

М. К. Хубеев, д-р техн. наук, проф., atp@pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Ресурсосберегающий пропорционально-интегральный регулятор

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

Ключевые слова: регулятор, допуск, алгоритм, объект, ресурсосбережение, точность, устойчивость, передаточная функция, транспортное запаздывание, исполнительное устройство

Введение

Одной из актуальных задач развития техники и технологий является обеспечение ресурсосбережения, что обусловлено усилением конкуренции в условиях глобализации экономики. Ресурсосбережение может обеспечиваться за счет экономного расходования энергии и создания благоприятных условий функционирования технологического оборудования.

Самый распространенный подход к решению проблемы энергосбережения заключается в использовании систем, реализующих оптимальное по затратам энергии управление. Большинство задач решается с использованием методов математической теории оптимального управления (принцип максимума, динамическое программирование и др.). Различные стратегии и постановки задач оптимального управления с минимизируемыми функционалами, учитывающие затраты энергии, представлены в работе [1]. В ряде случаев для достижения энергосберегающего эффекта используются какие-либо особенности математической модели или режима функционирования объекта управления.

Рассмотрим некоторые работы, посвященные проблеме энергосбережения. В работе [2] получен алгоритм управления переориентацией космического аппарата, в котором учтена зашумленность измерений. Статья [3] посвящена энергосбережению на объектах энергетики, в работе [4] исследуется возможность использования переменного такта квантования для беспроводной передачи информации. В статье [5] предложены структурные схемы для оптимизации регуляторов в целях сокращения затрат энергии при переводе объекта из одного состояния в другое. Они применимы для объектов, модели которых содержат интегратор.

В этих работах исследуются различные объекты управления, они отличаются методами решения и полученными результатами. При этом все разработанные алгоритмы обладают одним свойством. Они не являются универсальными, т. е. примени-

мы лишь для конкретного рассматриваемого или сходных случаев.

В работе [1] отмечено, что "для получения алгоритмов энергосберегающего управления требуется проведение трудоемких исследований применительно к каждому новому объекту или новым режимам работы", что связано со значительными экономическими затратами. Поэтому на предприятиях химии и нефтепереработки, имеющих большое число объектов управления, обычно используются системы автоматического регулирования (САР) со стандартными регуляторами, при этом предпочтение отдается пропорционально-интегральному (ПИ) регулятору. Отметим, что возможности использования энергосберегающих технологий управления в этих отраслях ограничены не только экономическими соображениями, но и нестационарностью объектов управления из-за изменений состава и свойств перерабатываемого сырья, расходов технологических потоков и т. д. Это требует выработки новых подходов к энергосбережению.

Ресурсосбережение в САР

В настоящее время в недостаточной степени исследованы возможности обеспечения ресурсосбережения в самих САР. В этом случае использование универсальных ресурсосберегающих алгоритмов может обеспечить значительный экономический эффект, так как на крупных предприятиях химии и нефтепереработки функционируют тысячи САР. Однако значимых результатов в рассматриваемом направлении пока не получено. Об этом свидетельствует содержание обзорной статьи [6]. В подразделе "Развитие алгоритмов регулирования системы автоматизации" этой работы не рассматривается возможность создания ресурсосберегающих или энергосберегающих алгоритмов регуляторов. О существовании проблемы указано и в монографии [1]. В ней отмечено, что "сдерживающим фактором в реализации оптимального энергосберегающего управле-

ния динамическими процессами является отсутствие алгоритмов синтеза управляющих воздействий в реальном времени ... В каталогах алгоритмического и программного обеспечения отечественных и зарубежных фирм ... отсутствуют сведения об алгоритмах, минимизирующих затраты энергии".

