УДК 004.942

© 2020 г. **А.Н. Рыбалев**, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

РЕАЛИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Предложены подходы к программной реализации систем компенсации возмущений на программируемых логических контроллерах (ПЛК) и апробации синтезируемых систем на комбинированных моделях, включающих имитационную модель объекта регулирования и виртуальный контроллер. Отдельно рассмотрен случай, когда теоретически рассчитанный компенсатор является физически нереализуемым.

Ключевые слова: компенсация возмущения, транспортное запаздывание, регулятор, передаточная функция, имитационная модель, SoftLogic-система, управляющая программа.

DOI: 10.22250/isu.2020.66.37-48

Введение

Компенсация возмущающих воздействий в системах автоматического регулирования приводит к существенному улучшению качества процесса регулирования как в статических, так и в динамических режимах работы систем. В большинстве случаев основные возмущения известны и довольно часто доступны для измерения. С другой стороны, когда сигналы – это «все-го лишь» переменные в управляющей программе, отсутствуют какие бы то ни было ограничения к исполнению алгоритмов компенсации.

В [1] предложен подход к программной реализации нетиповых линейных законов регулирования на программируемых логических контроллерах (ПЛК) с апробацией их на комбинированных моделях, включающих имитационную модель объекта регулирования и виртуальный контроллер. В [2] рассмотрены различные алгоритмы, позволяющие реализовать в программе для ПЛК транспортное запаздывание. В данной работе показано, как полу-

ченные решения могут быть использованы для построения алгоритмов компенсации возмущений.

Сначала рассматривается случай, когда передаточная функция теоретически рассчитанного компенсатора является физически реализуемой: порядок числителя ее дробно-рациональной части – не более порядка знаменателя, а запаздывание – положительно. Далее рассматривается вариант с физически нереализуемым компенсатором.

В работе не затрагиваются вопросы компенсации *взаимного* влияния друг на друга двух и более связанных систем регулирования и возможные проблемы с их устойчивостью.

Как и в [1, 2], для апробирования алгоритмов используется «комбинированная модель» на базе Simulink-модели объекта и виртуального контроллера PLC WinNT. Программы управления составлены на языках стандарта МЭК МЭК 61131 в среде CoDeSys.

Структура системы регулирования с компенсацией возмущения и расчет компенсатора

На рис. 1 показана структура системы автоматического регулирования с компенсацией возмущения.

Рис. 1. Структура системы регулирования с компенсацией возмущения.

Объект управления представлен передаточными функциями $W_{ou}(s)$ и $W_{of}(s)$ – соответственно по управлению и возмущению. $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора. Сигнал компенсации возмущения формируется компенсатором с передаточной функцией $W_k(s)$ и складывается с выходным сигналом регулятора. Передаточная функция $W_k(s)$ легко находится из условия взаимного подавления двух сигналов, порожденных возмущением f , на выходе объекта y :

$$W_k(s) = -\frac{W_{of}(s)}{W_{ou}(s)}.$$

Рассмотрим практически важный случай, когда объект описывается передаточными функциями первого порядка с запаздыванием, полученными, например, путем обработки кривых разгона:

$$W_{ou}(s) = \frac{k_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1}, \quad W_{of}(s) = \frac{k_2 e^{-\tau_2 s}}{T_2 s + 1}.$$

Передаточная функция компенсатора примет вид:

$$W_k(s) = -\frac{k_2 T_1 s + k_2}{k_1 T_2 s + k_1} e^{-(\tau_2 - \tau_1)s}.$$

Пусть $\tau_2 \geq \tau_1$ и компенсатор, таким образом, физически реализуем.

После несложных преобразований представим передаточную функцию $W_k(s)$ в виде:

$$W_k(s) = -\left[b_1 + \frac{b_2}{T_2 s + 1} \right] e^{-\tau s}, \quad b_1 = \frac{k_2 T_1}{k_1 T_2}, \quad b_2 = \frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right), \quad \tau = \tau_2 - \tau_1.$$

По передаточной функции построена модель компенсатора, пригодная для программной реализации на ПЛК (рис. 2).

Рис. 2. Модель компенсатора возмущения.

Для примера в дальнейшем будут использованы следующие числовые значения параметров:

$$k_1 = 5, \quad T_1 = 10\text{с}, \quad \tau_1 = 4\text{с};$$

$$k_2 = 3, \quad T_2 = 13\text{с}, \quad \tau_2 = 5\text{с}.$$

Передаточная функция компенсатора:

$$W_k(s) = -\frac{30s + 3}{65s + 5} e^{-s} = -\left[0,4615 + \frac{0,1385}{13s + 1} \right] e^{-s}.$$

Параметры модели:

$$\frac{b_2}{T_2} = 0,0107, \quad \frac{1}{T_2} = 0,0769, \quad \tau = 1\text{с}.$$

Имитационная модель в Simulink

Для моделирования объекта и «эталонной» системы регулирования с компенсацией возмущений была разработана Simulink-модель, показанная на рис. 3.

