$  и  $111\gamma$ , а также исторические временные ряды, содержащие машинные данные  $\{\{X...\}\}N$ , и исторические временные ряды, содержащие данные  $\{Q...\}$  об отказах. Для простоты на чертеже использованы не все имеющиеся индексы.

5 Как уже было сказано выше, данные могут быть недоступными в достаточном объеме. На чертеже показано несколько производственных установок, предоставляющих исторические машинные данные  $X$  и исторические данные  $Q$  об отказах. Чертеж символизирует, что в идеальных условиях временные ряды с данными являются доступными в числе, равном числу  
10 временных рядов на установку, умноженному на число установок (наличие 3 установок  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  является всего лишь упрощением).

Для обучения способу 702/802 компьютер (обучаемая схема 372) обрабатывает временной ряд  $\{\{X...\}\}N$  и временной ряд  $\{Q...\}$  при  $N+1$  входных переменных за один раз. Затем компьютер переходит к следующему  
15 временному ряду.

Возможной является обработка компьютером последовательных временных рядов (1), (2) - (Q), таких как  $\{\{X...\}\}N$ , а также  $\{Q...\}$  в рамках «единовременного ввода», упомянутого относительно фиг. 1Б. Специалист может организовать повторение для  $\alpha$ , для  $\beta$ , для  $\gamma$  или даже позволить  
20 компьютеру сразу обрабатывать  $\alpha\{\{X...\}\}N$ ,  $\beta\{\{X...\}\}N$ ,  $\gamma\{\{X...\}\}N$ ,  $\alpha\{Q...\}$ ,  $\beta\{Q...\}$ ,  $\gamma\{Q...\}$ . Возможными являются и другие варианты обработки.

Компенсация отсутствующих переменных за счет использования виртуальных датчиков и переноса обучения Сценарии с несколькими установками, такие как описанный на фиг. 12 сценарий, в идеале должны  
25 работать с машинными данными (и данными об отказах) из практически одинаковых источников. Например, одномерный временной ряд  $a\{X...\}n$  должен быть похож на одномерный временной ряд  $|3\{X...\}n$ , поскольку датчики для переменной  $n$  представлены датчиками одного и того же типа, как на установке  $\alpha$ , так и на установке  $\beta$ . Однако не все установки оснащены одинаковыми  
30 датчиками. Далее в описании рассмотрен подход к преодолению таких ограничений.

На фиг. 13 показаны различные производственные установки в рамках подхода к согласованию машинных данных (и возможно, данных об отказах  $Q$ ).

Согласование может быть применено как для исторических данных (фаза \*\*1), так и для текущих данных (фаза \*\*3).

На чертеже повторены производственные установки 111 $\alpha$ , 111 $\beta$  и 111 $\gamma$  (из фиг. 12), но указана различная доступность машинных данных. Установка  $\alpha$  должна иметь обычное число  $N$  переменных, установке  $\beta$  не хватает одной переменной ( $N-1$  переменных), а установка  $\gamma$  должна иметь большее число переменных ( $N+1$  переменных).

На чертеже показаны устройства 382 $\beta$  и 382 $\gamma$  согласования данных. Устройство 382 $\beta$  согласования данных обеспечивает получение недостающих данных посредством виртуального датчика (в данном случае  $X_n$ ), а устройство 382 $\gamma$  согласования данных фильтрует поступающие данные (то есть, убирает лишние данные).

Чертеж является упрощенным, недостаток и избыток данных зависят от вклада тех или иных переменных в прогнозирование. Некоторые машинные данные (то есть, некоторые переменные в этих данных) попросту не имеют значения для прогнозирования отказа.

Оба устройства согласования используют модули, которые посредством переноса обучения были предварительно обучены (в ходе обозначаемых \*\*1 фаз). Например, установки  $\alpha$  и  $\gamma$  могут выступать в роли ведущих устройств для обучения устройства 382 $\beta$  согласования виртуализации датчика  $X_n$ . Или, например, установки  $\alpha$  и  $\beta$  могут выступать в роли ведущих устройств для обучения игнорированию конкретного набора данных.

Как показано на чертеже, устройства согласования не изменяют данные {Q...} об отказах.

Обученная посредством переноса обучения модель машинного обучения с доменной адаптацией обрабатывает исторические машинные данные (полученные в виде многомерных временных рядов от нескольких производственных установок определенного типа, но из нескольких доменов). Исторические машинные данные отображают состояния соответствующих установок из нескольких доменов. Как правило, несколько сотен или тысяч датчиков на установку измеряют рабочие параметры, такие как, например, температура, давление, содержание химикатов и тому подобное (ср. относительно большое число  $N$  переменных). Такие измеренные параметры в конкретный момент времени определяют соответствующее состояние установки

в этот момент. Вследствие наличия множества характеристик каждой установки (например, режим работы, размер, входной материал, например, состав материала, и тому подобное) не является возможным прямое сравнение двух установок (исходной и целевой) без применения специального преобразования многомерных данных временных рядов.

При этом могут быть использованы различные подходы к переносу обучения. Например, модель машинного обучения с доменной адаптацией может быть реализована посредством нейронной сети глубокого обучения с конволюционными и/или рекуррентными слоями, обученной извлекать инвариантные к домену признаки из исторических машинных данных в качестве первого набора инвариантных к домену данных. Перенос обучения может быть реализован для извлечения инвариантных к домену признаков из исторических машинных данных. Признак в глубоком обучении является абстрактным представлением характеристик конкретной установки, извлекаемым из полученных в результате работы этой установки многомерных временных рядов данных. Посредством применения переноса обучения, из множественных реальных установок можно извлекать инвариантные к домену признаки, которые не зависят от конкретного типа (то есть, не зависят от различных доменов).

В рамках альтернативного подхода модель машинного обучения с доменной адаптацией может быть обучена нескольким отображениям соответствующих исходных данных от нескольких установок на опорную установку. В качестве опорной установки может выступать представляющая собой некую усредненную установку виртуальная установка или реальная установка. Каждое отображение представляет собой представление преобразования соответствующей конкретной установки в опорную установку. При таком подходе несколько отображений соответствуют первому набору инвариантных к домену данных. Например, такая модель машинного обучения с доменной адаптацией может быть реализована с помощью генеративной архитектуры глубокого обучения, основанной на архитектуре CycleGAN. Эта архитектура получила широкое распространение в другой области применения - для генерации искусственных (или «фальшивых») изображений. CycleGAN является расширением архитектуры GAN, в рамках которого происходит одновременное обучение двух моделей-генераторов и двух моделей-дискриминаторов. Один генератор принимает на вход данные из первого домена

и выдает данные для второго домена, а другой генератор принимает на вход данные из второго домена и выдает данные для первого домена. Модели-дискриминаторы используются для выявления степени правдоподобности сгенерированных данных и соответствующего обновления моделей-генераторов.

5 В CycleGAN используется дополнительное расширение архитектуры, называемое согласованностью циклов. Идея заключается в том, что выданные первым генератором данные могут быть использованы в качестве входных для второго генератора, и выходные данные второго генератора должны совпадать с исходными данными. Верно и обратное: выходной результат второго генератора  
10 может быть подан на вход первого генератора, и результат должен соответствовать входному сигналу второго генератора.

Согласованность циклов является концепцией машинного перевода, согласно которой фраза, переведенная с английского на французский, должна переводиться с французского обратно на английский и быть идентичной  
15 исходной фразе. Обратный процесс также должен быть верным. CycleGAN поддерживает согласованность циклов путем добавления дополнительной потери, измеряющей разницу между выходным сигналом второго генератора и исходным изображением, и наоборот. Результатом такого действия является унификация моделей-генераторов, что направляет процесс генерации  
20 изображений в новой области в сторону преобразования изображений. Для адаптации оригинальной архитектуры CycleGAN к обработке изображений и многомерных временных рядов с целью получения первого набора инвариантных к домену данных могут быть реализованы модификации с использованием рекуррентных слоев (на примере LSTM) в сочетании с  
25 конволюционными слоями для изучения временной зависимости многомерных временных рядов, что подробно описано в работе:

C. Schockaert, H. Hoyez, (2020) «MTS-CycleGAN: An Adversarial-based Deep Mapping Learning Network for Multivariate Time Series Domain Adaptation Applied to the Ironmaking Industry», In arXiv: 2007.07518.

30 Обзор по переносу обучения можно также найти в следующих работах: Fuzhen Zhuang, Zhiyuan Qi, Keyu Duan, Dongbo Xi, Yongchun Zhu, Hengshu Zhu, Hui Xiong, Qing He: «A Comprehensive Survey on Transfer Learning» arXiv:1911.02685

### Компенсация путем моделирования

Фиг. 14 показывает машинные данные в виде двумерного временного ряда  $\{\{X_{i,t}\}\}_N$  для  $N=2$ , где первый временной ряд поступает от датчиков 135 (как в обычной ситуации, см. датчик 130 на фиг. 5), а второй временной ряд поступает от процессора 165 обработки данных.

Например, инструмент (140 на фиг. 5) со временем теряет остроту. Датчик для измерения этого параметра может отсутствовать, а настройка виртуального датчика также может быть затруднена (ведущее устройство может отсутствовать, поскольку измерение остроты является затруднительным).

Процессор 165 обработки данных может быть реализован посредством использующего экспертные формулы компьютера. Например, специалисты могут соотносить имеющиеся данные для расчета снижения остроты с течением времени и, тем самым, для расчета момента, когда инструмент необходимо заменить (или заточить)). В качестве примера можно привести такие данные, как время монтажа инструмента в установке, число операций, число объектов и тому подобное.

Альтернативно, процессор 165 обработки данных может быть реализован как выполняющий моделирование компьютер. В этом случае компьютер может работать, как описано выше, не для прогнозирования отказа установки в целом, но для прогнозирования отказа инструмента («перестал быть острым» - условие отказа). Настройка моделирующей программы предположительно требует лишь минимального взаимодействия с людьми-экспертами.

Приведенный выше принцип обнаружения отказов может быть применен и к частям установок. Инструмент рано или поздно выходит из строя. Это может привести к двум последствиям:

- во-первых, отказ инструмента является конкретным видом отказа (который можно прогнозировать как таковой),
- во-вторых, отказ инструмента может быть смоделирован и использован в качестве исходных данных.

### Специфичное для конкретного режима обучение

Фиг. 7 в сочетании с фиг. 8 иллюстрирует возможность отдельного обучения соподчиненных модулей для различных режимов работы. Предполагая наличие двух соподчиненных модулей (как на фиг. 2), классификатор режимов работы может различать исторические данные по

режимам так, что первый модуль обучается на данных MODE\_1, а второй обучается на данных MODE\_2.

Для текущих данных оба модуля выдают промежуточные индикаторы состояния (например, 1{Y...} и 2{Y...}) и не получают индикацию режима, см.

5 фиг. 2.