Рассмотрим состояние этого вопроса в САР с ПИ регулятором. Ресурсосбережение можно обеспечить за счет сбережения энергии и экономии ресурса канала регулирования при более высокой точности регулирования технологического параметра и больших запасах устойчивости системы. Регулятор, обеспечивающий решение перечисленных задач, назовем ресурсосберегающим ПИ (РПИ) регулятором. В настоящее время в распределенных системах управления (РСУ) ведущих производителей отсутствует РПИ регулятор, обладающий перечисленными преимуществами по сравнению со стандартным ПИ регулятором.

В большинстве современных САР, как отмечено в работе [7], "единственным элементом контура, содержащим движущиеся части, является исполнительное устройство (ИУ) ... оно наиболее подвержено износу и коррозии ... ИУ является также и наиболее затратным элементом контура регулирования. На его долю приходится от 50 до 75 % капитальных затрат на контур регулирования и до 90 % затрат на ремонт и текущие расходы". Следовательно, ИУ можно считать механическим устройством, требующим значительных затрат ресурсов. Для экономии последних необходимо так изменить электронную часть САР (алгоритм функционирования регулятора), чтобы уменьшить объем работы, выполняемой ИУ. Таким образом, рассматриваемая задача является типичной для мехатроники.

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

Сущность задачи синтеза РПИ регулятора

В работе [8] представлен универсальный энергосберегающий ПИ регулятор для САР с пневматическими ИУ. Попытки его дальнейшего совершенствования без введения дополнительных настроек не увенчались успехом. Анализ различных САР показал, что во многих случаях известен технологический допуск D , который может быть использован в качестве дополнительной настройки регулятора.

Представим выходной сигнал РПИ регулятора, учитывая технологический допуск D и алгоритм энергосберегающего ПИ регулятора из работы [8], в виде

$$u(t_i) = u(t_{i-1}) + a_f(d_i)u_E(t_i) + b_f(d_i)u_f(t_i), \quad (1)$$

где $(a_f(d_i), b_f(d_i)) \in R$, R — множество действительных чисел; $d_i = \varepsilon_d(t_i)/D$, t — время; $i \in N$, N — множество натуральных чисел; $t_i - t_{i-1} = h < h_m$ — период квантования; h_m — предельное значение такта

квантования, при котором цифровая система работает практически не хуже аналоговой; $u_E(t_i) = k_E(\varepsilon_d(t_i) - \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение пропорциональной составляющей управляющего воздействия; $u_f(t_i) = k_f(\varepsilon_d(t_i) + \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение интегральной составляющей управляющего воздействия; k_E, k_f, D и h — настроечные параметры регулятора; $\varepsilon_d(t_i) = \varepsilon(t_i) + v_i$ — измеренное значение ошибки регулирования; $\varepsilon(t_i) = g(t_i) - x(t_i)$ — ошибка регулирования; $v_i \in V$, V — множество, характеризующее ошибку 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. Для обозначения переменных, относящихся к РПИ регулятору, в необходимых случаях используется верхний индекс "r".

Выходной сигнал (1) отличается от выходного сигнала стандартного ПИ регулятора наличием коэффициентов $a_f(d_i)$ и $b_f(d_i)$. РПИ регулятор изменяет их значение относительно 1. Значения коэффициентов $a_f(d_i)$ и $b_f(d_i)$ зависят от q_c , где q_c — расчетное значение функции $Q(t_i)$, введенной в работе [9].

Система автоматического регулирования характеризуется:

1) точностью регулирования. В качестве показателей точности регулирования приняты максимальная ошибка регулирования ε_m (МОР) и сумма 10 наибольших ошибок регулирования ε_{m10} (НОР) на интервале моделирования. Точность регулирования тем выше, чем меньше МОР и НОР. Уменьшение этих показателей обеспечивает повышение качества продукции;

2) 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 ресурсосберегающих 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. Опытные производственники считают, что для оценки экономии ресурса ИУ можно использовать следующее соотношение: при уменьшении u_Σ в два раза ресурс ИУ увеличится примерно на 20 %;

