

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

Н. А. Автушенко, Г. С. Леневский, канд. техн. наук, доц.

### ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрена методика расчета регулятора давления в системах горячего водоснабжения, разработана математическая модель в среде MATLAB. Расчет основан на преобразовании гиперболических передаточных функций трубопровода в инерционное звено второго порядка. Полученное решение позволяет контролировать выходной параметр в любой точке магистрального трубопровода горячего водоснабжения. Такое решение направлено на исключение гидравлических ударов, повышение надежности систем и, как следствие, продление эксплуатационного срока.

Теоретические исследования в области систем автоматического управления регулируемых электроприводов турбомеханизмов, работающих на длинные трубопроводы, вызваны ростом числа энергосберегающих технологий, а также необходимостью автоматизации работы насосных станций и распределительных систем трубопроводов. Между тем, применение частотных приводов насосов на ряде объектов требует специального подхода по причине возникновения гидравлических ударов и колебаний давления в трубопроводе при регулировании частоты вращения турбомеханизма.

Возникновение колебаний обусловлено тем, что длинные трубопроводы являются объектами с распределенными параметрами. Изменение давления в любой точке вызывает волну давления, распространяющуюся по трубопроводу со скоростью, определяемой скоростью звука в среде трубопровода. Колебания давления возникают также при наличии в системе трубопроводов замкнутых контуров или объектов, отражающих волну давления.

Принимается, что давление в обратном сетевом трубопроводе постоянно и равно 0,2 МПа, давление на входе сетевых насосов второго подъема формируется насосами первого подъема, изменение

давления в обратном сетевом трубопроводе близко к нулю и, как следствие, не учитывается в дальнейшем расчете. Таким образом, контроль перепада давления вырождается в контроль давления в конкретной точке прямого магистрального трубопровода. Напряжение задания всех частотных приводов насосов остается одинаковым.

В качестве исследуемого объекта используется участок магистральной тепловой сети Могилевских тепловых сетей от ТЭЦ-2 до павильона П2 общей протяженностью 4173,6 м. Система имеет следующие параметры: количество работающих насосов второго подъема – 4, тип насоса СЭ-2500-140 ( $Q_H = 2500 \text{ м}^3$ ,  $p_H = 1,37 \text{ МПа}$ ), суммарный расход в прямом коллекторе ТЭЦ-2 –  $9087 \text{ м}^3$ , расход исследуемой магистрали –  $4479 \text{ м}^3$ , номинальное давление в прямом коллекторе – 1,2 МПа, условный диаметр трубопровода – 1 м, температура наружного воздуха –  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура теплоносителя –  $98 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для расчета регулятора в конце трубопровода необходимо рассчитать передаточные функции насосного агрегата и магистрального трубопровода.

Расчет передаточной функции насосного агрегата имеет ряд трудностей, т. к. содержит квадрат входного воздей-

ствия – расхода воды (скорости вращения крыльчатки):  $H = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c$ ; ( $H = 0,0000037 \cdot Q^2 - 0,0023330 \cdot Q + 169,1289177$ ). Для получения искомой передаточной функции частично используется расчет А. К. Аракеяна и А. В. Шепелина [1].

$$W_{HA}(p) = \frac{p(p)}{\omega(p)} = k_n \frac{1 + k_0 \cdot e^{-2\tau p}}{1 + \lambda k_0 \cdot e^{-2\tau p}};$$

$$e^{-2\tau p} = 1 - 2\tau p + 2\tau^2 p^2 - \frac{4\tau^3 p^3}{3}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время распространения волны в один конец трубопровода:

$$\tau = \frac{l}{c}, \quad (2)$$

$k_n$  – коэффициент линеаризации кривой напора насоса от скорости:

$$k_n = -\frac{P_{н.а.ном} - P_{н.а.нач}}{\omega_{н.а.ном} - \omega_{н.а.нач}}. \quad (3)$$

Далее в расчетах используется модуль значения (3).

Коэффициент степени колебательности системы  $\lambda$  для инженерных расчетов принимается равным 0,6 и определяется по формуле

$$\lambda = 1 - \frac{2k_{нх} \cdot S}{\rho c}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь сечения трубопровода,  $S = \pi d^2/4$ ;  $k_{нх}$  – коэффициент жесткости характеристики в области рабочей точки.

