

УДК 669.184:658.52.011.56

Л.В. Галицкая

## Активно-пассивная идентификация промышленных объектов в системах управления

Предложены способы активно-пассивной идентификации эргодических систем управления, не требующие разрыва обратных связей в действующих контурах регулирования и нанесения пробных воздействий, цель которых не соответствует достижению характерных для нормального функционирования систем выходных воздействий. Областью применения данных результатов являются технологические объекты металлургии.

**Ключевые слова:** идентификация, система управления, вектор выходных воздействий, целевая функция, ошибка регулирования, ошибка прогнозирования, статистическая модель.

### Задача активно-пассивной идентификации в системах управления

В настоящее время проблема идентификации объектов управления является актуальной. Решение данной проблемы невозможно без создания эффективных систем управления (СУ), как автоматических, так и автоматизированных. Проблеме идентификации, разработке ее теоретических и прикладных вопросов посвящены работы Н.С. Райбмана, П. Гропа, Н.А. Спирина, Л. Льюнга, В.Я. Ротача, В.П. Авдеева, Л.П. Мышляева, В.И. Веревкина [1, 2, 4, 6, 9]. Наиболее применяемые в технологических СУ способы идентификации подразделяются на активные и пассивные. В активных способах идентификации и управления предполагается оперативное воздействие как человека, так и средств автоматизации, направленное на изменение значимых параметров. В пассивных способах задача идентификации объекта, соответствующего определенным технологическим ограничениям (нормальной эксплуатации (НЭ)), оказывается неразрешимой [6]. Это обусловлено, с одной стороны, наличием значимых статистических связей между входными величинами и приведенной к выходу помехой [4, 6] либо самим возмущением – с другой. К числу других недостатков пассивного изучения объектов относится недостаточно широкий спектр, необходимый для оценки их динамических характеристик [6]. Поэтому основное внимание приковано к активным способам изучения и построения моделей технологического объекта. Активная идентификация предполагает вмешательство в НЭ изучаемого объекта управления, что в отдельных случаях может привести к существенному ухудшению его состояния.

Реальным путем активного изучения большинства сложных промышленных объектов в свое время явилось не традиционное снятие кривых разгона, сопровождающееся размыканием обратных связей (с полным отстранением оперативного персонала от управления объектом на весь период проведения эксперимента), а нанесение пробных (испытательных, исследовательских) воздействий на прогнозируемые рабочие управления (РУ) [4]. В соответствии с этим методом в начале эксперимента человек-оператор, управляющий данным объектом, или автоматическое устройство управления прогнозировали траектории РУ. Они же прогнозировали траектории изменения выходных воздействий объекта. Затем на предполагаемые траектории РУ наносили (добавляли) испытательные воздействия. В ходе эксперимента фиксировали траектории отклонений выходных величин объекта относительно спрогнозированной траектории их изменения. Если в ходе эксперимента объектом управляют, придерживаясь спрогнозированной траектории изменения управляющих воздействий, то при отсутствии испытательных воздействий по каналу регулирования отклонение измеренного значения выходной величины в конце  $i$ -го интервала памяти объекта (либо в конце  $i$ -го технологического цикла) соответствует отклонению между прогнозируемой выходной величиной и выходной величиной после проявления эффекта пробного сигнала [2, 4, 7–9].

### Постановка задачи

Состояние канала регулирования идентифицируемого технологического объекта определяется значениями  $n$  параметров, изменяющихся при прохождении технологического цикла.

Положим, что  $Y_k(i)$  – выходное значение параметра с номером  $k$ , оцененное в конце  $i$ -го технологического цикла,  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Желаемое состояние этого параметра назовем «точкой прицеливания» и обозначим  $Y_k^*(i)$ .

