

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 681.5

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА¹

А.А. Афиногентов, Ю.Э. Плешивецца, А.П. Ефимов

Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: Pondex@Yandex.ru

Сформулирована задача оптимального по быстродействию управления нестационарными режимами работы магистрального нефтепровода с учетом технологических ограничений, проведена ее редукция к задаче математического программирования. Приведены некоторые результаты расчета оптимального по быстродействию режима управления давлением в процессе отключения насосного агрегата на нефтеперекачивающей станции.

Ключевые слова: оптимальное управление, задача математического программирования, объект с распределенными параметрами, переходный режим, трубопроводный транспорт, нефть, давление.

Введение

Наиболее распространенным и эффективным способом передачи нефти и нефтепродуктов на большие расстояния является их транспортировка по системе магистральных трубопроводов (МТП), имеющих значительную пространственную протяженность.

Осуществляемые на магистральном трубопроводе технологические операции, такие как пуск и остановка насосных агрегатов, приводят к взаимосвязанным изменениям расхода и напора транспортируемого продукта, которые, в свою очередь, обуславливают возникновение волн давления и скорости потока жидкости, распространяющихся по трубопроводу в противоположные стороны от места возмущения и затухающих с выходом на новый установившейся режим.

Значительное количество операций переключения насосного оборудования и смена режимов работы МТП приводят к тому, что длительность переходных режимов занимает значительную долю от общего времени работы магистральных трубопроводов.

¹ Работа выполнена в рамках целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.», государственный контракт №П2560; АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект №2.1.2/13988.

Александр Александрович Афиногентов – к.т.н., ассистент.

Юлия Эдгаровна Плешивецца – д.т.н., профессор.

Александр Порфирьевич Ефимов – к.т.н., доцент.

Отключение насосных агрегатов на нефтеперекачивающей станции (НПС) приводит к росту давления в линии всасывания и падению давления в линии нагнетания. Волны повышенного давления представляют серьезную опасность для трубопровода, особенно для участков с высоким статическим давлением, расположенных в нижних точках по профилю трассы и вблизи НПС. Для снижения негативного воздействия волн повышенного давления на трубопровод в системе МТП предусмотрены специальные устройства сглаживания волн давления (ССВД). Резкое изменение давления от фронта проходящей волны приводит к срабатыванию ССВД, которое реагирует на заданную скорость повышения давления, что, в свою очередь, приводит к сбросу части потока нефти в безнапорную емкость и необходимости в повторном закачивании нефти в МТП.

Альтернативным способом снижения негативного влияния волн повышенного давления на трубопровод может служить реализация специальной программы отключения насосного агрегата на промежуточной НПС, которая позволяет «сгладить» фронт ударной волны на стадии ее формирования и избежать негативного влияния гидроударных процессов на трубопровод.

Данная проблема приводит к необходимости постановки и решения задачи оптимального управления (ЗОУ) давлением на выходе промежуточных НПС в переходных режимах работы МТП с учетом технологических ограничений на скорость изменения давления в трубопроводе.

В статье приводится постановка соответствующей ЗОУ и ее редукция к задаче математического программирования, решение которой иллюстрируется на примере результатов численных расчетов оптимальных по быстродействию переходных режимов работы НПС.

Постановка задачи оптимального по быстродействию управления

Магистральный трубопровод ввиду его значительной пространственной протяженности представляет собой объект с распределенными параметрами (ОРП), описываемый векторной функцией состояния $Q(x,t) = (P(x,t), \omega(x,t))$, где $P(x,t)$ и $\omega(x,t)$ – пространственно-временные распределения давления и скорости потока перекачиваемого продукта в трубопроводе соответственно. Взаимосвязь между $P(x,t)$ и $\omega(x,t)$ может быть представлена в первом приближении системой двух пространственно-одномерных нелинейных неоднородных уравнений вида [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = -\rho \cdot \left(\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} + \frac{\lambda(\omega(x,t)) \cdot \omega^2(x,t)}{2 \cdot D} + g \cdot \sin \alpha(x) \right) + f_p(x,t), \\ \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} = -\frac{1}{c^2 \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + f_\omega(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к произвольной горизонтальной поверхности, g – ускорение свободного падения, $\lambda(\omega(x,t))$ – коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый по формулам Стокса, Блазиуса, Альтшуля, c – скорость распространения волн в жидкости, текущей в стальной трубе с толщиной стенки d , которая определяется по формуле Жуковского [1]. Система уравнений (1) характеризует движение жидкости плотностью ρ по трубопроводу постоянного диаметра D длиной L в любой точке x , $x \in [0, L]$, по направлению движения потока и в любой момент времени t , $t \geq 0$.

