

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНФОРМАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВОМ

Кудрявцев¹ В.И., Зирко² О.Ф.

¹НПФ «Адекват», Москва, Россия, vik171@yandex.by;

² Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы (БелИСА), Минск, Беларусь, olzirko@yandex.by

Сложившаяся в настоящее время модель информационного управления предприятием имеет несколько концептуальных слоев управления в областях, объединенных в АСУТП и АСУП [1]. Эти две области представляют собой отдельные информационные среды, каждая из которых решает собственный круг задач. Их согласование в рамках следования единым целям предприятия до сих пор представляет собой существенную проблему. Разрабатываются сложные принципы интеграции данных и функций управления для АСУТП и АСУП, которые являются ноу-хау конкретных разработчиков отдельных коммерческих систем. Несмотря на существование стандартов такой интеграции, это, тем не менее, не привело к созданию целостной системы проектирования и управления предприятием как таковым.

В настоящее время структуру информационного управления предприятием принято изображать как последовательность уровней Field-level (технологического оборудования), PLC (программно-логических контроллеров), SCADA (диспетчеризации), MES (производственно-аналитического), ERP и MRP (ресурсов предприятия), а также OLAP (стратегического управления) [1], образующих пирамиду в направлении от «низших» уровней управления в основании пирамиды к «элитарным». Такой подход моделирования, основанный на шаблонных представлениях о властной пирамиде, не отражает действительных отношений между управляемыми областями реальности и функциями управления разных уровней. Исходя из этого, на рисунке 1 представим несколько иную схему структуры информационного управления предприятием относительно и в направлении от основного технологическим процессом производства отражающую изменение областей применения функций управления на разных его уровнях.

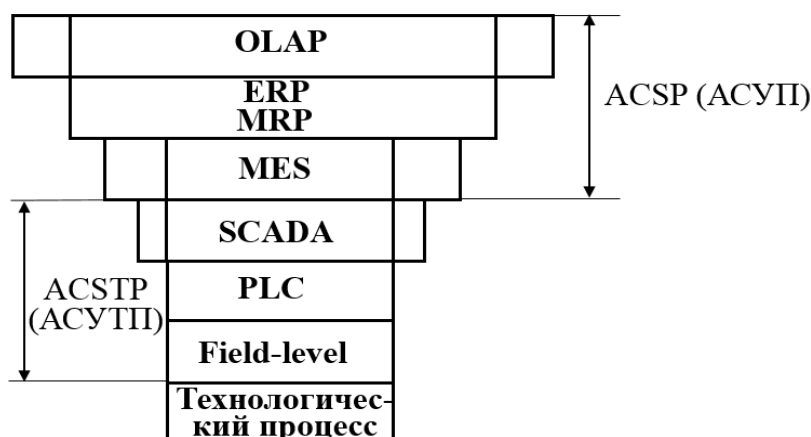


Рисунок 1 – Схема информационного управления предприятием относительно основного технологического процесса этого предприятия.

Из рисунка 1 следует, что начиная с уровня SCADA каждый вышерасположенный уровень включают в себя дополнительные функции управления смежными технологическими и коммерческими процессами, управление которыми косвенно влияет на управление основным технологическим процессом. Что касается функций непосредственного управления технологическим процессом, которые проецируются в вышерасположенные уровни до уровня ERP

MRP, то на уровнях Field-level, PLC, SCADA и MES по тем или иным причинам могут передаваться некоторые функции предыдущего уровня управления, а также функции, связанные с углубленным производственным анализом. Но уже на уровне ERP и MRP, как это следует из рисунка 1, проецирование основного технологического процесса в уровни управления прерывается, что означает, что управление им в реальном времени на этом уровне уже не осуществляется. Это объясняется тем, что при переходе от АСУТП к АСУП функции управления резко смещаются в сторону внешних отношений предприятия, а управление производством от конкретных управляющих воздействий переходит к формированию общих требований к нему. Это является также причиной изменения масштаба реального времени, в котором осуществляется управление. Если в АСУТП это секунды, минуты, часы, то в АСУП это дни, недели и месяцы. Никакие производственные функции управления предыдущего уровня не делегируются на уровень ERP для углубленного анализа и оптимизации.

