



МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Е.Е. Кузнецова (МОАО "Нефтеавтоматика")

Рассматривается методика синтеза цифровой системы управления давлением на выходе центробежного насоса (ЦН), используемого для перекачки нефти по трубопроводам. Приведены основные этапы проектирования и результаты экспериментального моделирования системы автоматического управления (САУ) на нелинейной модели насосного агрегата. Новизна приведенной САУ и ее принципиальное отличие от аналогов в том, что осуществляется дополнительная обратная связь по частоте вращения привода ЦН, что улучшает качество управления.

Ключевые слова: системы автоматического управления, цифровой регулятор, качество управления, математическая модель, трубопроводный транспорт.

При транспорте нефти и нефтепродуктов на большие расстояния по трубопроводам используются насосные агрегаты большой мощности, при этом необходимо обеспечить стабилизацию давления в нефтепроводе. Одним из способов решения этой задачи является управление давлением в трубопроводе за счет изменения скорости вращения приводных двигателей насосных агрегатов. Техническую базу для решения этой задачи составляют современные средства частотно-регулируемого электропривода и компьютерной техники. Цифровая САУ позволяет регулировать как запуск насосного агрегата, так и поддерживать заданное значение давления в трубопроводе.

Рассмотрим методику синтеза цифрового регулятора САУ давлением на выходе ЦН агрегата. Данная методика синтеза универсальна и позволяет строить регуляторы для любого из параметров ЦН агрегата. Синтез САУ давлением во многом аналогичен синтезу САУ расходом перекачиваемой жидкости [1] и состоит из следующих этапов: построение линейных математических моделей насосного агрегата, как объекта управления; синтез регулятора давления на выходе насосного агрегата; проведение экспериментальных исследований системы управления и определение ее характеристик.

Синтез цифровой системы управления

Для синтеза нелинейной САУ, включающей регулятор запуска ЦН и регулятор статического режима, необходимо получить комплекс линейных моделей объекта управления на основе математической нелинейной модели объекта управления.

Нелинейная математическая модель объекта управления состоит из моделей ЦН и приводного электродвигателя. Из нее следует, что расчет относительного давления на выходе ЦН производится по формулам:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(h(q) - p - P_{ext}) \cdot 2\sqrt{p}}{T},$$

$$h(q) = \{h_0 - (h_0 - \frac{1}{k})p\} \eta(p) a(\varphi),$$

$$\eta(q) = kq^{0,35}, \quad (1)$$

$$a(\varphi) = 0,22 + 0,78\varphi,$$

где P_{ext} — относительное внешнее давление, p — относительное давление на выходе насоса, $h(q)$ — относительная напорно-расходная характеристика насоса, h_0 — максимум относительной напорно-расходной характеристики, k — номинальный коэффициент полезного действия насоса, φ — относительная частота вращения приводного двигателя, T — постоянная времени насоса.

Модель асинхронного электродвигателя переменного тока представлена нелинейным дифференциальным уравнением:

$$T_d \frac{d}{dt} \left(\frac{\varphi^2}{2} \right) = W - \varphi^3,$$

где W — относительная мощность, потребляемая электродвигателем, φ — относительная частота вращения приводного двигателя, T_d — постоянная времени двигателя.

Решение системы уравнений (1) для расчета давления проводилось численным интегрированием с помощью метода Эйлера с шагом 0,001 с. Для получения линейных моделей весь диапазон возможного изменения мощности W насосного агрегата был разбит на десять участков, и для каждого участка получены линейные дифференциальные уравнения, описывающие динамику объекта управления на этом участке. Затем из линейных дифференциальных уравнений были получены линейные разностные уравнения. Линейные дифференциальные уравнения представлялись в виде:

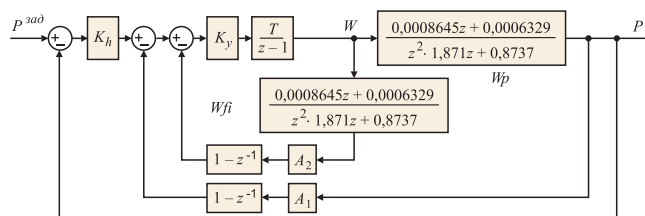


Рис. 1. Структурная схема системы управления давлением на выходе насосного агрегата

