Интересным является исследование знака погрешности. Немаловажно в дальнейшим оценить влияние накопления ошибки из-за автоматического выбора системой Matlab шага расчета. Наличие колебательности в передаточной функции, а также элементов переключения также может повлиять на адекватность использования того или иного метода в расчетах.

Вывод: При всех точностях наименьшее отклонение от аналитического решения ДУ 3-го порядка обеспечивает решатель ode15s. Это объясняется тем, что в основе лежит адаптивный метод решения ДУ от 1-го до 5-го порядка. За ode15 следует ode23bt в основе которого лежит неявный метод Рунге-Кутта. Таким образом первый шаг при выборе решатель это вид ДУ и его порядок. Если вид неявный то используют решатели ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb, ode23b. Цифры в названии решателя говорят о том, какого порядка ДУ рекомендуется решать этим решателем. Так решатель ode23 и его модификации рекомендуют использовать для решения ДУ 2-го и 3-го порядка. Для решения ДУ 4-го и 5-го порядка рекомендуют использовать решатели ode15 и ode45.

УДК 621.37

Студ. В.С. Долгова.
Науч. рук. доц. Ю.П. Барметов.
(кафедра управления в технических системах, ВГУИТ, Воронеж, РФ)

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕЧЬЮ

Важную роль в приготовлении хлеба играет режим выпечки, определяемый температурой и продолжительностью выпечки. Управляют температурой в секциях пекарной камеры тупиковой секционной печи Г4-ХПФ-21М, изменяя подачу природного газа и воздуха в горелку, а также изменяя расходы дымовых газов по секциям.

Разделим процесс управления на два этапа: разогрев пекарной камеры и регулирование температуры в процессе выпечки. Такое разделение позволит упростить синтез управления при разогреве печи и линеаризовать дифференциальные уравнения для отклонений температур от заданных при синтезе оптимального квадратичного регулятора для этапа регулирования.

В пространстве состояний модель печи для температур записывается в виде:

$$\frac{d\mathbf{T(t)}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{T(t)} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{t}), \qquad \mathbf{y}(\mathbf{t}) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{t}),$$

где $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{t})$, $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t})$, $\mathbf{y}(\boldsymbol{t})$ **-** векторы переменных состояния, управления и выхода; $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ **-** матрицы коэффициентов состояния, управления и выхода, причем, отдельные коэффициенты матрицы ***A*** зависят от управления ***u***. В качестве переменных состояния служат температуры дымовых газов, стенок секций печи, конвейера, теста по секциям, управляемыми переменными или выходами на стадии разогрева - температуры стенок в секциях. Количество уравнений для каждой секции печи равно четырем, количество секций – трем.

Поскольку расход природного газа и расходы дымовых газов ограничены сверху и снизу, т. е. $u_{\min} \le \mathrm{u(t)} \le \mathrm{u}_{\max}$, задача синтеза оптимального управления по критерию минимума расхода газа при разогреве печи до заданной температуры решается на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина. Для расчета управления запишем функцию Гамильтона

$$H = \psi_0 u_0(t) + \mathbf{\Psi}(\mathbf{t})^{\mathrm{T}} \cdot \left[\mathbf{A} \cdot \mathbf{T(t)} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u(t)}\right] \ ,$$

где $u_0(t)$ – расход природного газа, $\Psi(\mathrm{t})^{\mathrm{T}}$ – вектор-строка неопределенных функций Лагранжа.

Оптимальное управление в соответствии с принципом максимума Понтрягина должно обеспечивать в каждый момент времени максимум функции Гамильтона. С учетом ограничений, наложенных на расход природного газа и дымовых газов, получаем управление в виде кусочно-постоянных функций, составленных из максимальных и минимальных расходов. Поскольку управляющие воздействия постоянны на некоторых временных интервалах, задача синтеза управления заключается в поиске точек переключения управления и конечного времени выхода на задание, если это время не задано. Решаем поставленную задачу синтеза численным методом, причем, постоянство управления на интервалах времени между точками переключения позволяет записать общее решение системы уравнений для температур в виде суммы экспонент для собственных значений матрицы **A** с постоянными элементами, умноженных на константы интегрирования, и предельных значений управления.

