

ек) на языке RDF: (Иванов, работать_над, Автоматизация); (Автоматизация, связан_с, контроллеры); (Автоматизация, связан_с, датчики); (Автоматизация, связан_с, электропривод)), то на основе анализа этой базы знаний и профиля специалиста Иванова можно сделать логический вывод, о том, что Иванов имеет опыт работы с Контроллерами, Датчиками или Электроприводами в области Автоматизации. Таким образом, без требований к Иванову явно обновлять свои параметры по имеющемуся опыту, система может сделать вывод о его возможной компетенции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davenport T., Prusak L. Working Knowledge: how organizations manage what they know. – Boston: Harvard Business School Press, 1998. – 200 p.
2. Нонака И., Такеучи Х. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах (The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation). – М.: Олимп-Бизнес, 2003. – 384 с.

Заключение

Построение модели специалиста является одним из важнейших этапов построения СУЗ, т. к. наличие подобной модели, а также её поддержка в актуальном состоянии позволяют решать проблемы поиска в организации знаний и опыта, персонализации СУЗ к потребностям конкретных пользователей и группирования специалистов в сообщества по интересам. Тем самым, моделирование пользователей позволяет улучшить процесс сбора и распространения явных и неявных знаний сотрудников организаций.

3. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии). – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
4. W3C, «RDF/XML Syntax Specification (Revised)» // [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/rdf-syntax-grammar/>

Поступила 17.11.2006 г.

УДК 681.521

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ И САМОНАСТРОЙКИ

Д.М. Таскаев, В.С. Аврамчук*

ОАО «Центрсибнефтепровод», г. Томск

*Томский политехнический университет

E-mail: Taskaev.dima@mail.ru

Показана возможность построения адаптивной системы управления с использованием принципа частотно-зависимой обратной связи и применением многочастотного идентифицирующего воздействия. Алгоритм адаптации обладает относительной простотой, приемлемой для большинства промышленных объектов точностью, не требует для реализации больших вычислительных ресурсов и способен работать в режиме реального времени.

Технический прогресс в развитии промышленности и исследования в научной сфере поставили задачу создания автоматических систем управления исключительно высокой точности и минимальной сложности. Такие автоматические системы должны без участия оператора находить условия высокоэффективного протекания технологического и производственного процессов в данных условиях работы системы. Системы, удовлетворяющие этому требованию, получили название адаптивных или самонастраивающихся.

Одной из существенных особенностей применения большинства методов адаптации на практике является непригодность управления некоторыми технологическими процессами (ТП), поскольку в самом объекте могут существовать источники внутренних неконтролируемых случайных возмущений. Это делает объект управления (ОУ) вероят-

ностным и влечёт за собой необходимость в постоянном контроле в процессе управления его текущего состояния и оперативной коррекции параметров настройки или управляющего воздействия.

Предлагаемый способ построения адаптивной системы управления (АДСУ), основан на использовании активных частотных методов идентификации объектов. Применение частотных методов позволяет обеспечить помехозащищенность алгоритма, а также рационально организовать активный эксперимент на действующей (функционирующей в нормальном рабочем режиме) системе в плане минимизации вмешательства в ее работу. Структурная схема предлагаемой адаптивной системы представлена на рис. 1, где БГА – блок гармонического анализа; ГП₁ и ГП₂ – генераторы пачек частот; K₁, K₂ – управляемые ключи; $\vec{\beta} = \{K_{п}, T_{и}, T_{д}\}$ – вектор параметров настройки регулятора;

