УДК681.5.013

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗЕРВУАРОМ ПОДАЧИ И СЛИВА НЕФТИ

Михалев А.В., Туманова Н.И.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия (600000, Владимир, ул. Горького, д. 87), e-mail: oid@vlsu.ru

В статье рассматривается вопрос синтеза оптимального управления вертикальным резервуаром с управляемыми подачами и сливом нефти на основе математического моделирования процесса. Построенная математическая модель описывает процесс распределения и перекачки нефти, поступающей из нефтепровода в вертикальный резервуар. В результате исследований получены три варианта оптимальных управлений и аргументирован выбор одного решения. Обоснована возможность включения полученного типа управления в автоматическую систему управления технологическим процессом перекачки нефти резервуарного парка с целью повышения его пропускной способности. Главным источником обоснования выступает проведение оценки экономической эффективности автоматизации резервуарного парка, оборудованным синтезированным оптимальным управлением. На основании расчетов определен период окупаемости инвестиций в автоматизацию резервуарного парка, который ориентировочно составляет 2,5 года.

Ключевые слова: нефть, резервуар, резервуарный парк, синтез оптимального управления, математическое моделирование, эффективность.

SYNTHESIS OF THE OPTIMAL CONTROL OF A TANK OF OIL FEED AND DRAIN

Mikhalev A.V., Tumanova N.I.

FSBE of Higher Vocational Education "Vladimir State University name after Alexander G. and Nicholay G. Stoletovs", Vladimir city, Russia (600000, Vladimir, st. Gorky, 87), e-mail: oid@vlsu.ru

The paper deals the synthesis of optimal control of vertical tank with controlled feed and drainof oil based on mathematical modeling. Constructed mathematical model describes the process of distribution and pumping oil from an oil pipeline in tank. Obtained three variants of optimal controls and reasoned choice of one solution. Substantiated the inclusion of the resulting type of control in the automatic process control system pumping oil tank farm in order to improve its throughput capacity. The main source of justification stands assess the economic efficiency of the tank farm automation, equipped synthesized system of optimal control. Based on calculations, the payback period is defined in the automation of the tank farm, which amounts approximately 2.5 years.

Keywords: oil, tank, tank farm, synthesis of optimal control, mathematical modeling, efficiency.

Введение

Нефтяная промышленность – стратегически важная отрасль России, и от её состояния зависит дальнейший экономический рост страны. Нефть является не только топливом, а и важнейшим источником химического сырья для многих смежных отраслей народного хозяйства [2].

Надежность и бесперебойность поставки нефти потребителям через нефтеперевалочные комплексы (резервуарные парки) являются основными требованиями, предъявляемыми к системам нефтеснабжения. Соблюдение и выполнение указанных требований в полном объеме возможно лишь при высоком уровне автоматизации технологического процесса перекачки нефти.

Цель исследования

Проведение синтеза оптимального управления резервуаром с управляемыми подачей и сливом нефти с целью повышения эффективности работы резервуарного парка.

Методы исследования

Методом исследования технологического процесса перекачки нефти через резервуарный парк выступает метод математического моделирования, который заключается в установлении зависимостей между входными и выходными параметрами рассматриваемого объекта (резервуарного парка).

Рассматриваемая в статье математическая модель описывает процесс распределения и перекачки нефти, поступающей в резервуар из нефтепроводной системы, и призвана разрешить задачу создания системы оптимального управления резервуарным парком.

Для того чтобы представить рассматриваемый технологический процесс перекачки нефти как процесс управления, необходимо разбить переменные на группы.

Входные переменные:

X1 – количество поступившей из нефтепровода нефти;

X2 – температура поступившей нефти;

X3 – качественный состав поступившей нефти.

Управляющие переменные:

U1 – давление приходящей нефти;

U2 – давление расходуемой нефти.

Переменные, характеризующие условие протекания технологического процесса перекачки:

Выходные переменные:

Y1 – верхний уровень нефти в резервуаре;

Y2 – нижний уровень нефти в резервуаре;

Y3 – потеря нефти с «дыханиями» резервуара.

Возмущающими воздействиями являются:

- состав нефти;
- состояние насосов;
- колебания температуры окружающей среды;
- и т. д.

