

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОМЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ С ПОМОЩЬЮ САМООРГАНИЗУЮЩЕГОСЯ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА*

© 1997 г. И. Ю. Евстратов, С. А. Кабанов, В. В. Сиротинкин

Санкт-Петербург, Научно-исследовательский ин-т электро-физической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Балтийский государственный технический ун-т им. Д.Ф. Устинова

Поступила в редакцию 17.06.96 г., после доработки 09.10.96 г.

Для задачи управления многомерным объектом предлагается алгоритм на основе адаптивных оптимальных регуляторов нового класса. В качестве примера рассмотрена система стабилизации ускорителя электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда. Результаты расчетов свидетельствуют о перспективности предложенного подхода к конструированию систем управления многомерными объектами.

Введение. Проблема управления техническими объектами и технологическими процессами неизменно актуальна, так как новые достижения в теории управления и в областях средств измерительной и вычислительной техники открывают новые возможности в ее решении. С этой точки зрения рассмотрим регулятор нового класса с самоорганизацией, предложенной А.А. Красовским в [1, 2]. Этот адаптивный регулятор (АР) основывается на последних достижениях теории оптимального управления и имеет несомненные преимущества как над традиционными следящими системами, так и над регуляторами, построенными на основе алгоритмов теории оптимального управления, так как АР не требует знания математической модели объекта, обладает высоким быстродействием и устойчивостью к шумам измерения.

Таким образом, в настоящее время имеется новый класс регуляторов с достаточно высокими потребительскими свойствами. Однако он предназначен для управления скалярным (один вход – один выход) объектом. Конструирование на основе таких регуляторов системы управления объектом, имеющим несколько входов и выходов, представляется интересной и важной с практической точки зрения задачей. Такие системы будут обладать высокой надежностью работы и малой стоимостью реализации, присущими самим регуляторами. В случаях, когда не известна математическая модель объекта управления или сложность такой модели не позволяет проводить синтез управления классическими методами теории оптимального управления в реальном времени, или оснащении объекта дорогостоящей системой

управления невозможно с экономической точки зрения, система управления на основе регуляторов нового класса может позволить решить проблему управления на должном уровне.

Обсуждению задачи конструирования такой системы управления и демонстрации ее конкретного воплощения посвящена эта статья.

1. Скалярный адаптивный регулятор. Приведем основные результаты работ [1, 2]. Адаптивный регулятор состоит из наблюдательной и исполнительной частей. Физическое время разбивается на циклы t_c , каждый из которых разбивается на шаги Δt_c . Длительность шага определяется дискретностью измерения выходного сигнала, а длительность цикла – необходимым количеством измерений в пакете (несколько десятков). От измеренного выходного сигнала отнимается заданное значение регулируемой величины и полученный сигнал рассогласования подается на вход наблюдателя. Задача наблюдателя – построить полиномиальное приближение сигнала рассогласования. Степень полинома определяется наблюдателем автоматически.

Таким образом, исполнительная часть получает от наблюдателя представление исходного скалярного процесса в виде полинома степени N

$$x(t) = \sum_{i=0}^N a_i t^i, \quad (1.1)$$

что эквивалентно описанию процесса системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$dx/dt = Ax + Bu, \quad (1.2)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 95-01-00-316).

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & E_N \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

E_N – единичная матрица порядка N , 0 в блочной записи матрицы A означает нулевые матрицы соответствующей размерности, $B = [0, 0, \dots, 0, 1]^T$, u – управление, равное нулю для наблюдателя, $x = (x_1, x_2, \dots, x_{N+1})^T$ – вектор, содержащий полиномиальное приближение процесса и его производные.

Выбираем в качестве критерия оптимальности функционал обобщенной работы (ФОР)

$$I = I_r + 1/2 \int_0^{t_y} \frac{u^2 + u_0^2}{k} dt, \quad (1.3)$$

$$2I_r = V_3(t) + \int_0^{t_y} Q(\theta) d\theta, \quad V_3(t_y) = \alpha_1 x_1^2(t_y) + \alpha_2 x_2^2(t_y), \quad (1.4)$$

$$Q(\theta) = \beta_1 x_1^2(\theta) + \beta_2 x_2^2(\theta).$$

Здесь t_y – цикл управления ($t_y \leq t_w$). Оптимальное управление на очередной цикл определяется по алгоритму с прогнозирующей моделью, где в качестве прогнозирующей модели используется полиномиальная модель с $u = 0$. Гамильтониан модели имеет вид

$$H_m = \lambda^T A x + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2^2,$$

λ – вектор сопряженных переменных.