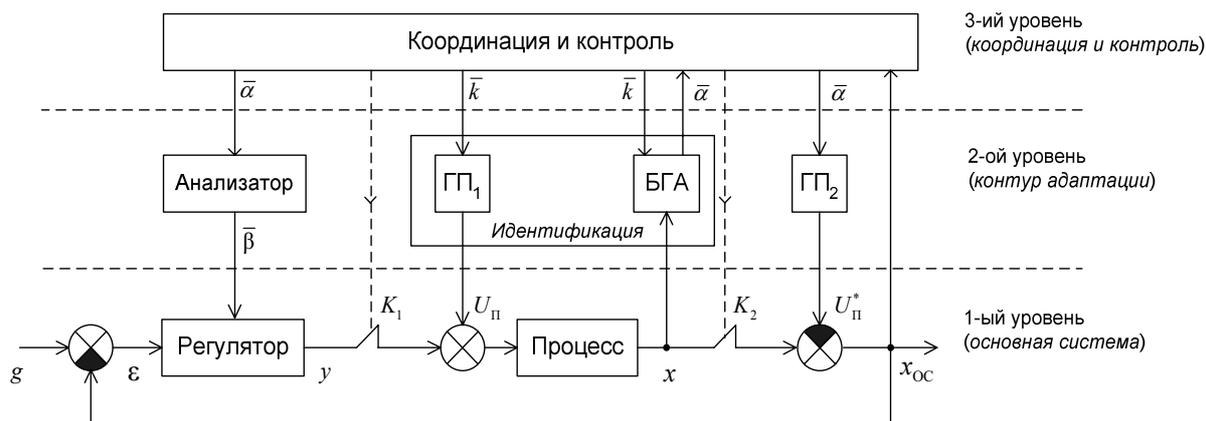


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы

$\bar{k} = \{Am_1 \dots Am_n; f_1 \dots f_n\}$ – вектор амплитуд и частот гармоник (образующих тестовый сигнал); $\bar{\alpha} = \{Am_1^* \dots Am_n^*; \varphi_1 \dots \varphi_n\}$ – результаты работы БГА в виде вектора, представляют из себя совокупность амплитуд и фаз, выделенных в сигнале гармоник, на частотах $f_1 \dots f_n$ тестового сигнала; g – уставка (задающее воздействие); ε – ошибка (сигнал рассогласования); y – управляющее воздействие; x – выходной сигнал; x_{oc} – сигнал обратной связи; U_{Π} – пробный идентифицирующий сигнал; U_{Π}^* – сигнал компенсации.

В организации структуры адаптивной системы чётко выделяются три уровня иерархии её функционирования, а именно:

- 1-ый уровень включает основной контур системы и состоит из настраиваемого пропорционального интегро-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), ОУ, двух управляемых ключей K_1 и K_2 , и трёх сумматоров;
- 2-ой уровень – контур адаптации, содержит два программируемых генератора сигналов $ГП_1$ и $ГП_2$, БГА и блок «Анализатор»;
- 3-ий уровень состоит из блока координации и контроля, осуществляющего общее управление процессами адаптации, идентификации и управления. Он определяет поведение АдСУ в нестандартных ситуациях, например, при потере устойчивости.

Контур самонастройки (адаптации) функционирует следующим образом: генератор $ГП_1$ формирует на своём выходе (согласно текущим настройкам, поступающим с блока «Координация и контроль» в виде вектора параметров \bar{k}) пробный сигнал U_{Π} . Пробный сигнал, поступающий на вход ОУ, состоит из суммы гармоник и описывается следующей формулой:

$$U_{\Pi} = \sum_{i=1}^m Am_i \sin(f_i t),$$

где i – номер гармоники, m – общее число гармоник в тестовом сигнале, $f_i = \Delta f i$ – частота i -ой гармоники, Δf – шаг по частоте, $\Delta F = \Delta f m$ – определяет ширину частотного интервала сканирования пробным сигналом.

Возможные законы изменения амплитуд гармоник, составляющих пробный сигнал, могут быть различными, например равномерный, линейно или экспоненциально убывающий. Экспериментально было установлено, что выбор закона изменения амплитуд влияет на параметры качества управления основной системы.