Модель содержит две идентичные подсистемы – Object и Object1, моделирующие объект управления (рис. 4). Первая подсистема управляется

сигналом виртуального контроллера, полученным от блока OPC Read, вторая – сигналом «местной» эталонной системы регулирования.

Эталонная система содержит регулятор PID Controller и подсистему Compensator, выход которой может по команде виртуального контроллера подключаться к формированию сигнала управления. Таким образом, имеется возможность исследования системы с компенсацией возмущения и без компенсации.

Рис. 3. Simulink-модель.

Рис. 4. Подсистемы Object(1) и Compensator.

Регулятор, реализующий ПИ-закон регулирования, был настроен с помощью средств автонастройки, которыми снабжен библиотечный блок PID Controller. Передаточная функция регулятора:

$$W_p(s) = 0,28 \left(1 + 0,1205 \frac{1}{s} \right).$$

Выходной сигнал регулятора ограничен в пределах 0 – 100%. По сигналу сброса, формируемому виртуальным контроллером в режиме ручного управления, интегральная ячейка регулятора «заряжается» до значения, обеспечивающего воспроизведение на выходе регулятора сигнала управле-

ния, который формируется контроллером:

$$I_0 = \frac{u}{k_p} - e = \frac{u}{0,28} - e,$$

где u – сигнал управления от ПЛК; e – ошибка регулирования.

Это позволяет «синхронизировать» ручные режимы управления эталонного и программного регуляторов.

Виртуальный контроллер через блок формирует следующие сигналы управления моделью: u – непрерывный сигнал управления объектом (как в автоматическом, так и в ручном режиме); man – дискретный сигнал перевода в режим ручного управления; sp – уставка регулятора (непрерывный сигнал); $comp$ – дискретный сигнал включения компенсации возмущений.

Дискретные сигналы «нормализуются» умножением их значений на – 1. Необходимость в этом продиктована тем обстоятельством, что блок OPC Read, преобразуя тип BOOL в тип DOUBLE, превращает TRUE в –1 (вполне логично преобразуется в 0).

Виртуальному контроллеру через блок OPC Write пересылаются значение возмущения f и регулируемой величины от «подчиненного» ему объекта y .

Возмущающий сигнал можно изменять в ходе моделирования с помощью блока Slider Gain. Время расчета модели устанавливается равным бесконечности (inf), поэтому процесс можно остановить только вручную.

Программа виртуального контроллера

Программа контроллера состоит из двух задач, к которым привязаны две программы. Первая из них, PLC_PRG, вызывается свободно, а вторая, Compensator, – «по расписанию», через каждые 50 мс. Такой интервал пере-счета выбран у входящих в нее функциональных блоков INTEGRAL и DELAY, реализующих интегрирование и временную задержку (см. рис. 6).

Программа PLC_PRG, написанная на языке ST:

вызывает подпрограмму regulator, которая вычисляет выходной сигнал ПИ-регулятора;

в случае если компенсация возмущения включена, вычитает из выходного сигнала регулятора компенсирующий сигнал;

управляет сигнализацией о выходе регулируемой величины из «допустимого коридора» (уставка $\pm 10\%$).

Код программы:

```
regulator;  
IF comp THEN  
    u := ureg - x;
```

```

ELSE
    u:=ureg;
END_IF
high_val := y > sp+10;
low_val := y < sp-10;

```

Подпрограмма regulator составлена на языке CFC (рис. 5).

Рис. 5. Подпрограмма regulator.

Основным ее элементом является стандартный функциональный блок PID, реализующий ПИ-закон регулирования с настройками, аналогичными настройкам регулятора в Simulink. Дополнительно подпрограмма занимается подменой сигнала ручного управления, сигналом, формируемым регулятором, в автоматическом режиме. Это требуется для безударного переключения в ручной режим (безударность переключения в автоматический режим обеспечивает сам блок PID).

Для наглядности программа Compensator также составлена на языке CFC (рис. 6).

Рис. 6. Программа Compensator

Программа практически один к одному воспроизводит модель, показанную на рис. 2. Функциональный блок DELAY выполняет функцию транспортного запаздывания, используя циклический буфер с чтени-

ем/обновлением по прерыванию [2]. Управление программой осуществляется с экрана визуализации (рис. 7.)

Рис. 7. Экран визуализации.

Экран позволяет:

вводить задание (уставку) регулятора, наблюдать текущие значения регулируемой величины и управляющего воздействия в числовой форме и на временном графике;

включать и отключать компенсацию возмущений;

переводить систему в режим ручного управления и вручную формировать управляющее воздействие.

