

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ. УПРАВЛЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА № 3 / 2007

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Автоматизированные системы управления

А.А. МУСАЕВ, д-р техн. наук, профессор,
В.А. НИКИТИН, канд. техн. наук, доцент

Программно-алгоритмический комплекс расширенного управления многопараметрическими технологическими процессами на основе прогностических моделей

Статья посвящена вопросам применения методологии MPC (*Model Predictive Control*) в задачах управления ТП. В качестве базового инструментария предлагается использовать разработанный авторами программно-алгоритмический комплекс (ПАК), позволяющий на основе предварительного анализа статистических и динамических характеристик ретроспективных данных мониторинга процесса формировать прогностические модели объекта управления.

The article deals with the problems of applying a method of MPC (*Model Predictive Control*) for the process technology. As a base tool it is suggested to use the software-algorithmic complex developed by the authors providing formation of the control object's predictive models in terms of preliminary analysis for statistical and dynamical characteristics of the monitoring historical data.

Состояние вопроса, задачи проекта

Современные АСУ, как правило, ориентированы на реализацию в некотором априори заданном классе объектов управления (ОУ). При этом сложность ОУ, определяемая множественностью взаимосвязанных параметров и не полностью определенными динамическими процессами, описывающими эволюцию состояния (обычно нелинейную и нестационарную), существенно затрудняет проектирование и эксплуатацию оптимальных схем управления.

В то же время, большинство подобных систем управления допускает возможность оптимизации, базирующейся на накопленной статистике управления

и реализуемой в виде программно-алгоритмической надстройки над уже существующей АСУ. Данный факт, в совокупности с возможностью получения существенного экономического или иного эффекта, послужил стимулом к разработке идеологии улучшенного (или расширенного) управления (APC, *Advanced Process Control*) ТП [1]. APC системы видимо являются промежуточным этапом в создании полностью автоматизированных систем управления многопараметрическими ТП.

Различные реализации APC технологий могут формироваться на основе различных методологических платформ. Самое широкое применение получила система APC на основе управления с прогностической моделью (MPC, *Model Predictive Control*), которая оперирует интерактивными параметрами процессов, моделирует сложные динамические характеристики объекта, удерживает процесс в заданных пределах, надежно реагирует на нарушения ТП.

Общим для систем MPC является ориентация на построение и последовательную коррекцию прогностических моделей, отражающих уникальные и постоянно изменяющиеся процессы эволюции состояния ОУ. При этом "информационным сырьем" для формирования моделей служат совокупность ретроспективной информации, хранящейся в БД и отражающей накопленный опыт управления объектом, и оперативных данных, получаемых в процессе текущего мониторинга состояния ОУ, параметров входных и выходных потоков. При этом, кроме традиционного математического инструментария, основанного на многомерных статистических методах и теории динамических систем, часто используются новейшие технологии компьютерной математики такие, как искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, методы ассоциативных связей.

Очевидно, что создание уникальных оптимизационных модулей является экономически нецелесообразным. Действительно, вся оптимизация базируется на общих математических алгоритмах, а сами ОУ легко группируются в некоторые функциональные классы. В соответствии с этим можно выделить два базовых

направления создания программно-алгоритмического обеспечения задач улучшенного (или аналитического) управления.

Первое направление, представленное технологиями интеллектуального анализа данных или *Data Mining* (DM, раскопки знаний в БД), сводится к созданию ПАК, базирующихся на определенном классе математического инструментария [2...4]. Развитие данного направления привело к появлению достаточно большого числа коммерческих разработок стоимостью от нескольких сотен до десятков тысяч долл. США. Наиболее широкое применение данные ПАК нашли в сфере бизнеса и финансового анализа.

Второе направление разработок в сфере аналитического управления связано с созданием ПАК, ориентированных на конкретный класс объектов анализа или/и управления. В частности, возникли решения в области промышленной автоматизации, связанные с оптимизацией управления технологическими установками определенного класса, технологическими производственными циклами.