Учитывая вышестоящую формулу, может быть найден коэффициент жесткости характеристики в области рабочей точки

$$k_{нх} = \frac{(1 - \lambda) \rho c}{2 \cdot S}. \quad (5)$$

Коэффициент отражения волны от конца трубопровода

$$k = \frac{k \frac{S}{\rho c} - 1}{k \frac{S}{\rho c} + 1}. \quad (6)$$

Коэффициент, учитывающий степень закрытия задвижки в конце трубопровода:

$$k = \frac{P_{x=l}}{Q_{x=l}}. \quad (7)$$

Передаточная функция насосного агрегата примет вид:

$$W_H = \frac{7750,16}{0,13p + 1}. \quad (8)$$

Передаточная функция магистрального трубопровода, полученная из уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности среды  $W(s, l)$ , и преобразованная передаточная функция в виде, удобном для моделирования в среде MATLAB,  $W_1(s, l)$  определяются как

$$W(s, l) = \frac{1}{\frac{Z_{БЛ}(s)}{Z_2(s)} \cdot sh[\theta(s), l] + ch[\theta(s), l]};$$

$$W_1(s, l) = \frac{K}{ch[\theta(s)l] + \frac{Z_{БЛ}(s)}{Z_1(s)} sh[\theta(s)l]},$$

где  $Z_1(s)$ ,  $Z_2(s)$ ,  $Z_{БЛ}(s)$  – концевые операторные сопротивления;  $K$  – поправочный коэффициент,  $K = f(l)$ .

При оценке поведения динамической составляющей давления теплоносителя трубопровода было замечено сходство в получении передаточных функций [2] с квадратичными полиномами  $n$ -го порядка. Наряду с использованием регулятора давления с помощью гиперболических функций [3] искомую передаточную функцию можно представить в полиномиальном виде. Передаточная функция магистрального трубопровода имеет вид:

$$W_{p2p1}(s) = \frac{T_1^2 \cdot T_2^2 \cdot T_3^2 \cdot \dots \cdot T_n^2}{(s^2 + T_1^2)(s^2 + T_2^2)(s^2 + T_3^2) \cdot \dots \cdot (s^2 + T_n^2)} \quad (9)$$

Для исследуемого участка протяженностью 4173,6 м передаточная функция примет вид:

$$W_{p2p1}(s) = \frac{1}{(4,54s^2 + 1)(1,85s^2 + 1)(1,11s^2 + 1)}$$

Анализ распределения резонансных частот выполняется с помощью логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ). При  $s = j\omega$  ЛАЧХ пе-

редаточных функций  $W(s,l)$ ,  $W_I(s,l)$  и  $W_{p2p1}(s)$ ,  $W_I(s)$  имеют вид:

$$L(\omega) = 20 \lg [W(j\omega, l)] ;$$

$$L_1(\omega) = 20 \lg [W_I(j\omega, l)] ;$$

$$L_2(\omega) = 20 \lg [W_{p2p1}(j\omega)] .$$

Анализ распределения резонансных частот с помощью ЛАЧХ представлен на рис. 1.

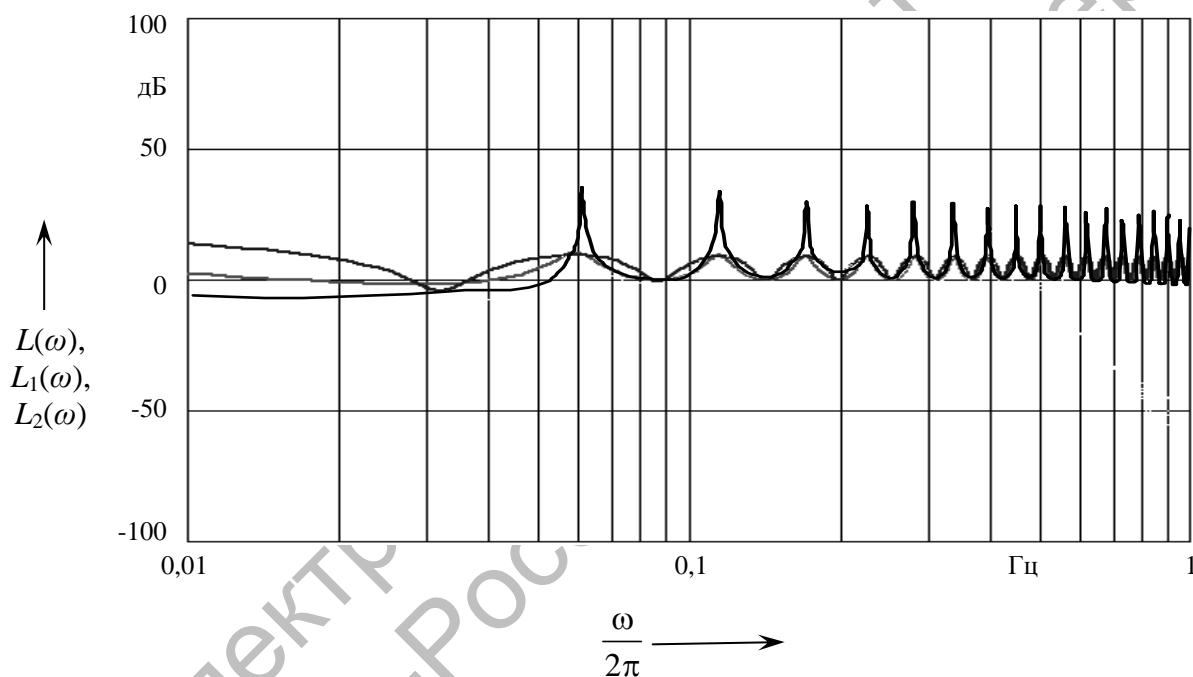


Рис. 1. ЛАЧХ магистрального трубопровода по давлению

Учитывая рекомендации по выбору постоянных времени [2], используем только вторую резонансную частоту как базовую. Реально в регуляторе оператор Лапласа со степенью выше второй влияния на систему не оказывает – оставляем множитель знаменателя от базовой резонансной частоты  $\omega_{PE3} = 1/\sqrt{1,85}$ . Кроме того, если систему оставить в виде  $W_{p2p14173,6}(s) = [1,85s^2 + 1]^{-1}$ , то очевидно, что это передаточная функция для незату-

хающих колебаний, хотя в реальности колебания имеют затухающий характер. Для этого по аналогии с [2] вводится демпфирующая составляющая.