3) временем функционирования ИУ δt . Для линейной САР с ПИ регулятором δt в динамическом режиме равно времени эксплуатации (моделирования) Δt , так как управляющее воздействие изменяется на каждом такте квантования, а время отработки ИУ входного воздействия обычно больше такта квантования по времени. Если обеспечить выполнение условия $\delta t < \Delta t$, то ресурс ИУ будет расходоваться медленнее. Опытные производственники считают, что для оценки экономии ресурса ИУ можно использовать следующее соотношение: при выполнении условия $\delta t = 0,5\Delta t$ ресурс ИУ увеличится примерно на 12 %;

4) запасами устойчивости по амплитуде и фазе. В работе предполагается, что настройки сравниваемых регуляторов выбраны, и они одинаковы. Поэтому оценивалось изменение Δp параметра ОР p , которое приведет к потере устойчивости системы, $p \in P$, где P — множество номинальных значений параметров ОР. Увеличение запасов устойчивости САР уменьшает затраты на обслуживающий персонал, выполняющий настройку регуляторов.

Анализ соотношения (1) позволяет сделать следующий вывод: РПИ регулятор в целях сбережения энергии, экономии ресурса ИУ, повышения точности регулирования технологических параметров и увеличения запасов устойчивости системы изменяет коэффициенты $a_i(d_i)$ и $b_i(d_i)$ относительно значения, равного 1.

Алгоритм регулятора

Основываясь на вышеизложенном, постановку задачи синтеза РПИ регулятора можно сформулировать следующим образом.

Найти алгоритм изменения коэффициентов $a_i(d_i)$ и $b_i(d_i)$, который обеспечит для заданных параметров ОР p , настроечных параметров регулятора k_E, k_I, D и h , случайного возмущающего воздействия $f \in F$, где F — множество возмущающих воздействий, интервала времени $\Delta t \in T$, где T — множество интервалов времени эксплуатации (моделирования), и ошибок измерений v_i существенное (в идеальном случае максимальное) уменьшение u_Σ при ограничениях $\varepsilon_m^r < \varepsilon_m$, $\varepsilon_{m10}^r < \varepsilon_{m10}$, $\Delta p^r \geq \Delta p$.

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

Сущность предлагаемой методики заключается в разбиении бесконечного множества ситуаций S на три основные группы:

1) ситуации $s \in S_1$, $S_1 \subset S$, в которых на очередном такте квантования управляющее воздействие не изменяется, т. е. $a_i(d_i) = 0$ и $b_i(d_i) = 0$. За счет этого обеспечивается уменьшение СИСВР;

2) ситуации $s \in S_2$, $S_2 \subset S$, характеризующиеся тем, что для формирования управляющего воздействия применяется функция $Q(t_i)$. В общем случае $a_i(d_i) \neq b_i(d_i)$, а значения этих коэффициентов связаны пропорциональной зависимостью с q_c ;

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

Ввод в действие РПИ регулятора предполагает осуществлять следующим образом: проводится настройка канала регулирования с ПИ регулятором, после чего включается РПИ регулятор.

Основные результаты

Для оценки эффективности РПИ регулятора выполнены вычислительные эксперименты для семи различных моделей ОР (ОР1 — ОР7), описанных в работе [8].

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

- технологический допуск D принят равным максимальной ошибке регулирования в САР с ПИ регулятором;
- оптимальные по точности настройки регуляторов, период квантования и случайное возмущающее воздействие, действующее на вход ОР, выбраны в соответствии с работой [8];
- моделирование выполнялось на временном интервале Δt , составляющем более 1000 периодов колебаний на доминирующей частоте САР с ПИ регулятором, что позволило получить результаты, близкие к вероятностным.

Результаты сравнительного анализа САР с ПИ и РПИ регуляторами представлены в табл. 1. Проведем анализ результатов на примере строки 3 таблицы.