Оба указанных направления нашли широкое применение в различных ПрО, продемонстрировав высокую экономическую отдачу при сравнительно невысоких инвестиционных затратах. В то же время, реализация этих направлений выявила существенные проблемы и ограничения по возможности их применения, важнейшими из которых являются:

- неполнота и часто низкое качество “сырых данных” (*Raw Data*), полученных в процессе мониторинга состояния ОУ и используемых для построения и коррекции базовых математических моделей;
- крайне высокие требования к точности идентификации протекающих процессов, связанные с соизмеримостью относительного выигрыша с флуктуационными характеристиками систем мониторинга и эволюции состояния самого ОУ;
- необходимость дополнительных инвестиций, обусловленных сложностью стыковки и адаптации готовых комплексных АРС решений с уже развернутыми АСУ;

- закрытость алгоритмического обеспечения, как коммерческого продукта, его недоступность для оперативной коррекции и модернизации со стороны пользователя, а порой и для настройщиков АРС;

- сложность эффективного применения аналитических надстроек для пользователей, не обладающих достаточным уровнем математической подготовки.

Перечисленные проблемы существенно влияют на эффективность внедрения и применения технологий аналитического управления. Рассмотренный в настоящей статье ПАК, основанный на MPC технологиях управления (получивший наименование “*Матрица*”), ориентирован на частичное разрешение перечисленных ограничений.

Основной задачей “*Матрицы*” (как проекта) являлась разработка многофункциональной программно-аналитической платформы, предназначенной для анализа, оценки, прогнозирования и контроля состояния сложных динамических систем (СДС), а также оптимизации процессов управления. Данная разработка сформирована в виде некоторого интеллектуального “конструктора”, образованного совокупностью функциональных программно-алгоритмических модулей (ПАМ).

Структура и основные функции “*Матрицы*”

Структура “*Матрицы*” включает в себя модули трех уровней (рис. 1). *Инструментальный уровень* включает в себя модули предобработки данных, анализа и прогнозирования состояния ТП и продукции, результаты которых используются для следующего – базового уровня. *Базовый уровень* предназначен для решения задач оптимизации управления и контроля измерительных и исполнительных механизмов систем управления. Верхний уровень (*уровень метауправления*) не является обязательным и формируется при необходимости оперативной увязки задач управления с изменяющимися требованиями иерархически вышестоящей системы (например, MES системой – системой управления производством).