В общем виде передаточная функция (9) примет вид:

$$W_{p2p1}(s) = \frac{1}{(T_{TP}^2 s^2 + 2 \cdot \gamma \cdot T_{TP} + 1)}, \quad (10)$$

где  $T_{TP}$  – постоянная времени трубопровода  $T_{2PE3} = 1/\omega_{2PE3}$ .

Для исследуемого участка функция примет вид:

$$W_{p2pl}(s) = \frac{1}{(1,85s^2 + 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{1,85} + 1)}, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – параметр аппроксимирующей модели объекта с распределенными параметрами (РП – объекта) [2].

Обратная связь по давлению может быть рассчитана следующим образом:

$$K_{др}(p) = \frac{U_3}{P_{П2}}. \quad (12)$$

Расчет параметров выполняется исходя из рекомендаций [2] по принципу подчиненного регулирования. Малая некомпенсируемая постоянная времени разрабатываемой системы автоматического управления (САУ) давлением в трубопроводе выбирается исходя из поиска наименьшей постоянной времени элементов системы. Таковой является постоянная времени преобразователя частоты  $T_{ПЧ}$ . Малая некомпенсируемая постоянная САУ примет вид:

$$T_{\mu} = 2 \cdot T_{ПЧ}. \quad (13)$$

Передаточная функция регулятора, настроенного на модульный оптимум (МО):

$$W_{рег}(s) = \frac{(T_{TP}^2 s^2 + 2 \cdot \gamma \cdot T_{TP} + 1) K_{ДС} (T_{H/A} s + 1)}{2 \cdot T_{\mu} K_{др} K_{ТЭС} K_{Г2} K_{H/A} s}. \quad (14)$$

Для получения оптимального переходного процесса устанавливается входной фильтр, а САУ настраивается на симметричный оптимум. Тогда передаточная функция регулятора и фильтра определится как

$$W_{\phi}(s) = \frac{1}{T_{\phi} s + 1}. \quad (15)$$

Передаточная функция регулятора давления, настроенного на симметричный оптимум (СО), примет вид:

$$W_{рег}(s) = \frac{abT_{\mu} s + 1}{abT_{\mu} s} \times \frac{(T_{TP}^2 s^2 + 2 \cdot \gamma \cdot T_{TP} + 1) K_{ДС} (T_{H/A} s + 1)}{2 \cdot T_{\mu} K_{др} K_{ТЭС} K_{Г2} K_{H/A} s}. \quad (16)$$

Для моделирования в среде MATLAB регулятор преобразовывается таким образом, чтобы показатель степени оператора Лапласа знаменателя был не менее показателя степени оператора Лапласа числителя (реально каждое из слагаемых третьего множителя знаменателя с учетом его порядка малости, за исключением 1, вырождается в 0 и не оказывает влияния на переходной процесс).

$$W_{рег}(s) = \frac{abT_{\mu} s + 1}{abT_{\mu} s} \times \frac{K_{ДС} (T_{H/A} s + 1)}{2 \cdot T_{\mu} K_{др} K_{ТЭС} K_{Г2} K_{H/A} s} \times \frac{T_{TP}^2 s^2 + 2 \cdot \gamma \cdot T_{TP} + 1}{0,00001s^2 + 0,0001s + 1}. \quad (17)$$

Передаточная функция фильтра для симметричного оптимума

$$W_{\phi CO}(s) = \frac{1}{abT_{\mu} s + 1}. \quad (18)$$

Регулятор давления, настроенный на СО (блок REG), представлен на рис. 2, математическая модель САУ давлением теплоносителя в трубопроводе тепловых сетей в среде MATLAB представлена на рис. 3.

#### Анализ параметров регулятора.

Рассматривается параметр  $a$  в диапазоне от 1,2 до 8. Графики переходных процессов давления в павильоне П2 исследуемого трубопровода для различных  $a$  представлены на рис. 4 и 5.

Из полученных графиков следует, что изменение параметра  $a$  даже в большом диапазоне, когда система обладает довольно значительной инерционностью, на переходной процесс влияния практически не оказывает.

