Имитационное моделирование – ключ к решению задач управления сложными технологическими процессами

Л.М. Яковис (СПбГПУ)

Намечены пути комплексного применения методов теории управления и имитационного моделирования при решении задач автоматизации сложных ТП. Обобщен опыт использования имитационных моделей в составе алгоритмов управления по схеме условного прогнозирования.

Дверь с замком должны быть выполнены в едином ключе.
(Народная мудрость)

Проблемы управления ТП

Углубившись в n-мерные пространства, современная теория управления достигла больших высот. Применяемые для управления производством современные компьютеры способны реализовать сложнейшие алгоритмы. Вместе с тем на практике, как и много лет назад, главным образом применяются типовые законы регулирования во главе с видавшим виды ПИ-регулятором [1, 2, 3], причем и его настройка в системе с перекрестными связями является "крепким орешком" как для теоретика, так и для инженера. В чем причина этого парадокса?

Основная причина в том, что в силу ряда особенностей сложных ТП как объектов управления, теория при всей ее мощи обычно не дает инженеру прямых и полных ответов на его практические вопросы. К главным особенностям технологических объектов, затрудняющим анализ и синтез систем управления, можно отнести:

- запаздывание, проявляющееся в том, что выходные переменные не сразу начинают "чувствовать" изменение управляющих воздействий;
- сложный и изменяющийся во времени характер динамических зависимостей выходных переменных от управляющих и возмущающих воздействий;
- случайный и изменяющийся во времени характер действующих на технологический объект неконтролируемых возмущающих воздействий;
- многомерный характер динамических объектов и наличие перекрестных связей, когда каждое из нескольких управляющих воздействий вызывает изменение каждой из нескольких выходных переменных;
- наличие жестких ограничений на изменение как выходных переменных, так и управляющих воздействий;
- значительные измерительные шумы в системе контроля переменных, характеризующих управляемые процессы.

К наиболее мощным методам современной теории управления, предназначенным для создания многомерных систем, следует отнести методы пространства состояний, однако они "не любят" запаздывания и жестких ограничений и, кроме того, обычно приводят к алгоритмам, использующим производные высоких порядков от контролируемых переменных, оценка которых с приемлемой точностью затруднена в условиях сильно зашумленных измерений. Более того, нередко проблематичным оказывается "достаточно адекватное" описание сложного технологического объекта в форме линейных дифференциальных уравнений, которое необходимо для применения большинства доступных инженеру методов современной теории.

Как же выйти из тупика, если с одной стороны, современная теория не дает инженеру полных ответов, а с другой стороны, создать сложную систему управления без науки "по наитию" практически невозможно? Думается, никакой панацеи, дающей простое решение данной проблемы, нет. По-видимому, для ее практического решения необходимо постепенное сближение сложной высокоматематизированной современной управленческой науки с прагматичной инженерной практикой, требующей создания в короткие сроки надежно работающих автоматических и автоматизированных систем. Одно из наиболее эффективных направлений такого сближения заключается, по мнению автора, в широком применении имитационного моделирования при создании систем управления. При этом имеется в виду как моделирование систем на стадии их разработки (которую лучше проводить совместно с разработкой самого объекта управления), так и непосредственное использование имитационных моделей в составе алгоритмов управления.

Имитационное моделирование на стадии разработки систем управления

В сущности, любая модель процесса является имитационной, так как она имитирует поведение этого процесса во времени. Вместе с тем, в специальной литературе термин *имитационное моделирование* подразумевает использование моделей, воспроизводящих логику (или, другими словами, алгоритм) функционирования объекта, причем допустимы любые способы формализации связи между переменными, поскольку использование любых математических соотношений принципиально не усложняет задачу имитационного исследования. Такое расширение

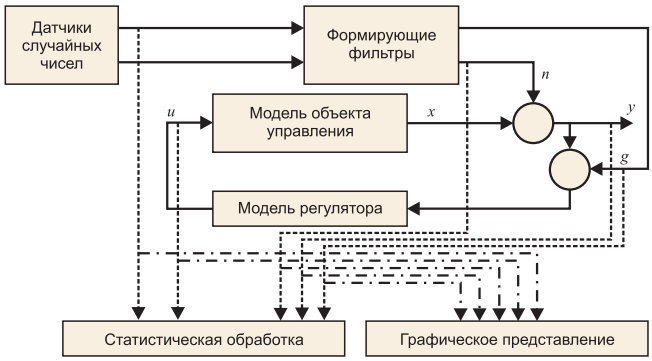

Рис. 1. Блок-схема системы имитационного моделирования

класса моделей по сравнению с аналитическими моделями, рассматриваемыми в теории динамических систем (главным образом, это линейные или специального вида нелинейные дифференциальные или разностные уравнения), позволяет максимально приблизить моделируемый объект к реальности, не искажая его упрощениями и допущениями, необходимыми для получения строгих математических результатов. То же самое относится и к моделированию способов управления, которые опять-таки максимально приближаются к реальным.