Для выделения пробного тестового сигнала на выходе ОУ в состав АдСУ, предлагается включить БГА. Основное назначение БГА – поиск амплитуд и фаз гармоник на частотах $f_1 \dots f_n$ тестового сигнала в выходном сигнале ОУ и представление результатов в виде вектора $\bar{\alpha} = \{Am_1^* \dots Am_n^*; \varphi_1 \dots \varphi_n\}$. Результаты работы БГА в виде найденного вектора параметров поступают на генератор $ГП_2$, на выходе которого формируется сигнал компенсации U_{Π}^* влияния пробного сигнала U_{Π} на ОУ. Затем сигнал U_{Π}^* вычитается на 3-ем сумматоре из выходного сигнала ОУ, устраняя тем самым негативное влияние пробного сигнала на основную систему в процессе идентификации.

Основное назначение блока «Анализатор» состоит в отслеживании установившегося значения фазового сдвига $\varphi_{кр}$, определении критической частоты объекта $f_{кр}$, на которой фазовый сдвиг между входом и выходом равен $\varphi_{кр} = -3,14$ рад и определении амплитуды $Am_{кр}$ установившихся колебаний. По найденной частоте и амплитуде, полученной в результате проведения частотной идентификации ОУ, осуществляется расчёт параметров регулятора $\bar{\beta}$.

Нормально замкнутые управляемые ключи K_1 и K_2 при подаче сигнала с блока «Координация и контроль» отключают ОУ, разрывая замкнутый контур основной системы при:

- осуществлении первичной идентификации ОУ, которая производится автоматически при первом включении адаптивной системы в работу для получения начальных значений параметров настройки регулятора;
- возникновении нестандартных ситуаций, например, потеря устойчивости системы вследствие быстрого изменения состояния ОУ и выход за пределы контролируемого допуска.

Для идентификации расходящегося переходного процесса в блоке «Координация и контроль» производится анализ выходного сигнала x_{oc} , в частности, производится статистическая обработка (расчёт математического ожидания и дисперсии), это позволяет определить момент потери устойчивости адаптивной системы.

Среди инженерных методов расчета настроек регуляторов одни являются более точными, но трудоемкими для ручного счета, другие – простыми, но приближенными. Наиболее распространенным способом, отражающим методику точного и приближенного расчета настроек, является метод незатухающих колебаний (Циглера-Никольса), основанный на выводе действующей системы с пропорциональным регулятором (П-регулятором) на границу устойчивости и расчёте по критической частоте и коэффициенту передачи оптимальных параметров настройки. Ниже приведены формулы расчёта параметров аналогового ПИД-регулятора [1]:

$$\begin{aligned} K_{\text{П}} &= 0,6 K_{\text{КР}}; \\ T_{\text{И}} &= 1,2 K_{\text{КР}} f_{\text{КР}}; \\ T_{\text{Д}} &= 0,075 \frac{K_{\text{КР}}}{f_{\text{КР}}}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{КР}} = \frac{Am_0}{Am_{\text{КР}}}$, Am_0 – амплитуда тестовой гармоники на входе ОУ, $f_{\text{КР}}$ и $Am_{\text{КР}}$ – соответственно установившаяся критическая частота и амплитуда колебаний на выходе ОУ. $K_{\text{КР}}$ находят в результате решения двух уравнений, отражающих метод незатухающих колебаний:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{КР}}(f_{\text{КР}}) + \pi = 0; \\ K_{\text{КР}} = \frac{1}{Am_{\text{КР}}(f_{\text{КР}})}. \end{cases}$$

Для точной настройки системы достаточно определить амплитудо-фазочастотную характеристику (АФЧХ) объекта в узком диапазоне – в окрестности частоты резонанса (критической частоты).

Метод Циглера-Никольса лежит в основе многих методов настройки дискретных ПИД-регуляторов. В частности, если рекуррентный алгоритм управления, соответствующий аналоговому ПИД-закону, имеет вид [2]:

$$y[k] = -K_0 \cdot \varepsilon[k] - K_1 \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon[i] - K_2 \cdot (\varepsilon[k] - \varepsilon[k-1]),$$

где $y[k]$ – текущее расчётное значение управляющего воздействия; $\varepsilon[k]$, $\varepsilon[k-1]$ – текущее и предыдущее значение для сигнала рассогласования; k – номер расчётного шага (итерации). Тогда параметры настройки регулятора K_0 , K_1 и K_2 могут быть найдены по формулам:

$$\begin{aligned} K_0 &= (0,6 - 0,27 T_0 f_{\text{КР}}) K_{\text{КР}}; \\ K_1 &= 1,2 K_{\text{КР}} T_0 f_{\text{КР}}; \\ K_2 &= 0,075 K_{\text{КР}} \frac{1}{T_0 \cdot f_{\text{КР}}}, \end{aligned}$$

где T_0 – период (интервал) опроса.