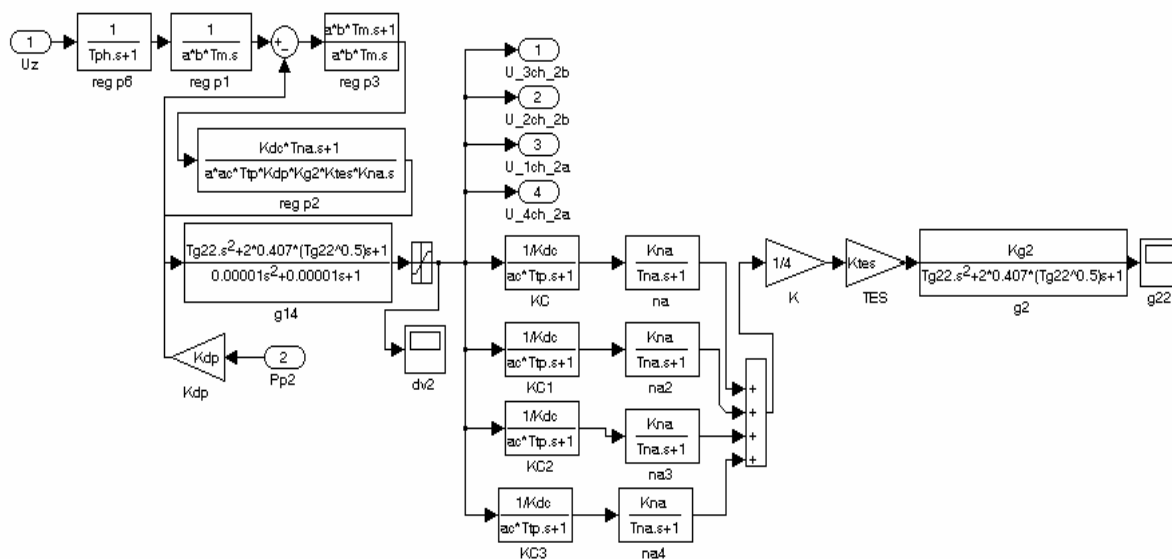


Рис. 2. Математическая модель блока REG (регулятора давления) электропривода и системы управления поведением теплоносителя в магистральных трубопроводах тепловых сетей в среде MATLAB

Так как время моделирования ( $t_{\text{мод}} = 0,95t_{\text{уст}}$ ) принимается по аналогии с переходным процессом, описанным с использованием гиперболических функций, – 30 с, то предварительно  $T_{\phi} = t_{\text{мод}}/3,4$ .

Выполняется моделирование для оценки влияния фильтра на входе в САУ. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

График переходного процесса (рис. 6) используется для сравнения с переходным процессом, полученным для гиперболических функций, откуда видно, что оптимальным является переходной процесс с параметром фильтра  $T_{\phi} = 4xT_{TR}$ .

Оценка качества переходного процесса выполняется исходя из условия попадания в 95 % от установившегося значения давления в исследуемой точке при времени переходного процесса 30 с.

По результатам моделирования видно, что более предпочтительным является постоянная времени фильтра  $T_{\phi} = 4xT_{TR} = 7,4$  с.

Моделирование выполняется по схеме, представленной на рис. 3, система регулирования выполнена по схеме, представленной на рис. 2 с настройкой регу-

лятора давления на МО (отсутствуют блоки regp1, regp3).

Моделирование с настройкой регулятора давления на СО выполняется по схеме, представленной на рис. 3. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

При использовании регулятора по давлению, рассчитанного по формулам (15), (17), (18), колебательность заметно снижается в сравнении с нерегулируемой схемой.

Далее выполняется проверка полученной системы регулирования для различных сигналов задания. Данные соответствия сигналов заданий и требуемых давлений для исследуемой системы представлены в табл. 1. Пересчет выполняется по (12).

Результаты моделирования переходных процессов для СУЭП в магистральных трубопроводах с внешней обратной связью и регулятором, настроенным на СО для заданий из табл. 1, представлены на рис. 7.

Результаты моделирования совпадают с заданием с требуемой точностью в 1 %.