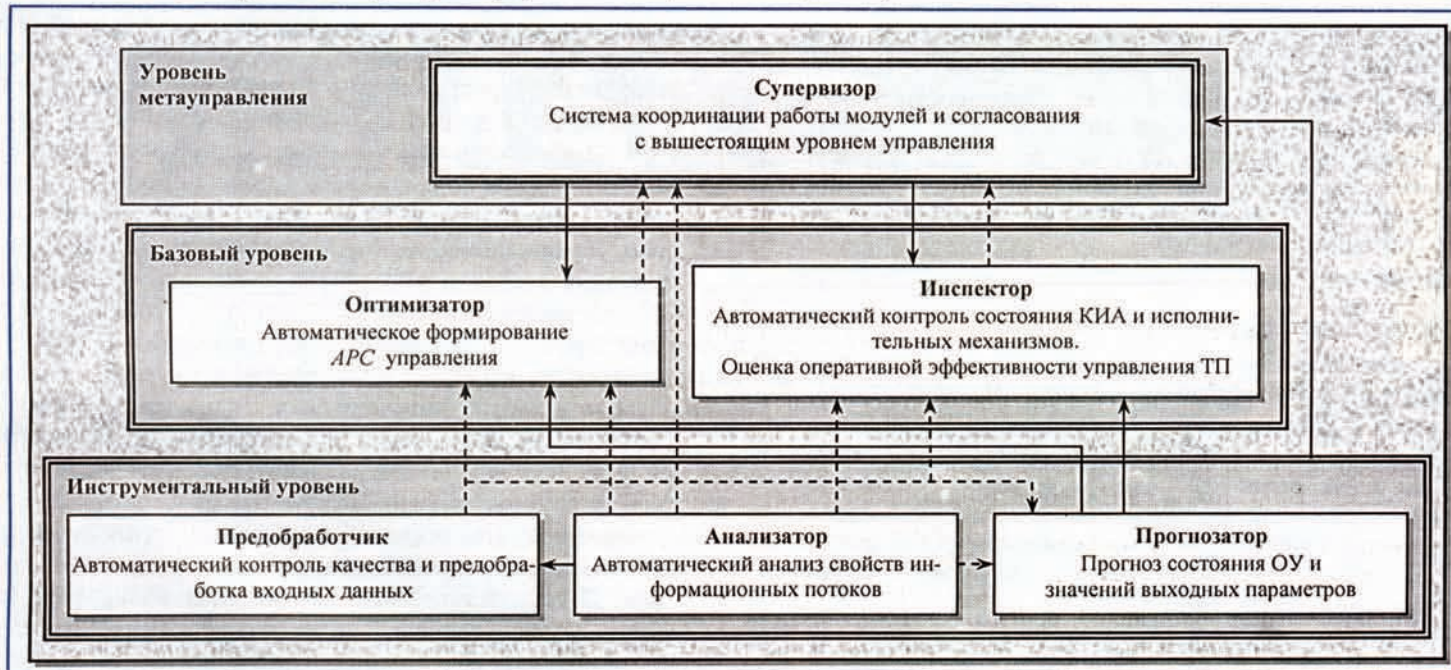


Рис. 1. Функциональная структура “*Матрицы*”

Из рис. 1 видно, что структура “Матрицы” включает в себя ПАМ: предобработки данных “Предобработчик”; анализа данных “Анализатор”; прогноза, формирования прогностических сценариев эволюции состояния объекта анализа “Прогнозатор”; оптимизации и поддержки управленческих решений “Оптимизатор”; контроля, оценки состояния и диагностирования контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) и исполнительных устройств “Инспектор”; координации работы модулей, согласования с вышестоящим уровнем управления, технико-экономического анализа “Супервизор”.

В соответствии с указанной структурой ПАК выполняет следующие функции.

1. Автоматизированная предобработка массивов исходных данных, включающая:

- восстановление пропусков в таблицах наблюдений (одиночных и групповых);
- выявление и обработку аномальных наблюдений и скрытых корреляционных несоответствий;
- сглаживание случайных шумов наблюдений;
- выявление мультиколлинеарности в исходных данных;
- нормировку данных.

2. Автоматизированный анализ статистических и динамических характеристик, включающий:

- дескриптивный статистический анализ каждого наблюдаемого параметра;
- анализ динамических характеристик каждого наблюдаемого параметра;
- выявление значимых взаимосвязей для каждого наблюдаемого параметра;
- идентификацию формы (характера) взаимосвязей между любыми парами наблюдаемых параметров;
- выявление аномальных наблюдений и корреляционных несоответствий в группах наблюдаемых параметров;
- визуализацию отклонений текущих значений групп наблюдаемых параметров от соответствующих значений на предыдущем шаге или от усредненных значений на N предшествующих шагах;
- корреляционный анализ групп наблюдаемых параметров;

• обобщенное (агрегированное) представление групп наблюдений и их визуализацию.

3. Прогнозирование выходных характеристик и/или состояния объекта управления на основе методов:

- многомерной регрессии;
- канонических корреляций;
- эволюционно-генетического моделирования;
- искусственных нейронных сетей;
- прецедентного анализа данных;
- калмановской фильтрации.

4. Оптимизация процесса управления сложной динамической системой на основе:

- полного перебора вариантов значений предикатов в окрестности ожидаемого значения целевой функции;

• случайного поиска в пространстве допустимых значений предикатов;

• решения обратной задачи для определения параметров управления.

5. Контроль состояния ОУ и каналов мониторинга на основе прогностического анализа невязок измерений и корреляционной структуры контролируемых параметров.

6. Обеспечение взаимосвязи модулей управления и контроля состояния объекта с верхними и нижними уровнями управления.

7. Расчет текущей эффективности управления ТП и основных технико-экономических показателей в РВ.

Реализация МРС программно-алгоритмического комплекса

Важной особенностью проекта является построение всех ПАМ “Матрицы” по единой унифицированной схеме (рис. 2).

Модуль имеет два уровня. Базовый уровень исполнительной математики включает алгоритмы прикладной математики и практически не зависит от ПрО. Унификация реализации данного уровня достигается за счет применения уровня НМИ интерфейса, обеспечивающего учет всех особенностей ПрО и решаемой задачи. Таким образом, уровень интерфейса играет роль согласующего буфера между унифицированными алгоритмами обработки данных и специфическими особенностями конкретной задачи в выбранной ПрО. Кроме того, данный уровень модуля обеспечивает возможность “общения” ПАМ с настройщиком и оператором (т. е. функционирует в качестве ЧМИ), в нем реализуются опции настройки модуля и здесь же визуализируются выходные данные, отображающие качество решения соответствующих задач.