Для создания имитационных моделей динамических систем на ПК, включающих объект с действующими на него возмущениями, регулятор и разнообразные средства анализа результатов моделирования, разработаны мощные программные системы. Реализованные в них принципы визуального программирования позволяют пользователю в типичных ситуациях не иметь дела с формированием программного кода, собирая "экспериментальную установку" из требуемых блоков путем их соединения на экране монитора средствами графики. Благодаря функциям объединения блоков в подсистемы моделированию подлежат системы практически любой сложности, включающие не только отдельные управляемые ТП, но автоматизированные участки производства и даже автоматизированные технологические комплексы в целом. При необходимости использования нестандартных блоков пользователь имеет возможность написать свою программу и пополнить библиотеку нужным ему модулем. Главной целью управления ТП является компенсация возмущающих воздействий, которые обычно носят случайный характер. Имитация такого рода возмущений и измерительных помех осуществляется с использованием генераторов псевдослучайных чисел и соответствующих формирующих фильтров (рис. 1).

В настоящее время наиболее известным пакетом "блочного моделирования" является система SIMULINK пакета MATLAB (MathWorks, Inc.; www.mathworks.com) [4]. С помощью данной или подобной ей систем могут выполняться многовариантные расчеты, в ходе которых решаются такие важные задачи проектирования систем управления, как настройка параметров алгоритмов управления, анализ устойчивости и грубости систем по отношению к неконтролируемым параметрическим и структурным изменениям объекта и (или) возмущений, оценка инженерных показателей качества управления для разных вариантов организации контроля процесса.

Крайне важное значение имеет и то обстоятельство, что решение перечисленных вопросов методами имитационного моделирования доступно специалистам вполне "умеренной" квалификации, тем более, что используемые при этом визуальные средства создания схем из библиотечных модулей весьма сходны с привычными для современного "инженера-автоматчика" средствами проектирования SCADA-систем.

Теория управления и имитационное моделирование

Являясь мощным инструментом для настройки и оценки работоспособности и качества систем управления практически любой сложности в условиях, максимально приближенных к реальности, имитационное моделирование само по себе не решает, однако, важнейшую для инженера задачу разработки структуры алгоритма управления – методами имитационного моделирования лишь проверяются и на основе эвристики и опыта уточняются и развиваются принятые каким-то образом алгоритмические решения. Для принятия таких фундаментальных начальных решений могут оказаться чрезвычайно полезными методы современной теории управления.

Представляется, что общей идейной платформой применения теории управления для решения практических задач может служить теория возмущений. Ее суть состоит в следующем. Вначале рассматривается базовая упрощенная (идеализированная) постановка задачи. Отсутствие учета практически важных, но не очень принципиальных условий позволяет использовать для решения этой порождающей задачи известные методы теории управления. Затем полученное базовое решение модифицируется с учетом первоначально неучтенных особенностей реальной задачи на основе предшествующего опыта и с широким использованием имитационного моделирования для проверки инженерных "изобретательских" решений.

Далее конкретизируем эту общую идею в нескольких направлениях [5].

- *Слабонелинейные системы.* Базовая упрощенная модель линейная, и задача управления решается известными методами теории линейных систем управления. Далее тем или иным способом исходный закон управления корректируется с учетом нелинейностей.
- *Слабовозмущенные системы.* В базисной задач предполагается, что возмущения отсутствуют. Тогда могут использоваться известные методы программного управления и, в частности, если речь идет о процессах, функционирующих в стационарных условиях (квазистатические системы) – хорошо разработанные методы статической оптимизации. На втором этапе система верхнего уровня, вырабатывающая оп-

тимальную программу или режимные уставки, дополняется системой с обратной связью по отклонениям от предписанного верхним уровнем движения или постоянного режима, стабилизирующей процесс в условиях относительно слабых возмущений. При этом используются известные методы синтеза законов регулирования линейных динамических объектов применительно к линеаризованному описанию объекта.