Полагая, что в момент времени $t = t_0 = 0$ давление жидкости распределено по длине трубопровода по некоторому закону $P_0(x)$, а скорость потока в трубопроводе в начальный момент времени постоянна и равна $\omega_0 = const$, можно записать начальные условия задачи в следующем виде:

$$P(x,0) = P_0(x), \quad \omega(x,0) = \omega_0, \quad x \in [0, L]. \quad (2)$$

Неоднородные граничные условия определяются исходя из технологической постановки задачи и могут быть заданы в виде функций $\eta_0(t)$, $\eta_1(t)$, описывающих изменение давления в начальной точке трубопровода с координатой $x = 0$ и в его конечной точке с координатой $x = L$, или в виде функций $\xi_0(t)$, $\xi_1(t)$, описывающих изменение скорости потока нефти в тех же точках, т. е. с помощью функций:

$$\begin{aligned} \omega(0,t) &= \xi_0(t), \quad P(0,t) = \eta_0(t), \\ \omega(L,t) &= \xi_1(t), \quad P(L,t) = \eta_1(t), \end{aligned} \quad (3)$$

любая пара которых обеспечивает однозначность решения соответствующей краевой задачи математического моделирования ОРП.

В правые части уравнений системы (1) входят функция распределения источников давления по длине трубопровода $f_p(x,t)$ и функция распределения источников жидкости по длине трубопровода $f_\omega(x,t)$, которые, как показано в [1], можно рассматривать в качестве внутренних управляющих сосредоточенных воздействий $f_{pk}(t)$, приложенных в точках расположения НПС $x_{pk} \in [0, L]$, $k = \overline{1, K}$, и $f_{on}(t)$, приложенных в точках отбора нефти $x_{on} \in [0, L]$, $n = \overline{1, N}$, где K – число работающих НПС, а N – общее число точек отбора нефти по длине трубопровода, при этом [1]

$$f_p(x,t) = \sum_{k=1}^K f_{pk}(t) \cdot \delta(x - x_{pk}), \quad f_\omega(x,t) = \sum_{n=1}^N f_{on}(t) \cdot \delta(x - x_{on}), \quad (4)$$

где $\delta(x - x_{pk})$, $\delta(x - x_{on})$ – функции Дирака.

В результате решения краевой задачи математического моделирования, представленной системой уравнений (1) с начальными условиями (2) и граничными условиями (3), можно получить пространственно-временные законы $P(x,t)$ и $\omega(x,t)$ распределения по длине трубопровода и во времени давления и скорости потока нефти соответственно. Далее будем рассматривать описанный ОРП в качестве объекта управления соответствующей ЗОУ [2].

Положим, что t_1 – момент окончания переходного процесса и в новом установившемся режиме давление жидкости должно распределиться по длине трубопровода по некоторому закону $P^*(x)$, в соответствии с которым скорость потока в трубопроводе должна принять некоторое постоянное значение $\omega^* = const$, т. е. должны выполняться следующие условия:

$$P(x,t_1) = P^*(x), \quad \omega(x,t_1) = \omega^*, \quad x \in (0, L). \quad (5)$$

Будем считать, что отсутствует изменение во времени скорости потока подкачки или отбора нефти в любой точке $x_{\omega n} \in [0, L]$, а следовательно, $f_{\omega n}(t) = 0$, $n = \overline{1, N}$, и тогда стационарный режим работы МТП однозначно определяется комбинациями включенных насосных агрегатов на перекачивающих станциях по всей длине МТП.

Программа отключения насосного агрегата на k -ой промежуточной НПС, которая позволяет предотвратить недопустимые волновые колебания давления, зависит либо от включения или выключения насосного оборудования либо от положения регулирующей заслонки и описывается функцией снижения давления $f_{pk}(t)$, представляющей в рассматриваемом случае единственное внутреннее сосредоточенное управляющее воздействие, стесненное ограничением:

$$0 \leq f_{pk}(t) \leq f_{pk}^0, \quad (6)$$

где $f_{pk}^0 = \rho \cdot g \cdot H_{0k}$; H_{0k} – напор, развиваемый насосной станцией до начала торможения насосного агрегата.