Поэтому первый модуль создает ненужные данные каждый раз, когда машина работает в режиме MODE\_2 (и наоборот, для второго модуля). Но поскольку классификатор 333 режимов работы предоставляет индикатор режима (текущие данные) 3{Y...}, выходная сеть может игнорировать (после ее

10

обучения) некоторые промежуточные данные. В общем случае, поскольку модуль классификатора режимов выполняет кластеризацию, число кластеров может быть больше двух. Обеспечена возможность динамического добавления или удаления соподчиненных модулей (не являющихся классификаторами режимов) в зависимости от числа кластеров режимов.

15

Специфичное для конкретного режима смещение

Согласно топологии на фиг. 2, индикатор 3{Y...} режима работы поступает на выходной модуль 363. В некоторых реализациях индикатор может также выполнять функцию смещения для соподчиненных модулей 313 и 323.

20

Типовой компьютер

Фиг. 15 показывает пример типового компьютерного устройства, которое может быть использовано в рамках описанных в настоящем документе способов.

Чертеж представляет собой схему, на которой показан пример типового вычислительного устройства 900 и типового мобильного вычислительного

25

устройства 950, которые могут быть использованы в рамках описанных в настоящем документе способов. Вычислительное устройство 900 выступает в качестве примера различных видов цифровых компьютеров, таких как ноутбуки, настольные компьютеры, рабочие станции, карманные персональные компьютеры, серверы, сверхкомпактные серверы, мэйнфреймы и другие

30

подходящие компьютеры. Вычислительное устройство 950 может выступать в качестве примера различных видов мобильных устройств, таких как карманные персональные компьютеры, сотовые телефоны, смартфоны, системы помощи водителю или бортовые компьютеры автомобилей и другие подобные вычислительные устройства. Например, вычислительное устройство 950 может

быть использовано пользователем (например, оператором производственной установки) в качестве клиентского компонента для взаимодействия с вычислительным устройством 900. Показанные здесь компоненты, их соединения и взаимосвязи, а также их функции приведены только в качестве примера и не ограничивают реализации описанных и/или заявленных в настоящем документе изобретений.

Вычислительное устройство 900 включает в себя процессор 902, память 904, устройство 906 хранения данных, соединяющий память 904 с высокоскоростными портами 910 расширения высокоскоростной интерфейс 908 и соединяющий низкоскоростную шину 914 и устройство 906 хранения данных низкоскоростной интерфейс 912. Все компоненты 902, 904, 906, 908, 910 и 912 соединены между собой различными шинами и могут быть установлены на общей материнской плате или другим способом. Процессор 902 может обрабатывать команды для выполнения в вычислительном устройстве 900, включая сюда хранящиеся в памяти 904 или на устройстве 906 хранения данных команды для отображения графической информации графического интерфейса пользователя на внешнем устройстве ввода/вывода, например, на подключенном к высокоскоростному интерфейсу 908 дисплее 916. В других реализациях могут быть использованы несколько процессоров и/или несколько шин, а также несколько видов и типов памяти. Кроме того, может быть подключено несколько вычислительных устройств 900, каждое из которых обеспечивает выполнение части необходимых операций (например, в виде банка серверов, группы сверхкомпактных серверов или многопроцессорной системы).

Память 904 хранит информацию в пределах вычислительного устройства 900. В одной реализации память 904 представляет собой энергозависимый блок или блоки памяти. В другой реализации память 904 представляет собой энергонезависимый блок или блоки памяти. Память 904 может также представлять собой другую форму считываемого компьютером носителя, например, магнитный или оптический диск. Устройство 906 хранения данных способно к обеспечению массового хранения данных для вычислительного устройства 900. В одной реализации устройство 906 хранения данных может представлять собой или содержать компьютерно-читаемый носитель, такой как дискета, жесткий диск, оптический диск или лента, флэш-память или другое подобное твердотельное запоминающее устройство, или массив устройств,

включая сюда устройства в сети хранения данных или другие конфигурации. Компьютерный программный продукт может быть материально воплощен на носителе информации. Компьютерный программный продукт может также содержать команды, которые при их выполнении осуществляют один или несколько способов, например, описанных выше. Носителем информации является считываемый компьютером или машиночитаемый носитель, например, память 904, устройство 906 хранения данных или память процессора 902. Высокоскоростной контроллер 908 управляет операциями, требующими большой пропускной способности вычислительного устройства 900, а низкоскоростной контроллер 912 - операциями, требующими меньшей пропускной способности. Такое распределение функций является лишь примерным. В одной реализации высокоскоростной контроллер 908 соединен с памятью 904, дисплеем 916 (например, через графический процессор или ускоритель) и с высокоскоростными портами 910 расширения, которые могут принимать различные платы расширения (не показаны). В данной реализации низкоскоростной контроллер 912 соединен с устройством 906 хранения данных и с низкоскоростным портом 914 расширения. Низкоскоростной порт расширения, который может включать в себя различные коммуникационные порты (например, USB, Bluetooth, Ethernet, беспроводной Ethernet), может быть соединен с одним или несколькими устройствами ввода/вывода, такими как клавиатура, указывающее устройство, сканер, или с сетевым устройством, таким как коммутатор или маршрутизатор, например, через сетевой адаптер.

Вычислительное устройство 900 может быть реализовано в различных формах, как показано на чертеже. Например, оно может быть реализовано в виде стандартного сервера 920 или нескольких таких серверов в группе. Оно также может быть реализовано как часть стоечной серверной системы 924. Кроме того, оно может быть реализовано в виде персонального компьютера, например ноутбука 922. Альтернативно, компоненты вычислительного устройства 900 могут быть объединены с другими компонентами в мобильном устройстве (не показано), например, в устройстве 950. Каждое из таких устройств может содержать одно или несколько вычислительных устройств 900, 950, а вся система может состоять из нескольких взаимодействующих друг с другом вычислительных устройств 900, 950.

Вычислительное устройство 950 включает в себя процессор 952, память 964, устройство ввода-вывода, например дисплей 954, интерфейс 966 связи, приемопередатчик 968 и другие компоненты. Устройство 950 также может быть снабжено устройством хранения данных, например микродиском или другим устройством, для обеспечения дополнительной памяти. Все компоненты 950, 952, 964, 954, 966 и 968 соединены между собой с помощью различных шин, а несколько компонентов могут быть установлены на общей материнской плате или другим способом, если это необходимо.

Процессор 952 может выполнять команды в вычислительном устройстве 950, включая сюда хранящиеся в памяти 964 команды. Процессор может быть реализован в виде набора микросхем, включающего в себя отдельные и множественные аналоговые и цифровые процессоры. Процессор может обеспечивать, например, координацию работы других компонентов устройства 950, таких как схема управления пользовательскими интерфейсами, выполняемые устройством 950 приложения и беспроводная связь устройства 950.

Процессор 952 может взаимодействовать с пользователем через интерфейс 958 управления и соединенный с дисплеем 954 интерфейс 956 отображения. Дисплей 954 может представлять собой, например, TFT LCD (тонкопленочный транзисторный жидкокристаллический дисплей) или OLED (органический светоизлучающий диодный дисплей) или он может быть основан на другой подходящей технологии отображения. Интерфейс 956 дисплея может включать в себя соответствующую схему управления дисплеем 954 для отображения графической и другой информации пользователю. Интерфейс 958 управления может принимать команды от пользователя и преобразовывать их для передачи в процессор 952. Кроме того, внешний интерфейс 962 может быть связан с процессором 952 для обеспечения связи в ближней зоне устройства 950 с другими устройствами. Внешний интерфейс 962 может обеспечивать, например, проводную связь в некоторых реализациях или беспроводную связь в других реализациях, также могут быть использованы несколько интерфейсов.

Память 964 хранит информацию в пределах вычислительного устройства 950. Память 964 может быть реализована в виде одного или нескольких считываемых компьютером носителей информации, энергозависимого блока или блоков памяти или энергонезависимого блока или блоков памяти.

Дополнительная память 984 также может быть предусмотрена и подключена к устройству 950 через интерфейс 982 расширения, который может включать в себя, например, интерфейс карты SIMM (Single In Line Memory Module - Модуль памяти с однорядным расположением выводов). Такая дополнительная память 5 984 может обеспечивать дополнительное пространство для хранения данных в устройстве 950, а также хранить приложения или другую информацию для устройства 950. Конкретнее, дополнительная память 984 может содержать команды для выполнения или дополнения описанных выше процессов, а также может содержать защищенную информацию. Так, например, дополнительная 10 память 984 может выступать в качестве модуля безопасности для устройства 950 и может быть запрограммирована с помощью команд, позволяющих безопасно использовать устройство 950. Кроме того, защищенные приложения могут быть предоставлены посредством SIMM-карт совместно с дополнительной информацией, например, в виде размещения идентифицирующей информации на 15 SIMM-карте в невзламываемом виде.

Память может включать в себя, например, флэш-память и/или NVRAM-память, о чем сказано ниже. В одной реализации компьютерный программный продукт имеет материальное воплощение на носителе информации. 20 Компьютерный программный продукт содержит команды, которые при их выполнении осуществляют один или несколько способов, например, описанных выше. Носитель информации представляет собой считываемый компьютером или машиночитаемый носитель, такой как память 964, дополнительная память 984 или память на процессоре 952, который носитель может получать свое содержимое, например, через приемопередатчик 968 или внешний интерфейс 25 962.

Устройство 950 может осуществлять беспроводную связь через интерфейс 966 связи, который при необходимости может включать в себя схемы цифровой обработки сигнала. Интерфейс 966 связи может обеспечивать связь в различных режимах или протоколах, таких как, среди прочего, голосовые вызовы GSM, обмен сообщениями SMS, EMS или MMS, CDMA, TDMA, PDC, WCDMA, 30 CDMA2000 или GPRS. Такая связь может быть осуществлена, например, посредством радиочастотного приемопередатчика 968. Кроме того, возможной является связь на коротких расстояниях, например, с помощью Bluetooth, WiFi или другого подобного приемопередатчика (не показан). Кроме того, модуль 980

приемника GPS (Global Positioning System) может предоставлять устройству 950 дополнительные данные, связанные с навигацией и местоположением, которые могут быть использованы работающими на устройстве 950 приложениями.

5 Устройство 950 может также осуществлять звуковую связь с помощью аудиокодека 960, который может принимать устную информацию от пользователя и преобразовывать ее в пригодную для использования цифровую информацию. Аудиокодек 960 может также генерировать звуковой сигнал для пользователя, например, посредством динамика, например, в трубке устройства 10 950. Такой звук может включать в себя звук голосовых телефонных вызовов, записанный звук (например, голосовые сообщения, музыкальные файлы и тому подобное), а также звук, генерируемый работающими на устройстве 950 приложениями.

Вычислительное устройство 950 может быть реализовано в различных формах, как показано на чертеже. Например, оно может быть реализовано в виде 15 сотового телефона 980. Оно также может быть реализовано как часть смартфона 982, карманного персонального компьютера или другого подобного мобильного устройства.