Канонические уравнения запишутся следующим образом:

$$dx/dt = Ax, \quad d\lambda/dt = -A^T \lambda - (dQ/dx)^T,$$

$$\lambda^T(t) = \partial V_3 / \partial x.$$

Методом математической индукции можно получить для k -го элемента вектора λ

$$\lambda_k(0) = \frac{t_y^{k-1}}{(k-1)!} \sum_{i=0}^N a_i t_y^i \left(\alpha_1 + \frac{\beta_1 t_y}{k+i} \right) + \frac{t_y^{k-2}}{(k-2)!} \sum_{i=0}^N i a_i t_y^{i-1} \left(\alpha_2 + \frac{\beta_2 t_y}{k-2+i} \right).$$

Тогда в соответствии с алгоритмом с прогнозирующей моделью управление, минимизирующее ФОР (1.3), имеет вид

$$u = -k\lambda_{N+1}. \quad (1.5)$$

Полученное управление подается на вход интегратора реального управляющего воздействия объекта.

2. Многомерный регулятор. Построим теперь самоорганизующийся адаптивный регулятор для объекта, имеющего M входов и N выходов. На каждый вход поставим наблюдатель, вырабатывающий полиномиальную модель. В качестве вектора состояния рассмотрим вектор, компонентами которого служат подвекторы, характеризующие полиномиальное приближение измеряемого на каждом выходе процесса. Тогда математическая модель примет вид

$$dX/dt = AX + Bu, \quad (2.1)$$

$$X^T = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_N^T], \quad u^T = [u_1, u_2, \dots, u_M],$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_N \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix},$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kM} \end{bmatrix},$$

где вектор X_i , матрицы A_i, B_i имеют размерности, назначаемые наблюдателем, стоящим на i -том выходе.

За критерий качества возьмем ФОР

$$2I = X^T Q_0 X|_{t=t_y} + \int_0^{t_y} (X^T Q_1 X + u^T K^{-1} u + u_0^T K^{-1} u_0) dt, \quad (2.2)$$

где Q_0, Q_1 – неотрицательно определенные матрицы, а K – положительно определенная. Тогда управление, согласно принципу минимума ФОР

$$u = -KB^T \Lambda, \quad (2.3)$$

$$d\Lambda/dt = -A^T \Lambda - Q_1 X, \quad \Lambda(t) = Q_0 X|_{t=t_y}. \quad (2.4)$$

Последние уравнения дают нам решение при произвольном виде матриц Q_0, Q_1, K . Однако практический интерес представляет один частный случай, когда главная часть функционала ФОР (2.2) представляет собой сумму ФОР вида (1.4), записанных для каждого входа. В этом случае матрицы Q_0, Q_1, K имеют вид

$$Q_0 = \text{diag}(\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^N),$$

$$Q_1 = \text{diag}(\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N),$$

$$\alpha^k = \text{diag}(\alpha_1^k, \alpha_2^k, 0, \dots, 0),$$

$$\beta^k = \text{diag}(\beta_1^k, \beta_2^k, 0, \dots, 0),$$

$$K = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_M).$$

Тогда уравнения (2.4) поблочно распадаются на независимые системы с решениями вида (1.5). Полагая матрицу K единичной, получим управления

$$u_k = -\sum_{i=1}^N b_{ik} \lambda_{in}, \quad (2.5)$$

где λ_{in} – последний элемент i -го подвектора блочного вектора Λ .

Сравним последний результат с (1.5) и заметим, что управление в многомерном случае можно трактовать как взвешенную сумму управлений, вырабатываемых скалярными регуляторами, установленными на каждом входе. Таким образом, выше изложенные результаты можно представить так.

Введем матрицу перехода G размерности $M \times N$

$$dw/dt = GU,$$

где w – вектор реальных управляющих воздействий (входов), а в N -мерный вектор U сведем управления, вырабатываемые скалярными регуляторами, установленными на каждом входе. Для обеспечения процесса управления следует подобрать коэффициенты перехода (элементы матрицы G). Отметим связь матрицы G с матрицей B из (2.1). Если из B убрать нули, а получившуюся матрицу транспонировать, то результатом будет матрица G .

Таким образом мы описали алгоритм управления многомерным объектом, построенный на скалярных адаптивных регуляторах.