Математический инструментарий “Матрицы” включает в себя основные методы многомерного статистического анализа и компьютерной математики, используемые при создании проекта (см. таблицу).

Перечень математических методов, представленных в таблице, позволяет структурировать алгоритмическое обеспечение “Матрицы” так, как это показано



Рис. 2. Структура функционального модуля

Математический инструментарий "Матрицы"

Методы	Задачи	Модули
Многомерный регрессионный анализ	Моделирование процессов, оценка значений отдельных параметров по связанным с ними предикатам	Предобработчик, анализатор, прогнозатор, оптимизатор, инспектор
Канонические корреляции	Моделирование процессов, оценка значений групп параметров по связанным с ними предикатам	Прогнозатор, оптимизатор, инспектор
Проверка статистических гипотез	Проверка принадлежности, стационарности, независимости, нормальности	Предобработчик, анализатор, инспектор
Статистическая фильтрация	Фильтрация стохастической компоненты наблюдений (фильтр <i>Калмана</i> , экспоненциальный фильтр и др.)	Предобработчик, анализатор, прогнозатор
Нейросетевые технологии	Прогнозирование значений многомерных случайных процессов	Прогнозатор
Эволюционное моделирование	Прогнозирование многомерных случайных процессов с последовательной адаптацией структуры модели	Прогнозатор
Генетические алгоритмы	Оптимизация с элементами случайного поиска на основе генетических технологий	Прогнозатор, оптимизатор
Дискриминантный анализ	Классификация состояния при наличии обучающих данных	Инспектор
Кластер-анализ	Классификация "без учителя"	Инспектор
Ассоциативные методы	Прогнозирование нестационарных случайных процессов, прецедентное управление	Прогнозатор, оптимизатор
Деревья решений	Контроль состояния и диагностика многомерных взаимосвязанных структур	Инспектор

на рис. 3. В основу *MPC* технологии, учитывающей специфику конкретного ОУ, положены традиционные методы многомерного статистического анализа (регрессионный анализ, канонические корреляции и др.). Применение новых технологий компьютерной математики, широко используемых в *DM*, например, эволюционное моделирование, нейросетевые технологии, позволяет существенно расширить сферу использования статистических алгоритмов путем построения достаточно эффективных прогнозных сценариев развития ситуаций при наличии нестационарных возмущающих и управляющих воздействий.

Ряд новых математических технологий относится к методам искусственного интеллекта (*AI, Artificial Intelligence*) и основан на использовании БЗ, теории самоорганизующихся и самоорганизующихся систем [5].

Применение *MPC* программно-алгоритмического комплекса в качестве аналитической надстройки АСУ

На рис. 4 приведен пример применения "Матрицы" в качестве аналитической надстройки АСУТП промышленного предприятия. Объект управления – ТП,

подлежит мониторингу, осуществляемому соответствующей подсистемой АСУТП. Данные мониторинга, вместе с результатами лабораторных анализов входных и выходных материальных потоков, периодически выполняемых заводской лабораторией, поступают в систему оперативного управления ТП. Оператор-технолог формирует решение по управлению и реализует его средствами исполнительных механизмов АСУТП.

ПАК "Матрица" может выступать либо в роли системы поддержки принятия решения (СППР), либо в роли модуля управления, автоматически формирующего, например, значения уставок для контуров регулирования или иных манипулируемых переменных. Во втором варианте оператор выступает в роли супервизора, контролирующего процесс управления ТП.

