

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: lorans53@mail.ru

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ИНТЕРВАЛА ПЕРЕСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В АСУ ТП

Разработан алгоритм выбора интервала измерений и корректировки параметров объектов контроля и управления иерархических АСУ, укомплектованных разнообразными техническими средствами и средствами связи между компонентами. Допустимый по точности воспроизведения характеристик объектов интервал определяется на основе теоремы Котельникова. Алгоритм предлагается использовать как универсальную последовательность действий при реализации различных способов достижения оптимального управления. Показана возможность использования алгоритма при управлении динамическими объектами с прогнозирующими моделями.

Ключевые слова: АСУ ТП, интервал контроля параметров объектов, алгоритм выбора интервала, теорема Котельникова, прогнозирующие модели.

При синтезе оптимальной системы управления объектами в основном решаются две задачи: определение оптимального управления (оптимального управляющего сигнала) и реализация оптимальных регуляторов, более сложной из которых является первая.

Оптимальное управление может быть получено в двух видах: в виде оптимальной программы и в виде оптимальной стратегии, когда управление задается как функция фазовых координат и входного сигнала, система управления является замкнутой, сохраняются все достоинства системы, построенной по принципу обратной связи. Второй вид совершеннее — реальная траектория движения ближе к оптимальной. В любом случае, для повышения качества системы управления требуется периодическое измерение параметров объектов управления, а потому частью оптимизации автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) является выбор интервала измерений. Однако, несмотря на важность этой проблемы, в литературе ей не уделяется достаточного внимания (см., например [1–4]).

В настоящей работе предложен алгоритм выбора интервала измерений и корректировки параметров объектов контроля и управления иерархических АСУ.

Постановка общей задачи

Основой для оптимизации управления и для удачной компоновки АСУ ТП техническими средствами являются свойства объектов управления, выявленные в результате анализа режимов работы технологических машин на их моделях. Пусть математической моделью объекта

управления служит система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$y'(t) = f[t, y(t), u(t)], \quad (1)$$

где t — время, $t \in [0, \infty]$;

u — вектор управления, $u \in U^m$;

y — вектор состояния из векторного (фазового) пространства Y^n системы управления (1), $y \in Y^n$.

Каждому вектору y в фазовом пространстве соответствует некоторая фазовая точка. Систему уравнений (1) можно решить, если задан вектор $u(t)$ и начальное условие $y(t_0)$. Поскольку разным вектор-функциям $u(t)$ соответствуют различные решения $y(t)$ уравнений (1), движением системы можно управлять, выбирая вектор $u(t)$.

Решению $y(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, в фазовом пространстве Y соответствует фазовая траектория системы. Положим, что для любых кусочно-непрерывных функций $u(t)$ со значениями из множества U функция $f[t, y(t), u(t)]$ удовлетворяет условиям существования и единственности решения задачи Коши для системы (1). Кроме того, будем полагать $f(t, 0, 0) \equiv 0$, т. е. система (1) обладает нулевым положением равновесия.

Целью управления объектом является обеспечение выполнения равенств

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r_y(t)| &= 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r_u(t)| &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где заданные векторные функции $r_y(t)$ и $r_u(t)$ определяют некоторое желаемое движение объекта.

Любая задача оптимального управления состоит в поиске такого управляющего воздействия

из некоторого доступного класса, которое обеспечивало бы достижение цели функционирования объекта управления, описываемого моделью (1), с учетом ограничения $y(t) \in Y^n$ для $\forall t \in [0, \infty]$, а также, если ввести в рассмотрение понятие качества управления, — минимум функционала $J_0 = J_0[y(t), u(t)]$.

В настоящее время известны многочисленные варианты типовых задач, например [1, 2, 5], конкретизирующих приведенную выше общую формулировку, а также разнообразные подходы к их аналитическому и численному решению. Однако необходимо отметить, что все эти подходы являются достаточно сложными для практической реализации.