3. Задача стабилизации выходных параметров ускорителя электронов. Упрощенно конструкция ускорителя электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) показана на рис. 1. Ускоритель состоит из вакуумной камеры, передней стенкой которой является опорная решетка 1, на которой укреплена тонкая фольга 2, обеспечивающая герметизацию вакуумной камеры, но пропускающая с малыми потерями ускоренные электроны. Часть вакуумной камеры, ограниченную ее стенками, опорной решеткой и анодом 3, называют дрейфовым объемом, а другую, ограниченную стенками камеры, анодом и рабочей поверхностью катода 4, – ускоряющим промежуток. Опорная решетка, анод и катод – плоские параллельные электроды, причем анод и опорная решетка перфорированы соосными от-

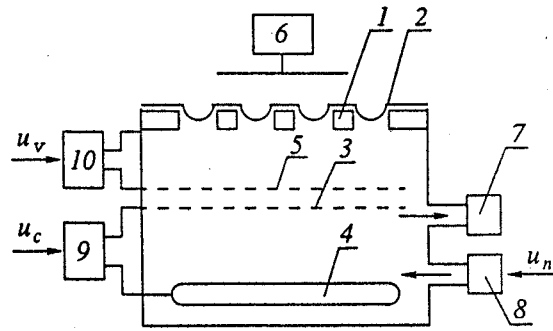


Рис. 1.

верстиями, образуя каналы, по которым движутся быстрые частицы. В дрейфовом объеме установлены тонкие нити – аноды вспомогательного разряда 5. Ток пучка электронов за фольгой контролируют с помощью монитора 6.

Система питания ускорителя состоит из двух каналов – канала питания вспомогательного разряда 10 и канала катодного питания 9. Каналы имеют схожую структуру и состоят из первичного регулятора напряжения, источника питания, эквивалентная схема которого может быть представлена в виде источника ЭДС и внутреннего сопротивления источника, балластных сопротивлений, включенных последовательно с нагрузкой, и собственно сопротивления нагрузки. Напряжением на источнике управляют, меняя напряжение на первичном регуляторе. При этом необходимо учитывать, что нагрузкой обоих каналов являются тлеющие разряды, обладающие сложными вольт-амперными характеристиками.

При подаче напряжения на аноды вспомогательного разряда в дрейфовом объеме поджигается тонкопроволочный тлеющий разряд. Объем почти полностью заполняется плазмой положительного столба.

При включении ускоряющего напряжения (подаче отрицательного потенциала на катод) ионы экстрагируются с поверхности плазмы, ускоряются и бомбардируют катодную пластину. За счет явления вторичной ионно-электронной эмиссии катод испускает электроны, которые в свою очередь, ускоряясь, проходят отверстия в аноде, дрейфовый объем и через фольгу выводятся в атмосферу.

Давление газа в ускорителе (порядка 10 мТор) не является стабильной величиной, так как через фольгу и разъемные элементы конструкции в процессе работы проникает атмосферный воздух. Несмотря на малое его количество, это явление способно сильно увеличивать давление. Кроме того, при нагреве происходит дегазация материала стенок камеры и катода, что тоже приводит к непредсказуемому росту давления.

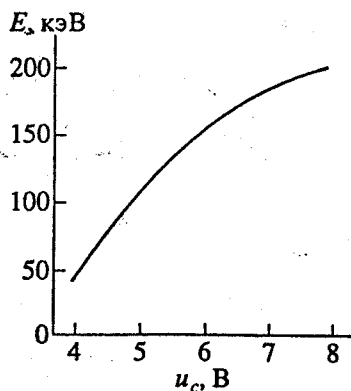


Рис. 2.

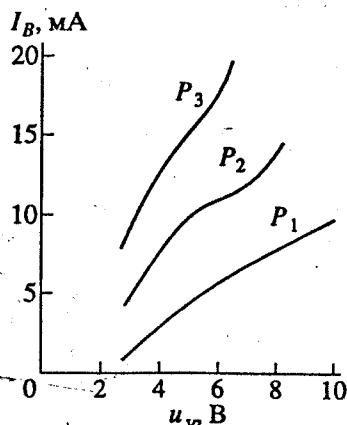


Рис. 3.