Отклонение измеряемого значения  $Y_k(i)$  от  $Y_k^*(i)$  складывается из ошибки регулирования  $\xi(i)$  и ошибки прогнозирования  $\delta(i)$

$$\Delta Y_k(i) = Y_k(i) - Y_k^*(i) = \xi(i) + a \cdot \delta(i), \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент передачи по идентифицируемому каналу регулирования, определяемый эмпирически, является количественной мерой значимости ошибки прогнозирования  $d(i)$ ;  $d(i)$  – ошибка прогнозирования управлений по идентифицируемому каналу регулирования, оцененная на момент времени реализации  $i$ -го интервала памяти объекта либо  $i$ -го технологического цикла;  $\xi(i)$  – ошибка регулирования, оцененная к тому же моменту времени.

При наложении испытательного воздействия  $P(i)$ :

$$\Delta Y_k(i) = a[P(i) + \delta(i)] + \xi(i). \quad (2)$$

Эксперимент повторяется несколько раз с различными по знаку и величине пробными воздействиями. По полученным данным строится статистическая модель объекта с получением оценки коэффициента передачи объекта  $a$ .

Активное экспериментирование чередуется с обычным функционированием производственно-исследовательской системы. При этом данные нормальной эксплуатации в дальнейшем используются для нахождения ошибок регулирования и прогнозирования. Результаты экспериментов обрабатываются с применением методов инструментальных переменных (в качестве инструментальной переменной принимают  $P(i)$ ). Нами использован метод инструментальных переменных с варьированием  $P(i)$  и минимизацией по методу наименьших квадратов.

Во время исследования объекта на интервале ожидаемого проявления эффектов пробных воздействий регулирующие обратные связи, осуществляемые как автоматически, так и с человеком, по возможности размыкаются, а контуры управления по возмущениям функционируют в обычном режиме. При большой необходимости способ допускает сохранение и элементов регулирования с обратными связями. Их представляют (в приращениях к прогнозируемым уровням управления) простыми, понятными алгоритмами с заранее установленными значениями коэффициентов.

Способ вполне пригоден и для изучения влияния тех определяющих факторов, которые непосредственно не входят в состав регулирующих воздействий, но могут выборочно изменяться при проведении специально организованных экспериментов. Преимущества способа проявляются особенно заметно на заключительных стадиях управления, когда ошибки регулирования и прогнозирования оказываются малыми.

Дальнейшим шагом в направлении снижения вмешательства исследователя в НЭ объекта можно считать **идентификацию с изменением задания** [3]. Суть способа рассмотрим на примере объекта с непрерывным технологическим процессом (объекты с циклическими технологическими процессами идентифицируются аналогично). К некоторому стартовому моменту времени  $t_C$  человеком-оператором или автоматом прогнозируются траектория вектора РУ до конца интервала памяти объекта, а также соответствующая траектория вектора выходных величин. В момент времени  $t_C$  по команде вышестоящей управляющей системы изменяется задание, например марка стали и способ ее разлива. Далее эргодическая СУ функционирует в обычном режиме. В соответствии со сменой внешнего задания человек-оператор корректирует собственную цель – требуемое значение вектора выходных воздействий объекта (для циклических объектов – «точку прицеливания»). Он отказывается от первоначально намеченной траектории вектора РУ и изменяет ее для достижения новой цели. Критерии идентификации и оптимизации РУ хорошо согласуются [1]. Фактически сам человек-оператор реализует эксперимент по изучению объекта.

#### Способ идентификации действующих объектов в СУ

Использование данного способа применяется для построения математических моделей каналов регулирования циклических и непрерывных технологических объектов в СУ. Результат заключается в повышении точности идентификации изменения состояния объекта (в сторону стабилизации или в сторону повышения устойчивости системы) и нанесения пробного сигнала, который своим воздействием способствует росту устойчивости СУ [7].

В качестве отклика в опытах рассматривается отклонение  $\Delta Y_k$  фактического значения результирующей выходной величины от прогнозируемой уставки на конец интервала памяти объекта. Изменение траектории РУ относительно ранее прогнозируемой траектории одновременно является и изменением во времени исследовательского воздействия, представляющего собой направленный на достижение целей идентификации фрагмент управлений – траекторию дополнительных управле-

ний, направленных на приведение выходной величины в конце интервала памяти объекта к новому заданному значению.