Согласно типовым технологическим требованиям, за время t_1 переходного процесса необходимо обеспечить перевод ОРП (1) из начального состояния (2) в требуемое конечное состояние (5) с допустимыми заданными погрешностями ε_p и ε_ω согласно соотношениям

$$\max_{x \in [0, L]} |P(x, t_1) - P^*(x)| \leq \varepsilon_p, \quad \max_{x \in [0, L]} |\omega(x, t_1) - \omega^*| \leq \varepsilon_\omega, \quad (7)$$

определяющим целевое множество допустимых конечных состояний ОРП с оценкой отклонений от заданных состояний в равномерной метрике [2].

Рассматриваемый ОРП описывается системой *взаимосвязанных* уравнений, поэтому для однозначного описания требуемого конечного состояния достаточно использовать только одно из двух соотношений (7). Далее в качестве основного требования к конечному состоянию ОРП будем рассматривать условие приближения в момент времени t_1 с некоторой заданной погрешностью ε_p распределения давления по длине трубопровода $P(x, t_1)$ к заданному распределению $P^*(x)$.

Технологические требования, предъявляемые к процессу торможения насосного агрегата, заключаются в необходимости ограничения скорости роста давления в трубопроводе некоторой максимальной предельно допустимой величиной $\sigma_{\max}^0$.

Поскольку наибольший рост давления наблюдается на входе останавливаемой НПС, т. е. в точке, обозначаемой в дальнейшем $x = x_k^-$, технологическое ограничение на скорость изменения этого давления $\sigma(x_k^-, t) = \frac{\partial P(x_k^-, t)}{\partial t}$ может быть записано в виде следующего условия:

$$\max_t [\sigma(x_k^-, t)] \leq \sigma_{\max}^0, \quad t \in [0, t_1]. \quad (8)$$

Поскольку переходный процесс, позволяющий устранить недопустимые колебания давления в трубопроводе, необходимо реализовать за минимально возможное время, задача поиска программы $f_{pk}(t)$ отключения k -ой промежуточной НПС может быть сформулирована как задача оптимального по быстродействию управления, т. е. задача минимизации следующего критерия оптимальности:

$$J = \int_0^{t_1} dt \rightarrow \min_{f_p(x_k, t) \in \Omega}, \quad (9)$$

где Ω – область допустимых управляющих воздействий, определяемая условием (6).

Таким образом, для ОРП (1)-(3) требуется определить такой закон изменения во времени давления на выходе k -ой промежуточной НПС $f_{pk}^*(t)$, подчиняющийся ограничению (6), который переводит данный ОРП из начального состояния (2) в конечное состояние (7) за минимально возможное согласно критерию (9) время t_1 при выполнении ограничения (8) на максимально допустимую величину $\sigma_{\max}^0$ скорости роста давления $\sigma(x_k^-, t)$ на входе останавливаемой НПС.

В данной задаче для определения оптимального управления может быть использована специальная модификация принципа максимума Понтрягина, разработанная для систем с распределенными параметрами, в частности, в форме интегрального принципа максимума Бутковского [2]. Однако на первом этапе рассмотрим гораздо более простую задачу, когда исходя из типовых технических требований управляющее воздействие изначально задается в параметрической форме, что непосредственно позволяет редуцировать исходную задачу оптимального управления к задаче математического программирования.

Редукция задачи оптимального по быстродействию управления к задаче математического программирования

В качестве наиболее простой типовой программы торможения насосного агрегата k -ой НПС $f_{pk}(t)$, позволяющей погасить недопустимые волновые колебания давления за минимально возможное время, рассмотрим программу с постоянной скоростью снижения давления на выходе НПС, представленную на рис. 1, которую можно описать в форме функции, зависящей от вектора параметров $\Delta^{(2)} = (\Delta_1, \Delta_2)$, т. е. в следующем виде:

$$f_p(t, \Delta^{(2)}) = \begin{cases} f_{pk}^0 \cdot \left(1 - \frac{t}{\Delta_1}\right), & 0 \leq t \leq \Delta_1, \\ 0, & \Delta_1 < t \leq \Delta_1 + \Delta_2. \end{cases} \quad (10)$$

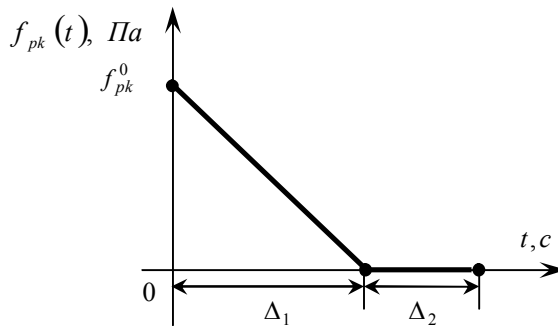


Рис. 1. Программа торможения насосного агрегата k -ой НПС

Таким образом, управляющее воздействие $f_{pk}(t, \Delta^{(2)})$ является функцией параметров $\Delta_i, i = \overline{1, 2}$, в роли которых фигурируют длительности интервалов изменения

во времени искомого управляющего воздействия по заранее фиксируемой зависимости (10).