• *Слабодинамические системы.* Известно, что для устойчивых динамических объектов весовая функция стремится к нулю при стремлении аргумента к бесконечности. Это означает, что хотя значения выходных переменных в некоторый момент времени зависят, вообще говоря, от всех ранее выданных управляющих воздействий, эта зависимость ослабевает по мере удаления управлений в прошлое. С использованием этого факта в порождающей задаче рассматривается более простой для анализа объект с "укороченной" динамической памятью, а затем это решение корректируется с учетом "отброшенных" частей весовой функции. В частности, если для порождающей задачи изменять управляющие воздействия с периодом, превышающим глубину "укороченной" динамической памяти системы, то приходим к более простой, чем исходная, задаче управления статическим объектом. При этом возврат к исходной постановке, учитывающей динамику управляемого процесса, заключается в организации второго (нижнего) уровня управления, задача которого состоит в оптимальном по быстродействию выводе объекта на задания верхнего ("статического") уровня.

• *Слабоуправляемые системы.* Для производственных систем, состоящих из ряда связанных между собой материальными потоками ТП, возникает сложная задача совместного выбора управляющих воздействий исходя из одного или нескольких критериев, которые характеризуют технико-экономические показатели производства в целом. Часть из этих управляющих воздействий (отнесем их к первому типу) составляют расходы материалов в единицу времени, другую часть (отнесем их ко второму типу) – режимные параметры каждого из ТП. В предположении, что при изменении управляющих воздействий в рамках допусков основное влияние на выходные материальные потоки отдельных процессов оказывают управляющие воздействия первого типа, в качестве упрощенной порождающей может быть рассмотрена задача так называемого оперативного управления, то есть задача управления распределением материальных потоков между ТП [6]. При ее решении режимные параметры фиксируются на неких номинальных уровнях, например, в центре допустимого диапазона. На втором этапе решения исходной задачи с учетом общих технико-экономических критериев и найденного распределения материальных потоков формируются целевые функции отдельных процессов и на этой основе определяются их наилучшие режимные параметры. Здесь же возможно уточнение решения задачи оперативного управления, связанное с учетом влияния режимных параметров составляющих процессов на их производительность.

Имитационные модели в алгоритмах управления

В рамках рассмотренной концепции разработки алгоритмов управления реальными ТП чрезвычайно важным этапом является "доводка" (как в сторону усложнения, так и в сторону упрощения) полученных на основе теории способов управления с учетом особенностей конкретных задач автоматизации. Для успешного осуществления этой "доводки" крайне важно, в свою очередь, чтобы структура порождающего алгоритма имела блочный характер, где каждый блок выполняет свою физически ясную функцию. В этом случае у разработчика возникает хорошая перспектива усовершенствования отдельных блоков при сохранении общей функциональной схемы алгоритма управления. Вместе с тем, получаемые на базе формальных методов теории способы управления нередко не удовлетворяют этому условию. Так, модели объекта в пространстве состояний приводят к законам управления, выражаемым функциями от оценок характеристик состояния, и поскольку сами формально введенные характеристики состояния обычно не имеют ясного физического смысла, то не имеют его и получаемые преобразования этих характеристик.

В этом плане более полезными могут оказаться подходы к синтезу алгоритмов управления на основе известного метода динамической компенсации [5]. Оказывается, при определенной трактовке он приводит к законам управления с блочной структурой, содержащим в своем составе блоки имитации поведения во времени управляемого объекта.

Идея метода состоит в синтезе регулятора, который обеспечит идентичность поведения замкнутой системы определенному эталонному образцу. Рассмотрим задачу поддержания выходной переменной $y(t)$ на заданном уровне y^* в условиях действия приведенных к выходу возмущений $n(t)$ для объекта с передаточной функцией $H_{об}(p)$ (рис. 2). При синтезе регулятора с отрицательной обратной связью по данным зашумленного помехой $g(t)$ контроля $y(t)$ будем без потери общности полагать $y^* = 0$. Тогда поведение выходной переменной, которую необходимо стабилизировать на нулевом уровне, определяется известным соотношением

$$y = [1 - H_{замк}(p)]n - H_{замк}(p))g, \qquad (1)$$

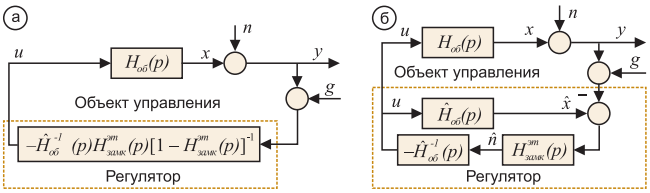

Рис. 2. Управление по методу динамической компенсации

Http://www.avtprom.ru

где $$H_{замк}(p) = \frac{H_{об}(p)H_{рег}(p)}{1+H_{об}(p)H_{рег}(p)}. \qquad (2)$$