Возможности упрощения модели

Одной из важнейших причин, затрудняющих практическое использование классических оптимизационных подходов при создании систем управления сложными объектами, является то, что математическая модель (1), которая исчерпывающим образом должна представлять динамику реального объекта, в силу различных обстоятельств не известна и в принципе не может быть построена. К таким обстоятельствам относятся неучтенные нелинейности, внешние воздействия (помехи), вариации параметров, неучтенная дополнительная динамика и т. д. Даже если модель (1) в известной мере отражает все эти факторы, в процессе функционирования некоторые из них могут изменяться, причем эти изменения априори не известны.

Итак, любая фиксированная математическая модель вида (1), с одной стороны, лишь приближенно представляет реальный объект, а с другой, является слишком сложной для практической реализации управления в реальном времени. Это оправдывает замену ее более простой моделью, которая в силу определенной близости к объекту при любых вариациях неучтенных факторов позволила бы выработать приближенные управляющие воздействия.

В [6] показано, что на верхних иерархических уровнях систем управления технологическими процессами в качестве эталона можно использовать линеаризованные модели технологических машин, агрегатов и установок как объектов контроля и управления (ОКУ), но их параметры должны идентифицироваться и адаптироваться с периодичностью, которая бы не ухудшала эффективность формирования управляющих воздействий.

Процессы наблюдаются в моменты t_k , $k = 1, 2, \dots$. Аргументом в моделях ОКУ будет интервал между замерами. В течение времени наблюдения $T = kt$ в иерархических системах автоматического контроля, регулирования и управления ОКУ должны быть решены следующие задачи:

1) прием информации от датчиков, установленных на ОКУ;

2) идентификация параметров математических моделей;

3) вычисление оценок наблюдаемых координат математических моделей;

4) принятие решений по управлению отдельными ОКУ и технологическим процессом в целом;

5) расчет оптимальных управляющих сигналов для отдельных ОКУ.

В общем случае интервал подбирается индивидуально для каждого ОКУ из некоторого диапазона, где верхнее значение определяется допустимой ошибкой воспроизведения сигнала.

Частота пересчетов параметров дискретных моделей зависит от численного значения τ , а оно, в свою очередь, определяется такими факторами, как характеристики ОКУ по измеряемым сигналам, быстродействие датчиков, частота возмущений, расстояние от ОКУ до управляющего вычислительного комплекса и тип канала связи между ними, характеристики помех, искажающих полезные сигналы.

В результате измерения сигналов ОКУ формируется вектор $y(k\tau)$. Допустимый по точности воспроизведения координат вектора y интервал τ определяется на основе теоремы Котельникова [7], в соответствии с которой функция с ограниченным спектром может быть представлена рядом

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(k\tau) \frac{\sin \omega_c(t - k\tau)}{\omega_c(t - k\tau)},$$

коэффициенты которого представляют собой отсчеты значений функции, взятые через $\tau = \pi / \omega_c = 1 / (2f_c)$, где ω_c , f_c — частота, ограничивающая спектр.

Числами, определяющими функцию с ограниченным спектром, могут быть не только отсчеты ее мгновенных значений, но и другие независимые числа, в качестве которых логично использовать коэффициенты разложения функции в ряд Фурье.

Если передавать числа равномерно, то для полного определения функции на интервале наблюдения T потребуется $m = 2f_c T$ чисел, а временной интервал между двумя числами будет равен $\tau = T / m$.

При этом необходимо иметь в виду, что в большинстве случаев даже при автоматическом управлении технологическими машинами мы сталкиваемся с процессами, имеющими начало и конец, т. е. с функциями ограниченной длительности, которые не могут иметь ограниченный спектр (спектральную плотность, равную нулю вне конечного интервала) — эти условия противоречивы. Однако, если считать ширину спектра F как интервал частот, вне которого спектральная плотность меньше некоторой выбранной величины (спектр быстро убывает за пределом F), то общий смысл теоремы Котельникова, состоящий в том, что функция определяется на

интервале T посредством $m=2FT$ отсчетов, сохраняется [7].