Объем работы, выполняемый ИУ в САР с ПИ регулятором в 1,318 раза больше, чем в САР с РПИ регулятором. Это обеспечивает энергосбережение и экономию ресурса ИУ. Данный факт демонстрирует рис. 1 (необходимо сравнить амплитуды сигналов на выходах регуляторов). Отметим, что рассматриваемая характеристика является интегральной, положительный эффект обусловлен принципом дей-

Таблица 1

Сравнительная оценка САР с ПИ и РПИ регуляторами в линейном случае

№ п/п	Объекты регулирования	Результаты моделирования			
		СИСВР	Точность регулирования		Время функционирования ИУ
		u_Σ / u_Σ^r	$\varepsilon_m / \varepsilon_m^r$	$\varepsilon_{m10} / \varepsilon_{m10}^r$	$\delta t^r / \delta t$
1	ОР1	1,164	1,204	1,137	0,537
2	ОР2	1,318	1,191	1,185	0,157
3	ОР3	1,318	1,302	1,292	0,312
4	ОР4	1,280	1,229	1,128	0,258
5	ОР5	1,358	1,216	1,150	0,234
6	ОР6	1,242	1,247	1,251	0,352
7	ОР7	1,275	1,237	1,157	0,251

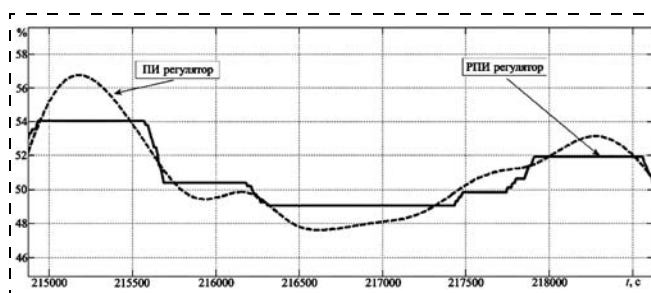


Рис. 1. Фрагмент зависимости сигнала на выходах регуляторов (% открытия клапана) на временном интервале

ствия РПИ регулятора, поэтому результаты всегда положительны.

Анализ точности регулирования показывает, что значение МОР в САР с ПИ регулятором в 1,302, а НОР — в 1,292 раз больше, чем в САР с РПИ регулятором. Относительное время функционирования ИУ составляет 0,312, за счет чего следует ожидать увеличения ресурса ИУ на 18 %. Уменьшение времени функционирования ИУ с САР с РПИ регулятором демонстрирует рис. 1. Видно, что в течение значительных отрезков времени сигнал на выходе РПИ регулятора не изменяется.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по сравнению с работой [8] преимущества по u_{Σ} выше в среднем в 1,75 раз, по МОР — в 1,2 раза и по среднему времени функционирования ИУ — в 1,30 раза. Эти данные свидетельствуют о существенных преимуществах РПИ регулятора по сравнению с энергосберегающим ПИ регулятором.

Значимым преимуществом является также увеличение запасов устойчивости САР. Преимущества по этому показателю меньше, чем в работе [8], но достаточны для того, чтобы обеспечивать приемлемое качество регулирования при значениях параметров ОР, соответствующих границе устойчивости САР с ПИ регулятором, что демонстрирует фрагмент на рис. 2. Фрагмент получен при увеличении коэффициентов передачи ОР до значений, соответствующих границе устойчивости САР с ПИ регулятором. Видно, что благодаря использованию в САР РПИ регулятора, удастся уменьшить МОР более чем в 5 раз.