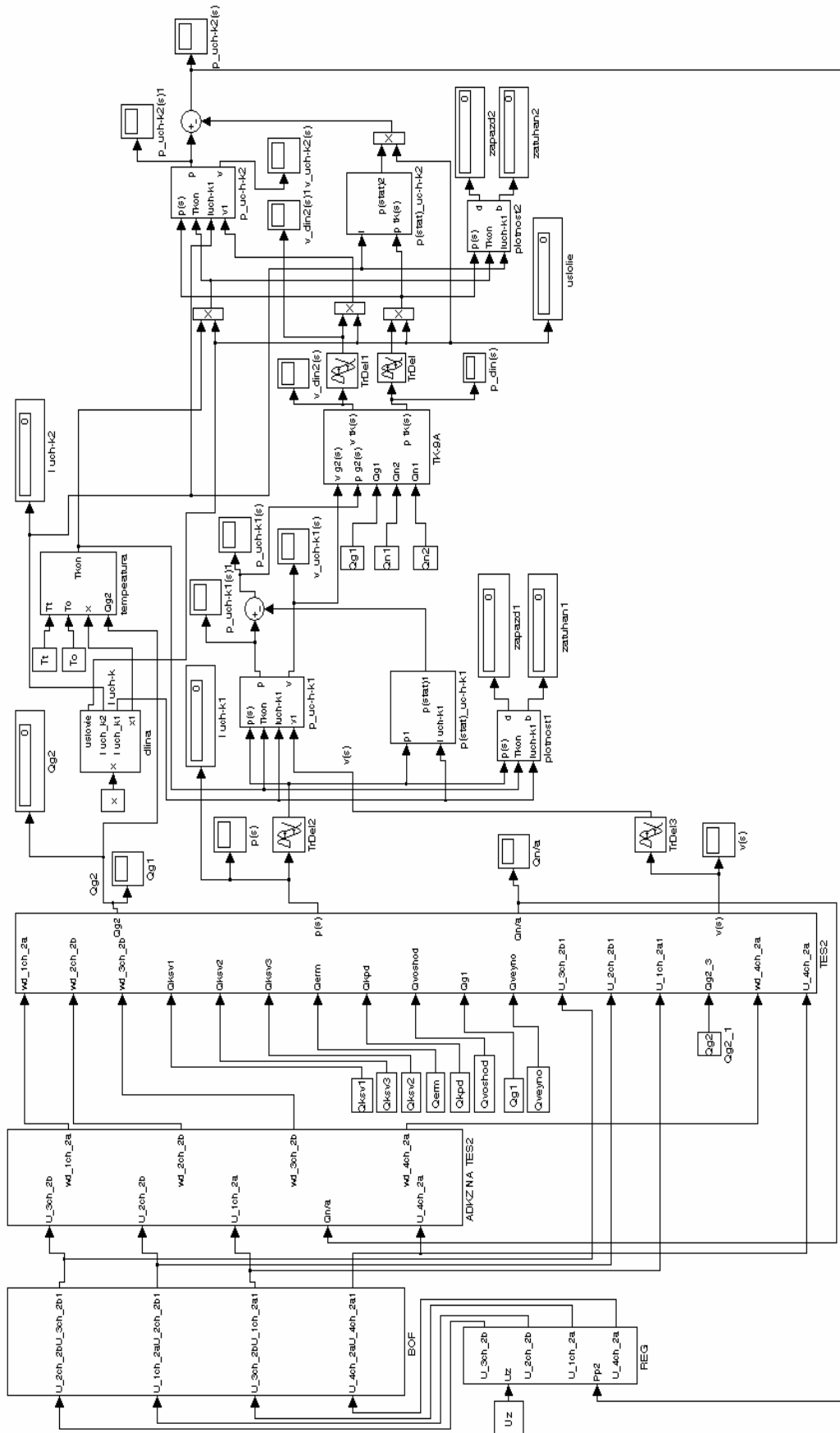


Рис. 3. Математическая модель САУ давлением теплоносителя в трубопроводе тепловых сетей в среде MATLAB

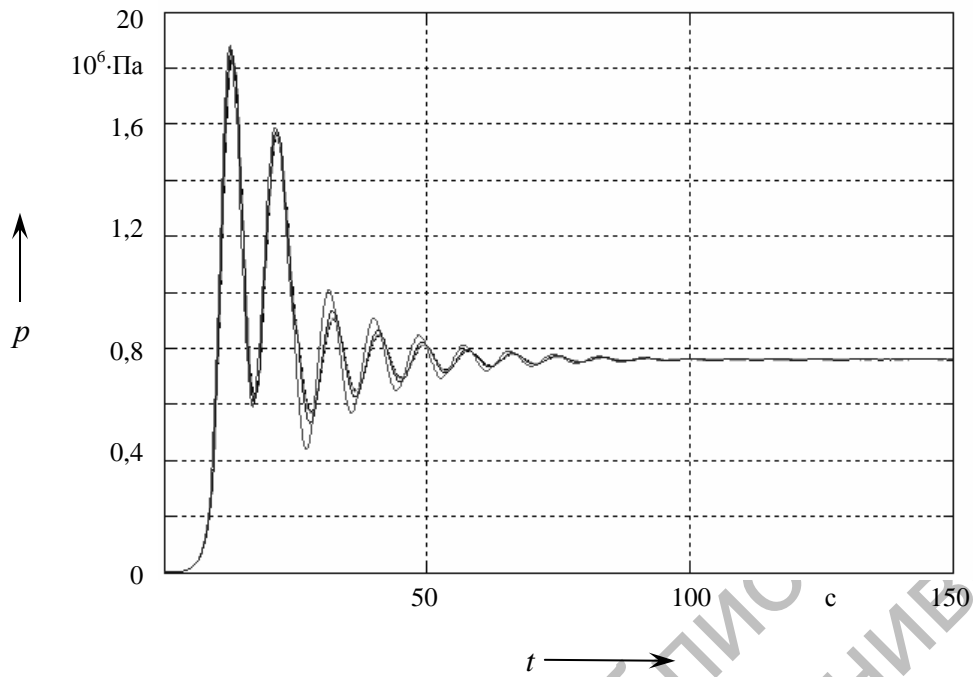


Рис. 4. Графики переходных процессов давления в трубопроводе в павильоне П2 при изменении параметра  $a$  в диапазоне от 1,2 до 8