На пограничном уровне MES между АСУТП и АСУП производится согласование функций управления этих двух резко отличающихся реальностей управления. Кроме того, на этот уровень относят задачу согласования всех функций производственного управления и производственного анализа предприятия, включая управления всеми смежными процессами. Таким образом, задача интеграции данных и функций управления является основным назначением уровня управления MES. Эта задача, начиная с 2004 года отражается в названии уровня как с-MES, что трактуется как уровень MES согласования [2].

Это главная особенность этого уровня управления, она не свойственна другим уровням, где давно сформированы целостные модели информационных систем, не требующие согласований, и созданы инструменты их проектирования. Эту же особенность можно определить как структурный кризис уровня MES имея в виду опыт формирования моделей информационных систем на других уровнях управления. Например, такое же состояние было свойственно уровню MRP и ERP до 60-70 годов прошлого столетия. Тогда согласование и совместная автоматизация разных бизнес-процессов решалась исключительно методами программирования. При этом с ростом объема решаемых задач снижалась надежность систем автоматизированного управления и резко возрастала стоимость такой автоматизации. Это было вызвано тем, что каждая конкретная бизнес-задача решалась автономно в рамках отдельного приложения, что требовало для больших бизнес-систем интеграции большого числа таких приложений в единой системе управления. Именно тогда впервые была отмечена критичность интеграционных процессов для прогресса автоматизации управления, включая совместное использование данных и согласование вычислительных процессов между множеством приложений. Проблема согласования при автоматизации бизнес-процессов окончательно разрешилась только с созданием систем реляционных баз данных.

С другой стороны, на уровне MES в результате поисков методов согласования производственных и коммерческих целей предприятия в рамках концепции так называемого прогнозного управления [3], сформировалось представление о том, что главная функция управления, которой должно подчиняться предприятие, это функция адаптации к рынку. Можно показать, что функция адаптации как функция управления имеет универсальный характер для всех уровней управления. В конечном итоге вся производственная деятельность должна подчиняться функции адаптации к рынку, а также к условиям, изменяющимся по ряду причин в ходе самого производства. Адаптация важна для высокотехнологичных и больших производств, где количество факторов может повлиять на результат производственной деятельности.

Для исследования разных типов адаптации дискретных производств к изменяющимся условиям на уровне MES используется компьютерное имитационное моделирование, в том числе на основе аппарата математического дискретно-событийного моделирования из области исследования операций. К ним относятся теория очередей, теория расписаний, теория восстановления, теория управления запасами и другие. Подробно исследовав теорию очередей и изучив подходы теории расписаний с целью их использования в процессах управления производством в реальном времени, О. Ф. Зирко установила, что адекватное моделирование

процессов дискретных производств может быть достигнуто в рамках предложенной ею системной модели производственной очереди. Модель представляет собой синтез системных моделей теории очередей и теории расписаний при условии расширении типов моделируемых событий. Из этих событий только системные события учитывались в математических теориях дискретно-событийного моделирования.

Следует отметить, что все типы событий, отображающие технологический процесс в модели производственной очереди, формируются на первых двух уровнях Field-level и PLC. Соответственно на этих уровнях также формируются основные концептуальные элементы модели производственной очереди, а именно требование очереди и требование маршрута. В контексте данной статьи мы будем обозначать их единым понятием требования (Rq). Концепт Rq отображает единичный процесс производственного обслуживания в очереди или в группе производственных очередей, моделирующих технологические линии, и представлен в виде диахронической последовательности событий обслуживания в технологическом процессе. Рассмотрим роль, которую призвано играть такое моделирование для АСУТП.