Различные реализации описанных в данном случае систем и способов могут быть воплощены в цифровых электронных схемах, интегральных схемах, 20 специально разработанных интегральных схемах ASIC (application specific integrated circuits), компьютерном оборудовании, микропрограммах, программном обеспечении и/или их комбинациях. Эти различные реализации могут включать в себя реализацию в одной или нескольких компьютерных программах, исполняемых и/или интерпретируемых на программируемой схеме, 25 включающей в себя по меньшей мере один программируемый процессор, который может быть представлен специализированным процессором или процессором общего назначения, соединенным по меньшей мере с одним устройством ввода и по меньшей мере с одним устройством вывода для приема данных и команд из системы памяти и для передачи данных и команд в систему 30 памяти. Эти компьютерные программы (также известные как программы, программное обеспечение, программные приложения или код) включают в себя машинные команды для программируемого процессора и могут быть реализованы на процедурном и/или объектно-ориентированном языке программирования высокого уровня, и/или на языке ассемблера/машинном

языке. В настоящем документе термины «машиночитаемый носитель» и «компьютерный носитель» относятся к любому программному продукту, аппарату и/или устройству (например, магнитным дискам, оптическим дискам, памяти, программируемым логическим устройствам (ПЛИС)), используемым для предоставления машинных команд и/или данных программируемому процессору, включая сюда машиночитаемый носитель, который получает машинные команды в виде машиночитаемого сигнала. Термин «машиночитаемый сигнал» относится к любому сигналу, используемому для предоставления машинных команд и/или данных программируемому процессору.

Для обеспечения взаимодействия с пользователем описанные в данном документе системы и способы могут быть реализованы на компьютере, имеющем устройство отображения (например, ЭЛТ (катодно-лучевую трубку) или ЖК (жидкокристаллический дисплей)) для вывода информации пользователю, а также клавиатуру и указывающее устройство (например, мышь или трекбол), с помощью которых пользователь может вводить данные в компьютер. Для взаимодействия с пользователем могут быть использованы и другие устройства, например, обратная связь с пользователем может быть представлена любой формой обратной связи (например, визуальной, слуховой или тактильной), а ввод от пользователя может быть осуществлен в любой форме, включая сюда акустическую, речевую или тактильную.

Описанные в настоящем документе системы и способы могут быть реализованы в вычислительном устройстве, которое включает в себя внутренний компонент (например, сервер данных), или которое включает в себя промежуточный компонент (например, сервер приложений), или которое включает в себя клиентский компонент (например, клиентский компьютер с графическим интерфейсом пользователя или интернет-браузер, посредством которого пользователь может взаимодействовать с реализацией описанных в настоящем документе систем и способов), или любую комбинацию таких внутренних, промежуточных или клиентских компонентов. Компоненты системы могут быть соединены между собой с помощью любой формы или среды передачи цифровых данных (например, коммуникационной сети). Примерами коммуникационных сетей могут служить локальная сеть (LAN), глобальная сеть (WAN) и Интернет.

Вычислительное устройство может включать в себя клиенты и серверы. Клиент и сервер, как правило, удалены друг от друга и обычно взаимодействуют через сеть связи. Отношения клиента и сервера возникают в силу того, что компьютерные программы выполняются на соответствующих компьютерах и находятся в отношениях клиент-сервер друг с другом.

5  
Описаны несколько вариантов осуществления изобретения. Тем не менее, следует понимать, что в них могут быть внесены различные изменения, не выходящие за рамки духа и объема изобретения.

10  
Кроме того, изображенные на чертежах логические потоки не требуют определенного порядка следования или последовательности для достижения требуемых результатов. Кроме того, в описанные потоки могут быть введены другие шаги или из них исключены некоторые шаги, а в описанные системы могут быть добавлены другие компоненты или из них исключены некоторые компоненты. Соответственно, другие варианты осуществления изобретения  
15  
входят в объем приведенной ниже формулы изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Компьютерно-реализуемый способ (203) прогнозирования отказов  
производственной установки (113), причем способ используют схему (373)  
5 обрабатывающих модулей (313, 323, 333, 363), причем способ (203) включает в  
себя:

получение (213) машинных данных ( $\{\{X...\}\}N$ ) от производственной  
установки (113) посредством первого, второго и третьего соподчиненных  
обрабатывающих модулей (313, 323, 333), которые расположены для выдачи  
10 промежуточных данных ( $1\{Y...\}$ ,  $2\{Y...\}$ ,  $3\{Y...\}$ ) на выходной обрабатывающий  
модуль (363), причем схему (373) предварительно обучают путем каскадного  
обучения (702/802),

обработку (223А) машинных данных для выявления первого  
промежуточного индикатора ( $1\{Y...\}$ ) состояния посредством первого  
15 соподчиненного обрабатывающего модуля (313),

обработку (223В) машинных данных для выявления второго  
промежуточного индикатора ( $2\{Y...\}$ ) состояния посредством второго  
соподчиненного обрабатывающего модуля (323),

обработку (223С) машинных данных для выявления индикатора ( $3\{Y...\}$ )  
20 режима работы производственной установки (113) посредством третьего  
соподчиненного обрабатывающего модуля (333), который является модулем-  
классификатором режимов работы, и

обработку (243) первого и второго промежуточных индикаторов ( $1\{Y...\}$ ,  
 $2\{Y...\}$ ) состояния и индикатора ( $3\{Y...\}$ ) режима работы посредством  
25 выходного обрабатывающего модуля (363), причем выходной обрабатывающий  
модуль (363) прогнозирует отказ производственной установки (113) посредством  
предоставления прогнозных данных ( $\{Z...\}$ ).

2. Способ по п. 1, причем компьютер использует схему (373), обученную  
30 в соответствии со следующей последовательностью обучения:

обучение (712, 812) третьего соподчиненного обрабатывающего модуля  
(333) по историческим машинным данным ( $\{\{X...\}\}N$ ),

функционирование (742) обученного третьего соподчиненного обрабатывающего модуля (333) для получения исторического индикатора (3{Y...}) режима путем обработки исторических машинных данных ({{X...}}N),

5 обучение (722, 822) первого и второго соподчиненных обрабатывающих модулей (312, 322) по историческим машинным данным ({{X...}}N) и по историческому индикатору (3{Y...}) режима,

10 функционирование (762, 862) обученных первого и второго соподчиненных обрабатывающих модулей (312, 322) для получения первого и второго промежуточных индикаторов (1{Y...}, 2{Y...}) состояния путем обработки исторических машинных данных ({{X...}}N), и

обучение (732, 832) выходного обрабатывающего модуля (362) по историческому индикатору режима, по историческим машинным данным, и по историческим данным ({{Q...}}) об отказах.

15 3. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем выявление индикатора (3{Y...}) режима работы выполняют посредством классификатора (333) режимов работы, обученного на основе исторических машинных данных, которые были аннотированы человеком-экспертом.

20 4. Способ по п. 3, причем экспертно-аннотированные исторические машинные данные представляют собой данные датчиков.

25 5. Способ по одному из п.п. 1 или 2, причем классификатор (333) режимов работы обучают на основе исторических машинных данных так, что в процессе обучения классификатор (333) режимов работы группирует времена (tm) работы установки в кластеры сегментов (segm\_1/3, segm\_2/4) временного ряда.

30 6. Способ по п. 5, причем кластеры сегментов (segm\_1/3, segm\_2/4) временного ряда соотносят с индикаторами (MODE\_1, MODE\_2) режима работы, которые выбирают из соотнесенных автоматическим образом или при взаимодействии с человеком-экспертом.

7. Способ по одному из п.п. 1-6, причем индикатор режима работы снабжают указателем числа изменений режима работы с течением времени.

5 8. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем индикаторы (1{Y...}, 2{Y...}) состояния выбирают из текущих индикаторов, которые указывают на текущее состояние, и из прогнозирующих индикаторов, которые указывают на состояние в будущем.

10 9. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем выходной обрабатывающий модуль (363) прогнозирует отказ производственной установки по параметру, выбранному из следующих: наработка на отказ, тип отказа, остаточный срок службы, временной промежуток наступления отказа.

15 10. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем индикатор (3{Y...}) режима работы дополнительно служит в качестве смещения, которое обрабатывают как первый, так и второй соподчиненные обрабатывающие модули (313, 323).

20 11. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем получение машинных данных осуществляют путем получения подмножества данных датчиков, и причем выявление первого и второго промежуточных индикаторов состояния осуществляют посредством первого и второго соподчиненных обрабатывающих модулей, которые обрабатывают подмножества данных датчиков.

25 12. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем получение машинных данных (213) включает в себя получение машинных данных через устройства (382β, 382γ) согласования данных, которые, в зависимости от вклада машинных данных в прогнозирование отказов, предоставляют виртуальные  
30 машинные данные посредством виртуального датчика или фильтруют входящие машинные данные.

13. Способ по п. 12, причем получение машинных данных (213) через устройства (382β, 382γ) согласования данных включает в себя получение

машинных данных от устройств согласования, имеющих заблаговременно обученные посредством переноса обучения обрабатывающие модули.

5 14. Способ по одному из предшествующих пунктов, причем получение машинных данных (213) включает в себя получение машинных данных, которые, по меньшей мере, частично дополнены полученными в результате моделирования данными.

10 15. Применение способа прогнозирования отказа производственной установки (113) по одному из п.п. 1-14 путем передачи прогнозных данных ( $\{Z...\}$ ) в управляющий установкой контроллер установки.

15 16. Применение способа прогнозирования отказа производственной установки (113) по п. 15, причем контроллер установки позволяет промышленной установке переход в режим, для которого прогнозируется наибольшая наработка на отказ.

20 17. Применение способа прогнозирования отказа производственной установки (113) по п. 15, причем контроллер установки позволяет промышленной установке переход в режим, для которого время обслуживания установки является самым поздним.

25 18. Производственная установка (113), выполненная для предоставления машинных данных ( $\{\{X...\}\}N$ ) компьютеру, выполненному для осуществления способа по одному из п.п. 1-14, и, кроме того, выполненная для получения прогнозных данных ( $\{Z...\}$ ) от компьютера, причем производственная установка (113) связана с контроллером установки, который переключает режимы работы производственной установки в соответствии с предварительно заданными целями оптимизации.

30 19. Производственная установка (113) по п. 18, причем предварительно заданные цели оптимизации выбирают из следующих: откладывание технического обслуживания на наиболее длительный срок, работа в режиме, для которого прогнозируется наиболее позднее наступление отказа.

20. Производственная установка (113) по одному из п.п. 18-19, выбранная из такого оборудования, как: химические реакторы, металлургические печи, технологические емкости, насосы, двигатели и силовые установки.