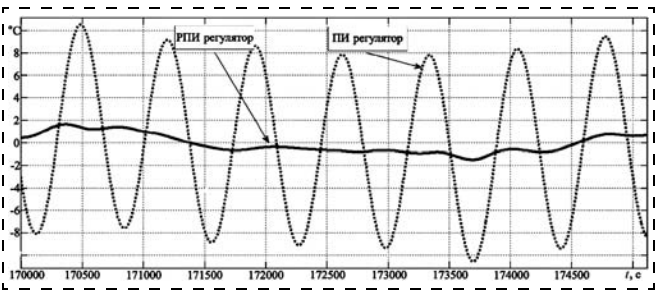


Рис. 2. Фрагмент изменения ошибок регулирования на временном интервале

Таблица 2
Сравнительная оценка САР с ПИ и РПИ регуляторами в различных режимах

№ п/п	Результаты моделирования			
	СИСВР	Точность регулирования		Время функционирования ИУ
	u_{Σ}/u_{Σ}^r	$\varepsilon_m/\varepsilon_m^r$	$\varepsilon_{m10}/\varepsilon_{m10}^r$	$\delta t^r/\delta t$
1	1,344	1,255	1,150	0,348
2	1,324	1,240	1,184	0,357
3	1,427	1,179	1,040	0,373
4	1,295	1,333	1,170	0,352
5	1,628	1,111	1,118	0,260
6	1,408	1,014	1,017	0,285
7	1,427	1,274	1,140	0,309

Рассмотрим особенности функционирования РПИ регулятора в различных режимах на примере САР с ОРЗ, который можно считать типичным объектом с самовыравниванием. 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 $u(t_i)$;
- 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 $\varepsilon(t_i)$;
- шаг квантования сигнала на выходе средства измерения составляет 1 % от диапазона изменения $\varepsilon(t_i)$;
- шаг квантования сигнала на входе ИУ составляет 0,2 % от диапазона изменения управляющего сигнала $u(t_i)$. 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 три раза параметров, характеризующих нелинейные элементы: люфта ИУ, шума измерений и шага квантования сигнала на выходе средства измерения. Видно, что при ухудшении условий эксплуатации преимущества РПИ регулятора практически не изменяются (по среднему значению для рассмотренных случаев). 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 строках 5—7 табл. 2 показаны результаты при уменьшении настроек регулятора k_E и k_I в два раза и увеличении технологического допуска в два раза. При этом возрастают преимущества по u_{Σ} и уменьшаются по значениям МОР и НОР.

Таким образом, преимущества РПИ регулятора сохраняются в различных режимах эксплуатации. В некоторых случаях они весьма значимы. Так, строка 5 свидетельствует о том, что объем работы, выполняемый ИУ в САР с ПИ регулятором в 1,628 раз больше, чем в САР с РПИ регулятором. При этом время функционирования ИУ составляет лишь 26 % от времени моделирования (эксплуатации). Отметим также, что рассмотренные преимущества достигаются при более высокой точности регулирования.

Заключение

Представленные результаты моделирования подтверждают высокую эффективность РПИ регулятора как по сравнению с ПИ регулятором, так и по сравнению с энергосберегающим ПИ регулятором. Комплексное решение задачи по улучшению основных технических характеристик ПИ регуляторов определяет практическую ценность работы. Создан алгоритм, который гарантированно сокращает энергетические затраты, экономит ресурс ИУ, повышает точность регулирования и увеличивает запасы устойчивости САР.

Выполненная оценка эффекта от внедрения РПИ регулятора показывает, что для нормальных условий эксплуатации (строка 1 табл. 2) экономия сжатого воздуха составит 17,2 %, а ресурс ИУ, который является наиболее затратным элементом САР, увеличится более чем на 20 %. В некоторых случаях экономический эффект существенно возрастает, например, для варианта, представленного в строке 5 табл. 2.

Руководящие работники предприятий, имеющих сотни, а иногда и тысячи каналов регулирования с ПИ регуляторами, заинтересованы в существенной экономии материальных ресурсов. Поэтому оснащение РСУ функцией ресурсосбережения является актуальной задачей. Вполне вероятно, что в ближайшей перспективе регуляторы, не обеспечивающие ресурсосбережение, потеряют конкурен-

тоспособность. Производители РСУ, которые не будут уделять этому вопросу должного внимания, могут понести существенные экономические потери. Внедрение РПИ регулятора отечественными производителями позволит повысить конкурентоспособность их продукции, что будет способствовать решению проблемы импортозамещения.