На уровне PLC и SCADA дискретных производств реализуется оперативное управление. В настоящее время оперативное управление относится к детерминированным процессам. Оно осуществляется в соответствии с установленными алгоритмами и основано на представлении об абсолютной предопределенности производственного процесса, гарантирующего требуемый результат с надежностью близкой к 100%. Моделируется такое управление в рамках развитой целостной концепции объектно-ориентированного проектирования, обеспечиваемого стандартом языка UML и американским стандартом IDEF. Данная концепция опирается на парадигму объекта, которая представляет акторов производства с точки зрения их методов, сценариев использования, функциональных состояний, свойств и реляционных отношений друг с другом, а также обмена сообщениями между объектами.

В отличие от концепции объектно-ориентированного проектирования, парадигма Rq отображает лишь предмет производства и призвана интегрировать данные о событиях производства относительно единичных предметов такого производства, а также аккумулировать относительно Rq другие события и информацию, которые могут быть связаны с этими единичными предметами производства потенциальными причинно-следственными связями. Такой подход позволяет формировать прогнозы, которые мы будем называть Rq -прогнозами, поскольку следствиями для таких прогнозов являются элементы Rq , а предпосылками являются либо элементы этого же Rq , либо элементы других Rq , связанные с рассматриваемым Rq потенциальными причинно-следственными связями. В рамках таких Rq -прогнозов можно организовать так называемое адаптивное Rq -прогнозирование. Однако в отличие от быстро развивающейся области адаптивного прогнозирования, основанной на динамическом моделировании процессов, нами было использовано понятие адаптивного Rq -прогноза исключительно с точки зрения адаптации аппроксимирующих зависимостей. В дальнейшем адаптивное Rq -прогнозирование (далее $AdRqP$) будем рассматривать как элемент адаптивного оперативного управления, концепция которого включает в себя три основных процесса:

1. Формирование заданий на выполнение требуемой обработки предмета обслуживания технологическим оборудованием исходя из предполагаемого влияния на отдаленный производственный результат.
2. Управление выбором линий и режимов обслуживания для предметов обслуживания в соответствии с текущим состоянием производственных процессов.
3. Планирование распределения продукции в технологической системе, включая координацию работы отдельных единиц оборудования с учетом изменяющейся во времени производственной ситуацией.

При этом в первых двух процессах адаптивное оперативное управление заключается в адаптивном формировании заданий для автоматического управления и адаптивном автоматическом выборе и отличается от детерминированной версии тем, что оно определяется логикой дальних производственных целей, которая не зависит от процесса взаимодействия с предметом обслуживания в текущей производственной операции, а зависит лишь от резуль-

тата этой операции. Адаптивное планирование по п.3 является сочетанием процессов адаптивного формирования заданий для автоматического управления и адаптивного автоматического выбора и представляет собой систему согласования этих процессов в рамках моделируемой системы производственных связей.

Здесь следует отдельно учесть, что Rq в трактовке производственной очереди пересекается с представлением об объекте управления со стороны технологического оборудования и это создает ложную перспективу для использования методов теории автоматического управления (ТАУ) в отношении Rq. В рамках этой ложной перспективы в ТАУ исследуются так называемые статистические системы автоматического управления, которые предназначены для процессов управления более высокого уровня управления чем Field-level. Здесь нам придется доказывать, что такие претензии на расширение области применения ТАУ несостоятельны и поэтому мы сразу попытаемся концептуально отделить понятие автоматического управления, осуществляемого в ходе технологической операции на уровне Field-level, от понятия автоматического управления технологическим процессом на более высоких уровнях информационного управления, называя такое управление автоматическим оперированием. В английском языке эти два типа управления также определяются разными терминами соответственно как automatic control (АС) и automatic operation. Соответственно искомое адаптивное оперирование мы будем обозначать как AdO, которое осуществляется в соответствии с обновляемым AdRqP.