5

21. Компьютерно-реализуемый способ (702/802) обучения модульной схемы (372), имеющей соединенные с выходным обрабатывающим модулем (362) первый, второй и третий соподчиненные обрабатывающие модули (312, 322, 332) для наделения модульной схемы (372) способностью к предоставлению прогнозирующего отказ производственной установки индикатора ( $\{Z\dots\}$ ) отказа, причем способ включает в себя применение каскадного обучения, охватывающего собой обучение соподчиненных обрабатывающих модулей (312, 322, 332), последующее функционирование обученных соподчиненных модулей, и последующее обучение выходного обрабатывающего модуля, причем каскадное обучение включает в себя:

10

15

обучение (712, 812) третьего соподчиненного обрабатывающего модуля (333) по историческим машинным данным ( $\{\{X\dots\}\}N$ ),

20

функционирование (742) обученного третьего соподчиненного обрабатывающего модуля (333) для получения исторического индикатора ( $3\{Y\dots\}$ ) режима путем обработки исторических машинных данных ( $\{\{X\dots\}\}N$ ),

обучение (722, 822) первого и второго соподчиненных обрабатывающих модулей (312, 322) по историческим машинным данным ( $\{\{X\dots\}\}N$ ) и по историческому индикатору ( $3\{Y\dots\}$ ) режима,

25

функционирование (762, 862) обученных первого и второго соподчиненных обрабатывающих модулей (312, 322) для получения первого и второго промежуточных индикаторов ( $1\{Y\dots\}$ ,  $2\{Y\dots\}$ ) состояния путем обработки исторических машинных данных ( $\{\{X\dots\}\}N$ ), и

30

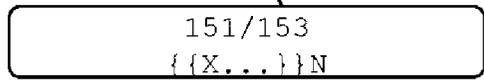
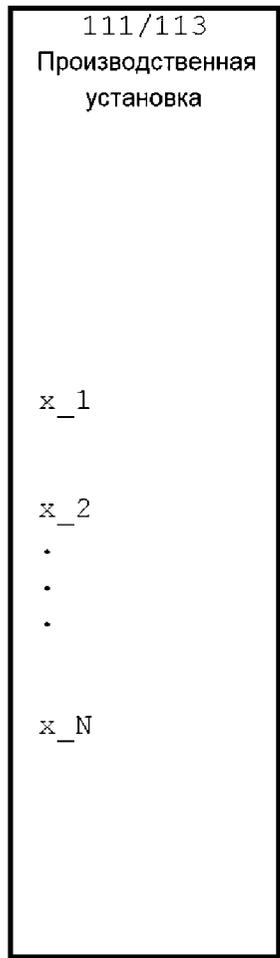
обучение (732, 832) выходного обрабатывающего модуля (362) по историческому индикатору режима, по историческим машинным данным, и по историческим данным ( $\{Q\dots\}$ ) об отказах.

22. Компьютерный программный продукт, который, будучи загруженным в память компьютерной системы и исполняемым посредством по меньшей мере одного процессора компьютерной системы, побуждает компьютерную систему к

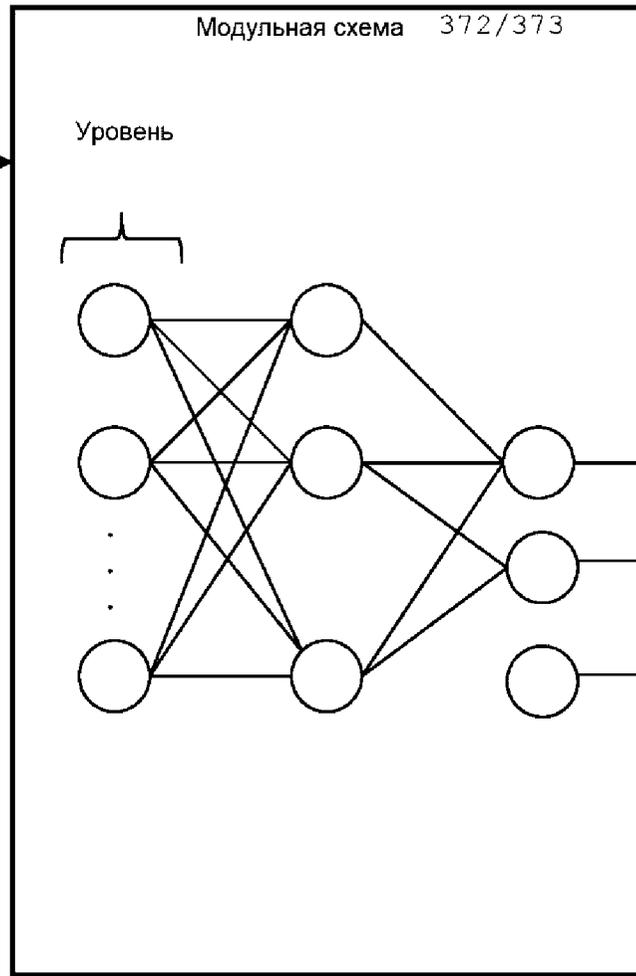
выполнению шагов компьютерно-реализуемого способа по одному из п.п. 1-14 или п. 21.

5 23. Компьютерная система, содержащая несколько обрабатывающих модулей, которые при выполнении их посредством компьютерной системы, осуществляют шаги компьютерно-реализуемого способа по одному из п.п. 1-14 или п. 21.

10 24. Производственная установка (113), включающая в себя компьютер, выполненный для обработки машинных данных ( $\{\{X...\}N\}$ ) при осуществлении способа по одному из п.п. 1-14 и, кроме того, выполненный для предоставления прогнозных данных ( $\{Z...\}$ ), причем компьютер переключает режим работы производственной установки в ответ на прогнозные данные и в соответствии с предварительно заданными целями оптимизации, выбранными из следующих:  
15 откладывание технического обслуживания на наиболее длительный срок, работа в режиме, для которого прогнозируется наиболее позднее наступление отказа.