Список литературы

1. Матвейкин В. Г., Муромцев Д. Ю. Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения. М.: Изд-во машиностроения 1, 2007. 128 с.
2. Петрищев В. Ф. Энергосберегающий алгоритм управления переориентацией космического аппарата по зашумленным измерениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 7. С. 474–483.
3. Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2009. Vol. 1, N. 1. P. 61–70.
4. Hensel B. et al. A simple PI controller tuning rule for sensor energy efficiency with level-crossing sampling // Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference. 2012. P. 243–248.
5. Жмудь В. А., Касторный А. В. Концепция энергосберегающих регуляторов // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4. С. 14–21.
6. Ицкович Э. Л. Современные тенденции развития автоматической части систем управления технологическими процессами // Датчики и системы. 2015. № 11. С. 68–76.
7. Беспалов А. В., Харитонов Н. И. Системы управления химико-технологическими процессами. М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. 690 с.
8. Хубеев М. К. Энергосберегающий ПИ-регулятор // Автоматизация в промышленности. 2015. № 3. С. 37–39.
9. Хубеев М. К. Энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 5. С. 29–33.

Resource Efficient Proportional-Integrated Controller

M. K. Khubeev, atp@pstu.ru✉,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614000, Russian Federation

Corresponding author: Khubeev Mars K., D. Sc., Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614000, Russian Federation
e-mail: atp@pstu.ru

Accepted on August 07, 2017

Proportional-integral (PI) controllers are used for continuous control of technological processes' parameters. Algorithms of PI-controllers have not undergone fundamental changes over the past decade. Manufacturers do not propose controllers that exceed the standard PI-controller on several key technical characteristics, which include expense of energy and resources, accuracy of control and stability margin. Therefore, this article offers resource-efficient PI-controller. Its use allows to achieve the following objectives: to save energy and resources, to improve automatic control accuracy and to increase the stability margin. A universal energy-efficient PI-controller is put as a basis of this design. Manufacturing tolerances are used to improve its technical characteristics. Situational approach is applied in solving the problem. Computational experiments were carried out for the seven known models of objects of control with the transport delay to assess the effectiveness. In the linear case the superiority of resource-efficient PI-controller compared with energy-efficient PI-controller is characterized by the following results:

- the summary changing of the output of controller (modulo) decreases on average 1,75 times. This helps to save energy and resources of actuator;
- the error of maximum control is reduced by an average of 1,2 times, thereby increasing the quality of products;
- an average operation time of the actuator is decreased by an average of 1,3 times. This ensures resources savings of the actuator.

The following fact indicates the increase of stability margin: if the coefficients of transmission of control objects increased to values when the automatic control system with PI-controller is at the limit of stability, then continuous oscillations are observed in the automatic control system with PI-controller. Herewith an acceptable quality of control is realized in the automatic control system with a resource-efficient PI-controller, since the maximum control error is less in 5 times. The benefits of resource-efficient PI-controller are preserved in a variety of operating conditions — in the presence of nonlinear elements and the various controller setting. The presented results confirm the high efficiency of resource-efficient PI-controller compared with both PI-controller and energy-efficient PI-controller. Comprehensive solution of improvement problem of the basic technical characteristics of the PI-controller determines the practical value of the work. Companies of chemical and related industries are interested in the use of controllers to enhance the effectiveness of automatic control systems.

Keywords: controller, tolerance, algorithm, object, resource-efficient, accuracy, stability, transfer function, transport delay, actuator

For citation:

Khubeev M. K. Resource Efficient Proportional-Integrated Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 723–728.