Изменение внешнего по отношению к данной СУ задания приводит и к изменению собственно задания, которое устанавливает себе человек-оператор. Как следствие, возникает дополнительная составляющая управлений – аналог испытательного воздействия:  $P(t) = U(t) - \hat{U}(t)$ , где  $U(t)$ ,  $\hat{U}(t)$  – фактически реализованная и прогнозируемая к моменту времени смены задания  $t_c$ .  $t_c$  может считаться моментом начала эксперимента.  $t \in [t_c, t_k]$  – текущее время;  $t_k$  – момент времени окончания эксперимента. Продолжительность эксперимента во времени может занимать несколько технологических циклов.

Для случая линейного представления канала регулирования вход-выходные зависимости объекта, начиная с момента времени  $t_c$ , можно определить в виде [2]

$$\Delta Y_k = Y(t_k) - Y^*(t_k) = \sum_{i=1}^S \int_0^{\tau_n} f_i(\tau) [P_i(t-\tau) + \delta_i(t-\tau)] d\tau + \xi(t), \quad (3)$$

где  $\Delta Y_k$  – отклонение измеренного значения выходной величины в конце интервала памяти объекта (либо в конце технологического цикла)  $Y(t_k)$  от прежней «точки прицеливания»  $Y^*(t_k)$ ;  $f_i(\tau)$  – весовая функция по  $i$ -му каналу регулирования;  $P_i(t-\tau)$  – величина аналога пробного воздействия по  $i$ -му каналу регулирования в момент времени  $(t-\tau)$ ;  $\delta_i(t-\tau)$  – ошибка прогнозирования уровня РУ по  $i$ -му каналу;  $\xi(t)$  – ошибка регулирования учитываемой выходной величины относительно ее уставки;  $\tau \in [0, \tau_n]$  – переменная, интегрированная в масштабе времени;  $S$  – общее число каналов управления;  $t_k = t_c + \tau_n$  для объектов с непрерывным режимом функционирования;  $t_k$  – конец цикла для циклических процессов;  $\tau_n$  – время переходного процесса, включающего чистое и инерционное запаздывание.

Ошибка прогнозирования  $\delta_i(t-\tau)$  и ошибка регулирования  $\xi(t)$  определяются по данным опытов без нанесения пробного воздействия, т.е. при неизменном задании. Поскольку ошибки прогнозирования и регулирования зависят от особенностей и условий производства данного вида продукции, то их анализ необходимо проводить по близким организационно-технологическим состояниям (ОТС) СУ и близким управляющим решениям. Для этого ОТС системы разделяют на классы  $K_i$ . Статистический анализ  $\delta_i$  и  $\xi(t)$ , а также обработка результатов экспериментов на основе выражения (3) производятся в данном классе  $K_{ji}$  ОТС. Таким путем для реально нелинейных и нестационарных технологических процессов достигается более строгая поклассовая (типологическая) линеаризованность модели (3), а также обеспечивается необходимое условие воспроизводимости опытов.

Отказ от искусственного разрыва в ходе эксперимента обратных связей действующей СУ в принципе обеспечивает оценку динамических характеристик не объекта управления, а всей системы. Однако учитывая совпадения ориентировочной основы действий технологической и исследовательской систем, искусственного подавления эффектов изменения задания не происходит. Тем самым нет подавления эффекта испытательного воздействия на объект. Обратная связь разрывается по желанию самого человека-оператора. Тем самым обеспечивается идентификация именно объекта.

Способ идентификации сложных технологических объектов с изменением заданий можно успешно использовать при различных интервалах исследования, в том числе, равных и превосходящих интервал памяти объекта [3]. В то же время способ не применим для заключительных стадий циклического управления (например, в конце операции выплавки металла), т.к. недостаток времени до конца цикла не позволяет перевести продукцию из одного вида в другой.

Для снижения отрицательного воздействия исследователя во время идентификации на нормальный ход технологического процесса можно использовать и автоматический режим управления. При таком способе автомат реализует некоторую программу входных воздействий, содержащую спланированные диагностирующие сигналы [4]. Наиболее предпочтительными являются случаи совмещения процессов диагностирования состояния и планового автоматического управления объектами.