Для компенсации этих явлений к камере ускорителя подключен вакуумный насос 7, работающий в постоянном режиме и обеспечивающий откачку газа в объемах гарантированно больших, чем оба натекания. Разницу компенсирует управляемое натекание очищенного газа из газового баллона. Таким образом обеспечивается не только управляемость давления, но и некоторая стабильность химического состава газа внутри камеры ускорителя. Этот процесс обеспечивается натекателем 8.

С полной моделью ускорителя ВТР и принципами его работы можно ознакомиться, например, в [3–5]. С точки зрения конструирования системы стабилизации параметров ускорителя для нас интерес представляют его средства управления (входы) и стабилизируемые параметры (выходы).

Стабилизируемыми параметрами работы ускорителя являются: электронный ток за фольгой, I_B , мА; энергия электронов этого тока, E , кэВ.

Управляющими параметрами являются: напряжение на первичном регуляторе источника питания вспомогательного разряда, u_v , В; напряжение на первичном регуляторе источника пита-

ния ускоряющего напряжения, u_c , В; напряжение на натекателе, u_n , В.

Заметим, что между ускоряющим напряжением и энергией пучка за фольгой существует однозначная и известная заранее зависимость, поэтому энергия пучка не измеряется. Измеряется напряжение, а энергия пересчитывается. Поэтому задачу стабилизации энергии электронов можно заменить задачей стабилизации ускоряющего напряжения.

Проанализируем зависимости выходов от входов. Энергия электронов E зависит главным образом от u_c . Примерный вид этой зависимости изображен на рис. 2. Ток пучка I_B возрастает с ростом u_v . Эта зависимость определяется тем, что рост напряжения на первичном регуляторе приводит к увеличению ЭДС источника питания, которое в свою очередь вызывает роста тока вспомогательного разряда. Чем выше этот ток, тем интенсивнее поток ионов на катод, тем сильнее, следовательно, ток электронов с катода, и тем выше значение тока пучка за фольгой. Примерный вид зависимости $I_B(u_v)$ при различных давлениях ($P_1 < P_2 < P_3$) представлен на рис. 3. Рост тока пучка I_B обеспечивается как ростом тока вспомогательного разряда I_v (т.е. u_v), так и ростом давления (т.е. u_n).

Зависимость тока пучка от других параметров является нестабильной главным образом из-за отмеченной выше дегазации поверхности катода, так как с уменьшением количества молекул газа на поверхности катода уменьшается величина вторичной электронной эмиссии, снижается и ток электронов. Это обстоятельство совместно с натеканием атмосферного воздуха приводит к необходимости стабилизации выходных параметров ускорителя во времени.

В настоящее время управление процессом стабилизации параметров ускорителя выполняется, как правило, вручную квалифицированным оператором. Авторам известны попытки применения для этой цели алгоритмов оптимальной фильтрации и управления, не принесшие ощутимых преимуществ. Впрочем, печатных работ по этому поводу найти не удалось.

Итак, у ускорителя электронов выделено три входа и два выхода, описанные выше. Добавим к выходам давление газа в камере P , а стабилизировать его будем около величины вычисляемого давления P_0 . Главным образом это сделано для того, чтобы при необходимости управлять давлением независимо от других параметров. Управление, вырабатываемые регулятором, подаются на входы интеграторов:

$$\begin{aligned} du_v/dt &= r_v, & du_c/dt &= r_c, \\ du_n/dt &= r_n, & dP_0/dt &= r_p. \end{aligned}$$

Измеряются: ток пучка I_B , напряжение катодного канала U_c , давление газа в камере P . В систему стабилизации входят три регулятора: U -регулятор, на вход которого подается сигнал $U_c - U_0$, где U_0 — стабилизируемое значение ускоряющего напряжения. Он вырабатывает управление r_c ; P -регулятор, на вход которого подается сигнал $P - P_0$. Он вырабатывает управление r_p ; I -регулятор, на вход которого подается сигнал $I_B - I_0$, где I_0 — стабилизируемое значение тока пучка. Он вырабатывает управление r_i , которое используется для вычисления оставшихся: $r_v = k_v r_i$, $r_p = k_p r_i$.

Матрица перехода выглядит следующим образом:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_v \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & k_p \end{bmatrix}$$

В систему входят также ограничители на скорости изменения параметров и на их допустимые диапазоны. Обычно такие ограничения в задачах оптимального управления значительно усложняют процедуру решения. В нашем случае такого усложнения не происходит, так как в случае выхода параметров или их скоростей на границы, модель просто иначе самоорганизуется. Таким образом, осталось назначить 16 коэффициентов и конструирование системы стабилизации будет завершено.