Стоит отметить, что параметры ПИД-регулятора, рассчитанные по формулам (1) и (2), носят субоптимальный характер и будут обеспечивать оптимальные по точности параметры для различных типов ОУ, соответствующие точке АФЧХ с длиной вектора $Am=0,8$ и углом $\varphi=-2,62$ рад [3]. Аналитически доказано, что оптимальные по минимуму среднеквадратической ошибки (СКО) настройки ПИД-регулятора можно получить, если определять критическую частоту и модуль вектора АФЧХ объекта, соответствующие фазовому сдвигу $-2,11$ рад [4].

Стоит отметить, что для объектов с большим запаздыванием оптимальность полученных настроек не гарантируется. Это связано с тем, что формулы Циглера-Никольса носят эмпирический характер и рассчитаны на объекты с отношением τ/T от 0 до 0,5 (где τ – запаздывание ОУ, T – постоянная времени ОУ). При $\tau/T > (0,5 \dots 0,7)$ целесообразно использование специальных регуляторов с компенсацией запаздывания.

Для применения указанной выше методики настройки ПИД-регулятора необходимо по результатам проведения частотной идентификации определить установившееся значение амплитуды $Am_{\text{КР}}$ и частоты $f_{\text{КР}}$ критических колебаний ОУ. В связи с этим одной из важных задач при функционировании предложенной структуры АдСУ является задача определения фазового сдвига гармонических сигналов на входе и выходе ОУ. Для определения величины фазового сдвига применяют методы: геометрический, спектральный, косинуса угла потерь.

Стоит отметить, что не существует универсального метода определения фазового сдвига, имеющего и высокую точность, и скорость преобразований, и низкие требования к анализируемым сигналам одновременно, поэтому в каждом конкретном случае выбор делается индивидуально, в зависимости от заявленных требований. И, как правило, при возникновении практической задачи по поиску фазового сдвига реализуют только один из рассмотренных методов, ухудшая тем самым показатели качества работы этого алгоритма.

В силу указанных причин для функционирования системы в режиме реального времени в качестве метода гармонического анализа используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), сочетающийся с достоинствами геометрического метода. Однако необходимо отметить, что существуют альтернативные алгоритмы, требующие меньше вещественных операций на один отсчет. Например, применение решетчатых периодических функций за счёт существенного сокращения числа обрабатываемых отсчетов может привести к значительному 20...40 % сокращению времени работы алгоритма (в зависимости от числа отсчетов) по сравнению с классическим алгоритмом БПФ [5].

Способ вычисления фазового сдвига по результатам проведения частотного анализа поясняется с помощью рис. 2, на котором приняты следующие обозначения: ΔF – частотный диапазон сканирова-

ния тестовым сигналом, Δf – шаг по частоте гармонических составляющих тестового сигнала, $f_{кр}$ и $\varphi_{кр}$ – (соответственно) критическая частота и фаза ОУ, n – размер выборки.

Если пренебречь нелинейностями фазочастотной характеристики (ФЧХ) и считать её условно линейной в окрестности точки, соответствующей критической частоте, то $f_{кр}$ можно определить по следующей формуле:

$$f_{кр} = \frac{f_B - f_H}{\varphi_B - \varphi_H} (\varphi_{кр} - \varphi_H) + f_H,$$

где f_B, f_H и φ_B, φ_H – частоты и фазы сигналов, лежащих выше или ниже критической точки (на рис. 2 эти точки обозначены «3» и «2»).