Результаты расчета оптимального управления для первой секции печи при произвольном конечном времени показаны на рисунке 1.

Синтез регулятора, поддерживающего температуры в секциях на втором этапе, выполняем по квадратичному критерию оптимальности

$$J = \frac{1}{2}\int_0^{\infty}\left[\Delta\mathbf{T}^{\mathrm{T}}(t)\cdot\mathbf{Q}\cdot\Delta\mathbf{T}(t) + \Delta\mathbf{u}^{\mathrm{T}}(t)\cdot\mathbf{R}\cdot\Delta\mathbf{u}(t)\right]dt \to min\,,$$

где **Q**, R – матрицы весовых коэффициентов; T – операция транспонирования вектора, $\Delta\mathbf{T}$ и $\Delta\mathbf{u}$ – отклонения переменных состояния и управления от номинальных.

Оптимальное управляющее воздействие в замкнутой системе определяется как функция переменных состояния

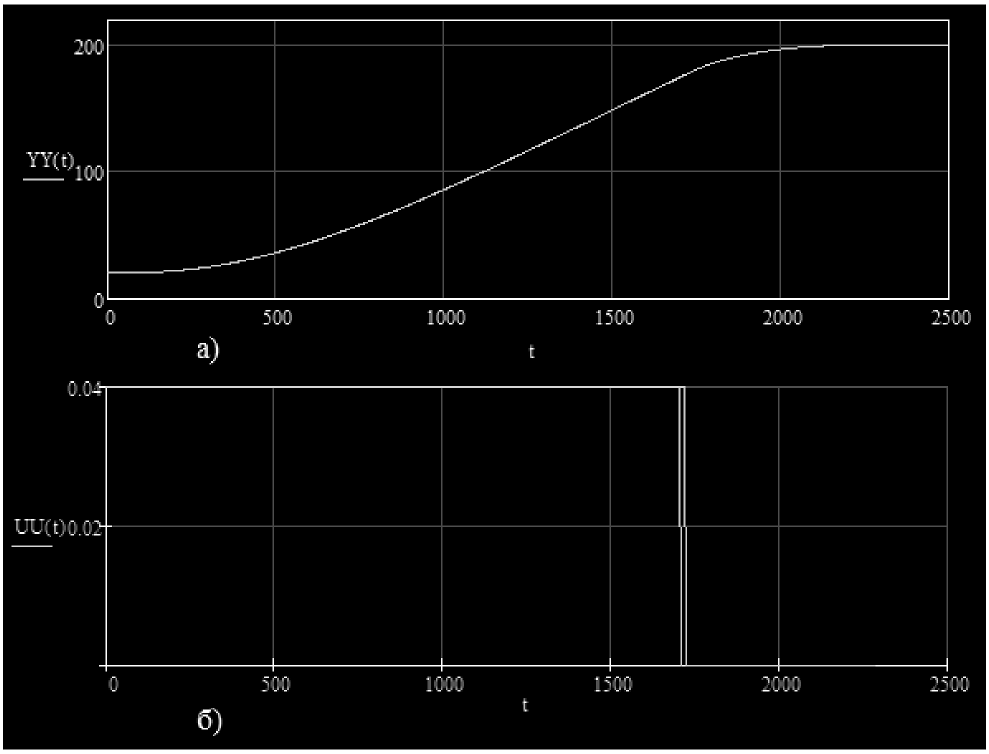

Рисунок 1 – Тренды
а) зависимость температуры стенки (YY) от времени t;
б) зависимость расхода газа (UU) от времени t.

$$\Delta\mathbf{u}(t)_{\text{опт}} = -\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B1}^{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{P} \cdot \Delta\mathbf{T}(t),$$

а матрица коэффициентов **P** находится из уравнения Риккати

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{P} \cdot \mathbf{B1} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0\,.$$

УДК 519.63

Студ. Е.Э. Холева.
Науч. рук. доц. Ю.В. Пятаков
(кафедра информационных и управляющих систем, ВГУИТ, Воронеж, РФ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВУЛКАНИЗИРУЕМЫХ СМЕСЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При разработке тепловых режимов вулканизации наряду с экспериментальным определением температур находят широкое распространение расчеты температурных полей. Одна из сложностей исполь-