Следует отметить тот факт, что некоторые переменные рассматриваемого технологического процесса не могут быть определены с достаточной степенью точности, ввиду отсутствия соответствующих контрольно-измерительных приборов. К примеру, практически не предоставляется возможным поддерживать непрерывный процесс мониторинга за состоянием резервуаров или измерять величину потерь нефти с так называемыми «дыханиями» резервуара. Эти переменные препятствуют оценке состояния процесса и ухудшают оперативное управление им – рассматриваемый объект относится к классу объектов с неполной информацией. Необходимо также учесть тот факт, что рассматриваемый технологический процесс резервуарного парка нестационарен ввиду непостоянства факторов, его характеризующих (налипание парафина на приемно-раздаточные патрубки, непостоянство содержания воды в нефти и др.).

Рассмотрим управление цилиндрическим резервуаром с управляемыми подачей и сливом нефти. Запишем систему уравнений для объекта [1]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= b_1 u_1; \\ \dot{x}_1 &= b_2 u_2; \\ \dot{x}_1 &= x_1 - k_3 x_2 \sqrt{x_3}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где x_1 – расход жидкости в подающем трубопроводе; x_2 – положение клапана на сливном трубопроводе; x_3 – высота уровня; ограничения следующего вида: $0 \le x_i \le x_{i\max}, i = 1,2,3$; b_1, b_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности. Принимаем $b_1 = b_2 = k_3 = 1, |u_1| \le 1, |u_2| \le 1$.

Множество стационарных состояний задается поверхностью $L = x_1 - x_2\sqrt{x_3} = 0$. Необходимо исследовать оптимальное управление, переводящее на множество стационарных состояний координаты из любой точки пространства.

Исследуем условия общности положения для данного объекта. Управления u_1 и u_2 независимы, то проверку условия общности положения проводим отдельно по каждому. Запишем систему (1) в векторной форме:

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u,$$

где

$$A(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_1 - x_2\sqrt{x_3} \end{pmatrix};$$

$$B(x) = B = B_1 = \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Исследуем условия общности положения для u_1, когда [5]

$$B_1 = B_1' = \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B_2' = -\frac{\partial A(x)}{\partial x} B_1' = -\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{x_3} & \frac{-x_2}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -b_1 \end{pmatrix};$$

$$B_3' = \frac{\partial B_2'(x)}{\partial x}\left(A(x) + B_2' u_1\right) - \frac{\partial A(x)}{\partial x} B_2' = -\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{x_3} & \frac{-x_2}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-b_1 x_2}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix}.$$

Составляем матрицу D"$_3$ = (B`$_1$,B`$_2$,B`$_3$):

$$D_3' = -\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -b_1 & \frac{-b_1 x_2}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix}, \ \det D_3' \equiv 0 . \tag{2}$$

Объект не управляем в R_3, но управляем в $R_2\{x_2,x_3\}$, т.к. ранг матрицы D"$_3$ равен двум. Имеется и особая линия – ось x_3, которая является пересечением особых плоскостей $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$. На оси x_3 стационарная поверхность имеет минимум, но особые плоскости имеют одновременно и ограничения, поэтому исследование особых управлений и особых траекторий можно не проводить.

Исследуем условия общности положения одновременно для двух управлений u_1 и u_2. Матрица D"$_3$ = (B_1,B_2,B_3) будет иметь следующий вид:

$$D_3' = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_1 & b_2\sqrt{x_3} & \frac{-b_1 x_2}{2\sqrt{x_3}} & \frac{b_2 x_1}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Ранг матрицы D"$_3$ равен трем, и объект управляем в $R_3 = \{x_1,x_2,x_3\}$. В пространстве R_3 также имеются особые плоскости $x_1 = 0$, $x_2 = 0$ и особая линия – ось x_2, которые совпадают с ограничениями.

