

Предлагается подход для создания энергосберегающего ПИ-регулятора, который способствует экономии энергоресурсов, увеличивает запасы устойчивости и повышает точность системы автоматического регулирования. Главное достоинство энергосберегающего ПИ-регулятора – уменьшение объема работы, выполняемой исполнительным устройством. Алгоритмы апробированы на математических моделях объектов регулирования, отличающихся линейной частью и относительным запаздыванием.

Ключевые слова: регулирование, передаточная функция, ПИ-регулятор, энергосбережение.

В настоящее время в распределенных системах управления (РСУ) ведущих производителей отсутствует энергосберегающий ПИ-регулятор, обладающий по сравнению с традиционными следующими достоинствами:

- обеспечивает энергосбережение;
- улучшает основные технические характеристики систем автоматического регулирования (САР) — увеличивает запасы устойчивости системы и повышает точность регулирования технологических параметров;
- экономит ресурс исполнительного устройства (ИУ).

Регулятор, обеспечивающий решение перечисленных задач, назовем ЭПИ-регулятором.

Задача синтеза энергосберегающей составляющей (ЭСС) для объектов регулирования (ОР) с транспортным запаздыванием достаточно сложна. Возможность ее решения возникла благодаря многократно возросшим возможностям вычислительной техники. Рассмотрим один из путей создания ЭСС.

В САР могут использоваться электродвигательные и пневматические ИУ. ЭПИ-регулятор для САР, имеющих электродвигательные ИУ, представлен в работе [1]. В этом регуляторе энергосбережение обеспечивается за счет уменьшения числа изменений сигнала управления. Этот показатель для оценки САР с пневматическими ИУ не используется, поэтому энергосбережение необходимо обеспечить за счет других показателей, а значит и алгоритм функционирования регулятора должен отличаться от приведенного в упомянутой работе.

Представим выходной сигнал ЭПИ-регулятора в виде:

$$u^{\partial}(t_i) = u^{\partial}(t_{i-1}) + a_i \cdot u_e(t_i) + b_i \cdot u_i(t_i), \quad (1)$$

где $(a_i, b_i) \in R$, R — множество действительных чисел; где t — время; $i \in N$, N — множество натуральных чисел; $t_i - t_{i-1} = h < h_p$ — период квантования; h_p — предельное значение такта квантования, при котором цифровая система работает практически не хуже аналоговой; $\varepsilon_u(t_i) = \varepsilon(t_i) + v_i$ — измеренное значение ошибки регулирования; $\varepsilon(t_i) = g(t_i) - x(t_i)$ — ошибка регулирования; $v_i \in V$, V — множество, характеризующее ошибки измерений, обусловленные в основном шумом средства измерений и квантованием по уровню его выходного сигнала; $g(t_i)$ — задающее воздействие; $x(t_i)$ — выходной сигнал ОР; $u_e(t_i) = k_E (\varepsilon_u(t_i) - \varepsilon_u(t_{i-1}))$ — приращение

пропорциональной составляющей управляющего воздействия; $u_i(t_i) = k_I (\varepsilon_u(t_i) + \varepsilon_u(t_{i-1}))$ — приращение интегральной составляющей управляющего воздействия; k_E , k_I и h — настроечные параметры регулятора.

В (1) для обозначения переменных, относящихся к ЭПИ-регулятору, используется верхний индекс «э». Выходной сигнал (1) отличается от выходного сигнала стандартного ПИ-регулятора наличием коэффициентов a_i и b_i .

Система автоматического регулирования характеризуется:

1) запасами устойчивости по амплитуде и фазе. В работе предполагается, что настройки сравниваемых регуляторов выбраны и они одинаковы. Поэтому оценивалось изменение Δ параметра ОР p , которое приведет к потере устойчивости системы, $p \in P$, где P — множество номинальных значений параметров ОР. Обозначим $c = \Delta/p$, $c \in R$. Значение c , при котором система теряет устойчивость, обозначим $c_{кр}$;

2) точностью регулирования. В качестве показателей точности регулирования приняты квадратичный интегральный показатель (КИП):

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt, \quad (2)$$

и максимальная ошибка регулирования (МОР) на интервале моделирования. Точность регулирования тем выше, чем меньше величины КИП и МОР;

3) суммарным по модулю изменением сигнала на выходе регулятора u_{Σ} (СИСВР). С увеличением u_{Σ} возрастает расход сжатого воздуха, используемого пневматическим ИУ. Для придания регулятору энергосберегающих свойств необходимо уменьшить СИСВР по сравнению с ПИ-регулятором. При этом уменьшится расход сжатого воздуха, а значит — и расход энергии на его подготовку. Уменьшение СИСВР приводит также к снижению объема работы, выполняемой ИУ, что способствует экономии ресурса ИУ.

Анализ (1) позволяет сделать следующий вывод: ЭПИ-регулятор с целью сбережения энергии, увеличения запасов устойчивости системы, повышения точности регулирования технологических параметров и экономии ресурса ИУ изменяет коэффициенты a_i , b_i относительно значения, равного 1.