В то же время, если частота импульсов f_0 , модулирующих непрерывный сигнал, удовлетворяет условию $f_0 \geq f_c$ и спектр сигнала f существует (не обрезается) в диапазоне $0 \leq f \leq (f_0 - f_c)$, то подобная дискретная система может анализироваться и проектироваться с помощью методов проектирования непрерывных систем автоматизированного контроля и управления [6].

Часто возмущение многих объектов, задействованных в технологическом процессе и управлении им, имеет нормальный закон распределения. В таких случаях можно предположить, что в некотором приближении процессы в ОКУ, вторичные по отношению к основному возмущению, тоже распределены нормально. Тогда для решения задач выбора оборудования и контроля его работы применимы методы корреляционной и спектральной теорий.

Положения теоремы Котельникова позволяют предварительно оценить случайный сигнал $y(k\tau)$, интервал его измерений τ , приемлемую точность воспроизведения сигнала σ , минимальную длину реализации $T_{\min}$ и m выборочных значений из нее (k — номер точки на временном отрезке анализа динамики процесса; $k\tau$ — момент времени оценки и измерения) [8].

Описание алгоритма

В процессе работы с ОКУ значения τ , T и m могут корректироваться по предлагаемому алгоритму (см. **рисунок**), основанному на вычислении корреляционных и спектральных функций на базе измеренных данных. Оптимальная величина τ определяется по критерию минимума суммарной ошибки σ .

Последовательность выполнения алгоритма следующая (номера шагов соответствуют нумерации блоков на рисунке).

1. В соответствии с теоремой Котельникова по априорным данным ОКУ определяются предварительные значения τ для сигнала $y_k(t)$.

2. По априорным данным определяются отношения амплитуд помехи и сигнала в полосе пропускаемых частот и интенсивность нормальных флуктуационных помех [9].

3. Выбирается предварительное значение $T > 5/f_c$.

4. Проверяется гипотеза об однородности измеренных данных на разных интервалах τ в пределах T [10]. (Неоднородные «порции» данных могли образоваться за счет неодинаковых условий их регистрации во времени или пространстве.) С этой целью сравниваются значения σ_k^2 при разных k . Если различие статистически значимо, данные заменяются порцией новых измерений (блок 4а на рисунке), если нет — переход к шагу 5.

5. Матрица измеренных данных проверяется на полноту заполнения. Если в ней отсутствует значение какого-либо признака ОКУ, связанное