Согласно предложенному способу построения адаптивной системы с частотным разделением канала управления и идентификации, рис. 1, в среде Simulink (Matlab) была разработана аналогичная ей динамическая модель (рис. 3).

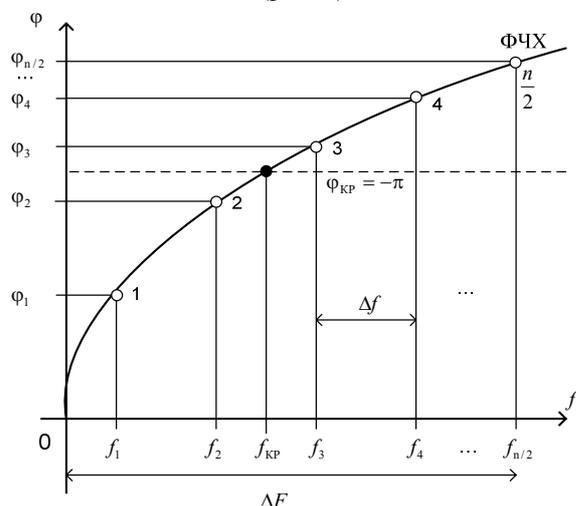


Рис. 2. Определение критической частоты по ФЧХ

Среди АдСУ, использующих активный частотный метод идентификации, наиболее широкое распространение получила АдСУ, содержащая в своем составе генератор пробного гармонического сигнала и синхронный детектор для выделения критической частоты [6]. Графики изменения текущего рассчитанного значения критической частоты $f_{кр}$ предлагаемой адаптивной системы в сравнении с АдСУ с синхронным детектором представлены на рис. 4. На рис. 4 приняты следующие обозначения: $t_{п}$ – момент изменения состояния объекта (изменение критической частоты с $f1_{кр}$ на $f2_{кр}$), t_1 и t_2 – моменты окончания идентификации для адаптивной системы, t_3 и t_4 – моменты окончания идентификации для АдСУ с синхронным детектором.

Как видно из приведённого графика (рис. 4), скорость настройки разработанной АдСУ по сравнению с АдСУ с синхронным детектором существенно выше, а именно: при проведении первичной идентификации (при нулевых начальных условиях) скорость настройки больше чем в 2 раза, а при текущей идентификации отличается на порядок. Соотношение скоростей настроек примерно сохраняется при других типах ОУ и различных условиях проведения эксперимента, это подтвердила серия экспериментов.

Графики определения текущих параметров ПИД-регулятора $\vec{\beta} = \{K_p, T_i, T_d\}$ при проведении первичной идентификации (при нулевых начальных условиях), а также при отработке различных видов нестационарности ОУ приведены на рис. 5.

В целом точность проведения идентификации и расчёт по её результатам параметров ПИД-регулятора можно охарактеризовать приемлемым для большинства ТП. Более детальная количественная оценка точности проводимых расчётов для различного шага по частоте тестового сигнала приведена в таблице.