Основываясь на вышеизложенном, задача синтеза энергосберегающей системы управления может быть сформулирована следующим образом.

Найти алгоритм изменения коэффициентов a_i, b_i , который обеспечит для заданных: параметров ОР P , настроечных параметров регулятора k_E, k_I и h , случайного возмущающего воздействия $f \in F$, где F — множество возмущающих воздействий, интервала времени $\Delta t \in T$, где T — множество интервалов времени, и ошибок измерений ν существенное (в идеальном случае максимальное) уменьшение u_Σ при ограничениях $c_{кр}^3 \geq c_{кр}, I^3 \leq I$.

Данная задача скорее всего аналитического решения не имеет. Поэтому исследована возможность применения ситуационного подхода.

Сущность предлагаемой методики заключается в разбиении бесконечного множества ситуаций на три группы.

1) Ситуации $s \in S_1, S_1 \subset S$, в которых на очередном такте квантования управляющее воздействие не изменяется, то есть $a_i = 0$ и $b_i = 0$. За счет этого обеспечивается уменьшение СИСВР.

2) Ситуаций $s \in S_2, S_2 \subset S$, характеризующиеся тем, что для формирования управляющего воздействия применяется функция $Q(t_i)$. Эта функция и методика ее использования представлены в работе [1]. В ней принято, что $a_i = b_i$, а число значений коэффициентов равно трем. Проблема уменьшения СИСВР оказалась сложнее, чем задача уменьшения числа изменений сигналов управления в САР электродвигательными ИУ. Поэтому принято, что в общем случае $a_i \neq b_i$, а значения этих коэффициентов связаны пропорциональной зависимостью с $q_{расч}$, где $q_{расч}$ — расчетное значение функции $Q(t_i)$.

3) Ситуации $s \in S_3, S_3 \subset S$, в которых на очередном такте квантования управляющее воздействие изменяется по традиционному ПИ-алгоритму, то есть $a_i = 1$ и $b_i = 1$. К ним относятся ситуации, когда не выполняются условия, характеризующие первую и вторую группы ситуаций.

Ввод в действие ЭПИ-регулятора предполагает осуществлять следующим образом: производится настройка канала регулирования с ПИ-регулятором, после чего включается ЭСС. Введение дополнительных настроек регулятора не предусмотрено.

Для оценки эффективности ЭПИ-регулятора выполнены вычислительные эксперименты для различных моделей ОР.

Наиболее распространенными моделями ОР являются апериодические, нейтральные (астатические) и колебательные.

Для исследования выбраны модели ОР, передаточные функции которых имеют следующие вид:

1) Пять апериодических ОР с запаздыванием (ОР1 — ОР5), являющихся частными случаями уравнения:

$$W(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \exp(-\tau s),$$

где k — коэффициент передачи; T_1, T_2, T_3 — постоянные времени; s — оператор Лапласа; τ — транспортное запаздывание;

2) астатическое с запаздыванием (ОР6):

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)} \exp(-\tau s);$$

3) колебательное с запаздыванием (ОР7):

$$W(s) = \frac{k}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1} \exp(-\tau s),$$

где $\xi < 1$.

Модели трех ОР заимствованы из научных работ (ОР1 — с передаточной функцией первого порядка, ОР2 — с передаточной функцией второго порядка и ОР3 — с передаточной функцией третьего порядка), остальные выбраны таким образом, чтобы исследовать случаи с большим относительным запаздыванием.

Рассматриваются САР, функционирующие в стабилизирующем режиме (задающее воздействие не изменяется) при следующих условиях:

— оптимальные по точности настройки регуляторов выбраны с соответствии с работой [2];

— период квантования равен $h = 0,1 \cdot h_p$;

— на вход ОР действует случайное возмущающее воздействие, которое получено путем преобразования дискретного нормально распределенного случайного сигнала с математическим ожиданием, равным нулю, линейным формирующим фильтром второго порядка, частота среза которого равна доминирующей частоте колебаний [2] САР с ПИ-регулятором;

— моделирование выполнялось на временном интервале, составляющем более 2000 периодов колебаний на доминирующей частоте САР с ПИ-регулятором, что позволило получить результаты близкие к вероятностным. Знак в формуле (3) заменен величиной этого временного интервала.

Результаты сравнительного анализа САР с ПИ- и ЭПИ-регулятором представлены в табл. 1. Положительные величины всех показателей свидетельствуют о преимуществе ЭПИ-регулятора для всех типов ОР. Табличные данные (1 строка) показывают, что объем работы, выполняемый ИУ, уменьшается в 1,104 раза, тем самым обеспечивается энергосбережение и экономится ресурс ИУ. Отметим, что данная характеристика является интегральной, положительный эффект обусловлен принципом действия ЭСУ, поэтому результаты всегда положительны. Запасы устойчивости по амплитуде и по фазе повышаются более чем на 25%. Увеличение запаса устойчивости САР является значимым

