

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.601 : 53.072.13

Б. А. ГУДКОВ, М. М. КАРЛИНЕР, П. Б. ЛЫСЯНСКИЙ,
А. С. МЕДВЕДКО, Б. М. ФОМЕЛЬ
(Новосибирск)

ОТРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ РАВНОВЕСНОЙ ОРБИТЫ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ АНАЛОГОВОЙ МОДЕЛИ

В Институте ядерной физики СО АН СССР разработана установка ВЭПП-3 — накопитель заряженных частиц с жесткофокусирующей магнитной системой [1]. Магнитная система содержит 16 элементов периодичности со структурой FODO на полукольцах и по 4 дублета квадрупольных линз на прямолинейных промежутках.

На накопителе ВЭПП-3 предусмотрена возможность коррекции равновесной орбиты по информации о положении пучка. В настоящее время работают система коррекции равновесной орбиты [2] и система контроля положения равновесной орбиты [3]. Система наблюдения выполнена таким образом, что периодические (периодом является периметр накопительного кольца) по азимуту радиальные и вертикальные отклонения равновесной орбиты преобразуются в периодические сигналы с периодом 20 мс. Система коррекции осуществляет преобразование временных периодических сигналов в азимутально распределенные вертикальные и радиальные корректирующие магнитные поля.

Как показывает опыт многих работ, на первом этапе разработки сложной системы полезно использовать аналоговую модель объекта регулирования. В нашем случае объект регулирования — равновесная орбита пучка заряженных частиц в накопителе ВЭПП-3, поэтому была построена специализированная аналоговая модель равновесной орбиты, работающая в масштабе времени реальной системы коррекции.

На модели изучались статические характеристики разомкнутой системы регулирования и сходимость процесса коррекции орбиты при отработке программ коррекции. Динамика процесса коррекции не рассматривалась, поскольку изменения возмущающих воздействий в накопителе достаточно медленны и однажды скорректированная орбита сохраняется в течение нескольких дней.

Алгоритм и программа оптимальной коррекции. В предположении малых отклонений от идеальной орбиты бетатронные колебания пучка электронов описываются уравнением Хилла, причем колебания в вертикальной и горизонтальной плоскостях независимы:

$$\frac{d^2z}{ds^2} + n(s)z + \gamma(s)\frac{dz}{ds} = f_z(s), \quad (1)$$

где s — азимутальная координата, z — отклонение пучка по оси z в точке с азимутом s , $n(s)$ — показатель спада магнитного поля, $\gamma(s)$ —

коэффициент затухания, $f_z(s)$ — периодическая функция, определяемая возмущением магнитного поля.

Равновесная орбита представляет собой вынужденные бетатронные колебания, которые удовлетворительно описываются уравнением, не учитывающим затухания собственных колебаний, т. е.

$$\frac{d^2z}{Z} + n(s)z = f(s) \quad (3)$$

Используя известные преобразования уравнения (2) [4], можно получить общий член матрицы R в виде

$$r_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin(\nu\pi)} \cos(\mu_{ij} - \nu\pi). \quad (4)$$

Здесь β_i — значение β -функции в месте расположения i -го датчика положения пучка в камере накопителя, β_j — значение β -функции в месте расположения j -го корректора, μ_{ij} — набег фазы бетатронных колебаний между точками i и j , ν — частота бетатронных колебаний (относительно частоты обращения).

В качестве критерия оптимальности при определении вектора коррекции \vec{F} естественно выбрать минимум среднеквадратичного отклонения возмущенной орбиты от заданной.

Однако нужно иметь в виду, что задача синтеза оптимальных коррекций, как всякая обратная задача оптимального управления, является некорректной [5]. Малым отклонениям от заданной равновесной орбиты могут соответствовать большие требуемые значения коррекций, выходящие за пределы допустимых. Поэтому в качестве критерия оптимальности будем использовать сглаживающий квадратичный функционал, который позволяет сделать решение задачи об оптимальной коррекции устойчивым [6, 7]:

$$Q = |\vec{Z} - \vec{Z}_0|^2 + \alpha |\vec{F}|^2, \quad (5)$$

где \vec{Z}_0 — вектор измеренных отклонений, \vec{Z} — вектор отклонений вследствие введенных коррекций, $\vec{F} = (f_j)$ — вектор коррекций, α — параметр регуляризации, определяемый экспериментально.