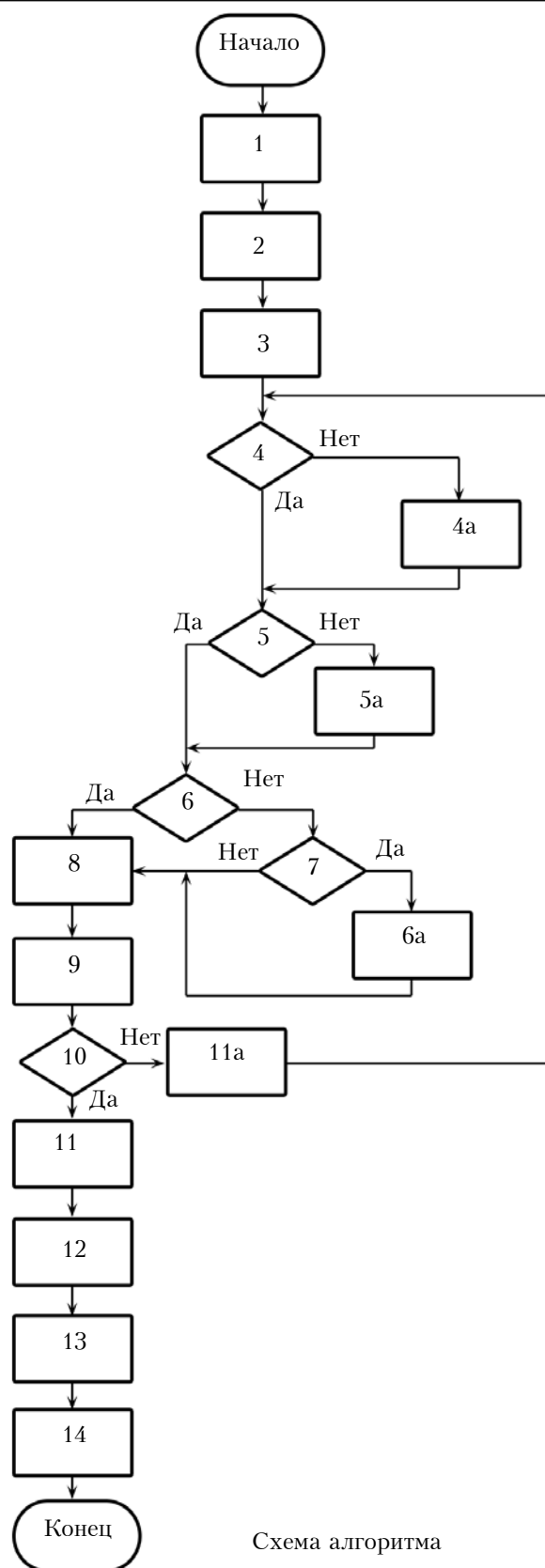


Схема алгоритма

не с состоянием самого ОКУ, а с другими техническими причинами, например с неисправностью датчика, то вместо него принимается среднее арифметическое значение, которое опреде-

ляется по имеющимся реализациям (блок 5а). Если матрица заполнена полностью — переход к шагу 6.

6. Проверяется статистическая значимость отличия резко выделяющихся величин от основной массы данных. Составляется вариационный ряд из результатов замеров. Решающее правило для исключения экстремального члена вариационного ряда основано на статистике $\Phi_k = (y_k - \bar{y}) / \sigma$, где $\bar{y}$ и σ определяются обычным образом. Статистика Φ_k сравнивается с критическими значениями, приведенными в [11].

7. Проверяется гипотеза о нормальном законе распределения. Если распределение признака нормально, резко выделяющиеся значения удаляются из массива данных (блок 6а), если нет — переход к шагу 8.

8. Вычисляются значения корреляционной функции r_y измеряемого сигнала ОКУ на интервале наблюдения T с помощью алгоритма [8] для стационарных сигналов, построенного на основании эргодической теоремы.

9. Вычисляется интервал корреляции по формуле [12]

$$\tau_{\text{кор}} \cong \int_0^T |r_{yi}(t)| dt \cong \sum_{k=1}^m |r_{yi}(t_k)|, \quad (3)$$

где m — количество вычисленных значений корреляционной функции.

10. Проверяется неравенство $|r_y(t_m)| \leq \eta$, где η — малая положительная величина, определяющая допустимую погрешность замены точного значения корреляционной функции $r_y(t)$ ее приближенным значением $r_y(t_k)$ в выражении (3). Обычно $\eta = 0,05$ [12]. Если неравенство не выполняется, то следует увеличить T в 2–3 раза (блок 11а) и вернуться к шагу 4, если выполняется — переход к шагу 11.

11. Корректируется величина τ в соответствии с величиной интервала корреляции.

12. Определяется максимальная частота спектра $\omega_c \cong \pi / 2\tau_{\text{кор}}$ для анализа спектральной функции сигнала.