Для нахождения оптимальных управлений применим принцип максимума. Составим функцию H и систему уравнений для функций ψ_1:

$$H = \psi_1 u_1 + \psi_2 u_2 + \left(x_1 - x_2\sqrt{x_3}\right)\psi_3;$$

$$\dot{\psi}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = -\psi_3; \tag{4}$$

$$\dot{\psi}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = \sqrt{x_3}\psi_3;$$

$$\dot{\psi}_3 = -\frac{\partial H}{\partial x_3} = \frac{x_2}{2\sqrt{x_3}}\psi_3;$$

Максимум функции *H* достигается при следующем условии:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \operatorname{sgn}\psi_1(t)\cdot 1; \\ u_2(t) &= \operatorname{sgn}\psi_2(t)\cdot 1. \end{aligned}; \qquad (5)$$

Закон управления – релейный. Количество интервалов управления определяется нулями функций $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$. Найдем решения для ψ_1 и ψ_2 [6].

$$\begin{aligned} \psi_1(t) &= -\int \psi_{30} \exp\int_0^t \frac{x_2}{2\sqrt{x_3}} d\tau dt + \psi_{10}; \\ \psi_2(t) &= \int \sqrt{x_3}\psi_{30} \exp\int_0^t \frac{x_2}{2\sqrt{x_3}} d\tau dt + \psi_{20}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Функции $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$ могут не более одного раза менять знак, поэтому управления и $u_1(t)$ и $u_2(t)$ содержат не более двух интервалов. Для заданных граничных условий первые интервалы должны быть противоположного знака. Утверждение о количестве перемен знака бесспорно для функции $\psi_1(t)$.

Функция $\psi_2(t)$ содержит координату x_3, от поведения которой может зависеть число перемены знака. В данном случае в процессе управления координата x_3 знака не меняет в силу безусловных ограничений. В нуль она обращается только в единственной стационарной линии $x_1 = x_3 = 0$, то есть на оси x_2. Поэтому в процессе управления x_3 не может менять знака. Тогда функция $\psi_2(t)$ не более одного раза меняет знак.

Анализ оптимальных управлений дает следующие решения задачи:

$u_2 = 0$ и $x_2 = \text{const}$. Управление $u_1(t)$ – релейное, имеет не более двух интервалов, осуществляется подачей нефти в резервуар.

$u_1 = 0$ и $x_1 = \text{const}$. Управление $u_2(t)$ – релейное, имеет не более двух интервалов, реализуется путем слива нефти из резервуара.

$u_1 \neq 0$ и $u_2 \neq 0$. Управления $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – релейные, имеют не более двух интервалов, реализуется как подачей нефти в резервуар, так и сливом ее из резервуара.

Из вышесказанного делаем вывод, что решение оптимальной задачи не единственное. Получены три варианта оптимальных управлений, и каждый из них удовлетворяет принципу максимума. Из полученных управлений следует выбрать такое, которое даст при данных граничных условиях минимальное время [4].

Рассмотрим управление для граничных условий, когда начальные условия заданы в нуле $x_1=x_2=x_3=0$, а конечные условия находятся на множестве стационарных состояний.

Необходимо, следовательно, объект из нуля перевести на множество стационарных состояний.

Представим граничные условия в следующем виде:

$x_{10}=x_{20}=x_{30}=0$; (клапаны закрыты и резервуар пуст)

x_{1n}, x_{2n}, x_{3n}, (причем должно выполняться соотношение $\sqrt{x_{3n}} = \frac{x_{1n}}{x_{2n}}$).

Последовательность управлений должна иметь вид:

$$\begin{array}{lccc} & \mathrm{I} & \mathrm{II} & \mathrm{III} \\ u_1 = & 1 & 1 & -1 \\ u_2 = & -1 & 1 & 1 \end{array}$$

Но координата x_2 не может принимать отрицательных значений в силу безусловного ограничения (сливной клапан закрыт).

Поэтому интервал $u_2 = -1$ заменяется интервалом $u_2 = 0$.

Последовательность управлений с учетом безусловного ограничения на x_2 имеет вид:

$$\begin{array}{lccc} & \mathrm{I} & \mathrm{II} & \mathrm{III} \\ u_1 = & 1 & 1 & -1 \\ u_2 = & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

Записываем системы уравнений и их решения на отдельных интервалах.

Первый интервал равен:

$$\begin{gathered} u_1 = 1, u_2 = 0, \\ \dot{x}_1 = u_1 = 1, \\ \dot{x}_3 = x_1, \end{gathered} \tag{7}$$

так как $x_2=0$.