Функционал (5) будет минимальным, если все частные производные по коррекциям будут равны нулю:

$$\frac{\partial Q}{\partial f_j} = 0. \quad (6)$$

Подсчитаем производную (6), учитывая (3):

$$\frac{\partial Q}{\partial f_j} = \frac{\partial}{\partial f_j} \left\{ \sum_{i=1}^n (z_i - z_{0i})^2 + \alpha \sum_{j=1}^m f_j^2 \right\} = 2 \left\{ \sum_{i=1}^n r_{ij} (z_i - z_{0i}) + \alpha f_j \right\}.$$

В векторной форме (6) приобретает вид:

$$\vec{R}^T (\vec{Z} - \vec{Z}_0) + \alpha \vec{F} = 0; \quad R^T = [r_{ji}]. \quad (7)$$

Подставляя (3) в (7) и вводя единичную матрицу I , получаем окончательное выражение для вектора оптимальной коррекции

$$\vec{F} = (R^T R + \alpha I)^{-1} R^T \vec{Z}_0 \quad (8)$$

или

$$\vec{F} = A\vec{Z}_0. \quad (9)$$

Программа коррекции равновесной орбиты написана на языке FORTRAN-1900 и реализована на ЭВМ ODRA-1304. Программа состоит из двух частей. В первой части вычисляются элементы матрицы коррекции $A = (R^T R + \alpha I)^{-1} R^T$. Входными данными являются набег фазы бетатронных колебаний между элементами системы коррекции (между датчиками и корректорами), значения β -функции в местах расположения элементов, частота бетатронных колебаний ν и параметр регуляризации α . Кроме того, задаются номера отсутствующих или временно вышедших из строя элементов и программа исключает их из рассмотрения. Для оперативной работы вычисленные элементы матрицы коррекции запоминаются в быстром устройстве внешней памяти ЭВМ.

Вторая часть программы вычисляет с помощью матрицы A компоненты вектора коррекции \vec{F} по заданным отклонениям орбиты от идеальной.

Аналоговая модель равновесной орбиты. Аналоговая модель содержит аналоговый вычислитель, времязадающее устройство, а также устройства, моделирующие систему наблюдения пучка и исполнительные элементы системы коррекции.

В машинных переменных моделируемое уравнение бетатронных колебаний имеет вид

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \Gamma \frac{du}{dt} + K(t)u = E_{\text{возм}}(t) + E_{\text{корр}}(t).$$

Решение задачи осуществляется методом понижения порядка производной. Блок-схема аналогового вычислителя приведена на рис. 1, где 1—4 — операционные усилители; К1—К12 — электронные ключи. Ключи К1—К6 позволяют производить установку начальных условий, ключи К7—К12 реализуют зависимость $K(t)$, вид которой показан на рис. 2. Ключами К7—К12, а в некоторых режимах и К1—К6 управляет времязадающее устройство. Устройства, моделирующие систему наблюдения и систему коррекции, в схемном решении представляют собой аналоговые запоминатели. Эпюры напряжений, поясняющие их работу, показаны на рис. 3. Применение запоминателей необходимо потому, что в модели все процессы развиваются только во времени, а «частица», пролетая, например, сквозь «корректор», должна испытывать постоянное по величине воздействие. При получении оценки точности моделирования в нашем рассуждении учитывались следующие погрешности и ограничения:

1) ошибки установки и нестабильность передаточных коэффициентов и временных интервалов;

2) ограниченная полоса пропускания операционных усилителей и конечные значения коэффициентов усиления разомкнутых усилителей;

3) дрейфы операционных усилителей и остаточные напряжения ключей;

4) вводимое затухание собственных колебаний.

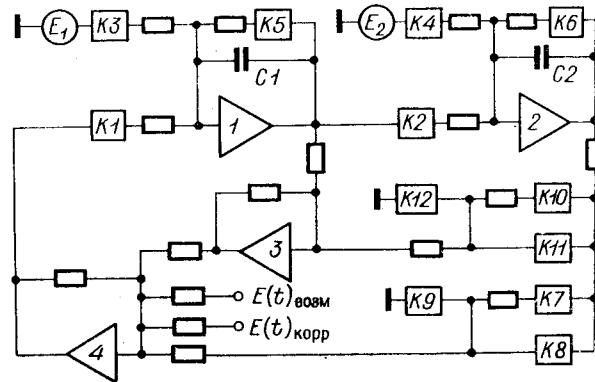


Рис. 1.

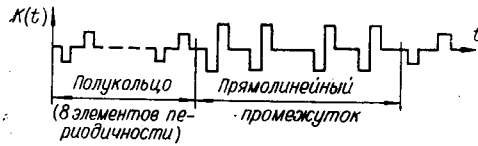


Рис. 2.