Из (1) видно, что $y(t)$ целиком зависит от передаточной функции замкнутой системы $H_{замк}(p)$, и для обеспечения требуемого поведения $y(t)$ достаточно выполнить условие равенства этой передаточной функции некому эталонному образцу $H^{эт}_{замк}(p)$. Он выбирается исходя из спектральных характеристик и относительной интенсивности $n(t)$ и $g(t)$ таким образом, чтобы в максимальной степени скомпенсировать возмущения и подавить измерительные помехи в (1) [5]. Задав эталонное поведение замкнутой системы "объект-регулятор", можно из (2) найти требуемую для соответствия эталону передаточную функцию регулятора

$$H_{рег}(p) = \hat{H}^{-1}_{об}(p)\frac{H^{эт}_{замк}(p)}{1-H^{эт}_{замк}(p)}, \qquad (3)$$

где $\hat{H}_{об}(p)$ – оценка передаточной функции объекта управления, представляющая собой динамическую модель ТП по каналу управляющих воздействий.

Для пояснения традиционного способа реализации полученного закона управления $u(t) = -H_{рег}(D)y(t)$ (D – обозначение оператора дифференцирования) рассмотрим типичный пример. Пусть объект управления, его динамическая модель и эталонная передаточная функция замкнутой системы представляют собой инерционные звенья первого порядка:

$$H_{об}(p) = \frac{K}{Tp+1},\ \hat{H}_{об}(p) = \frac{\hat{K}}{\hat{T}p+1},\ H^{эт}_{замк}(p) = \frac{1}{Qp+1}. \qquad (4)$$

Тогда закон управления (3), сформированный по схеме динамической компенсации, запишется в виде:

$$H_{рег}(p) = \frac{\hat{T}p+1}{\hat{K}}\frac{1}{(Qp+1)(1-\frac{1}{Qp+1})} =$$

$$= \frac{\hat{T}p+1}{\hat{K}}\frac{1}{Qp} = K_п + K_и\frac{1}{p}, \qquad (5)$$

где параметры $K_п = T/(KQ)$ и $K_и = 1/(KQ)$ представляют собой коэффициенты хорошо известного всем инженерам ПИ-регулятора, реализация которого в рамках стандартной схемы (рис. 2а), казалось бы, не вызывает никаких вопросов.

Приближая задачу к реальной, представим себе, однако, что статическая модель автоматизируемого объекта нелинейна и задается зависимостью $x = F(u)$. Тогда с учетом инерционности процесса его динамическая модель может быть задана в виде последовательности линейного инерционного и нелинейного статического звеньев (рис.3):

$$x = F(z);\ z = H_{об}(p)u, \qquad (6)$$

причем в рассматриваемом примере $H_{об}(p) = 1/(T_p + 1)$.

Синтезированный выше закон управления (5) дает решение задачи в линейном приближении, когда нелинейная зависимость в (6) заменяется линейной $x = Kz$, однако при реализации по приведенной на рис.1 а стандартной схеме остается не ясным, каким образом изменить алгоритм управления, чтобы учесть нелинейность объекта. Рассмотрим в связи с этим другой способ реализации способа управления (3), соответствующий блок-схеме, приведенной на рис.2 б.

Здесь алгоритм управления представлен в виде системы взаимодействующих, но вместе с тем автономных блоков. Смысл внутренней обратной связи состоит в имитации реакции объекта на управляющие воздействия и выделении непосредственно неконтролируемых приведенных к выходу возмущений. Поскольку возмущения выделяются лишь в сумме с измерительными помехами, возникает задача фильтрации, а роль фильтра играет эталонная передаточная функция замкнутой системы. Получив на выходе фильтра оценку возмущений $\hat{n}(t)$, необходимо выработать компенсирующие их управляющие воздействия. Для этого служит блок компенсации, содержащий инвертированную динамическую модель объекта. Насколько близка эта модель к реальному объекту, настолько близок будет выход объекта $x(t)$ к значению $\hat{n}(t)$, взятому со знаком "минус". Наконец, насколько близкой к $n(t)$ окажется оценка $\hat{n}(t)$, настолько близкой к требуемому нулевому значению окажется выходная переменная $y(t)$.