Практически значимые функциональности, формируемые базовым уровнем *MPC* комплекса, позволяют оптимизировать управление ТП (например, за счет снижения запаса по качеству или поиска энергосберегающих/ресурсосберегающих режимов). Кроме того, использование элементов "Матрицы" дает возможность:

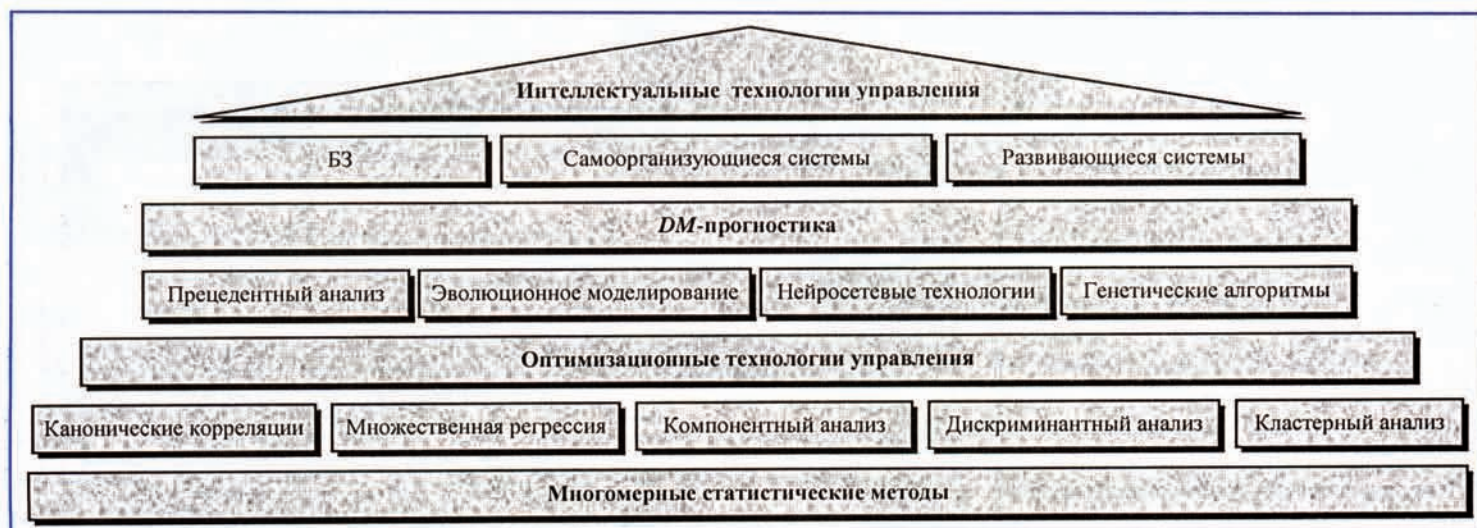


Рис. 3. Структуризация алгоритмического обеспечения "Матрицы"