Указанные выше причины приводят к следующим эффектам:

- 1) появлению погрешностей в абсолютной величине и стабильности частоты собственных (бетатронных) колебаний ν ;
- 2) повышению порядка уравнения, что также приводит к смещению частоты ν и к изменению декремента затухания;
- 3) появлению дополнительных частных решений.

Оценка сдвига ν от нестабильности передаточных коэффициентов и временных интервалов производилась следующим образом. Сначала составлялась матрица перехода элемента периодичности накопительного кольца в машинных переменных, а затем находилось выражение для полного дифференциала $\cos \mu$ (μ — набег фазы собственных бетатронных колебаний на элементе периодичности) как функции всех перечисленных параметров. Расчет показал, что при погрешности этих параметров (коэффициентов передач и временных интервалов) не хуже, чем 10^{-3} , максимальная относительная погрешность удовлетворяет условию

$$\left| \frac{\Delta \nu}{\nu} \right| \leq 6 \cdot 10^{-3}.$$

Относительный сдвиг ν , вызванный вводимым затуханием, не превосходит $7 \cdot 10^{-6}$, а сдвиг ν , вызванный идеальностью частотных свойств элементов модели, имеет порядок 10^{-7} .

Время задающее устройство формирует временные интервалы с погрешностью не более 10^{-3} в интервале температур $\Delta t = 10^\circ \text{C}$. Температурные коэффициенты пассивных элементов модели позволяют получить нестабильность передаточных коэффициентов, равную 10^{-3} в интервале температур $\Delta t = 10^\circ \text{C}$. Учет конечных значений коэффициентов усиления операционных усилителей дает на порядок меньший вклад в погрешность элементов.

Величина амплитуды частного решения, вызванного дрейфами усилителей, определялась экспериментально и была равна примерно 10^{-2} от максимально возможной амплитуды решения.

Таким образом, при выбранных элементах модели относительный сдвиг частоты ν не превосходит $6 \cdot 10^{-3}$, что сравнимо с относительной погрешностью ν реального накопителя. Что касается погрешности моделирования, вызванной частными решениями, то она в несколько раз меньше погрешности, вносимой реальными системами измерения и коррекции равновесной орбиты.

Проверка программы коррекции на аналоговой модели. Аналоговая модель равновесной орбиты была смонтирована в пульт управления накопителем ВЭПП-3 и сопряжена с реальными элементами наблюдения и коррекции. Рядом с пультом имеется терминал (телетайп), связанный с управляющей ЭВМ.

Поясним последний пункт. Частота обращения пучка в накопителе составляет примерно 4 МГц, в модели она равна 50 Гц, но время затухания свободных колебаний было оставлено натуральным, поэтому декремент затухания увеличился соответственно в 10^5 раз.

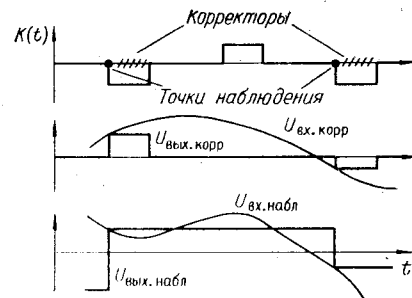


Рис. 3.

Данные о «равновесной орбите» снимались с экрана осциллографа с погрешностью порядка нескольких процентов. Относительная частота бетатронных колебаний в модели была установлена равной $\nu=5,2$; β -функция определялась путем задания начальных условий, соответствующих фазовому объему «пучка» в модели. Набег фазы φ находился численным интегрированием [4]:

$$\varphi = \int \frac{ds}{\nu\beta}.$$

Все перечисленные данные были введены в ЭВМ для работы первой части программы коррекции и вычисления матрицы A (9).

В оперативном режиме через телетайп в ЭВМ вводились измеренные на модели отклонения равновесной орбиты в местах расположения датчиков наблюдения. Вычисленные во второй части программы значения коррекции выводились на телетайп для последующего ввода в модель. На телетайп также выводилась сумма квадратов отклонений орбиты, и по величине этой суммы судили о качестве коррекции.

По результатам совместной работы ЭВМ и аналоговой модели можно сделать следующие выводы:

1. Если возмущения магнитного поля введены в точках расположения корректоров и имеется полный набор датчиков и корректоров, то матрица коррекции с малым параметром регуляризации ($\alpha=10^{-5}$) дает вполне удовлетворительные результаты. За один сеанс коррекции сумма квадратов отклонений орбиты уменьшилась более чем в 100 раз, и отклонения скорректированной орбиты от идеальной были в пределах погрешности измерения. Под сеансом коррекции понимается ввод корректирующих сигналов на основании одного измерения.