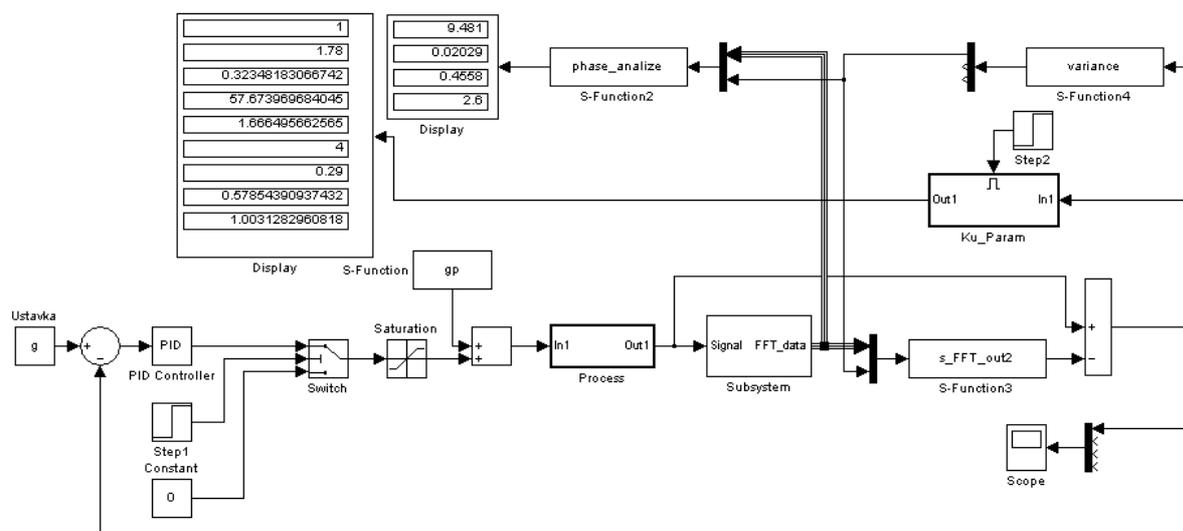


Рис. 3. Модель адаптивной системы с частотным разделением канала управления и самонастройки в среде Simulink (Matlab)

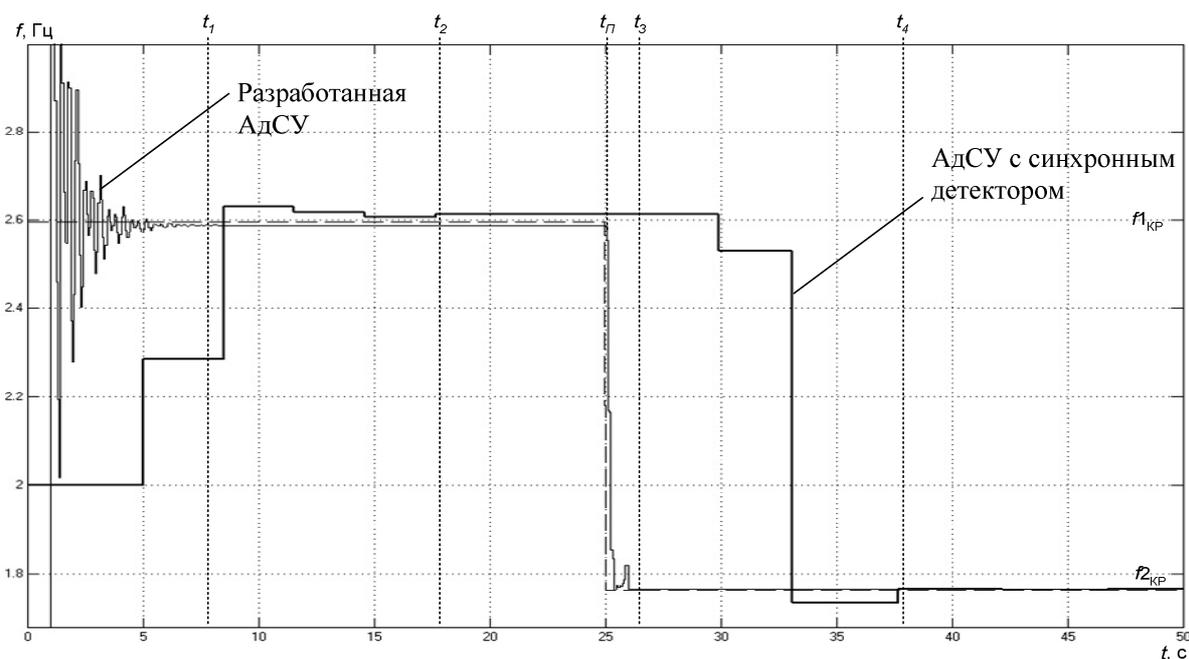


Рис. 4. Процедура идентификации объекта частотным методом



Рис. 5. Графики определения параметров ПИД-регулятора (где t_1, t_2, t_3 – моменты проявления нестационарности ОУ)

Стоит заметить, что с уменьшением шага по частоте Δf увеличивается период тестового сигнала, а это в свою очередь приводит к увеличению длительности переходного процесса и как следствие времени самонастройки, поэтому на практике следует искать разумный компромисс между скоростью самонастройки и точностью расчётов.