Примером такого органичного совмещения этих двух процессов является продувка стали в ковше инертным газом через погружную футерованную фурму в автоматическом режиме. Одновременно такой режим позволяет оперативно оценивать состояние продувочной фурмы, поскольку фурма совершает возвратно-поступательное движение по заранее установленной программе. Фактически активный эксперимент при этом трансформируется в пассивный, но с соблюдением требо-

ваний активного: управляющие связи с пробного воздействия, любого другого собственно возмущения и с выхода на вход процесса продувки стали в ковше разрываются.

#### **Реализация СУ на основе идентификации состояний канала регулирования**

При реализации предлагаемого способа необходимо выполнение условий:

1. Программа автоматического управления должна включать в себя спланированные воздействия.
2. Время работы в автоматическом режиме должно быть достаточным для проявления эффекта спланированных воздействий на изучаемых переменных состояния.

Из второго условия следует, что исследованию настоящим способом можно подвергать лишь такие каналы «управление-состояние», время памяти которых ниже времени работы объекта в автоматическом режиме. На период исследования управляющие воздействия стабилизируют на опорных уровнях. При необходимости могут сохраняться автоматические обратные связи от возмущений на вход (исключая связи от пробного сигнала). Состояние объекта прогнозируют. Управление поручают автомату. По результатам проявления эффектов спланированных воздействий оценивают оперативное состояние объекта.

Очередным шагом в направлении снижения вмешательства исследователей в процесс построения математической модели объекта можно считать **способ идентификации действующих объектов в СУ** [7]. Согласно данному способу испытательные воздействия предложено наносить в направлении, способствующем улучшению состояний систем. Нанесение испытательных воздействий в обратную сторону с точки зрения статистики не имеет смысла.

Многие металлургические процессы протекают в условиях пониженной устойчивости СУ. Важной особенностью нелинейных СУ является тот факт, что «в нелинейной области устойчивость стационарного состояния не поддерживается автоматически. Такое состояние устойчиво только тогда, когда все возможные отклонения и возмущения имеют характер подъема в горку». То есть если новое состояние энергетически ниже, чем исходное, то система будет двигаться в сторону еще большего отклонения от исходного стационарного состояния. Если же возмущения должны приводить к возрастанию энергетике системы, «имеют характер подъема в горку», то состояние системы остается устойчивым. Статистическое оценивание не может гарантировать нужной точности идентификации. В этом случае предлагается применять способ идентификации на основе компенсации внешних воздействий. Динамика поведения системы в направлении устойчивого состояния положительна. При этом происходит улучшение состояния системы. При реализации способа возникает естественный вопрос: «В случае существенной нелинейности объекта как описать динамику поведения объекта в сторону ухудшения его состояния?». Ответ на этот вопрос также вполне понятен: действия человека-оператора, направленные на ухудшение состояния объекта, в критических ситуациях следует признать недопустимыми, а значит, не имеющими смысла.

#### **Способ описания объектов в действующих СУ на основе компенсации эффекта внешних воздействий**

Основная идея [8] заключается в предварительной оценке статистических характеристик ошибок прогнозирования внешнего воздействия. Если параметры распределения в соответствии с критерием Фишера позволяют принять гипотезу о существовании линейной корреляционной зависимости с высоким уровнем коэффициента детерминированности, то производится управление для компенсации эффекта действия канала возмущения. Внешнее воздействие объективно присутствует и оказывает влияние на объект исследования. Убрать или снизить эффект влияния возмущения, как правило, не представляется возможным. В то же время деятельность человека-оператора направлена на снижение вредного влияния возмущения. Имеет место полная заинтересованность технологов в компенсации эффектов внешних воздействий.

Согласно предложенному способу предварительно идентифицируют канал возмущения и оценивают статические характеристики ошибок прогнозирования внешнего воздействия. Дополнительно прогнозируют поведение контролируемого внешнего воздействия объекта. После фиксирования качественного изменения траектории поведения внешнего воздействия наносят управление для компенсации эффекта действия этого возмущения.