13. Оценивается относительная среднеквадратичная ошибка воспроизведения $y_k(t)$ [12] в соответствии с неравенством

$$\sigma_b^2 \leq 3E_c / E_T, \quad (4)$$

где E_c — энергия части спектра за пределами ω_c ;

E_T — общая энергия процесса $y(t)$, выделившаяся за время T :

$$E_T = \int_0^T y^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |S_T(\omega)|^2 d\omega.$$

(Неравенство (4) справедливо при быстром убывании величины спектральных функций

$S_T(\omega) = \int_0^T y(t) e^{-j\omega t} dt$ и при небольших m .

Мощность за время T составит величину

$$P_T = \frac{1}{\pi T} \int_0^\infty |S_T(\omega)|^2 d\omega, \text{ которая зависит от } T \text{ при малых } T, \text{ но для стационарного процесса стремится с ростом } T \text{ к постоянному пределу.)}$$

14. Вычисляется суммарная среднеквадратическая ошибка, зависящая от интервала τ и складывающаяся из ошибки от нормальной помехи и ошибки воспроизведения $y_k(t)$.

Реализация рассмотренного алгоритма усложняет структуру АСУ ТП, но повышает точность контроля и управления.

Обоснованно выбранный интервал дискретности позволяет приступить к формированию дискретного аналога модели объекта управления, описываемого системой уравнений (1), в координатах пространства состояний на верхнем уровне управления АСУ ТП. Последующие задачи, связанные с характеристиками, свойствами и ограничениями ОКУ, могут быть решены в рамках исследования полученной математической модели на управляемость, наблюдаемость, устойчивость, чувствительность. После этого можно перейти к выбору оборудования АСУ ТП по заранее сформированным критериям.

Управление с предсказанием

Для того чтобы приблизить траекторию движения ОКУ к оптимальной, можно использовать прогнозирующие модели управления (MPC-методы, model predictive control) [13], построенные по принципу обратной связи, согласно которому при формировании управляющего воздействия используется измеряемая информация о состоянии объекта, и система управления является замкнутой.

В случае управления с предсказанием прогнозирующая модель активизируется в определенных моменты времени при соответствующем состоянии объекта, что позволяет приближенно спрогнозировать его поведение (прогнозирование с подвижным горизонтом). Информации о состоянии объекта поступает в моменты 0, τ , 2τ , ...

Таким образом, вместо (1) рассматриваем систему дифференциальных уравнений

$$\tilde{y}'(\tau) = \tilde{f}[\tau, \tilde{y}(\tau), \tilde{u}(\tau)], \tilde{y}|_{\tau=t} = y(t). \quad (5)$$

Кроме того, будем считать, что функция $\tilde{f}$ задана таким образом, что для любого допустимого управления $\tilde{u}(\tau) \equiv u(\tau)$ векторные функции $y(\tau)$ в системе (1) и $\tilde{y}(\tau)$ в (5) близки между собой для любого $\tau \in [t, \infty]$. В остальном функция $\tilde{f}$ обладает такими же свойствами, что и функция f , а векторы $\tilde{y}$ и $\tilde{u}$ принимают значения из тех же допустимых множеств Y и U .

Система дифференциальных уравнений (5) является прогнозирующей моделью. Прогнозирующую модель желательно выбирать достаточно простой, чтобы ее можно было интегри-

ровать в масштабе реального времени и непосредственно использовать в контуре управления. Полученное частное решение $\tilde{y} = \tilde{y}[\tau, \tilde{y}(t), \tilde{u}(t)]$ будет трактоваться как предсказанное поведение ОКУ с горизонтом управления, зависящим от τ . Следует отметить, что реальная траектория объекта в целом будет отличаться от прогнозируемой на любом отрезке реальной длины, а совпадение гарантируется только в начальной точке.

Простейшим частным примером прогнозирующей модели можно считать какой-либо асимптотический «наблюдатель», сформированный для системы (1), которая тоже линеаризована, но только в окрестности своего нулевого положения равновесия при некотором номинальном сочетании факторов неопределенности.