Подстановка функции $f_{pk}(t, \Delta^{(2)})$ в систему уравнений объекта (1) позволяет получить конечное состояние объекта $Q(x, t_1) = (P(x, t_1), \omega(x, t_1))$ в виде явной $\Delta^{(2)}$ -параметризованной векторной функции $Q(x, \Delta^{(2)}) = (P(x, \Delta^{(2)}), \omega(x, \Delta^{(2)}))$, а следовательно, требования к распределению давления по длине трубопровода по окончании переходного процесса могут быть записаны в виде

$$\max_{x \in [0, L]} |P(x, \Delta^{(2)}) - P^*(x)| \leq \varepsilon_p \geq \varepsilon_{p \min}^{(2)}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{p \min}^{(2)} \geq 0$ – максимально достижимая точность приближения распределения по длине трубопровода давления $P(x, \Delta^{(2)})$ в конце оптимального процесса торможения насосного агрегата НПС к заданному закону распределения $P^*(x)$ в рассматриваемом классе $\Delta^{(2)}$ -параметризованных функций управления $f_{pk}(t, \Delta^{(2)})$.

При этом критерий оптимальности (9) запишется также в $\Delta^{(2)}$ -параметризованной форме в виде функции $I(\Delta^{(2)})$ вектора $\Delta^{(2)}$:

$$I(\Delta^{(2)}) = \Delta_1 + \Delta_2 \rightarrow \min_{\Delta^{(2)}}, \Delta^{(2)} \in G_2 \subset E^2. \quad (12)$$

Таким образом, задача поиска оптимального по быстродействию закона изменения во времени давления на выходе k -ой промежуточной НПС $f_{pk}(t, \Delta^{(2)})$ является в рассматриваемом случае задачей параметрической оптимизации, т. е. задачей выбора такого вектора параметров $\Delta_{opt}^{(2)}$, который обеспечивает минимум заданного критерия оптимальности $I(\Delta^{(2)})$.

В результате без каких-либо погрешностей в рамках используемых моделей осуществляется точная редукция исходной ЗОУ ОРП к специальной задаче (13)-(15) минимизации функции $I(\Delta^{(2)})$ двух переменных $\Delta_2, i = \overline{1, 2}$ с бесконечным числом ограничений, порождаемых требованием (11) достижения допустимой погрешности ε_p равномерного приближения функции $P(x, \Delta^{(2)})$, описывающей распределение давления по длине трубопровода в конце оптимального процесса, к установившемуся в стационарном режиме распределению давления $P^*(x)$ в пределах всей области изменения пространственного аргумента, и записываемых в форме (14), при выполнении условия (15) на всем протяжении оптимального процесса управления (задача полубесконечной оптимизации (ЗПО)) [3,4]:

$$I(\Delta^{(2)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(2)}}, \Delta^{(2)} \in G_n \subset E^n, \quad (13)$$

$$\varphi_1(x, \Delta^{(2)}) = \max_{x \in [0, L]} |P(x, \Delta^{(2)}) - P^*(x)| - \varepsilon_p \leq 0, \quad (14)$$

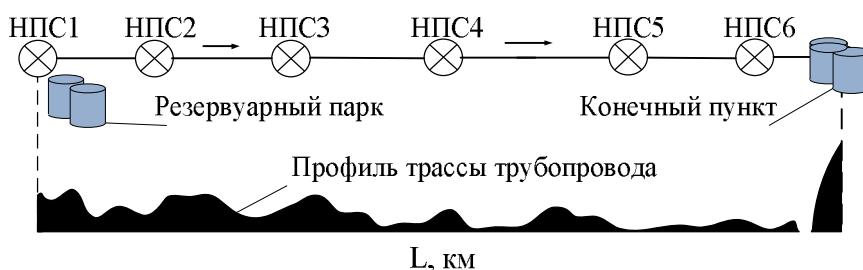
$$\max_t [\sigma(x_k^-, t)] - \sigma_{max}^0 \leq 0, t \in [0, \Delta_1 + \Delta_2]. \quad (15)$$

Сформулированная ЗПО существенно проще исходной ЗОУ и может быть решена известными методами математического программирования [4].