С учетом действия неизменной тенденции (тренда) контролируемых возмущений и без пробных сигналов по идентифицируемому каналу регулирования отклонение измеренного значения выходной величины в конце  $i$ -го интервала памяти объекта (либо в конце  $i$ -го технологического цикла)  $Y_k(i)$  от «точки прицеливания»  $Y_k^*(i)$ :

$$\Delta Y_k(i) = a_2 [W_k(i) + \delta_2(i)] + \xi(i) + a_1 \cdot \delta_1(i), \quad (4)$$

где  $a_2$  – коэффициент передачи по каналу возмущения «Изменение возмущения – изменение выходной величины объекта»;  $W_k(i)$  – спрогнозированное значение контролируемого возмущения на конец  $i$ -го цикла функционирования объекта;  $\delta_2(i)$  – ошибка прогнозирования контролируемых возмущений. Например, в качестве  $\delta_2(i)$  принимают среднее по множеству значение усредненных за время каждого  $i$ -го цикла функционирования объекта разностей спрогнозированных и фактически имевших место контролируемых возмущений;  $\xi(i)$  – ошибка регулирования по идентифицируемому каналу регулирования;  $a_1$  – коэффициент передачи по идентифицируемому каналу регулирования «Изменение управления – изменение выходной величины объекта»;  $\delta_1(i)$  – ошибка прогнозирования по идентифицируемому каналу регулирования.

С учетом действия изменений тенденции (тренда) контролируемых возмущений

$$\Delta Y_k(i) = a_2 [P_{WK}(i) + W_K(i) + \delta_2(i)] + \xi(i) + a_1 \cdot \delta_1(i), \quad (5)$$

где  $P_{WK}(i)$  – отклонение фактического значения контролируемого возмущения на конец  $i$ -го цикла функционирования объекта от спрогнозированного уровня этого возмущения;  $a_2 \cdot \delta_1(i)$  – эффект, найденный и оцененный в условиях неизменности тенденции поведения контролируемых возмущений  $W_k(i)$ .

При наличии компенсирующего управления по идентифицируемому каналу регулирования

$$\Delta Y_k(i) = a_2 [W_\Phi(i) + \delta_2(i)] + \xi(i) + a_1 \cdot \delta_1(i) + a_1 \cdot K_U(i), \quad (6)$$

где  $W_\Phi(i) = P_{WK}(i) + \hat{W}_K(i)$  – фактически имевшее место значение контролируемого возмущения на конец  $i$ -го цикла функционирования объекта;  $\hat{W}_K(i)$  – спрогнозированное значение контролируемого возмущения на конец  $i$ -го цикла функционирования объекта;  $P_{WK}$  – отклонение фактического значения контролируемого возмущения на конец  $i$ -го цикла функционирования объекта от спрогнозированного уровня этого возмущения  $\hat{W}_K(i)$ ;  $\xi(i)$  – ошибка регулирования;  $K_U(i)$  – компенсирующее управление по идентифицируемому каналу регулирования, откуда получаем коэффициент передачи по идентифицируемому каналу регулирования «Изменение управления – изменение выходной величины объекта»:

$$a_1 = \frac{\Delta Y_k(i) - a_2 \cdot [W_\Phi(i) + \delta_2(i)] - \xi(i)}{K_U(i) + \delta_1(i)}. \quad (7)$$

### Заключение

Приведенные формулы позволяют снизить влияние исследовательской системы на нормальный ход технологического процесса, а также позволяют провести идентификацию и управление со сдерживанием скатывания системы в область неустойчивости. В условиях зашумленности объектов снижение амплитуды пробных исследовательских воздействий не обеспечивает высокой точности идентификации при ограниченном числе опытов. Для явно нестационарных объектов перспективным является применение многомерного покласового моделирования с учетом ОТС. Ряд действующих СУ, имеющих склонность к выходу из устойчивого состояния при управлении, предопределяют использование сложных управляющих компонентов – фрагментов программ управлений. Это обстоятельство требует при идентификации такого рода объектов применения адекватных управляющих компонентов.