X11	X21	Xm1	XM1
X12	X22	Xm2	XM2
⋮	⋮	⋮	⋮
X1n	X2n	Xmn	XMn
X1N	X2N	XmN	XMN

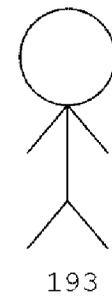


{Z...}

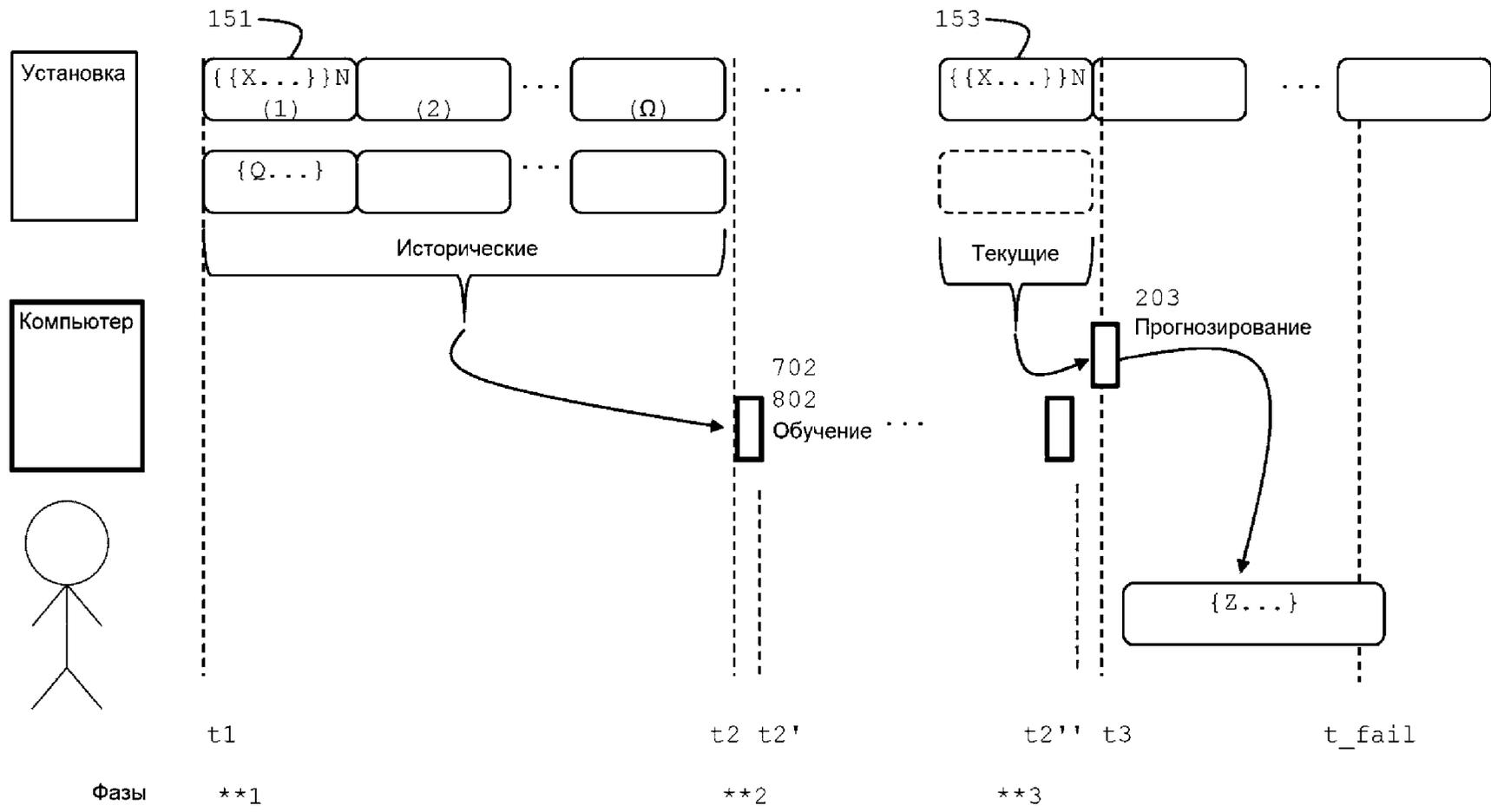
t\_fail\_a

t\_fail\_b

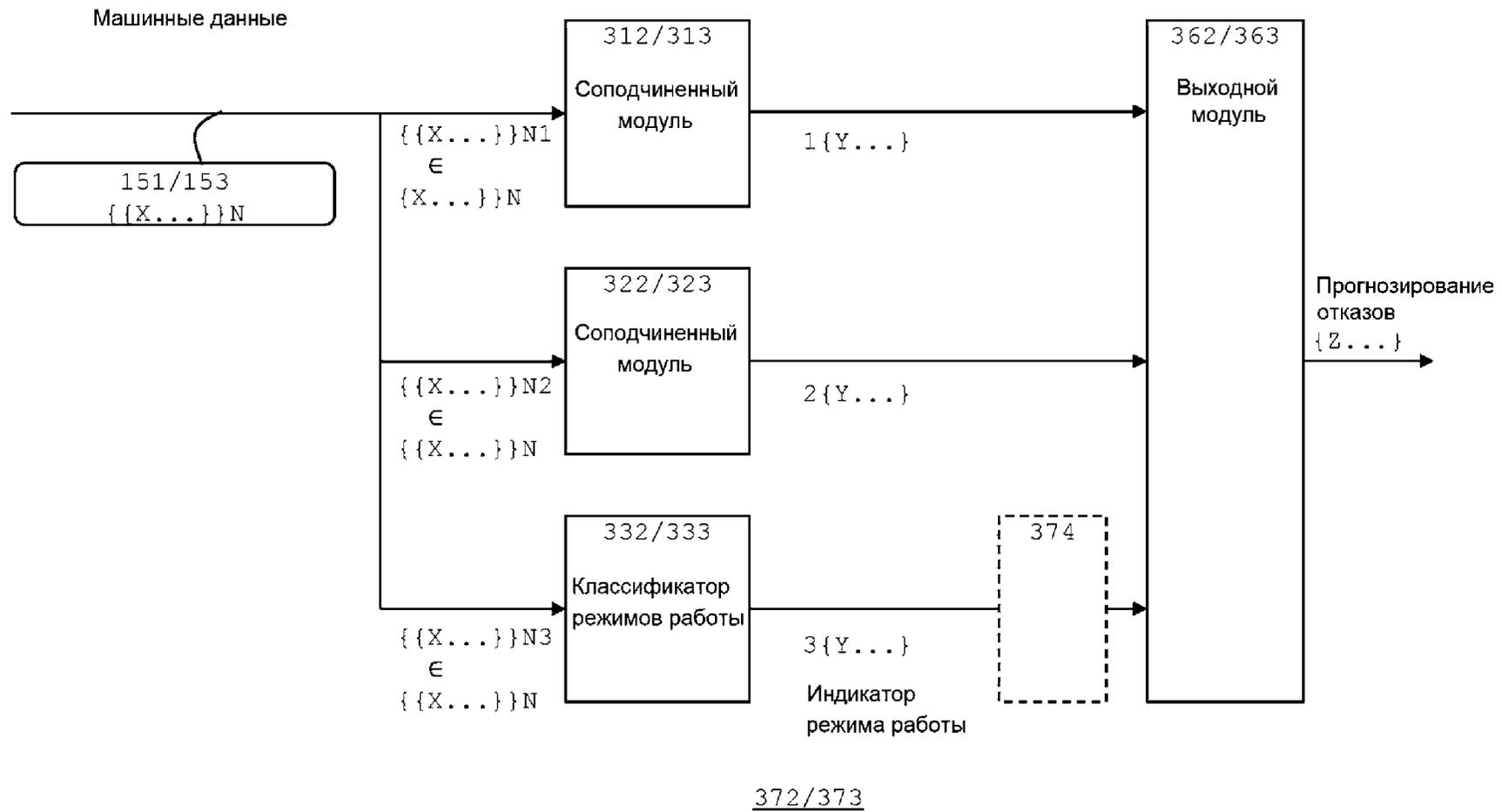
fail\_type