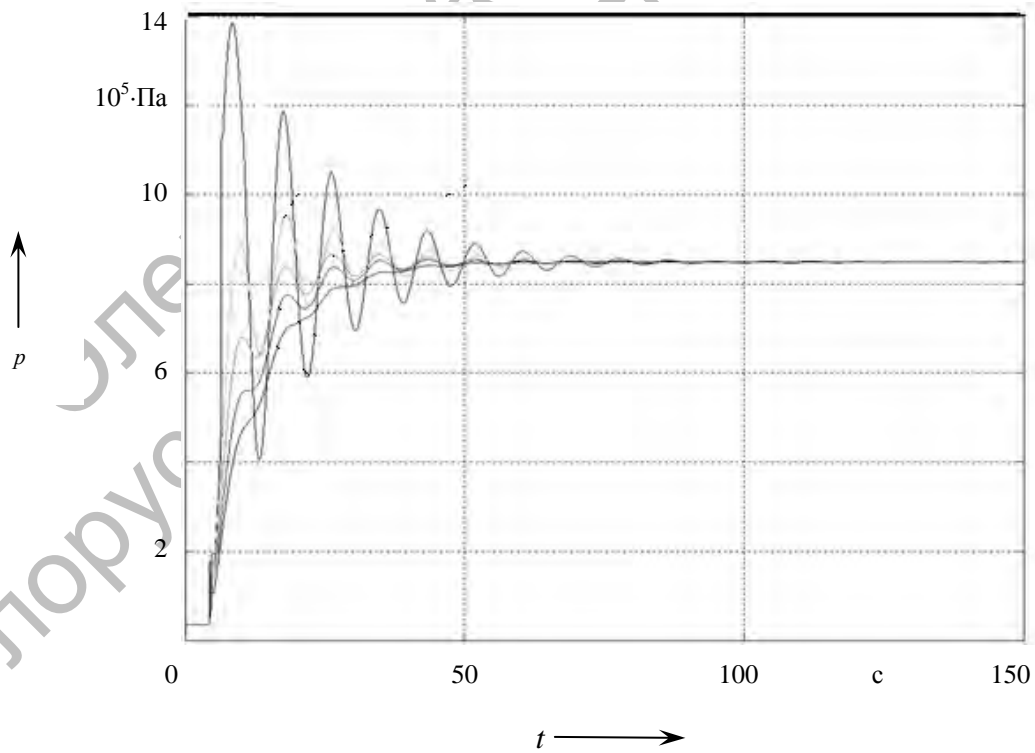


Рис. 5. Графики переходных процессов давления в трубопроводе в павильоне П2 при пуске четырех насосов при изменении постоянной времени фильтра ( $T_{\phi} = 1xT_{TP} \dots 5xT_{TP}$ )