Решения для x_1 и x_3 следующие:

$$\begin{aligned} & x_1(t) = t; \\ & x_2(t) = \frac{t^2}{2} \end{aligned} \tag{8}$$

Второй интервал равен:

$$\begin{aligned} & u_1 = 1, u_2 = 1 \\ & \dot{x}_1 = u_1 = 1 \\ & \dot{x}_2 = u_2 = 1 \\ & \dot{x}_3 + x_2\sqrt{x_3} = x_1 \end{aligned} \tag{9}$$

Решения для $x_1(t)$ и $x_2(t)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} & x_1(t) = x'_{10} + t \\ & x_2(t) = 1 \end{aligned} \tag{10}$$

Подставляем полученные решения для $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в третье уравнение, получим:

$$\dot{x}_3 + t\sqrt{x_3} = x'_{10} + t \qquad (11)$$

Третий интервал будет равен:

$$\begin{aligned} &u_1 = -1, u_2 = 1 \\ &\dot{x}_1 = u_1 = -1 \\ &\dot{x}_2 = u_2 = 1 \\ &\dot{x}_3 + x_2\sqrt{x_3} = x_1 \end{aligned} \qquad (12)$$

Решения для $x_1(t)$ и $x_2(t)$ будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} &x_1(t) = x'_{10} - t \\ &x_2(t) = x'_{20} + t \end{aligned} \qquad (13)$$

Подставляем полученные решения $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в третье уравнение:

$$\dot{x}_3 + (x''_{20} + t)\sqrt{x_3} = x'_{10} + t \qquad (14)$$

Из решений данного управления следует определить время оптимального процесса T, момент t_2 включения u_2 и момент t_1 переключения u_1. Аналитически найти t_1, t_2 и T не представляется возможным, поэтому они определяются приближенно из условия прохождения оптимальной траектории через конечные точки x_{1n}, x_{2n}, x_{3n}[3].

С физической точки зрения объяснение оптимального управления весьма просто – при закрытом сливном клапане уровень в резервуаре поднимается с наибольшей скоростью.

Допустим, что количество нефти, перекачиваемой без системы автоматизации, составляет 29200 у.т/год со стоимостью перекачки 292000 у.е./год.; количество перекачиваемой нефти с оборудованной системой автоматизации составляет 36500 у.т/год со стоимостью перекачки 255500 у.е./год.

Рассчитаем экономический эффект оснащения резервуарного парка (РП) системой автоматизации на основе AdvantController 450 компании по автоматизации технологий «ABB». Результаты расчета сведем в таблицу 1.

Таблица 1

	РП не оснащен АСУ	РП оснащен АСУ
Количество перекачиваемой нефти, у.т./год	29200	36500
Стоимость перекачки нефти, у.е./год	292000	255500
Единоразовые инвестиции в АСУ, у.е.	0	350000
Эксплуатационные затраты, у.е.	0	20000

В результате проведённых расчетов на основе данных таблицы 1 период окупаемости инвестиций в автоматизацию РП составляет ~ 2,5 года [7].

Выводы

1. Резервуарный парк, в котором функционирует система автоматизации на основе синтеза оптимального управления резервуаром, увеличивает его пропускную способность, т. е. через парк перекачивается в сутки больший объем нефти, чем при отсутствии системы.
2. Автоматизация резервуарного парка на основе синтеза оптимального управления резервуаром с управляемыми подачей и сливом нефти экономически целесообразна.

Список литературы

1. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
2. Бушуев В.В., Крюков В.А., Саенко В.В. Нефтяная промышленность России – сценарии сбалансированного развития. – М.: Энергия, 2011. – 160 с.
3. Исакович Р.Я., Логинов В.И. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1983. – 424 с.
4. Комягин А.Ф. Автоматизация производственных процессов газонефтепроводов. – М.: Недра, 1979. – 376 с.
5. Лернер А.Я. Оптимальное управление. – М.: Энергия, 1976. – 360 с.
6. Олейников В.А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
7. Сапожников П.С., Крашенинников С.Н., Филановский В.Ю. Экономико-математическое моделирование капитальных вложений в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 263 с.

Рецензенты:

Веселов О.В., д.т.н., профессор кафедры мехатроники и электронных систем автомобилей ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир.

Сысоев С.Н., д.т.н., профессор кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» г. Владимир.