Совершенствование эргодических СУ сложными объектами промышленного назначения подразумевает не только построение и разумное использование математических моделей объектов, но и подготовку оперативного персонала для эффективной работы в таких системах.

Решение отмеченных выше проблем позволяет сформировать аппарат активно-пассивной идентификации, способной описывать нестационарные, нелинейные процессы в промышленных СУ, обладающих пониженной устойчивостью.

Разработанные способы активно-пассивной идентификации успешно использовались для описания динамических характеристик каналов регулирования кислородно-конвертерного, доменного, электросталеплавильного процессов на ОАО «ЗСМК», ОАО «НкМК» (г. Новокузнецк). Как показывают полученные результаты, точность описания каналов регулирования предложенными способами на 8–12% выше по отношению к количеству успешно проведенных испытаний, чем методами активной идентификации. При этом реализация плана эксперимента не сопровождается наруше-

ниями нормального хода технологического процесса и характеризуется снижением моральных и материальных издержек при создании СУ.

#### Литература

1. Авдеев В.П. Взаимосвязь критериев идентификации и регулирования производственных процессов / В.П. Авдеев, Л.П. Мышляев, В.И. Веревкин // Изв. вузов. ЧМ. – 1973. – № 12. – С. 147-150.
2. Авдеев В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей: учеб. пособие / В.П. Авдеев, Т.М. Даниелян, П.Г. Белоусов. – Новокузнецк: Сибирский металлургический институт, 1984. – 88 с.
3. Пат. 2 276 396 РФ, МПК G05B 23/00. Способ идентификации объектов с изменением заданий / В.И. Веревкин, С.Р. Зельцер, Л.В. Галицкая (РФ). – № 2 004 108 619/ 09; заявл. 22.03.04; опубл. 10.05.06. Бюл. № 13. – 7 с.
4. Веревкин В.И. Программно-фрагментальный способ идентификации и управления / В.И. Веревкин, Л.В. Галицкая, А.Е. Турчанинов // Матер. 6-й Всерос. науч.-практ. конф. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк: Сибирский металлургический институт, 2007. – С. 92–94.
5. Веревкин В.И. Идентификация сложных промышленных объектов с использованием эволюционных моделей / В.И. Веревкин, Л. В. Галицкая // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. трудов. – Липецк: ЛГТУ. – 2007. – Ч. 2. – С. 95–100.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – 2-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
7. Пат. 2 277 259 РФ, МПК G05B 13/04. Способ идентификации действующих объектов в системах управления / В.И. Веревкин, С.Р. Зельцер, Л.В. Галицкая, П.П. Лизогуб (РФ). – № 2 004 135 154/ 09; заявл. 01.12.04; опубл. 27.05.06. Бюл. № 15. – 6 с.
8. Пат. 2 271 561 РФ, МПК G05B 23/00. Способ идентификации каналов регулирования объектов с нанесением пробных сигналов на прогнозируемые рабочие управления / В.И. Веревкин, С.Р. Зельцер, Л.В. Галицкая (РФ). – № 2 004 116 646/ 09; заявл. 01.06.04; опубл. 10.03.06. Бюл. № 7. – 7 с.
9. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии: учеб. пособие / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. – 307 с.

---

#### Галицкая Любовь Владимировна

Ст. преподаватель каф. информатики Сибирского университета потребительской кооперации (СибУПК)  
Тел.: 8 (383) 346-58-01  
Эл. почта: lyb\_vlad@ngs.ru

Galitskaya L.V.

#### Active-passive identification of industrial objects in control systems

About the actively-passive methods of identification in the interactive control systems, which not requiring the break of feed-backs in the control loop and the trial actions for purpose with inconsistent with the normal functioning systems of output actions. Scope of data results are process objects.

**Keywords:** identification, control system, output-actions vector, criterion function, error management, failure prediction control error, statistical model.