Таблица 1

W, %	φ, %	$a_1(\varphi)$	$a_2(\varphi)$	$a_3(\varphi)$	$b_1(\varphi)$	$b_2(\varphi)$	$b_3(\varphi)$
10	46	-1,51995	0,95586	-0,6561	5,02632	-4,91624	7,78401
20	58	-2,89957	2,58141	0,01848	0,04271	-0,63428	0,71903
30	66	-3,36854	3,43636	0,01195	0,01452	-0,68870	0,57024
40	73	-3,66029	4,13347	0,00894	0,00708	-0,74725	0,49804
50	79	-3,86732	4,75238	0,00725	0,00409	-0,80031	0,45245
60	84	-4,02430	5,32533	0,00618	0,00262	-0,84801	0,42000
70	88	-4,14802	5,86899	0,00545	0,00179	-0,89128	0,39523
80	92	-4,24784	6,39328	0,00492	0,00129	-0,93091	0,37542
90	96	-4,32954	6,90467	0,00453	0,00096	-0,96755	0,35908
100	100	-4,39692	7,40770	0,00423	0,00073	-1,00167	0,34525

$$\frac{dp}{dt} = a_{1,i} \cdot \Delta p + a_{2,i} \cdot \Delta \varphi + a_{3,i} \cdot \Delta W, \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = b_{1,i} \cdot \Delta p + b_{2,i} \cdot \Delta \varphi + b_{3,i} \cdot \Delta W, \quad (3)$$

где $\Delta p = p - p_0$, $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_0$, $\Delta W = W - W_0$ — это отклонения параметров от статического режима, параметры p_0 , φ_0 и W_0 определяют статический режим, на котором проводится линеаризация дифференциальных уравнений, а постоянные коэффициенты a_1 , a_2 , a_3 и b_1 , b_2 , b_3 получены по переходным процессам методом наименьших квадратов. Значения коэффициентов, полученных в результате эксперимента, приведены в табл. 1.

Далее соотношения (2, 3) использовались для получения комплекса разностных уравнений, на основе которых проводился синтез цифровых регуляторов. Временная дискретизация уравнений (2, 3) осуществлялась методом, изложенным в [2] и основанном на фундаментальной матрице решения системы дифференциальных уравнений. В результате этого этапа уравнения (2, 3) на i -м шаге приводят к следующим разностным соотношениям:

$$\Delta p_{i+1} = A_{1,i} \cdot \Delta p_i + A_{2,i} \cdot \Delta \varphi_i + A_{3,i} \cdot \Delta W_i, \quad (4)$$

$$\Delta \varphi_{i+1} = B_{1,i} \cdot \Delta p_i + B_{2,i} \cdot \Delta \varphi_i + B_{3,i} \cdot \Delta W_i. \quad (5)$$

Коэффициенты разностных уравнений $A_1(\varphi)$, $A_2(\varphi)$, $A_3(\varphi)$, $B_1(\varphi)$, $B_2(\varphi)$, $B_3(\varphi)$ для уравнений (4, 5), являющиеся функционально зависимыми от режима по частоте вращения φ , приведены в табл. 2. Время дискретизации $\tau = 0,025$ с.

Уравнения регулятора рассчитывались по методике, представленной в [3]. В результате проведенного синтеза получены разностные уравнения для регулятора заданного значения давления на выходе насоса:

$$\begin{aligned} \delta W_i = & K_y \{ (p_i^{pr} - p_i) \cdot K_h - \\ & - A_{1,i} \cdot (p_i - p_{i-1}) - A_{2,i} \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$W_i = W_{i-1} + \delta W_i \cdot \tau,$$

где параметр p_i^{pr} определяет значение заданного относительного давления на выходе ЦН на i -м шаге управления, p_i и φ_i — текущие относительные значения давления на выходе ЦН и частоты вращения, p_{i-1} и φ_{i-1} — относительные значения давления на выходе ЦН и частоты вращения на предыдущем шаге управления. Параметр K_y является коэффициентом усиления,

Таблица 2

W, %	φ, %	$A_1(\varphi)$	$A_2(\varphi)$	$A_3(\varphi)$	$B_1(\varphi)$	$B_2(\varphi)$	$B_3(\varphi)$
10	46	0,9641	0,02207	0,00059	0,11600	0,8857	0,18310
20	58	0,9301	0,06176	0,00100	0,00102	0,9843	0,01784
30	66	0,9192	0,08168	0,00087	0,00034	0,9829	0,01413
40	73	0,9126	0,09782	0,00083	0,00016	0,9815	0,01234
50	79	0,9078	0,11210	0,00081	$9,67 \cdot 10^{-5}$	0,9802	0,01120
60	84	0,9043	0,12530	0,00081	$6,18 \cdot 10^{-5}$	0,979	0,01039
70	88	0,9015	0,13780	0,00082	$4,22 \cdot 10^{-5}$	0,978	0,00977
80	92	0,8993	0,14990	0,00083	$3,03 \cdot 10^{-5}$	0,977	0,00927
90	96	0,8974	0,16160	0,00084	$2,26 \cdot 10^{-5}$	0,9761	0,00886
100	100	0,8959	0,17320	0,00086	$1,73 \cdot 10^{-5}$	0,9753	0,00852