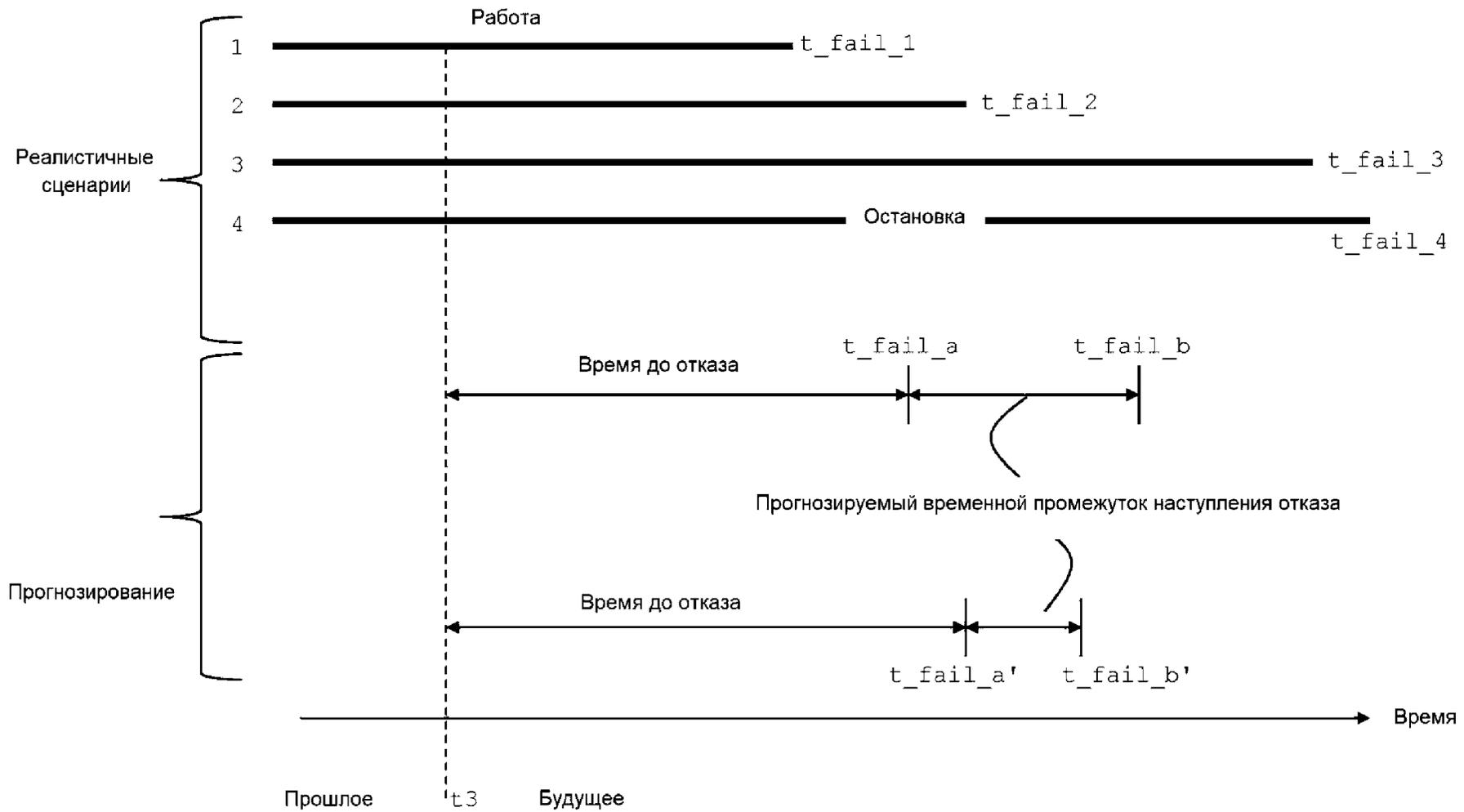
Фиг. 1А



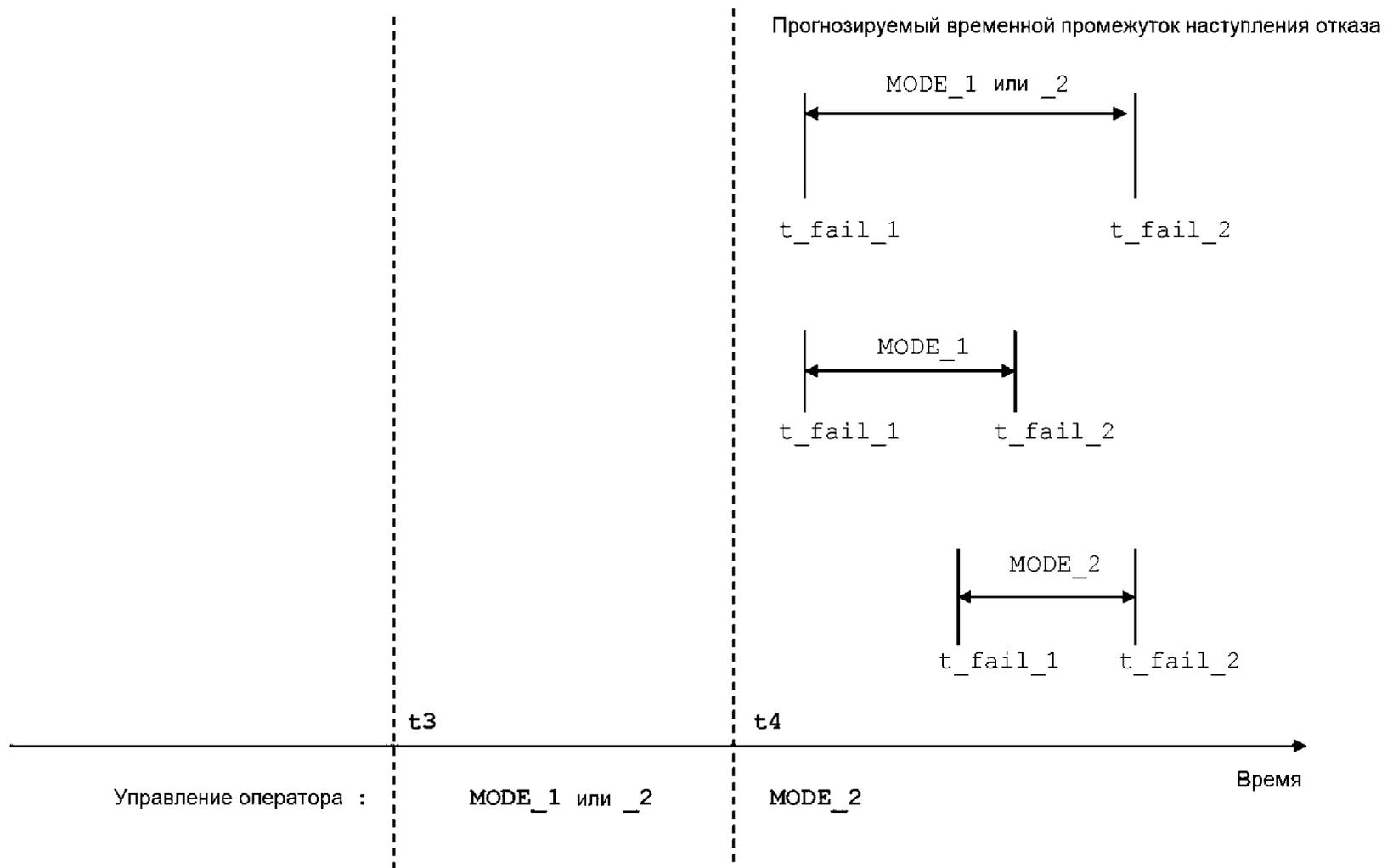
Фиг. 1Б



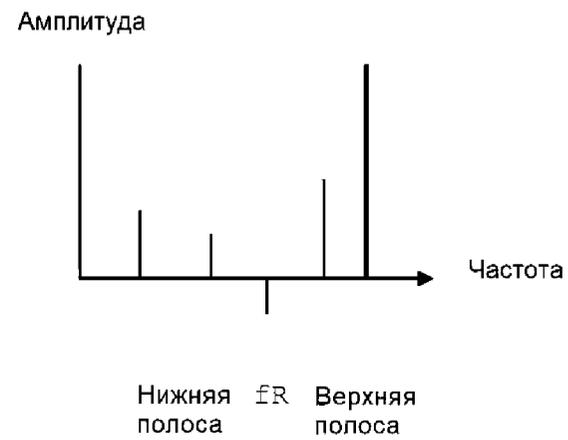
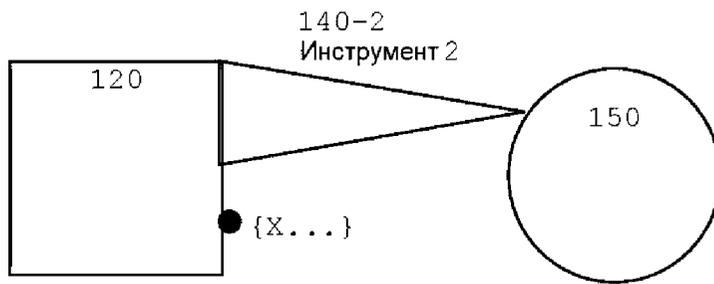
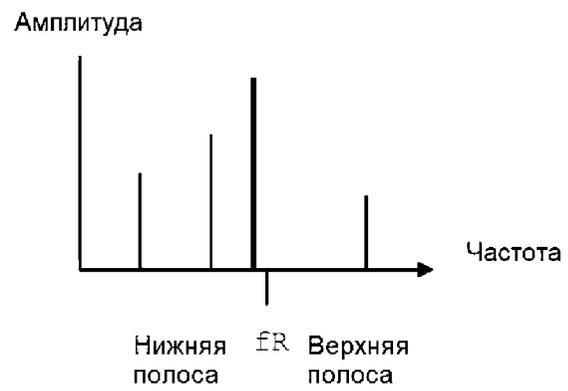
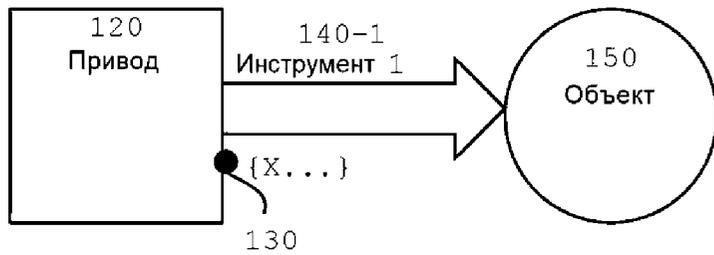
Фиг. 2