К преимуществам разработанного метода адаптации также можно отнести возможность определения параметров ПИД-регулятора без использования математических моделей ОУ, построение которых для большинства реальных объектов существенно затруднено.

Применение адаптивного регулятора с частотным разделением канала управления и самонастройки позволяет:

1. автоматически определять близкие к оптимальным настройки ПИД-алгоритмов управления для объектов с различной динамикой;
2. вести процесс самонастройки при минимальном уровне пробного сигнала, не приводящего к нарушению нормального режима работы ОУ, при этом амплитуда пробного сигнала на выходе ОУ составляет не более 0,3...0,5 %, на входе 1...5 %;
3. запускать процесс самонастройки одновременно на всех регуляторах, установленных в ТП;

Таблица. Результаты экспериментов по оценке точности расчётов

Результаты		Шаг по частоте, Δf , Гц				
		1,0	0,8	0,5	0,2	0,1
$f_{кр}$	Расчёт.	2,59739996136133				
	Эксперим.	2,5712	2,5781	2,5850	2,5886	2,5887
	СКО, %	1,0106	0,7448	0,4790	0,3380	0,3349
$A_{кр}$	Расчёт.	3,0580003724e-3				
	Эксперим.	0,0032	0,0031	0,0030	0,0030	0,0030
	СКО, %	4,0921	2,6894	1,2867	0,9131	0,7496
$K_{п}$	Расчёт.	9,8103323567				
	Эксперим.	9,4197	9,5351	9,6504	9,7402	9,7602
	СКО, %	3,9818	2,8060	1,6302	0,7199	0,5321
$T_{и}$	Расчёт.	1,9622189e-2				
	Эксперим.	0,0200	0,0199	0,0199	0,0197	0,0195
	СКО, %	1,8513	1,6349	1,4186	0,6151	0,5432
$T_{д}$	Расчёт.	4,721227238e-1				
	Эксперим.	0,4540	0,4620	0,4700	0,4731	0,4730
	СКО, %	3,8363	2,1418	0,4474	0,1974	0,1931

4. производить контроль процесса самонастройки и корректировки настроек со стороны оператора;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротач В.Я. Адаптация в системах управления технологически-ми процессами // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 1. – С. 4–10.
2. Ротач В.Я. Расчёт настройки промышленных систем регулирования. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 344 с.
3. Ротач В.Я., Клюев А.С. и др. Автоматизация настройки систем управления / Под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
4. Мазуров В.М. Принципы построения и методы реализации оптимальных и адаптивных регуляторов для объектов с запаздыванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула: ТулГТУ, 1994. – 40 с.

5. производить контроль процесса самонастройки в автоматическом режиме с целью исключения неустойчивой работы системы;

6. настраивать контура регулирования с различными, заранее неизвестными периодами опроса.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование адаптивной системы с частотным разделением канала управления и самонастройки на основе ПИД-регулятора позволяет существенно повысить быстродействие замкнутой системы управления по сравнению с адаптивной системой управления с синхронным детектором, а также добиться приемлемых для большинства промышленных ОУ показателей качества переходных процессов. При этом контур управления АдСУ не разрывается и работает одновременно с контуром адаптации. Изменение настроек работы алгоритма БПФ, лежащего в основе работы БГА, позволяет сконфигурировать работу адаптивной системы управления в режиме реального времени.

5. Пат. 2229139 РФ. МКИ G01R 23/16. Способ спектрального анализа сложных несинусоидальных периодических сигналов представленных цифровыми отсчетами / В.С. Аврамчук, Е.И. Гольдштейн. Заявлено 10.12.02; Оpubл. 20.05.2004, Бюл. № 14. – 10 с.: ил.
6. Спицын А.В. Адаптивные регуляторы с пробным гармоническим сигналом для объектов с переменными параметрами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2001. – 20 с.

Поступила 14.09.2006 г.