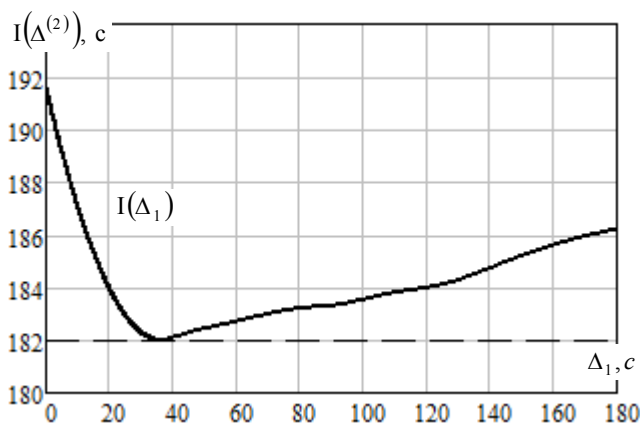
В качестве примера рассматривается задача параметрической оптимизации программы отключения насосного агрегата НПС3 магистрального нефтепровода, схема которого представлена на рис. 2, при исходных данных, приведенных в [1].

Решение задачи получено в условиях заведомо недостижимого ограничения $\sigma_{\max}^0$, накладываемого на скорость роста давления в трубопроводе $\sigma(x_k^-, t)$, для фиксированной точности $\varepsilon_p = 50 \text{ кПа}$ приближения конечного состояния ОРП заданному стационарному состоянию в (14).

Зависимость минимизируемого критерия $I(\Delta^{(2)})$ от параметра Δ_1 представляет собой экстремальную функцию, изображенную на рис. 3, которая достигает минимума при значениях $\Delta_1^{opt} = 37 \text{ с}$ и $\Delta_2^{opt} = 145 \text{ с}$ оптимальных параметров искомой программы торможения насосного агрегата $f_{p3}^*(t, \Delta^{(2)})$ на НПС3.



Р и с . 2 . Технологическая схема и профиль трассы магистрального нефтепровода:
НПС1 – головная перекачивающая станция,
НПС2-НПС6 – промежуточные перекачивающие станции



Р и с . 3 . Зависимость минимизируемого критерия $I(\Delta^{(2)})$ от параметра Δ_1

Заключение

В работе сформулирована задача оптимального по критерию быстродействия управления нестационарным режимом работы магистрального нефтепровода с учетом фазового ограничения на скорость роста давления. Задача формулируется в терминах теории управления системами с распределенными параметрами (СРП), при этом требования к конечному состоянию ОРП задаются в виде целевого множества, попадание в которое оценивается в равномерной метрике. В качестве управляющего

воздействия в ЗОУ рассматривается изменение во времени по специальной программе давления на промежуточной НПС, описание которой с помощью набора параметров позволяет осуществить редукцию указанной задачи к задаче математического программирования и решить ее численно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афиногентов А.А., Пleshivtseva Ю.Э., Снопков А.С. Математическое моделирование управляемых гидродинамических процессов трубопроводного транспорта жидких углеводородов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 137-144.
2. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
3. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000 – 336 с.
4. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы: пер. с фр. и предисловие А.И. Штерпа. – М.: Наука, 1990. – 488 с.

Статья поступила в редакцию 13 мая 2011 г.

TIME-OPTIMAL CONTROL BY TRANSIENT MODES OF OPERATION OF PETROLEUM TRUNK PIPELINES¹

A.A. Afinogentov, Yu.E. Pleshivtseva, A.P. Efimov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of time-optimal control with consideration of technological constraints is formulated for the transient modes of operation of trunk pipelines for petroleum and petrochemical products transportation. The problem is reduced to the problem of mathematical programming. Some computational results show the time-optimal control by pressure in the transient process of transfer pumps braking.

Keywords: optimal control, problem of mathematical programming, object with distributed parameters, transient mode, pipeline transport, petroleum, pressure.

*Alexander A. Afinogentov – Candidate of Technical Sciences, assistant.
Yulia E. Pleshivtseva – Doctor of Technical Sciences, Professor.
Alexander P. Efimov – Candidate of Technical Sciences, Ass. Professor.*