Помимо этого, выполняется сигнализация о выходе регулируемой величины из допустимого диапазона.

Результаты моделирования

Результаты моделирования в виде графиков изменения регулируемой величины, зафиксированных блоком Scope Simulink-модели (рис. 3), показаны на рис. 8.

Графики отражают поведение двух систем: *эталонной*, полностью реализованной в Simulink, и *комбинированной*, построенной на базе виртуального контроллера. На них показаны следующие процессы:

- 1) отработка изменения задания от 0 до 70%;
- 2) отработка ступенчато изменяющегося возмущения от 0 до 10 ед. и обратно при выключенной компенсации (интервал времени 70 – 180 с);
- 3) отработка ступенчато изменяющегося возмущения от 0 до 10 ед. и обратно при включенной компенсации (начиная с 200 с).

Как видно из рис. 8, поведение комбинированной системы близко к поведению эталонной. Отклонения в работе систем компенсации возмущения связаны, по-видимому, с задержкой при передаче сигналов между про-

граммами и погрешностью реализации запаздывания в компенсаторе виртуального контроллера, обусловленной ограничением на размер буфера (100 против 1024 в Simulink-модели).

Рис. 8. Результаты моделирования. Графики изменения регулируемой величины.

Случай физически нереализуемого компенсатора

Пусть параметры передаточной функции объекта по возмущению теперь будут следующими:

$$k_2 = 7, \quad T_2 = 7\text{с}, \quad \tau_2 = 3,5\text{с}$$

(передаточная функция объекта по управлению остается прежней).

Имеет место неблагоприятная ситуация: объект реагирует на возмущение активнее, чем на управление. Передаточная функция компенсатора примет вид:

$$W_{\kappa}(s) = -\frac{W_{of}(s)}{W_{ou}(s)} = -\frac{70s + 7}{35s + 5} e^{0,5s}.$$

Она физически нереализуема, поскольку содержит отрицательное запаздывание (предварение). В таких случаях предлагается перейти к приближенной реализации компенсатора, передаточную функцию которого можно найти, аппроксимируя частотную характеристику *идеального* в некотором диапазоне частот, от нулевой частоты до максимальной. При этом предполагается, что возмущение действует именно в этом диапазоне частот. В [4] рассмотрены аналитические методы расчета параметров типовых компенсаторов с передаточными функциями реального дифференциального и интегро-дифференцирующего звеньев. Методы гарантируют пересечение частотных

характеристик идеального и реального компенсаторов на двух частотах: нулевой (статический режим) и некоторой *рабочей*.

Используя оптимизационный подход, можно предложить метод, позволяющий найти передаточную функцию компенсатора общего вида, частотная характеристика которого максимально близка к характеристике идеального компенсатора на нескольких частотах или в некотором частотном диапазоне. Мерой близости может служить сумма квадратов отклонений в расчетных точках. При этом (поскольку мы не ограничены структурой компенсатора – порядком его передаточной функции) единственным ограничением является максимальная частота, которая может быть легко определена через возможности аппаратуры измерения и управления.

Для решения задачи в Matlab могут быть задействованы функции многомерной оптимизации `fminsearch` (поиск минимума без ограничений) и `fmincon` (с ограничениями) пакета Optimization Toolbox. Последняя может быть полезна, например, в случае, если компенсатор с передаточной функцией, параметры которой находит `fminsearch`, оказывается неустойчивым.

В приложениях 1, 2 приведены коды программы расчета компенсатора, а также минимизируемой функции для рассматриваемого примера в случае, когда компенсатор описывается передаточной функцией первого порядка:

$$W_{\kappa}(s) = \frac{a_1 s - 1,4}{a_2 s + 1}.$$

«Настройке» подлежат две постоянные времени интегро-дифференцирующего звена, коэффициент передачи которого в нашем случае известен и равен – 1,4. В результате расчетов параметров получены значения: $a_1 = -9.7295$; $a_2 = 4.1479$. Они обеспечивают хорошую близость АФЧХ реального и идеального компенсаторов в диапазоне частот от 0 до 0,25 рад/с. На больших частотах характеристики различаются кардинально (рис. 9).

Рис. 9. АФЧХ идеального (жирная линия) и реального компенсаторов в диапазоне частот от 0 до 3 рад/с.

При этом очевидно, что расширить частотный диапазон, в котором реальный компенсатор будет удовлетворительно функционировать, можно только усложнив его структуру. Этот вывод можно сделать, сравнив «формы» частотных характеристик реального и идеального компенсаторов.