Ясное назначение каждого из функциональных блоков представленного подобным образом закона управления позволяет достаточно просто модифицировать их "начинку" при усложнении задачи. В частности, учет нелинейности статической характеристики объекта может быть сделан по схеме, представленной на рис. 3, где F^{-1} обозначает обратную функцию. При этом замкнутая система будет вести себя в соответствии с заданным эталоном $H^{эт}_{замк}(p)$.

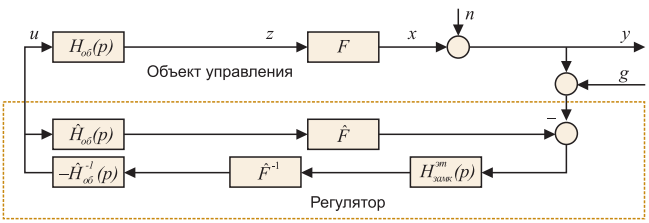

Рис. 3. Учет нелинейности в схеме динамической компенсации

Использование имитационных моделей при управлении по схеме условного прогнозирования

В качестве обобщения рассмотренной алгоритмической структуры, включающей моделирование поведения управляемого объекта в реальном времени, может рассматриваться предложенная в [7] так называемая схема условного прогнозирования (рис.4).

Для широкого класса непрерывных ТП разнообразные проблемы динамической оптимизации могут быть формализованы в виде задачи минимизации математического ожидания средних потерь на длительном интервале функционирования

$$\lim_{T\to\infty} M\left\{\frac{1}{T}\int_0^T \varphi(y(t),u(t))dt\right\} \longrightarrow \min. \qquad (7)$$

Модель ТП обычно задается зависимостью вектора выходных переменных $y(t)$ от значений векторов управляющих воздействий $u(\tau)$ и контролируемых случайных возмущений $r(\tau)$ в предшествующие моменты времени τ, искажаемой неконтролируемыми случайными возмущениями $n(t)$

$$y(t) = f(u(\tau), r(\tau): \tau \in (-\infty, t)) + n(t). \qquad (8)$$

При наличии характерных для ТП перекрестных связей, сложной динамики, содержащей наряду с инерционными звеньями элементы чистого запаздывания, и ограничений $u(t) \in G_u$ задача нахождения оптимального управления (7), (8) не имеет точного решения даже в простых вариантах [3, 5]. Более того, реальная модель может быть задана не системой дифференциальных и алгебраических уравнений, а алгоритмом, включающим операции логического характера.

Один из подходов к приближенному решению состоит в применении схемы условного прогнозирования. Ее суть заключается в том, что на каждом шаге управления с использованием в регуляторе внутренней обратной связи, включающей имитационную модель объекта, производится выделение, а затем перспективный прогноз случайных возмущений. Далее на основе такого прогноза путем "проигрывания" на имитационной модели управляемого процесса различных вариантов формируется многошаговая программа управления, оптимизирующая критерий (7) с учетом ограничений, после чего реализуется начальный шаг намеченной программы. Таким образом, предлагаемая схема управления использует имитационную модель дважды: один раз эта модель работает в РВ и служит для выделения возмущений, приведенных к выходу объекта, а другой раз она работает в ускоренном времени и служит для поиска наилучшей программы управления.

Упрощенный вариант схемы условного прогнозирования

Реализация рассмотренной схемы "в лоб" в изложенном двушкальном временном варианте может оказаться достаточно сложной, однако благодаря блочной "архитектуре" алгоритм допускает различные модификации при сохранении общей структуры. В частности, может быть предложен упрощенный вариант схемы, где вместо сложной задачи поиска оптимальной программы с учетом динамики объекта решается существенно более простая задача статической оптимизации (рис. 5).