Для демонстрации особенностей практического применения AdO и AdRqP в качестве основания для модельных примеров нами выбран метод термоупругопластического деформирования (ТПД), который в настоящее время используется преимущественно как технология восстановления изношенных металлических деталей цилиндрической формы, а также их упрочнения. На практике этот метод наиболее широко используется как технология восстановления и упрочнения гильз цилиндров и пальцев поршней двигателей внутреннего сгорания.

Суть восстановления рассматриваемым методом заключается в том, что устанавливая определенную локализацию нагрева и охлаждения деталей цилиндрической формы и скорость перемещения этой локализации относительно детали добиваются изменения ее размеров и переноса металла вдоль продольной оси детали с целью компенсации ее износа на внутренней в случае гильз цилиндров и внешней в случае пальцев поршней поверхности. Этот эффект достигается перемещением жестко связанной системы нагревателя в виде индуктора высокой частоты и охладителя в виде спреера, разбрызгивающего под давлением охлаждающую жидкость, вдоль продольной оси восстанавливаемой детали. При этом степень и качество восстановления детали можно определить только на стадии подготовки ее к механической обработке после завершения операции восстановления, когда деталь охлаждена до ее рабочей температуры. Эта особенность также свойственна большинству других методов термического восстановления изношенных деталей, например, методу диффузионной металлизации и другим. Затем, либо деталь отправляется на повторное восстановление, либо осуществляется ее механическая обработка. От объема механической обработки восстановленной детали зависит ресурс ее дальнейших восстановлений этим методом, то есть чем объем механической обработки больше, тем меньше этот ресурс. Также по объему механической обработки, включая ее излишний объем, можно косвенно судить о расходе и перерасходе энергии и времени на восстановление детали. Управление режимом восстановления может осуществляться автоматически в ходе АС с обеспечением соответствующего параметра скорости перемещения индуктора, обычно при постоянной мощности индуктора, зонально нагревающего деталь, и связанного с ним спреера, охлаждающего уже нагретую зону с некоторым шагом относительно зоны текущего нагрева, но само задание требуемого значения параметра скорости перемещения для качественного восстановления является целью AdO, которое мы беремся отличать от адаптивного АС.

Данная технология восстановления изношенных деталей отличается от ей подобных тем, что в ней не требуется обеспечивать необходимую сцепляемость между металлом осно-

вы и металлом, используемым для восстановления, поскольку в восстановлении используется металл самой основы. Это свойство делает способ восстановления гильз цилиндров и пальцев поршней универсальным относительно любого состава металла деталей и его термической обработки. Данная особенность востребована, например, для независимых ремонтных предприятий, поскольку информация о технологии изготовления и оптимальных режимах восстановления для деталей такого рода является ноу-хау соответствующих производителей и доступна только для соответствующих фирменных ремонтных сервисов.

Таким образом, независимый ремонтный сервис вынужден опираться лишь на собственные накапливаемые данные, получаемые при восстановлении деталей разнообразных модификаций, для того, чтобы устанавливать требуемую для эффективного восстановления скорость перемещения системы индуктор-спреер для каждой конкретной детали. При этом, вследствие разнообразия источников поступления изношенных деталей, на принадлежность восстанавливаемых деталей одной и той же модификации могут указываться косвенные признаки при отсутствии прямых, что затрудняет обобщение данных. Кроме того, с течением времени эксплуатации меняются характеристики производственной установки для восстановления, что также необходимо учесть при определении задания значения скорости. Все эти факторы невозможно учесть вручную и требуется технология автоматической адаптации, то есть AdO. Для этого необходимо использование AdRqP.

Теоретические аспекты формирования AdRqP и его сочетания с функцией автоматического формирования задания для контура АС в рамках AdO рассмотрены авторами в [4]. Здесь же мы хотим отметить отличия адаптации в AdO от процессов и оценок адаптивных систем АС, которые заключаются в следующем:

1. Ошибка оперирования совпадает с ошибкой AdRqP, то есть она носит метрологический характер и определяется не только как рассогласование значений, в данном случае прогнозного и фактического значений, но и как доверительный интервал рассогласования при установленной его надежности, представляющей собой значение вероятности. Уменьшение ошибки AdRqP в ходе его адаптации связано не с уменьшением конкретного рассогласования, а с уменьшением доверительного интервала рассогласования при заданной его надежности для будущих ошибок AdRqP. Таким образом, ошибка оперирования структурно отличается от соответствующих ей ключевых показателей качества АС, а именно от показателей динамической и статической ошибок управления.