В дальнейшем передаточная функция реального компенсатора была приведена к виду

$$W_k(s) = \frac{-9,7295s - 1,4}{4,1479s + 1} = -\left(2,3455 - \frac{0,9455}{4,148s + 1}\right) = -\left(2,3455 - \frac{0,2279}{s + 0,2411}\right),$$

необходимому для ее программной реализации (рис. 10).

Рис. 10. Программа Compensator.

Simulink-модель, показанная на рис. 3, была незначительно изменена: вместо блока «Const», формирующего единичное возмущение, был задействован блок «Sine Wave», генерирующего синусоидальный сигнал. Кроме того, необходимым образом был отредактирован блок «Compensator». На рис. 11 показаны результаты моделирования в виде графиков изменения регулируемых величин «идеальной» системы регулирования (Simulink) и комбинированной системы с виртуальным контроллером.

Графики отражают прохождение трех процессов на трех временных интервалах. На первом интервале происходит выход систем на задание (70%) при выключенном возмущении. На втором показаны процессы отработки возмущения, изменяющегося с частотой 0,2 рад/с и амплитудой, равной 2 ед. при выключенной компенсации. На третьем интервале компенсация была задействована. В целом графики показывают эффективность компенсации возмущения, хотя увеличенный фрагмент третьего участка свидетельствует, что система с виртуальным контроллером отрабатывает возмущение хуже, чем «эталонная»: имеют место значительное превышение ам-

плитуды колебаний и достаточно большой фазовый сдвиг. Очевидно, это объясняется временной задержкой при передаче данных между программами.

Рис. 11. Результаты моделирования.

Заключение

Рассмотрены вопросы реализации компенсации возмущающих воздействий в системах автоматического регулирования в программах для управляющих ПЛК на примере объектов, описываемых простейшими передаточными функциями первого порядка с запаздыванием, полученными экспериментальным путем. Подход может быть распространен и на более сложные случаи. Рассмотрен как вариант, когда рассчитанный компенсатор является физически реализуемым и содержит звено запаздывания, так и вариант, когда такой компенсатор физически не реализуем и может быть реализован только приближенно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Код программы расчета компенсатора

```
close all
% ПФ объекта по управлению и возмущению
Wu=tf(5,[10 1]); Wu.InputDelay = 4;
Wf=tf(7,[7 1]); Wf.InputDelay = 3.5;
% Диапазон частот для аппроксимации.
% Максимальная частота подобрана экспериментально
w = 0:.01:.25;
% Вычисление АФЧХ идеального компенсатора
[re,im] = nyquist(Wu,w);
j = sqrt(-1);
```

```

Wu_jw = re + j*im; Wu_jw = Wu_jw(:);
[re,im] = nyquist(Wf,w);
Wf_jw = re + j*im; Wf_jw = Wf_jw(:);
Wc_id_jw = -Wf_jw(:)./Wu_jw(:);
% Нахождение ПФ реального компенсатора
global Wc_id_jw w
a = fminsearch(@comby_err,[-1 1]);
Wc = tf([a(1) -1.4],[a(2) 1]); %ПФ реального компенсатора
% Построение частотных характеристик идеального и реального
% компенсатора в "большом" диапазоне частот
w = 0:.01:3;
[re,im] = nyquist(Wf,w);
Wf_jw = re + j*im; Wf_jw = Wf_jw(:);
[re,im] = nyquist(Wu,w);
Wu_jw = re + j*im; Wu_jw = Wu_jw(:);
Wc_id_jw = -Wf_jw(:)./Wu_jw(:);
[re,im] = nyquist(Wc,w);
Wc_jw = re + j*im; Wc_jw = Wc_jw(:);
lines = plot(real(Wc_id_jw),imag(Wc_id_jw),real(Wc_jw),imag(Wc_jw)),
grid;
lines(1).Color = 'black'; lines(1).LineWidth = 2;
lines(2).Color = 'black';

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Код минимизируемой функции для нахождения ПФ компенсатора

```

function [err] = comby_err(a)
global Wc_id_jw w
Wc = tf([a(1) -1.4],[a(2) 1]);
[re,im] = nyquist(Wc,w);
err = sum((re(:) - real(Wc_id_jw)).^2 + (im(:) - ...
imag(Wc_id_jw)).^2);
end

```

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбалев А.Н. Компьютерное моделирование нетиповых законов регулирования для программируемых логических контроллеров // Информатика и системы управления. – 2016. – №4(50). – С.33-43.
2. Рыбалев А.Н. Реализация и компьютерное моделирование алгоритмов регулирования с транспортным запаздыванием для программируемых логических контроллеров // Информатика и системы управления. – 2017. – №2(52). – С.12-24.
3. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУ ТП. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019.
4. Кривошеев В.П., Сачко М.А. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. III // Информатика и системы управления. – 2010. – № 4(26). – С. 127-136.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Рыбалев Андрей Николаевич – amgu_appe@mail.ru.