Система стабилизации отлаживалась с использованием имитационной компьютерной модели ускорителя на основе высоковольтного тлеющего разряда. Указанная программа основана на анализе траекторий элементарных частиц в двумерной системе электродов ускорителя с учетом процессов в газовой среде. Расчеты характеристик пучков ряда электронных ускорителей продемонстрировали хорошее совпадение с известными экспериментальными данными.

Испытания системы стабилизации показали, что подбор коэффициентов регуляторов практически не вызывает трудностей. Изменение коэффициентов k_p и k_v возможно в реальном времени для перераспределения ответственности за стабилизацию между каналом давления и каналом вспомогательного разряда. В принципе возможно добавление к системе стабилизации модуля, оценивающего качество процесса и изменяющего эти коэффициенты в зависимости от того, насколько оправдано преобладание какого-либо канала.

На рис. 4 представлены временные зависимости тока пучка без стабилизации (1) и со стабилизацией (2). Система стабилизации полностью выполнила поставленную перед ней задачу, обес-

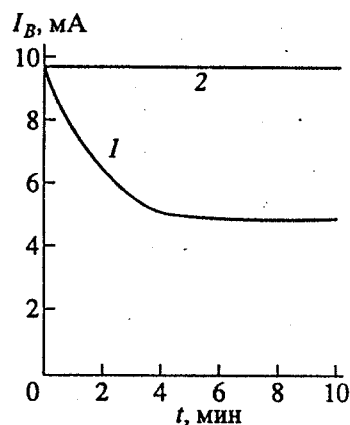


Рис. 4.

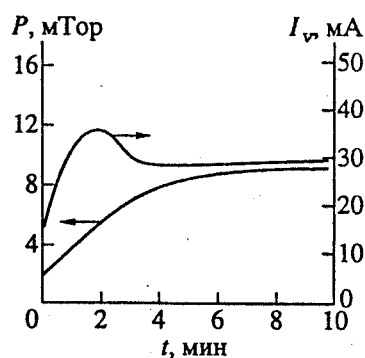


Рис. 5.

печив стабильность выходных параметров ускорителя во времени. На рис. 5 отображена эволюция давления и тока вспомогательного разряда при работающей системе стабилизации. В течение первых 2 мин работы стабилизация тока пучка обеспечивалась повышением тока вспомогательного разряда. Далее возросшее давление стало играть преобладающую роль, что привело сначала к некоторому падению тока вспомогательного разряда, а затем ток стабилизировался и ток пучка поддерживался только за счет роста давления. При необходимости канал стабилизации давления может быть исключен из общей системы, ему может быть поставлена самостоятельная задача поддержания давления на заданном уровне или обеспечения перехода на этот уровень с другого давления. К системе может быть добавлен и канал стабилизации тока вспомогательного разряда, который до включения системы стабилизации обеспечит выход на заданный уровень тока вспомогательного разряда.

Заключение. Предложен алгоритм управления многомерным объектом с помощью самоорганизующегося адаптивного регулятора на основе подхода А.А. Красовского. Как показали результаты его применения для сложного объекта

(ускоритель электронов) с несколькими входами и выходами, алгоритм успешно решает задачу управления с хорошим качеством переходных процессов и устойчивостью к шумам измерения.

Создаваемая регулятором модель объекта имеет обычный для управляемых линейных динамических систем вид, однако вместо вектора состояния используется вектор выходных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А.А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции // А и Т. 1994. № 11.
2. Красовский А.А. Алгоритмические основы оптимальных адаптивных регуляторов нового класса // А и Т. 1995. № 9.
3. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. Ускоритель электронов непрерывного действия на основе вторичной электронной эмиссии // ПТЭ. 1984. № 4.
4. Аброян М.А., Манукян Г.Ш., Сиротинкин В.В. и др. Устройство ионизации мощного генератора озона // Тез. Восьмого совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург. 26-28 сентября 1995. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
5. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косогоров С.Л. и др. Ускорители электронов с высоким коэффициентом вывода пучка для научных и технологических исследований // Тез. Восьмого совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 26-28 сентября 1995. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.

Российская
национальная библиотека
Отдел внешнего обслуживания
191069 С.-Петербург, Садовая, 18
тел. 310-98-46
СПЕРУ - 4
ОАО "Промышленно-
строительный банк "ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК. ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
Р/с № 40502810537000000028