а K_h служит для изменения динамических характеристик САУ и для изменения запасов устойчивости системы.

Аналогичные соотношения получены для всех десяти расчетных режимов. Значения коэффициентов в (6), таким образом, меняются в зависимости от частоты вращения привода насосного агрегата, обеспечивая тем самым пассивную адаптацию САУ к меняющимся характеристикам насосного агрегата.

Экспериментальное исследование системы управления

Экспериментальное исследование синтезированной системы управления величиной давления на стационарных режимах проводилось путем имитационного моделирования в системе Matlab 6.5. На рис. 1 приведена структурная схема системы управления давлением на выходе насосного агрегата на режиме $\varphi = 100\%$.

На рис. 2 приведены переходные процессы по относительному давлению на выходе p и по относительной скорости вращения вала приводного двигателя φ , вызванные ступенчатым изменением заданного давления на 5% на режиме $W = 100\%$. Переходные процессы имеют апериодический характер со временем регулирования 5 с.

На рис. 3 приведены переходные процессы по относительной скорости вращения вала приводного двигателя φ и давлению p на выходе насоса, вызванные ступенчатым изменением внешнего давления P_{ext} на 5%. Длительность парирования этого возмущения составила 4 с. Переходные процессы имеют апериодический монотонный характер.

Экспериментальное исследование синтезированной системы управления насосным агрегатом показало, что САУ отвечает предъявляемым требованиям как по качеству управления, так и по времени переходных процессов в системе. Известно, что в оптимальных САУ всегда справедливы следующие равенства $\Delta \varphi \geq 30^\circ$, $\Delta L \geq 6$ дБ, где $\Delta \varphi$ и ΔL — запас устойчивости по фазе и запас устойчивости по амплитуде соответственно. Запасы устойчивости системы составляют 21,4 дБ по амплитуде и 68,5° по фазе. Время отработки ступенчатых изменений заданных значений управляемых параметров ≤ 4 с при монотонном характере переходных процессов. Время парирования внешних возмущений не меньше 6 с, и переходные процессы носят апериодический характер.

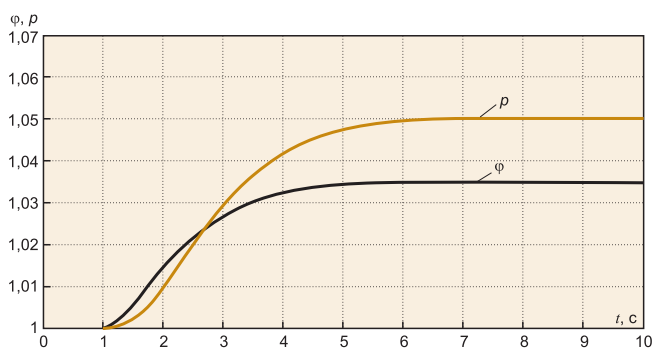


Рис. 2. Переходные процессы в САУ по φ , p при ступенчатом изменении p_{pr} на 5%

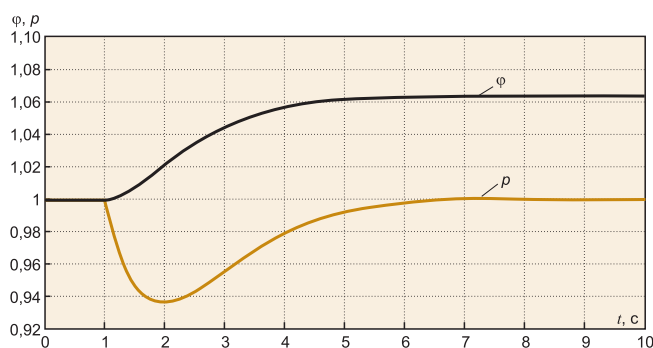


Рис. 3. Переходные процессы в САУ по φ , p при ступенчатом изменении P_{ext} на 5%

Выводы

Предложена методика расчета нелинейной цифровой САУ давлением на выходе насосного агрегата. Система управления имеет требуемые качественные характеристики и обладает пассивной адаптацией к изменению характеристик объекта управления. Система, построенная на базе описанной методики, является адаптивной для всех режимов работы насосного агрегата, а также в отличие от ПИД-регуляторов учитывает значение не только регулируемого параметра, но и значение частоты вращения двигателя. Таким образом повышается качество управления.