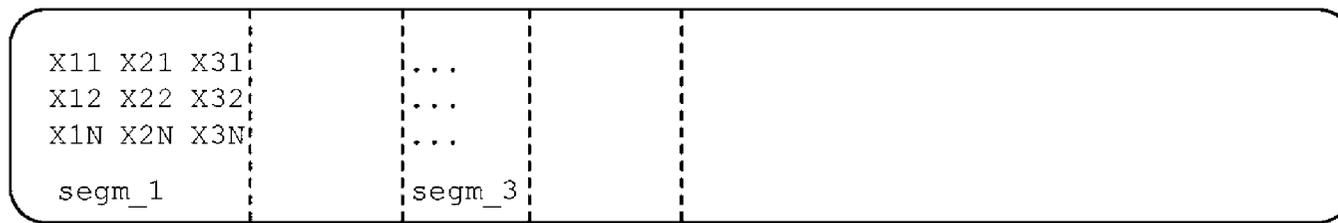
Фиг. 3



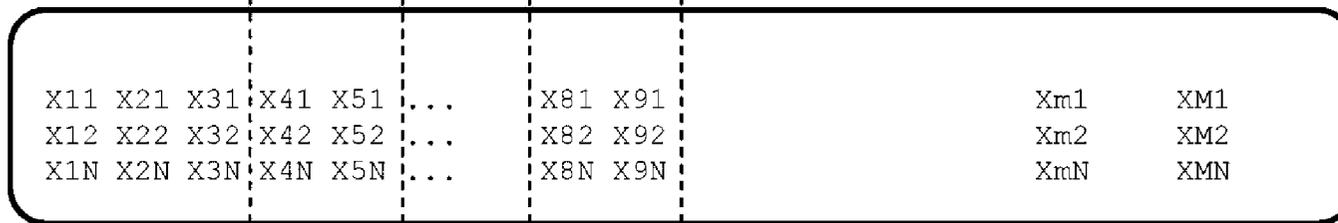
Фиг. 4



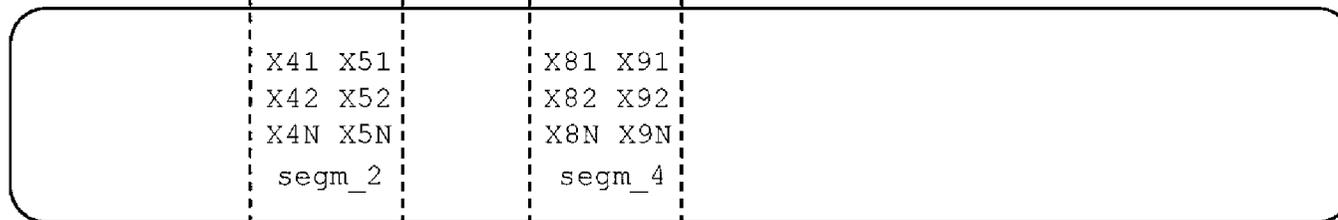
Фиг. 5



Исторические машинные  
данные (mode 1)  
{{X...@1}}N



Исторические машинные  
данные  
{{X...}}N

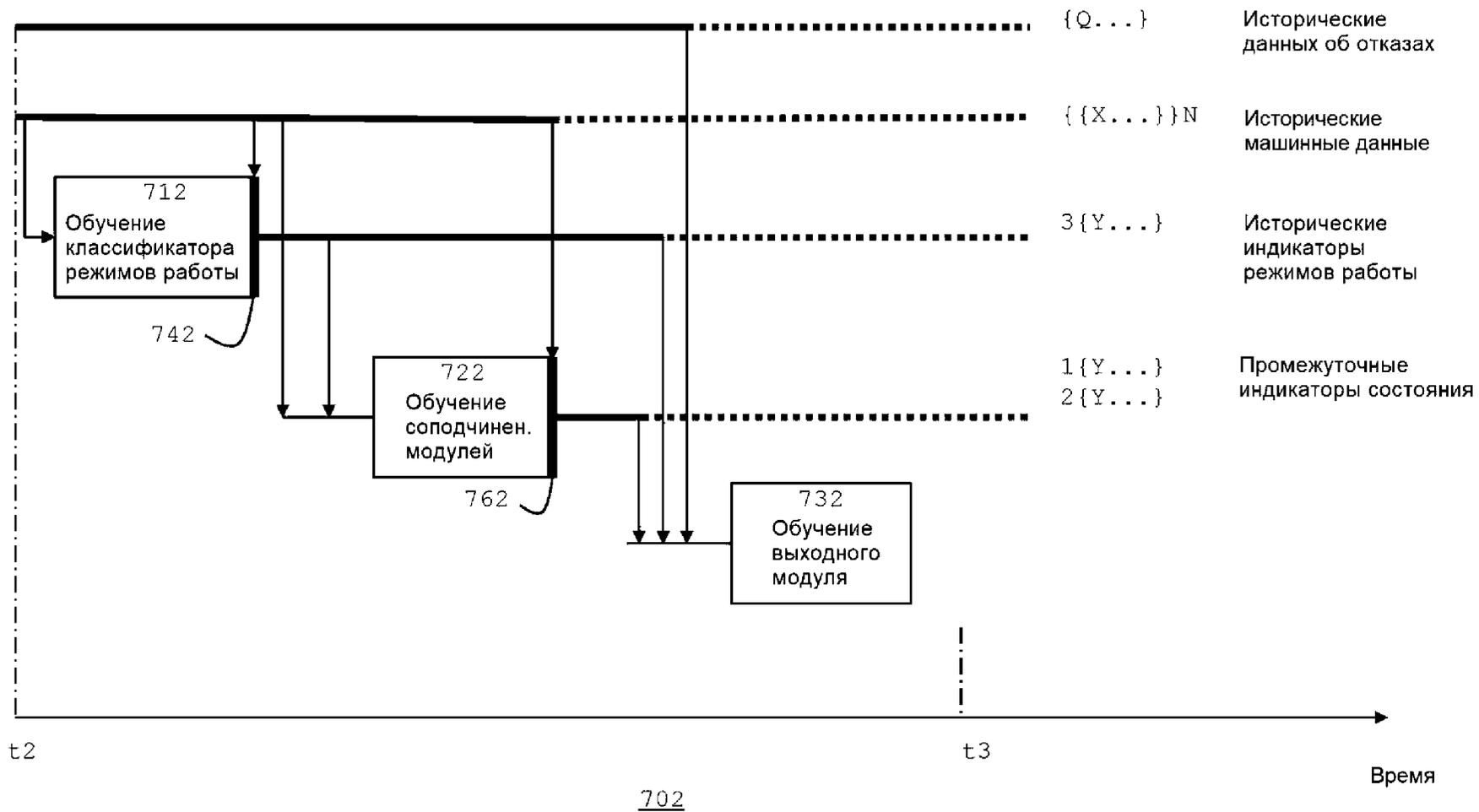


Исторические машинные  
данные (mode 2)  
{{X...@2}}N

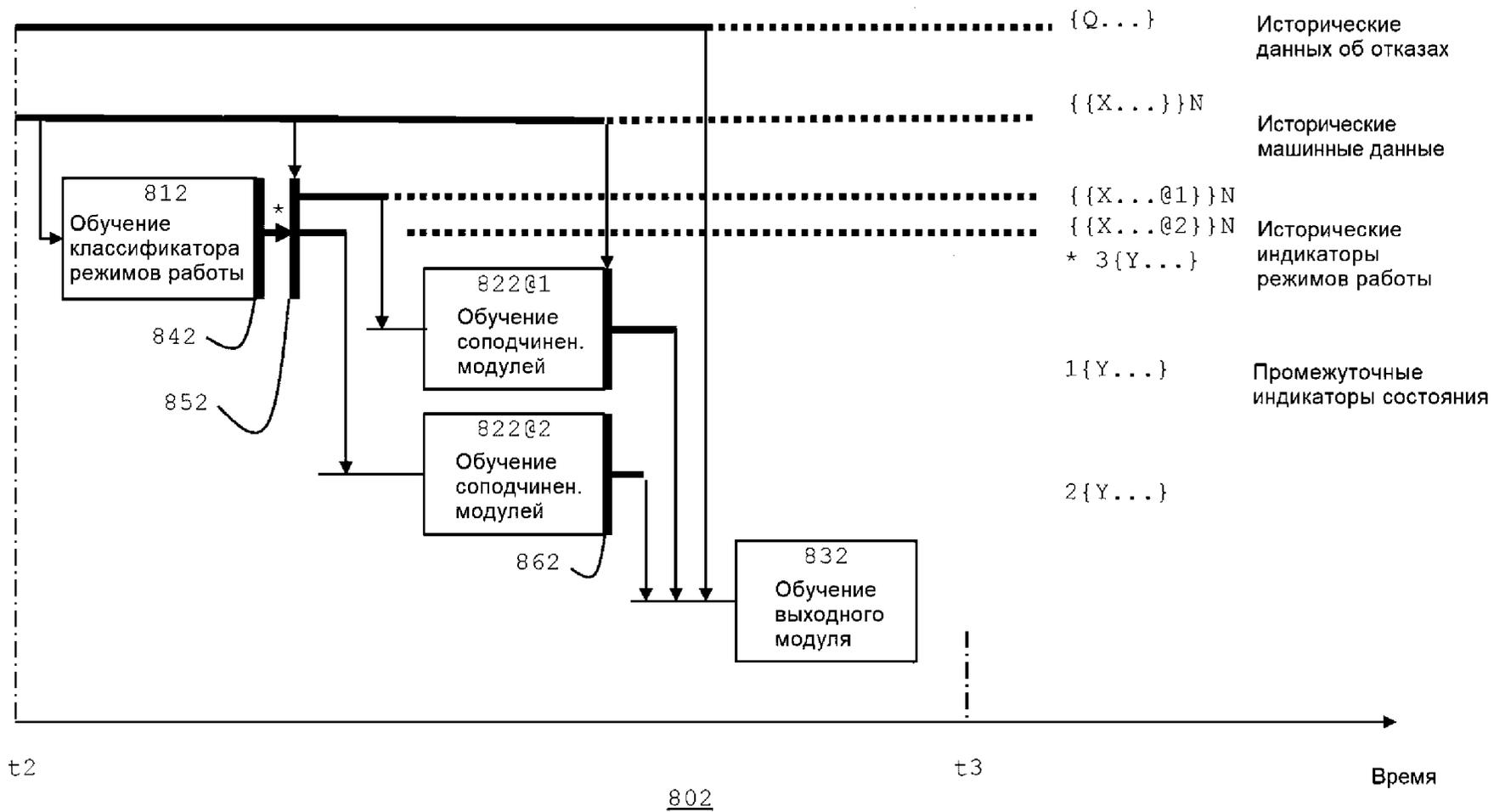
1 1 1 2 2 1 1 2 2

Исторические индикаторы  
режимов работы  
3{Y...}

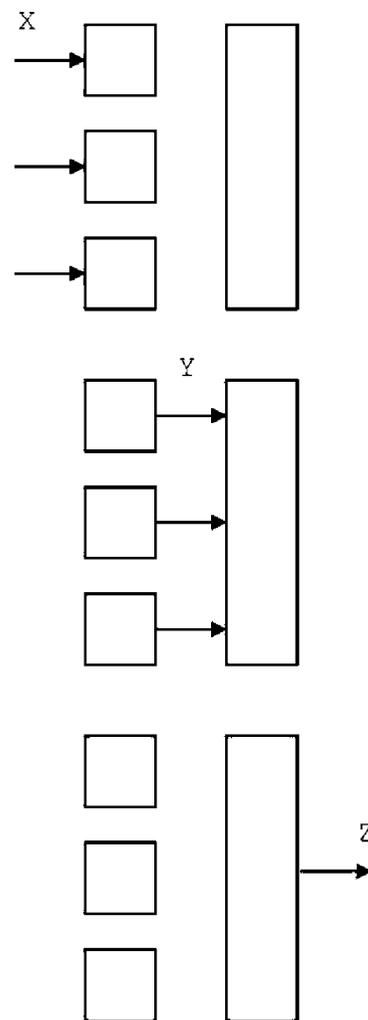
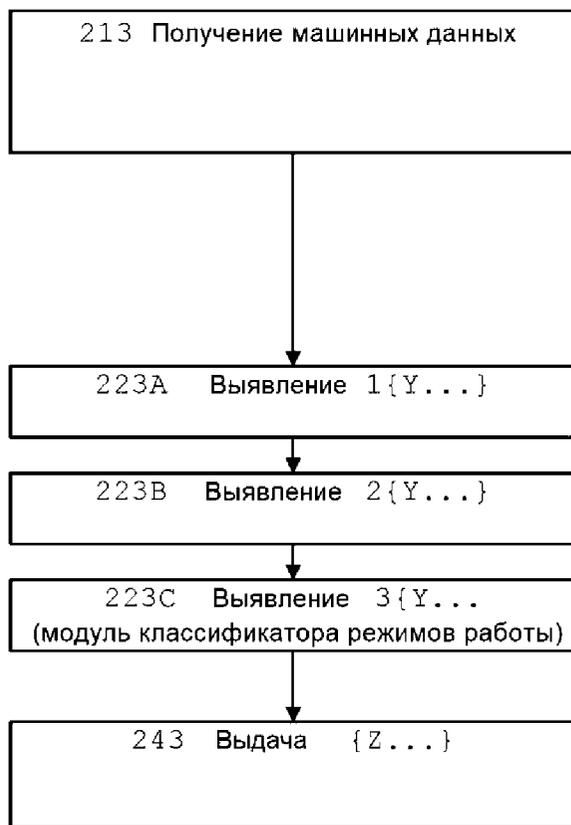
Фиг. 6