DOI: 10.17587/mau.18.723-728

References

1. **Matveikin V. G., Muromcev D. Ju.** *Teoreticheskie osnovy jenergosberegajushhego upravlenija dinamičeskimi rezhimami ustanovok proizvodstvenno-tehnicheskogo naznachenija* (Theoretical bases of energy saving management of the dynamic modes of installations of technological appointment), Moscow, Mashinostroenie 1, 2007, 128 p. (in Russian).
2. **Petrishhev V. F.** *Jenergosberegajushhij algoritm upravlenija pereorientaciej kosmicheskogo apparata po zashumlennym izmerenijam* (Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 474–483 (in Russian).
3. **Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 61–70.

4. **Hensel B.** et al. A simple PI controller tuning rule for sensor energy efficiency with level-crossing sampling, *Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference*, 2012, pp. 243–248.

5. **Zhmud' V. A., Kastornyj V. A.** *Koncepcija jenergosberegajushhih reguljatorov* (Concept of energy saving regulators), *Avtomatika i Programnaja Inzhenerija*. 2013, no. 4, pp. 14–21 (in Russian).

6. **Ickovich E. L.** *Sovremennye tendencii razvitiya avtomaticheskoy chasti system upravlenija tehnologicheskimi processami* (Current trends in the development of automatic part of process control system), *Datchiki i Sistemy*, 2015, no. 11, pp. 68–76 (in Russian).

7. **Bespalov A. V., Haritonov N. I.** *Sistemy upravlenija himiko-tehnologicheskimi processami* (Control systems of chemical-technological processes), Moscow, IKC "Akademkniga", 2007, 690 p. (in Russian).

8. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij PI-reguljator* (Energy-saving PI-regulator), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2015, no. 3, pp. 37–39 (in Russian).

9. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij proporcional'no-integral'nyj reguljator* (Energy-saving proportional-integral controller), *Jeneregobezopasnost' i Jenergosberezhenie*, 2014, no. 5, pp. 29–33 (in Russian).

УДК 681.518

DOI: 10.17587/mau.18.728-733

А. Н. Жирабок, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru, **А. Е. Шумский**, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Зуев, канд. техн. наук, доц.,

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,
Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток

Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей¹

Рассматривается задача функционального диагностирования технических систем, описываемых линейными динамическими моделями. Предлагается подход, позволяющий существенно повысить степень робастности процесса диагностирования линейных систем при действии неизвестных внешних возмущений и состоящий из двух этапов: на первом этапе синтезируются скользящие наблюдатели, чувствительные к действующим на систему возмущениям и нечувствительные к дефектам, которые осуществляют оценку этих возмущений; на втором этапе полученные оценки вводятся в диагностические наблюдатели, обеспечивающие обнаружение дефектов. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность полученных теоретических результатов.

Ключевые слова: линейные модели, функциональное диагностирование, скользящие наблюдатели, робастность, декомпозиция

Введение

Функциональное диагностирование (ФД) является одним из мощных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем. Оно позволяет осуществлять проверку правильности функционирования системы в процессе выполнения ею своих основных функций и оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах. За несколько последних десятилетий было разработано множество разнообразных методов ФД на основе диагностических наблюдателей, соотношений паритета и идентификации [1–5]. Одним из них является метод на основе скользящих наблюдателей, который за счет особенностей скользящего режима [6] активно используется на практике для идентификации дефектов и построения отказоустойчивых систем, чему посвящено большое число публикаций [7–11].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-09-00046).

В настоящей работе этот подход предлагается использовать для повышения степени робастности процесса диагностирования за счет совместного использования скользящего и диагностического наблюдателей: с помощью скользящего наблюдателя оценивается возмущение, действующее на объект диагностирования, которое затем используется в качестве исходных данных для диагностического наблюдателя. Под возмущением в данном случае понимается совокупность внешних неконтролируемых воздействий, погрешностей измерительных средств и неточностей используемых моделей.

1. Скользящие наблюдатели, основные соотношения

Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + Lp(t), y(t) = Hx(t). \quad (1.1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ — известные посто-