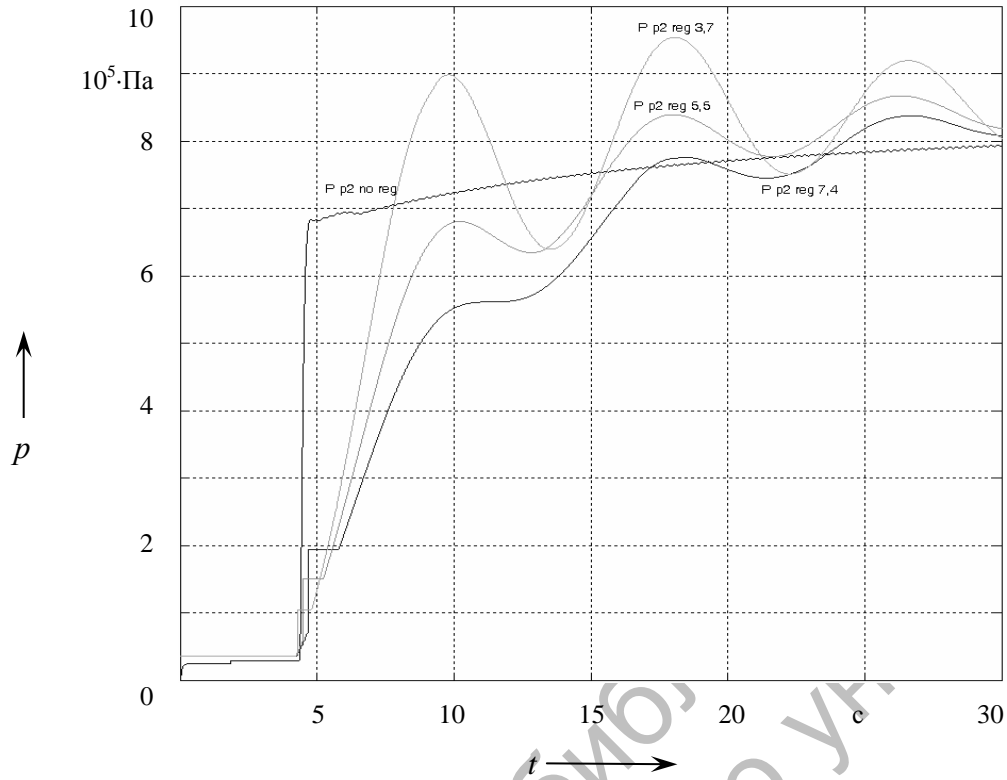


Рис. 6. График переходного процесса давления в П2 для нерегулируемой и регулируемой схем с  $T_{\Phi} = 2xT_{TP} = 3,7$  с,  $T_{\Phi} = 3xT_{TP} = 5,5$  с,  $T_{\Phi} = 4xT_{TP} = 7,4$  с

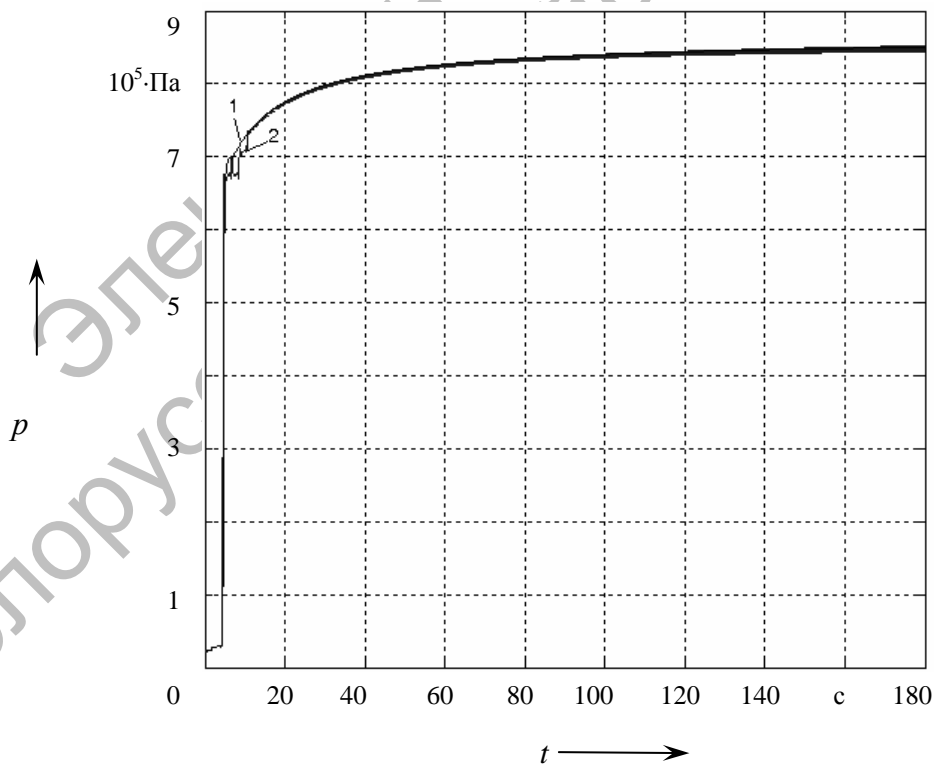


Рис. 7. Графики переходных процессов давления в павильоне П2: 1 – одновременное включение четырех насосов по регулируемой схеме в внешней ОС по давлению с настройкой на CO; 2 – веерное включение четырех насосов по нерегулируемой схеме



Табл. 1. Соответствие сигналов заданий и давлений в П2

Сигнал задания напряжения САУ, В	Давление в П2, Па
10	845590
9	762712
8	677966
7	593220

Для исследуемой схемы оценивается адекватность системы регулирования при моделировании штатной ситуации – изменение сигнала задания с 9 по 9,37 В при увеличении давление с 0,76 до 0,8 МПа. Моделирование выполняется при мгновенном изменении задания (нерекомен-

дуемый режим задания) (рис. 8) и плавном задании за 10 с (рис. 9). Отклик системы запаздывает на 4,2 с ввиду значительной протяженности трубопровода. На основании полученных результатов можно судить об адекватности полученного регулятора.