2. Контролируемый параметр контура оперирования удален по времени и стадии производства от контролируемого параметра АС текущей операции, а сам процесс адаптации не направлен на улучшение качества АС, которое включено в контур AdO.

3. Процесс адаптации в AdO заключается не только в изменении вычислительных функций и вычислительных структур, но и в изменении структуры исходных параметров, используемых в расчете AdO. В отличие от AdO при адаптивном АС структура входного сигнала системы АС не подвергается изменению.

4. В процессе адаптации в AdO определяющим является изменение функции AdRqP, а не функции автоматического оперирования, аналогом которой для контура адаптивной АС является функция регулятора АС. При этом функция AdRqP имеет самостоятельное значение для системы информационного управления вне его связи с какой-либо одной функцией автоматического оперирования.

Потенциал AdO в ТПД не исчерпывается задачами производственной адаптации поскольку адаптация может применяться также и для коммерческих процессов и сочетаться при этом с производственной адаптацией к целям коммерческих процессов. Рассмотрим эту возможность на основе модельного примера с выбранным нами методом ТПД применяемым для упрочнения новых деталей. Упрочнение методом ТПД связано с тем, что в отличие от режима восстановления этим методом деталь нагревается до температуры выше температур фазовых переходов. При этом упрочненные детали могут быть реализованы на рынке как самостоятельный товар. Для совместной производственной и коммерческой адаптации может

быть реализована схема многокаскадного адаптивного формирования задания для системы автоматического управления, представленная на рисунке 2.

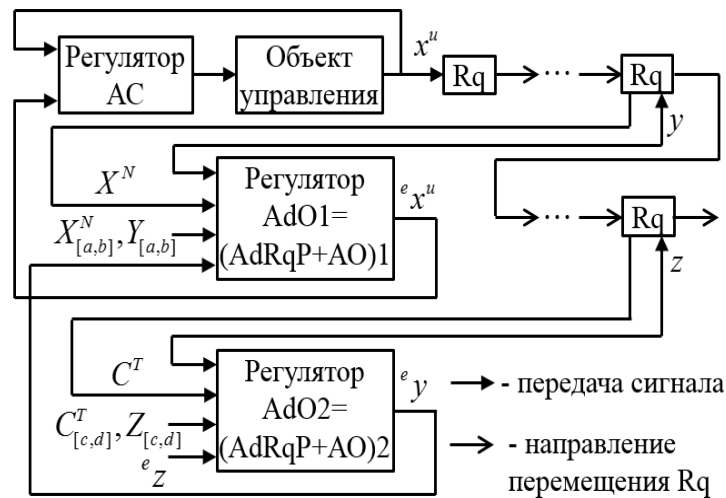
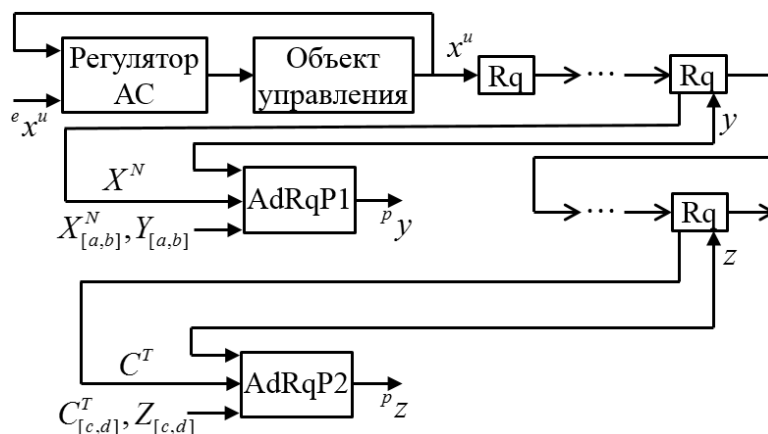


Рисунок 2 – Схема многокаскадного адаптивного формирования задания для системы автоматического управления.