Таблица 1. Сравнительная оценка САР с ПИ- и ЭПИ-регуляторами в линейном случае

		,%		
			/	/
1	1	10.4	25 / 25	20 / 18
2	2	13.4	25 / 30	14 / 19
3	3	19.2	40 / 45	21 / 19
4	4	17.1	30 / 30	21 / 18
5	5	18.6	30 / 35	26 / 21
6	6	15.0	25 / 30	20 / 23
7	7	17.4	40 / 50	22 / 17

Таблица 2. Сравнительная оценка САР с ПИ- и ЭПИ-регуляторами в различных режимах

		, %		
			/	/
1	1	10.4	25 / 25	20 / 18
2	2	13.4	25 / 30	14 / 19
3	3	19.2	40 / 45	21 / 19
4	4	17.1	30 / 30	21 / 18
5	5	18.6	30 / 35	26 / 21
6	6	15.0	25 / 30	20 / 23
7	7	17.4	40 / 50	22 / 17

преимуществом ЭПИ-регулятора и сохраняется во всех эксплуатационных режимах. Точность регулирования показывает, что значение КИП в САР с ПИ-регулятором в 1,2, а МОР в 1,18 раз больше, чем в САР с ЭПИ-регулятором.

Рассмотрим особенности функционирования ЭСС в различных режимах на примере САР с ОРЗ, который можно считать типичным объектом с саморавнованием [2]. Вычислительный эксперимент выполнялся при условиях, соответствующих табл. 1, с учетом наличия нелинейных элементов и апериодического фильтра:

— люфт ИУ составляет 1% от диапазона изменения управляющего сигнала $u(i)$;

— шум на выходе средства измерения представляет собой дискретный нормально распределенный случайный сигнал с математическим ожиданием равным нулю и среднеквадратичным отклонением σ . В соответствии с современным уровнем техники выбрано $3\sigma = 1\%$ от диапазона изменения ошибки регулирования $\varepsilon(t)$;

— шаг квантования сигнала на выходе средства измерения составляет 1% от диапазона изменения $\varepsilon(t)$;

— шаг квантования сигнала на входе ИУ составляет 0,2% от диапазона изменения управляющего сигнала $u(i)$. Эта величина характеризует суммарное влияние ошибок аналого-цифрового преобразования и зону нечувствительности ИУ;

— параметры апериодического фильтра выбраны такими, при которых в САР с ПИ-регулятором обеспечивается минимальное значение СИСВР.

Результаты моделирования представлены в табл. 2:

— в строке 1 представлены результаты для приведенных выше условий;

— в строках 2–4 приведены результаты, полученные при последовательном увеличении в 3 раза параметров, характеризующих нелинейные элементы: люфта ИУ, шума измерений и шага квантования сигнала на выходе средства измерения. Видно, что ухудшение условий эксплуатации сопровождается увеличением (по среднему значению) преимуществ

ЭПИ-регулятора по величине СИСВР. Если параметры нелинейных элементов уменьшать, то результаты будут приближаться к значениям, представленным в табл. 1 (строка 3);

— выполнено исследование влияния настроек регулятора. На практике часто используются «слабые» настройки. В строке 5 показаны результаты при уменьшении обеих настроек регулятора в 3 раза;

— в строках 6 и 7 представлены случаи, когда запасы устойчивости по амплитуде и фазе уменьшены в 3 раза. Видно, что САР с ЭПИ-регулятором обладает значимыми преимуществами за счет больших запасов устойчивости.

Таким образом, преимущества ЭПИ-регулятора сохраняются в различных режимах эксплуатации.

Заключение

Представленные результаты моделирования подтверждают высокую эффективность ЭПИ-регулятора. Комплексное решение задачи по улучшению основных технических характеристик ПИ-регуляторов определяет практическую ценность работы. Создан алгоритм, который гарантированно сокращает энергетические затраты, увеличивает запасы устойчивости САР, повышает точность регулирования и экономит ресурсы ИУ.

Выполненная оценка эффекта от внедрения ЭСС показывает, что для случая, представленного в строке 1 табл. 2, экономия сжатого воздуха составит 8,6%, а расход ресурса ИУ, который является наиболее затратным элементом САР, уменьшится на 15%. В некоторых случаях экономический эффект существенно возрастает, например, для варианта, представленного в табл. 2 (строка 6), примерно в 2 раза.

Руководящие работники химических предприятий, имеющих сотни, а иногда и тысячи каналов регулирования с ПИ-регуляторами, заинтересованы в существенной экономии материальных ресурсов. Поэтому оснащение РСУ функцией энергосбережения является актуальной. Вполне вероятно, что в ближайшей перспективе регуляторы, не имеющие ЭСС, потеряют конкурентоспособность. Производители РСУ, которые не будут уделять этому вопросу должного внимания, могут понести существенные экономические потери. Внедрение ЭСС отечественными производителями позволит повысить конкурентоспособность их продукции.

Список литературы

1. Хубеев М. К. Энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 5. С. 29–33.
2. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. МЭИ. 2004. 400 с.

Хубеев Марс Кадимович — д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизации технологических процессов химико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Контактный телефон (8342) 239-15-06.

E-mail: atp@pstu.ru