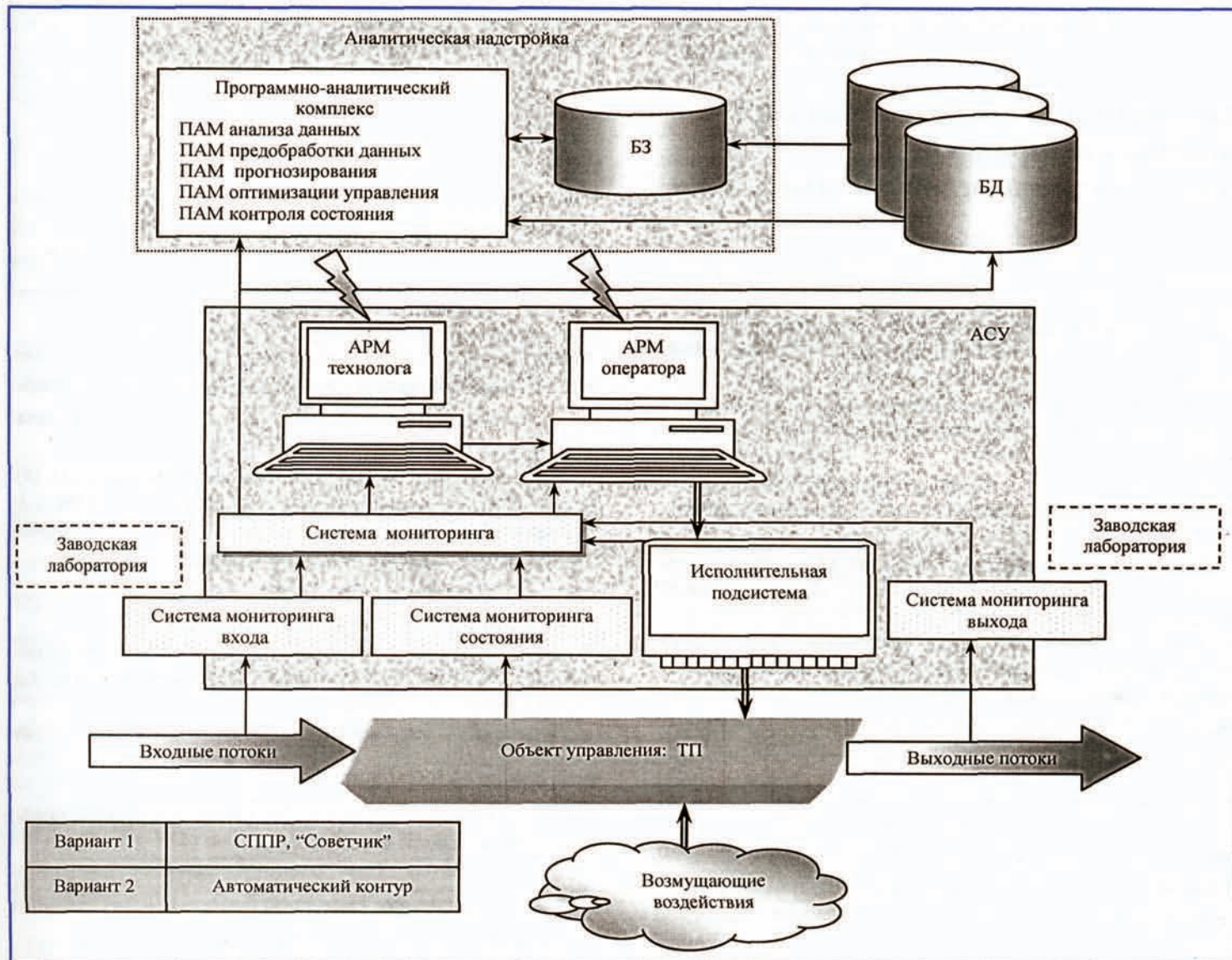


Рис. 4. Применение "Матрицы" в качестве аналитической надстройки АСУТП

- осуществлять непрерывный контроль качества управления, состояния технологической установки, продукции со стороны дежурной смены (например, при реализации виртуальных анализаторов);

- наглядно отображать в агрегированном виде результаты текущего управления многопараметрическим ТП [6];

- формировать прогностические сценарии изменения состояния установки и качества продукции в зависимости от тех или иных управлений;

- контролировать и/или диагностировать состояние технологической установки, КИА и исполнительных систем АСУТП в РВ.

Примеры реализации данного ПАК будут представлены в последующих публикациях журнала "Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика".

Дальнейшее развитие "Матрицы" связано с использованием технологий искусственного интеллекта, в частности, с созданием унифицированной (для заданной Про) БЗ, совмещающей в себе количественные и качественные описания ситуаций. Указанные описания образуют в совокупности некоторый аналог производственного опыта, позволяющий методами ассоциативного поиска формировать основания для оптимальных

решений и осуществлять прогноз развития нестационарных (в том числе аварийных) ситуаций.

Следует заметить, что введение системы мониторинга среды взаимодействия, позволяющее получить количественные сведения о возмущающих воздействиях, повышает качество прогнозирования состояния ОУ и, в конечном счете, качество и эффективность управления ТП.

Работа выполнена в ОАО специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика" (ОАО СПИК СЗМА).

Контактный телефон (812) 350-58-85.

E-mail: amusaev@szma.com

Список литературы

1. Camacho E.F., Bordons C. Model predictive control. London: Springer-Verlag, 2004.
2. Дюк В., Самоilenко А. Data Mining: Учебный курс. СПб.: Питер, 2001.
3. Киселев М., Соломатин Е. Средства добычи знаний в бизнесе и финансах // Открытые системы. 1997. № 4.
4. Мусаев А.А. Интеллектуальный анализ данных: Клондайк или Вавилон? // Банковские технологии. 1998, ноябрь-декабрь.
5. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001.
6. Мусаев А.А., Никитин В.А. Оценка качества управления процессами на основе многомерного статистического контроля // Методы менеджмента качества. 2006. № 12.