В соответствии с методикой условного прогнозирования блок-схема предлагаемого многомерного регулятора содержит цепь внутренней обратной связи, которая служит для получения оценки приведенных к выходу неконтролируемых возмущений с использованием имитационной модели процесса (8). В блоке прогноза возмущений с применением одного из известных методов прогнозирования случайных процессов осуществляется фильтрация от измерительных ошибок $g_r(t)$ и $g_y(t)$ с одновременным предсказанием возмущений $r(t)$ и $n(t)$. Далее путем замены неизвестных значений возмущений спрогнозированными осуществляется переход от вероятностной задачи оптимизации к детерминированной. При этом должна быть определена программа $u(\tau)$ для $\tau \in [t, \infty)$, минимизирующая целевую функцию

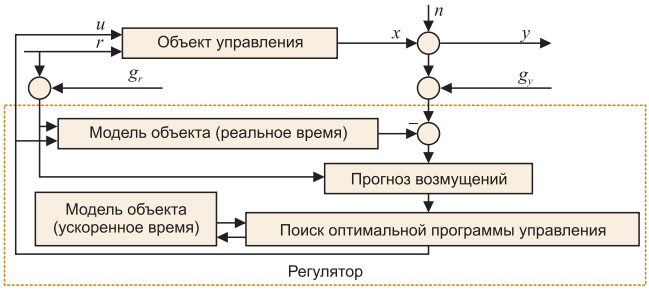

Рис. 4. Управление по схеме условного прогнозирования

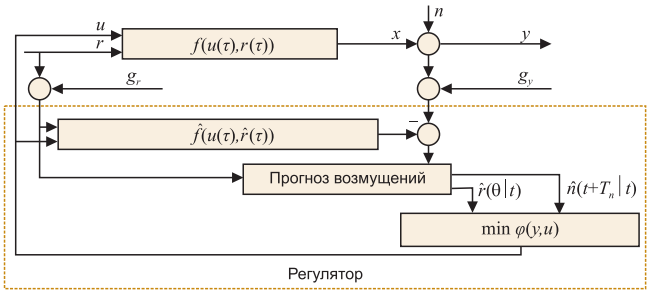

Рис. 5. Управление по упрощенной схеме условного прогнозирования

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T-t} \int_t^T \varphi(y(\tau), u(\tau))\, d\tau \qquad (9)$$

при ограничениях:

$$y(\tau) = \hat{f}(u(\theta), \hat{r}(\theta|t): \theta \in (-\infty, t)) + \hat{n}(\tau|t),$$
$$u(\tau) \in G_u \text{ для } \tau \in [t, \infty), \qquad (10)$$

где $\hat{r}(\theta|t)$ и $\hat{n}(\tau|t)$ – оценки соответствующих сигналов по данным контроля, полученным к текущему моменту времени t.

Для приближенного решения этой, как правило, весьма сложной задачи предлагается использовать следующие соображения эвристического характера. Суть задачи оптимального программного управления состоит в минимизации целевой функции $\varphi(y,u)$ в каждый момент времени $\tau \in [t, \infty)$. Ограничимся рассмотрением кусочно-постоянных управляющих воздействий таких, что длительность каждой "ступеньки" T_n превосходит длительность переходного процесса в динамической системе (10), и поставим более скромную цель минимизации целевой функции к концу каждого "ступенчатого" цикла. При такой постановке динамическая задача минимизации функционала (9) распадается на ряд автономных задач статической оптимизации для каждого цикла управления, причем в рамках методики условного прогнозирования важен лишь первый цикл, который начинается в момент t и заканчивается в момент $t + T_n$.

Условие минимизации $\varphi(y,u)$ к концу цикла приводит к задаче статической оптимизации

$$\min_u \{\varphi(y,u)|y = \\ = \hat{f}_{уст}(u,\hat{r}(\theta|t):\theta\in(-\infty,t+T_n)) + \hat{n}(t+T_n|t),\ u\in G_u\}, (11)$$

где функция $f_{уст}$ определяет установившуюся реакцию объекта на постоянное управляющее воздействие u и спрогнозированные возмущения.

Найдя решение этой задачи u^{opt} одним из методов нелинейного или линейного программирования (в зависимости от вида критериальной функции φ, статической модели $f_{уст}$ и типа ограничений G_u), определим тем самым искомое управляющее воздействие в текущий момент t, положив $u(t)= u^{opt}$.