Фиг. 7

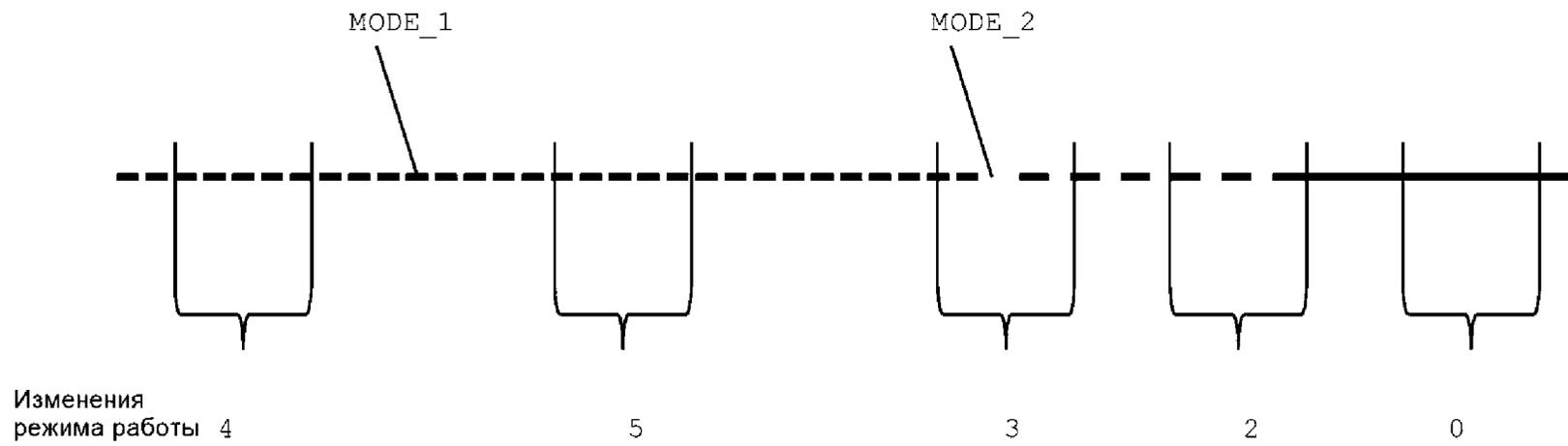


Фиг. 8

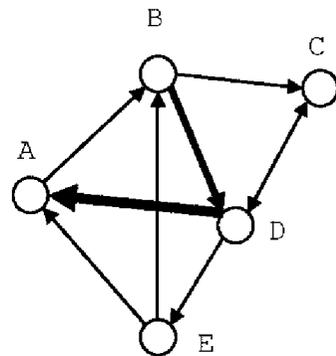


203

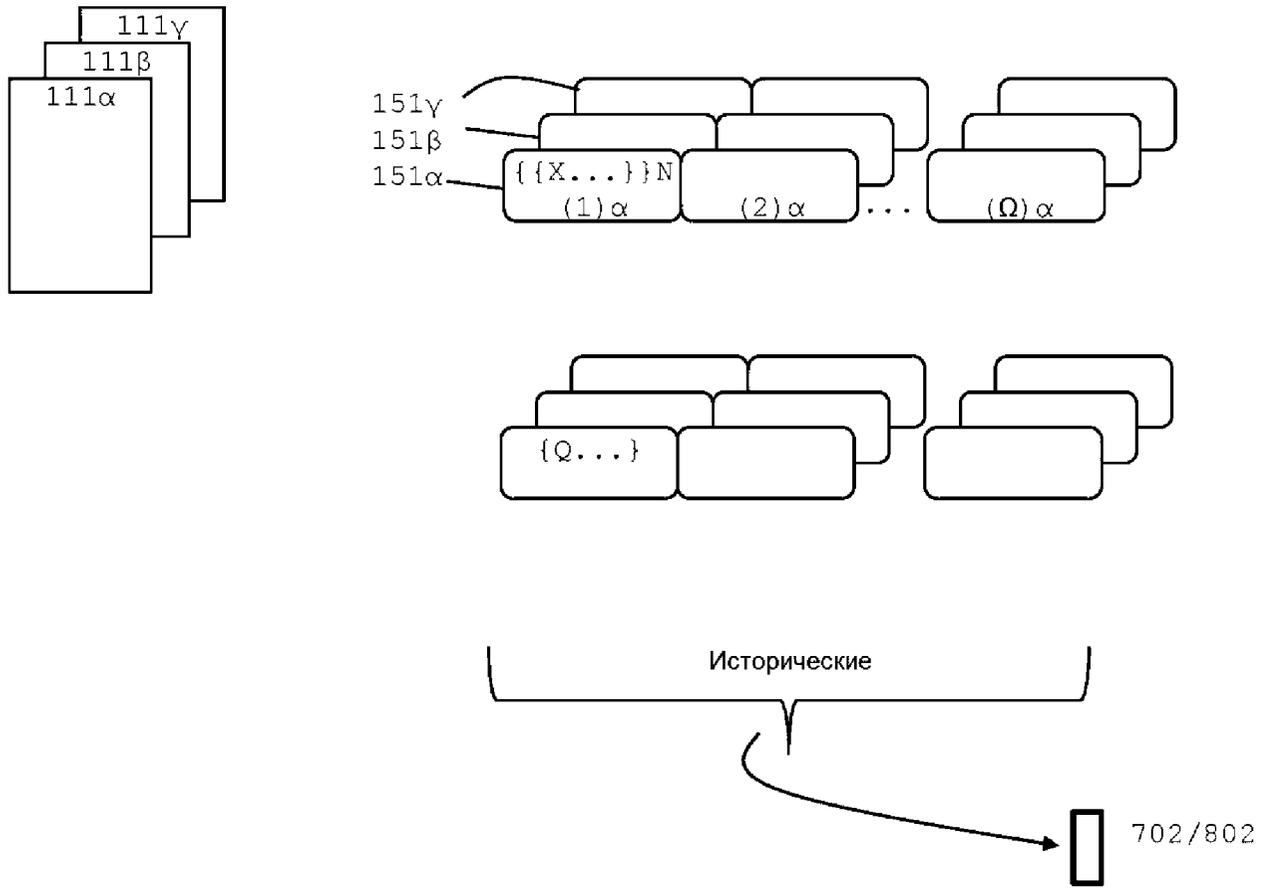
Фиг. 9



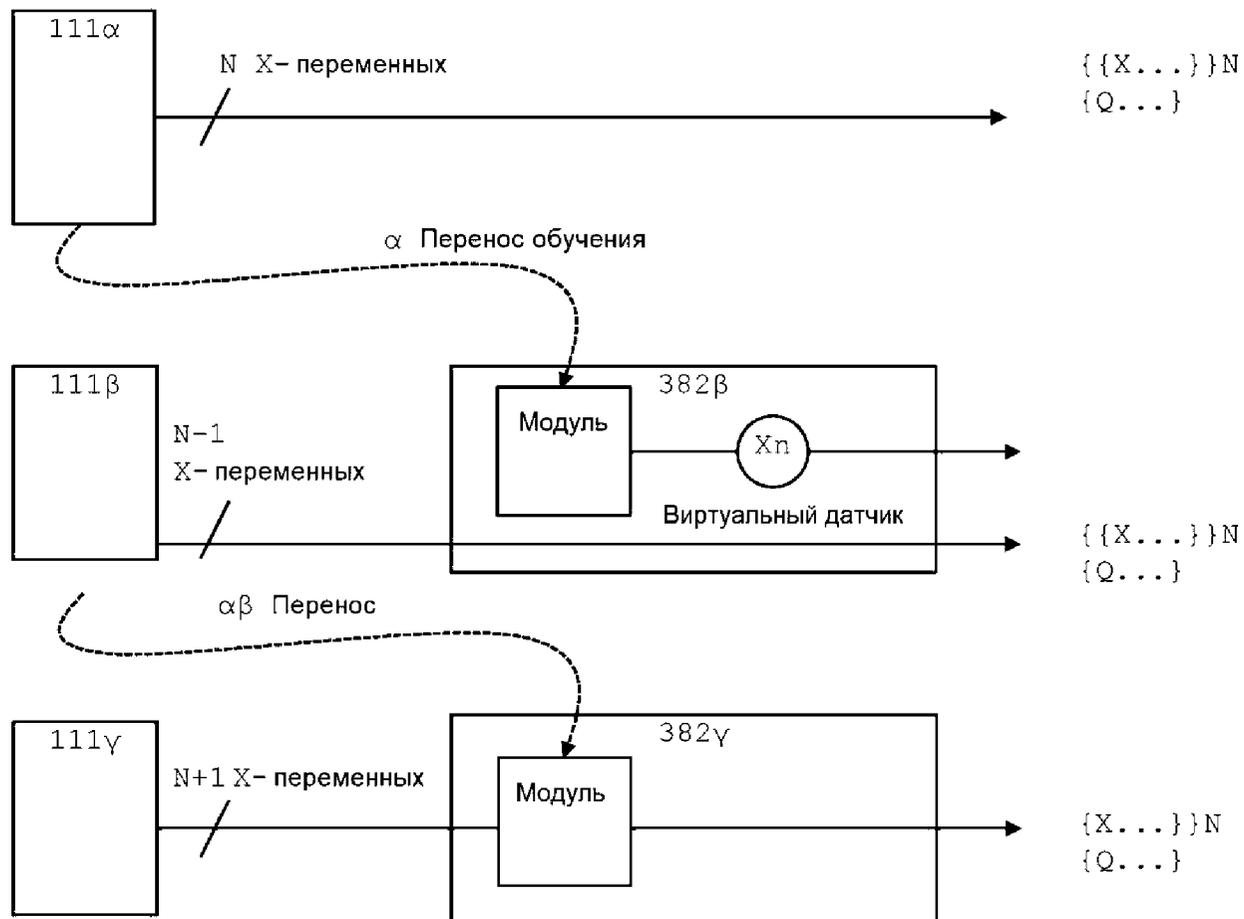
Фиг. 10



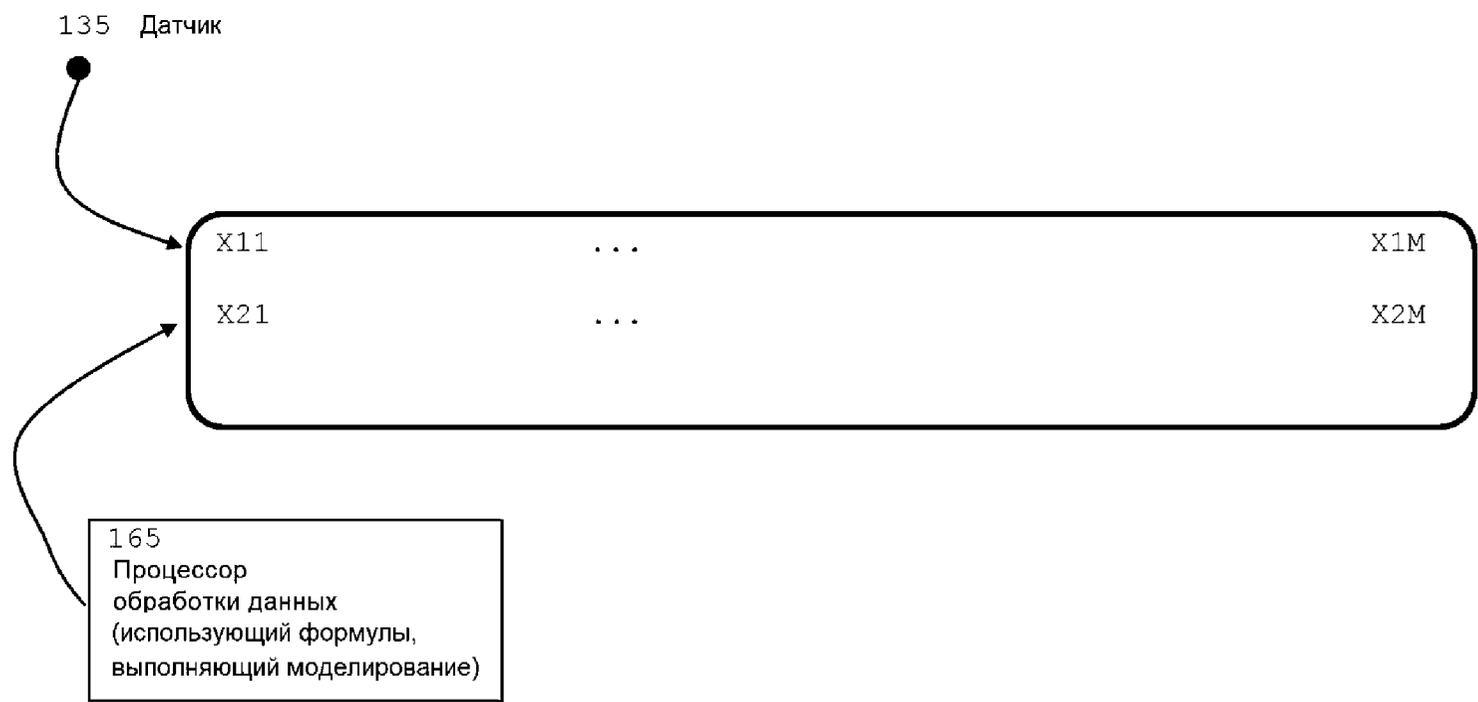
Фиг. 11



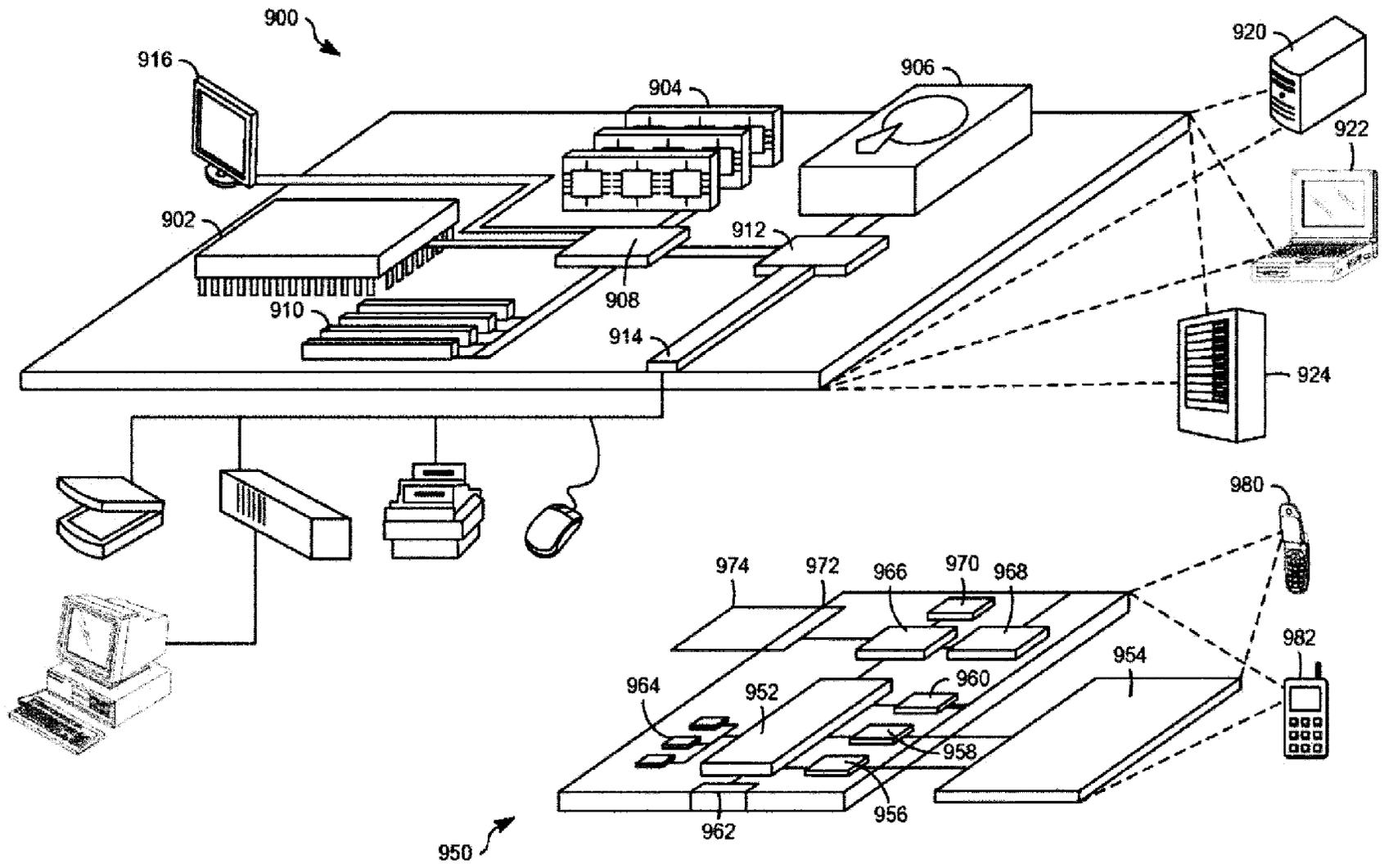
Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15