В рамках данной статьи описать подробно работу этой схемы не представляется возможным, тем не менее ее смысл заключается в следующем. Предположим, что показатель z в Rq , который на соответствующей стадии обслуживания отображает упрочненную деталь в точке ее реализации, представляет собой время его реализации при фиксированной прибыли этой реализации. Тогда, если предсказанное в $AdRqP$ значение z превышает допустимый уровень соответствующих бизнес-ожиданий, регулятор $AdO2$ автоматически формирует разные значения степени упрочнения $^e y$ для изготовления пробных партий, которые из регулятора $AdO2$ поступают для исполнения в регулятор $AdO1$. В последнем для каждого значения $^e y$ выполняются процедуры адаптации отдельных $AdRqP$ для каждой партии на основе выборок $X_{[a,b]}^N, Y_{[a,b]}$ размера $[a,b]$, где множество $X_{[a,b]}^N$ содержит значения толщины стенки и установленной скорости перемещения системы индуктор-спреер $^e x^u$ для деталей из выборки $[a,b]$ для состоявшихся упрочнений, $Y_{[a,b]}$ представляет собой множество значений y . На основании значений $X_{[a,b]}^N, Y_{[a,b]}, C_{[c,d]}^T, Z_{[c,d]}$ автоматически формируется новая функция z и соответствующее ему значение $^e y$, в отношении которого запускается новый процесс автоматической адаптации в $AdO1$.

Таким образом, при таком объединении разных процессов автоматической адаптации нет проблемы разрыва масштабов реального времени. Каждая задача адаптации реализуется в собственном масштабе времени и в собственном единстве Rq , при этом в единой системе оперирования гармонизированы функции разных уровней информационного управления.

Представим схему на рисунке 2 без функции АО. Она примет вид, представленный на рисунке 3. В нем каждая $AdRqP$ имеют свой независимый контур адаптации, а их результаты $^p y$ и $^p z$ могут быть использованы в автоматизированном режиме оперирования. Также анализ накопленной выборки значений $^p y$ и $^p z$ вместе с соответствующими фактическими значениями y и z , и зафиксированных изменений в функциях $AdRqP$ может быть использован для обоснования экономической целесообразности перехода к автоматическому оперированию. Однако автоматизированный режим оперирования и анализ, реализуемые в том же направлении, что и автоматическое оперирование, не доказывает самостоятельной роли $AdRqP$ относительно функции АО, что является ярким отличием AdO от регулятора АС, функция которого является единой и нераздельной.



Рисунке 3 – Схема многокаскадного адаптивного Rq-прогнозирования.

Исходя из этого рассмотрим принципиально иную функцию производственного оперирования на основе AdRqP на примере процесса восстановления изношенных гильз цилиндров или пальцев поршней методом ТПД, рассмотрев следующую производственную ситуацию. В процессе эксплуатации характеристики производственной аппаратуры для восстановления могут изменяться. Например, производительность охлаждающего спреера в течение срока эксплуатации уменьшается в связи с постепенным кальцинированием отверстий спреера, если в качестве охлаждающего агента используется вода. При использовании AdO1 можно было бы адаптировать задаваемые значения скорости системы индуктор-спреер или количества проходов в одной операции восстановления к текущему состоянию индуктор-спреер. Однако при этом затраты времени и энергии на процесс восстановления будут отличаться от оптимальных. Тогда наиболее рациональным решением будет восстановить характеристики спреера с использованием специальной его обработки. Обычно такие процессы организуют на уровне SCADA, но для этого надо обнаружить соответствующую производственную проблему. С этой целью может быть проанализирован характер изменения функции AdRqP. Если, например, для одного и того значения износа для одной и той же модификации восстанавливаемой детали согласно первоначальному AdRqP прогнозируется значительно меньше энергетических и временных затрат для восстановления детали, чем согласно последнему по времени AdRqP, то это может свидетельствовать о проблеме аномальной работы данного технологического оборудования. Если проблема будет подтверждена, она устраняется в ходе техобслуживания этого технологического оборудования. В результате происходит восстановление его первоначальных технических характеристик.