Применимость алгоритма

Реализация лишь однократного прогноза приводит к значительным отклонениям от оптимальной траектории, поэтому необходимо выполнять многократный прогноз с одним и тем же интервалом времени τ , что должно защитить от потери информации, содержащейся в векторе $y(t)$. Сигнал управления изменяется через интервал τ в результате каждого нового прогноза. Вырабатывать прогнозы и менять сигналы чаще нет необходимости.

Таким образом, интервал τ становится универсальным интервалом замеров значений функции (1) при разных методах оптимизации управляющих сигналов $u(t)$. Определить его величину можно по приведенному выше алгоритму.

После нахождения τ процесс управления с предсказанием происходит следующим образом. Решается оптимизационная задача для прогнозирующей модели (5) с начальным условием $\tilde{y}|_{t=\tau} = y(t)$ по отношению к функционалу, оценивающему качество процесса управления прогнозирующей моделью. Найденная оптимальная функция $\tilde{u}^*[\tau, y(t)]$ используется для программного управления на отрезке $\tau \in [t, t+\tau]$. Далее момент времени t заменяется на $t+\tau$ и повторяются предыдущие действия.

Поскольку случайные возмущения (они накладываются на фазовое пространство) и шумы измерения μ_t (они искажают функцию наблюдения $\varphi_t = by_t + \mu_t$) имеют нормальное распределение, алгоритм оптимального прогнозирования поведения объекта и вектора выхода можно синтезировать, используя экстраполятор Калмана [14].

Систематизируем основные особенности предложенного подхода управления с предсказанием.

1. В качестве прогнозирующей модели можно использовать нелинейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

2. Предложенный подход позволяет учитывать ограничения, которые наложены как на управляющие переменные, так и на компоненты вектора состояния.

3. Для управления с предсказанием необходимо, чтобы текущее состояние объекта непосредственно измерялось или оценивалось.

4. Предложенный подход предусматривает минимизацию функционала, характеризующего качество процесса управления, в режиме реального времени. Для работы в масштабе реального времени необходимо, чтобы решение оптимизационной задачи осуществлялось достаточно быстро, в пределах допустимого запаздывания. Следует отметить, что для решения оптимизационной задачи численными методами удобно пользоваться, например, существующим пакетом прикладных программ MPCTools [15].

5. Предсказанная траектория движения динамического объекта в общем случае будет отличаться от реальной.

6. Непосредственная реализация обсуждаемой схемы MPC-стратегии не гарантирует устойчивости по Ляпунову движения объекта, что требует принятия специальных мер по ее обеспечению.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет устанавливать интервалы измерения и коррекции параметров моделей объекта контроля и управления, используя корреляционные и спектральные функции, и может применяться при различных способах оптимизации управления, в том числе по схеме MPC-стратегии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. — С.-Пб.: Профессия, 2003.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Теоретические основы автоматизированного управления. — Москва: Высш. школа, 2006.
3. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
5. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2009.
6. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — Москва: Наука, 1987.
7. Анохин В. А. Применение теорем Котельникова в условиях компьютерно-интегрированных технологических систем производства // Вестник Сибирского ГАКУ им. акад. М. Ф. Решетникова. — 2008. — № 4. — С. 9–12.
8. Фельдбаум А. А., Дудыкин А. Д., Мановцев А. П. и др. Теоретические основы связи и управления. — Москва: Физматгиз, 1963.
9. Ильин В. А. Телеуправление и телеизмерение. — Москва: Энергия, 1974.
10. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. — Москва: Финансы и статистика, 1983.
11. Большев А. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. — Москва: Наука, 1965.
12. Романенко А. Ф., Сергеев Г. А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. — Москва: Советское радио, 1968.
13. Camacho E. F., Bordons C. Model predictive control. — London: Springer – Verlag, 2004.
14. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бьюси. — Москва: Наука, 1972.
15. www.mathworks.com/programs

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.12.2015 г.