Рассмотренная методика синтеза САУ может быть использована для решения задач по автоматическому управлению нефтепромысловым оборудованием. Целе-

сообразно применить подобный подход к синтезу оптимальных многомерных САУ с целью обеспечения минимальных затрат электроэнергии для перекачки нефти несколькими пунктами подкачки одновременно.

Список литературы

1. Кузнецова Е.Е. Синтез цифровой системы автоматического управления насосным агрегатом // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 4.
2. Смит Джон М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Пер. с англ. М.: Машиностроение. 1980.
3. Лянцев О.Д. Синтез цифровых многосвязных систем управления ГТД методами нелинейного программирования. Уфа: "Башкирская энциклопедия". 2001.

Кузнецова Елена Евгеньевна — инженер-программист

1 категории Отдела разработки и внедрения АСУТП МОАО "Нефтеавтоматика".

Контактный телефон (917)-74-33-018. E-mail: alenushkamail@gmail.com

Продуктовая серия Kontron Concept Box:

заказные встраиваемые компьютеры Box PC под любые требуемые размеры и конфигурацию

Международный холдинг Kontron представляет программу Kontron Concept Box, в рамках которой создаются заказные безвентиляторные встраиваемые компьютеры формата Box PC с различными габаритами, допускающие гибкое конфигурирование в соответствии с прикладными требованиями. Эта инициатива мирового лидера ВКТ призвана обеспечить клиентам холдинга быстрый вывод на рынок специализированных заказных решений на основе компьютеров Box PC.

Системы серии Kontron Concept Box создаются по известному принципу "функциональность определяет форму". Исходя из минимальных размеров Kontron Concept Box (40×200×200 мм) OEM-производитель сможет самостоятельно подобрать конфигурацию встраиваемого компьютера с учетом требований своих прикладных задач. Варьируются физические габариты конечного решения, системная комплектация и функционал.

Благодаря программе Kontron Concept Box OEM-клиенты смогут получать готовые компьютеры Box PC, сделанные на заказ под конкретные прикладные требования, но сохраняющие свойственные COTS-решениям преимущества в отношении гибкости и сроков выхода на рынок. Фактически в семействе компьютеров Box PC производства Kontron появилась новая продуктовая линейка, представители которой доступны в различных модификациях как по физическим размерам, так и по аппаратному составу, что минимизирует усилия по оптимизации продукции для клиентов из различных отраслей.

Высшая степень гибкости компьютеров Kontron Concept Box достигается за счет концепции модульных корпусов, пред-

полагающей использование корпусных элементов стандартизованных профилей разных размеров. Профили фронтальных и тыльных панелей также стандартизованы; при этом расположение, размеры, форма и число отверстий для разъемов ввода/вывода определяются требованиями заказчика.

Платы расширения устанавливаются непосредственно в слоты, параллельно материнской плате при помощи специальных адаптеров, в любых иных положениях по отношению к материнской плате (с использованием кабелей). Допускается применение стандартных плат PCI и PCI Express и любых других изделий, совместимых с указанными интерфейсами. Простейший компьютер, состоящий из материнской платы и жесткого диска Slim RAID, может иметь как минимум три варианта компоновки: низкую и широкую (плата и накопитель располагаются друг к другу боком), низкую и глубокую (расположение друг за другом), узкую и высокую (друг над другом).

Выбор материнской платы и процессора определяется базовой версией системы Kontron Concept Box будет использоваться. В настоящее время пользователям доступны ЦП семейств Intel Atom Z5xx и Intel Core2 Duo, а также процессоры компании AMD. Все решения Kontron Concept Box являются безвентиляторными и способны работать при температурах 0...50 °С. Тепловой пакет материнской платы не превышает 35 Вт, энергопотребление всей системы — 70 Вт. Каждая сделанная на заказ модификация подвергается тщательному тестированию и является изделием с увеличенным сроком службы.

[Http://www.rtsft.ru](http://www.rtsft.ru)