Средствами системы имитационного моделирования SIMULINK был выполнен сравнительный анализ предложенного регулятора (который можно назвать многомерным предиктором) с многомерным ПИ-регулятором, настраиваемым с использованием так называемого комбинированного метода [8]. Моделирование проводилось при случайных возмущениях применительно к линейному инерционному объекту с запаздыванием, динамика которого задавалась передаточной матрицей $H(p) = \{k_{ij}exp(-p\tau_{ij})/(T_{ij}p+1)\}$, $i,j = 1,2$. Выполненные модельные эксперименты показали, что предиктор обеспечивает лучшее качество стабилизации, оцениваемое по среднеквадратичному критерию.

Опыт применения имитационных моделей

В статье предпринята попытка обобщить опыт автора по применению имитационных моделей при разработке систем управления процессами приготовления многокомпонентных смесей [9, 10]. В ходе проектирования смесительно-усреднительных автоматизированных технологических комплексов (АТК) необходимо выбрать наиболее экономичный вариант технологического оборудования, а также технических средств контроля с учетом требований и возможностей системы управления. Для решения такого рода задач системного анализа создан программный комплекс, который включает две проектирующие подсистемы: многовариантного анализа (ПМА) и имитационного моделирования (ПИМ) смесительно усреднительных АТК. На начальной стадии проектирования расчеты ведутся с применением ПМА, так как, базируясь на приближенных соотношениях теории линейных динамических систем, она обладает большим быстродействием. На заключительной стадии несколько лучших вариантов исследуются на более точной имитационной модели с помощью ПИМ. Комплекс программ был применен при проектировании АТК сырьевых переделов 15 цементных и одного стекольного заводов.

Для управления приготовлением сырьевых смесей в цементном производстве разработан базовый алгоритм, предназначенный для АСУТП заводов, работающих по высокопроизводительной поточной технологии. Алгоритм реализует один из вариантов схемы условного прогнозирования, где в процессе управления имитационная модель смесеприготовления используется для выделения и компенсации возмущающих воздействий, обусловленных неконтролируемыми флуктуациями характеристик смешиваемых материалов и погрешностями дозирования. На основе базового алгоритма реализовано ПО АСУТП приготовления сырьевых смесей на Липецком, Ново-Карагандинском, Себряковском, Навоийском, Резинском и ряде других заводов РФ и СНГ.

Заключение

Обращая внимание упорного читателя, добравшегося до финала статьи, на шутливый эпиграф в ее начале, автор надеется, что ключом к решению задач создания эффективных систем управления сложными ТП является разумный симбиоз методов теории управления и имитационного моделирования. Одновременно следует подчеркнуть, что моделирование может лишь сократить объем экспериментальных работ на реальном объекте, но отнюдь не исключить стадию доводки системы управления при ее внедрении в производство [11].

Список литературы

1. *Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П. и др.* Проблемы создания эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №7.
2. *Симкин А.И., Дмитренко И.В., Довгалев Д.О.* Уровень современной автоматизации на металлургических предприятиях // Там же. 2004. №10.
3. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Автоматика и телемеханика. 2005. №5.
4. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab. СПб., Наука. 2001.
5. *Первозванский А.А.* Курс теории автоматического управления. М., Наука, 1986.
6. *Гайцгори В.Г., Ицкович Э.Л., Первозванский А.А., Соркин Л.Р.* Взаимосвязь задач оперативного управления производством и локальной оптимизации установок на предприятиях с непрерывной технологией // Автоматика и телемеханика. 1986. № 6
7. *Перельман И.И.* Динамическая оптимизация в АСУ ТП на базе алгоритмов условного прогнозирования // Там же. 1978. № 9
8. *Кустов Б.С., Яковис Л.М.* Комбинированный метод расчета многомерных пропорционально-интегральных регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // XXXIII Неделя науки СПбГПУ, Ч.IV: Материалы Всероссийской межвуз. научно-техн. конф.-СПб.: Изд. СПбГПУ, 2005.
9. *Яковис Л.М.* Многокомпонентные смеси для строительства. Расчетные методы оптимизации состава. Л., Стройиздат, 1988.
10. *Гельфанд Я.Е., Яковис Л.М. и др.* Управление химико-технологическими процессами приготовления многокомпонентных смесей. Под ред. Я.Е. Гельфанда // Л., Химия, 1988.
11. *Ротач В.Я.* Адаптация в системах управления технологическими процессами // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. №1.

Яковис Леонид Моисеевич *– д-р техн. наук, старший научный сотрудник, проф. Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Контактные телефоны: (812) 759-71-21, 950-49-39. E-mail: leonid@yakovis.com*