Однако та же описанная выше ситуация может быть вызвана не ухудшением характеристик технологического оборудования, а тем, что средство для измерения износа стало занижать свои показания, и фактический компенсируемый износ выше измеренного. Это можно установить, если при ремонте одной и той же техники при тех же исходных параметрах срока и условий эксплуатации прогноз степени износа гильз цилиндров или пальцев поршней падает при переходе от первоначального соответствующего AdRqP к последнему по времени сформированному AdRqP, а зависимость, в которой прогнозируются энергозатраты на восстановление изношенной детали, как мы уже показали, имеет обратную тенденцию. Поэтому прежде, чем определять выявленное рассогласование как проблему технологического оборудования следует проанализировать работу измерительной аппаратуры. Для этого требуется совместный анализ нескольких AdRqP, которые связаны друг с другом общими параметрами своих предпосылок или следствий.

Тем не менее, можно утверждать, что многие из необходимых для метрологического и технологического контроля AdRqP никогда не будут созданы в системе целенаправленно тем или иным специалистом, поскольку подобных задач и соответствующих решений в большом производстве чрезвычайно много, и их реализация в информационной системе требует очень

больших затрат труда высококвалифицированных специалистов. Выход может заключаться лишь в синтезе этих функций контроля в специально созданном для этих целей типе информационной системы. При этом AdRqP в такой системе должны быть лишь синтезированы просто потому, что их можно синтезировать в рамках Rq-прогнозирования без попадания на ложные, то есть случайные, корреляции данных. Сама возможность синтеза Rq-прогноза является признаком AdRqP, поскольку процесс автоматической адаптации в нем представляет собой повторный синтез AdRqP.

Описанный выше метрологический контроль относится к возможностям контроля качества данных, но это не единственная такая возможность, предоставляемая структурами Rq. Раскрыть все перспективы контроля данных в структурах Rq в рамках одной статьи невозможно. Однако эти другие возможности контроля данных также могут быть максимальным образом воплощены лишь при синтезе соответствующих расчетных соотношений в системе оперирования. Процессы массового синтеза упомянутых расчетных соотношений и AdRqP могут опираться только на соответствующую структуру данных отражающих структуру Rq и его связи с другими Rq смежных и влияющих процессов, то есть речь идет о соответствующей модели данных.

Таким образом, методической основой информационной интеграции систем управления на разных уровнях управления предприятием является адаптивное Rq – прогнозирование. Вне ориентированной на поддержание Rq-прогнозирования модели данных и соответствующих ей структур данных невозможен массовый синтез и адаптация Rq-прогнозов требуемых для управления сложными производствами.

Литература.

1. Гвоздева Т.В., Баллод Б.А. Проектирование информационных систем: учебное пособие. – Ростов н/Д.: Феникс, 2009. – 508 с.
2. Степанов Д.Ю. Интеграция ERP и MES-систем: взгляд сверху // Современные технологии автоматизации. – 2016. – №2. – с.108-111.
3. Smagin V.I., Koshkin G.M., Kim K.S. Locally Optimal Inventory Control with Time Delay in Deliveries and Incomplete Information on Demand // Proceedings Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management. February 15–18, 2016. – Beer Sheva, Israel, 2016. – P. 570–574.
4. Зирко, О.Ф. Адаптивное управление по прогнозу в процессах дискретного производства / О.Ф. Зирко, В.И. Кудрявцев / Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ–2018): доклады XVII Междунар. конф., Минск, 20 сентября 2018 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2018. – С. 171–175.