2. При измененном числе датчиков или корректоров (нарушение симметрии системы), а также при введении возмущений в места, где нет корректоров, коррекция с параметром $\alpha=10^{-5}$ приводила к резкому увеличению мощности коррекции; в некоторых случаях вычисленные значения корректирующих сигналов в десятки раз превышали допустимые. Однако после введения в матрицу коррекции параметра регуляризации $\alpha=5$ все корректирующие сигналы становились меньше предельно допустимых и коррекция проходила достаточно эффективно — сумма квадратов отклонений уменьшалась в десятки раз за один сеанс. При повторных итерациях орбита корректировалась до уровня ошибок измерения.

Дополнительные численные эксперименты на ЭВМ показали, что процесс коррекции равновесной орбиты сходится при отличии частот бетатронных колебаний в элементах вычислительной матрицы коррекции (ν_1) и в реальном объекте (ν_2) в пределах

$$\nu_1 - \nu_2 \sim -0,1 \div 0,3$$

при $\nu_1=5,2$, а также при наличии ошибок в элементах матриц коррекции A порядка 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Будкер, Н. А. Кузнецов, Б. В. Левичев, И. Я. Протопопов, А. Н. Скринский. Магнитная система накопителя ВЭПП-3.— Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1. М., 1968.
2. И. И. Авербух, В. М. Боровиков, М. М. Карлинер, А. С. Медведко, И. Я. Протопопов. Система коррекции равновесной орбиты в накопительном кольце ВЭПП-3.— Препринт № 52-70. Новосибирск, Изд. ИЯФ СО АН СССР, 1970.
3. А. С. Калинин, М. М. Карлинер, А. С. Медведко. Система контроля положения равновесной орбиты в накопительном кольце ВЭПП-3.— Препринт № 53-70. Новосибирск, Изд. ИЯФ СО АН СССР, 1970.
4. Е. Курант, Х. Снайдер. Теория синхротрона с сильной фокусировкой.— «Проблемы современной физики», 1958, № 4.

5. А. Н. Тихонов, В. А. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М., «Наука», 1974.
 6. А. Н. Тихонов. О методах регуляризации задач оптимального управления.— «ДАН», 1965, т. 162, № 4.
 7. Y. Vassonier. Contribution of l'etude de l'orbite fermee.— "CERN", 1965, № 35.

Поступила в редакцию
 17 января 1974 г.;
 окончательный вариант —
 31 марта 1975 г.

УДК 661.63.001.57 : 658.5.011.56

Е. А. ДОМБРОВСКИЙ, Е. С. КРИЧЕВСКИЙ, В. В. СТАЛЬСКИЙ
 (Ленинград — Таллин)

МАШИННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Известно, что для автоматизации технологического процесса необходимо провести его исследование как объекта автоматического управления, т. е. выявить динамические функциональные связи между входными и выходными его параметрами. Наличие математической модели объекта позволяет, как известно, получить все исходные данные для выбора структуры и параметров регулятора на основе моделирования работы объекта при различных возмущениях.

Цель данной работы — построение линейной модели технологического процесса производства суперфосфата на основе его физико-математического описания и исследование работы этой модели при типичных возмущениях, характерных для данного объекта.

Представим физико-математическую модель, приведенную в [1], в виде эквивалентной структурной схемы (рис. 1).

В соответствии с этой схемой можно получить передаточные функции по интересующим нас каналам «вход — выход».

Несмотря на то что в литературе описана методика подобных преобразований [2, 3], физико-химические особенности конкретного объекта требуют индивидуального подхода. Что касается рассматриваемого процесса переработки апатита в суперфосфат, то, насколько нам известно, в литературе отсутствуют данные по математическому описанию и исследованию этого процесса.

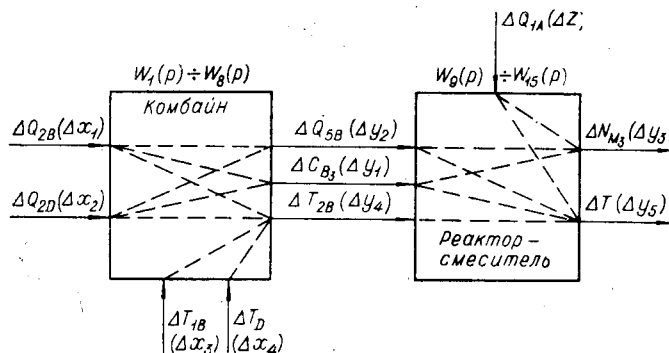


Рис. 1. Эквивалентная схема объекта.