АЛГОРИТМ ВИБОРУ ІНТЕРВАЛУ ПЕРЕРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ
ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ В АСУ ТП

Розроблено алгоритм вибору інтервалу вимірювань і коригування параметрів об'єктів контролю та управління ієрархічних АСУ, укомплектованих різноманітними технічними засобами і засобами зв'язку між компонентами. Допустимий по точності відтворення характеристик об'єктів інтервал визначається на основі теореми Котельникова. Алгоритм пропонується використовувати як універсальну послідовність дій при реалізації різних способів досягнення оптимального управління. Показано можливість використання алгоритму при управлінні динамічними об'єктами з прогнозувальними моделями.

Ключові слова: АСУ ТП, інтервал контролю параметрів об'єктів, алгоритм вибору інтервалу, теорема Котельникова, прогнозуючі моделі.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.33
UDC 681.51:621.391

A. N. TYNANYKA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: lorans53@mail.ru

THE ALGORITHM FOR SELECTION OF INTERVAL OF PARAMETERS
RECALCULATION OF CONTROL AND MANAGEMENT OBJECTS
IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF PROCESS ENGINEERING

The author presents an algorithm for selecting of measurements and adjusting interval of parameters of control and management objects of hierarchical ACS, packaged with a variety of technical equipment and means of communication between the components. The interval that is acceptable for fidelity of reproduction of characteristics of objects is determined using Kotelnikov theorem. The algorithm is proposed to be used as a universal sequence of actions in the implementation of the various ways to achieve optimal control. The paper shows the possibility of using the algorithm in the management of dynamic objects with predictive models.

Keywords: automatic control system of process engineering, control interval of objects parameters, interval selection algorithm, Kotelnikov theorem, predictive models.

REFERENCES

1. Besekerskii V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control system theory]. SPb, Professiya, 2003. (Rus)
2. Sovetov B. Ya., Tsekhanovskii V. V., Chertovskoi V. D. *Teoreticheskie osnovy avtomatizirovannogo upravleniya* [Theoretical bases of automatic control]. Moscow, VSh, 2006. (Rus)
3. Solodovnikov V. V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami* [Automatic control theory of technical systems]. Moscow, BMSTU, 1993. (Rus)
4. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and modern automatic control theory]. Ed. by K. A. Pupkov and N. D. Egupov. Moscow, BMSTU, 2004. (Rus)
5. Denisenko V. V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom, 2009. (Rus)
6. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [A handbook on automatic control theory]. Ed. by A. A. Krasovskiy. Moscow, Nauka, 1987. (Rus)
7. Anokhin V. A. *Primenenie teorem Kotel'nikova v usloviyakh komp'yuterno-integrirovannykh tekhnologicheskikh sistem proizvodstva* [Sampling theorems of Kotelnikov application in conditions of computer-integrated manufacturing systems]. *Vestnik of SibSAU* 2008, no. 4. (Rus)
8. Fel'dbaum A. A., Dudykin A.D., Manovtsev A.P. et al. *Teoreticheskie osnovy svyazi i upravleniya* [Theoretical bases of communication and control]. Moscow, Physmathgiz, 1963. (Rus)
9. Il'in V. A. *Teleupravlenie i teizmerenie* [Telemechanical control and measurement]. Moscow, Energia, 1974. (Rus)
10. Aivazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied Statistics: Bases of modelling and initial data processing. Reference edition]. Moscow, Finansy i statistika, 1983. (Rus)
11. Bol'shev A. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1965. (Rus)
12. Romanenko A. F., Sergeev G. A. *Voprosy prikladnogo analiza sluchainykh protsessov* [Applied analysis of casual process]. Moscow: Sovradio, 1968. (Rus)
13. Camacho E. F., Bordons C. *Model predictive control*. London, Springer — Verlag, 2004.
14. Brammer K., Ziffeling G. Fil'tr Kalmana — B'yusi [Kalman — Byusi's filter]. Moscow, Nauka, 1972. (Rus)
15. www.mathworks.com/programs