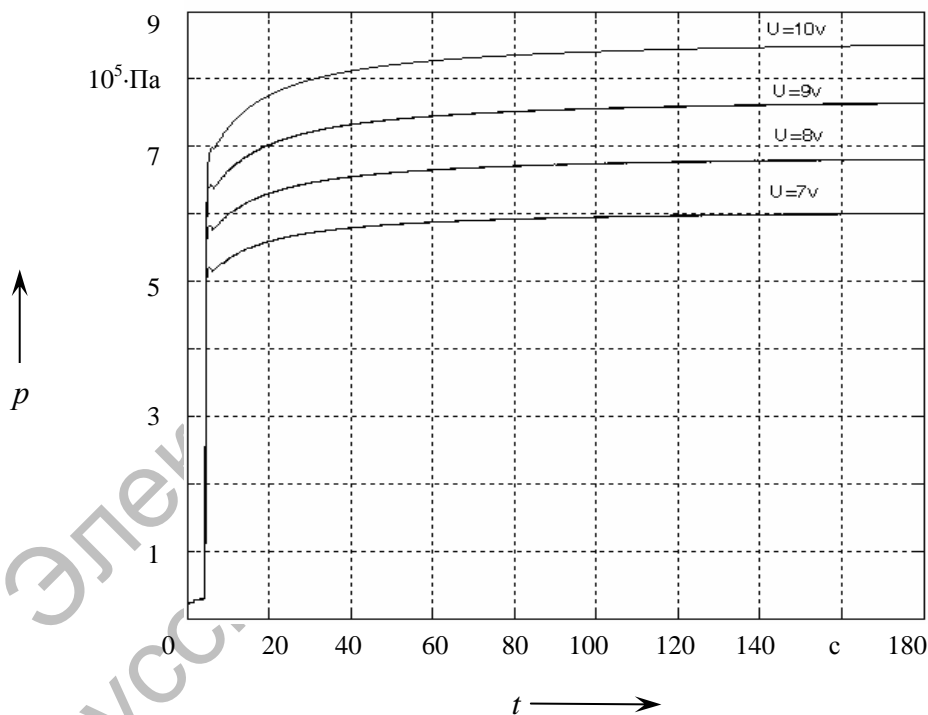


Рис. 8. Семейство кривых давления в павильоне П2 при использовании системы регулирования с настройкой на СО

### Выводы

Полученная система позволяет контролировать QH-параметры в любой точке трубопровода, исключая нестационарные процессы в системе.

Система может быть использована для прогнозирования результатов конкретного режима, а также для исключения гидравлических ударов и колебания напора в коммуникационной сети путем формирования переходных процес-

сов пуска и останова системы электропривода группы насосных агрегатов. Представление длинного трубопровода

как динамического объекта позволит находить оптимальные законы управления системой.

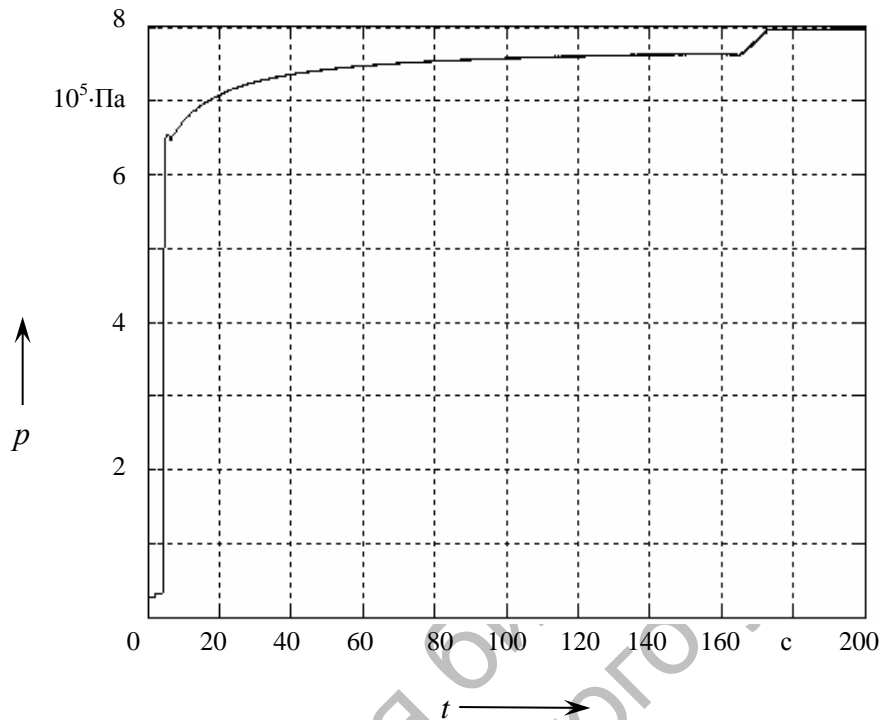


Рис. 9. График переходного процесса давления в павильоне П2 при одновременном пуске насосных агрегатов при плавном увеличении сигнала задания с 9 до 9,37 В за 10 с

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аракелян, А. К.** Способы построения систем автоматического управления электроприводами насосов, работающих на длинные трубопроводы / А. К. Аракелян, А. В. Шепелин // *Электричество*. – 2001. – № 2. – 212 с. : ил.
2. **Киселев, Н. В.** Электроприводы с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н.

Мядзель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с. : ил.

3. **Автушенко, Н. А.** Построение математической модели системы горячего водоснабжения магистральных трубопроводов в среде MATLAB / Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvский // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2007. – № 3. – 212 с : ил.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 27.09.2008

**N. A. Avtushenko, G. S. Lenevsky**  
**Construction of control systems by**  
**transients in the main hot waterway**  
**pipelines**

The design procedure of a regulator of pressure in the main hot waterway pipelines is shown in the scientific paper. A mathematical model in MATLAB has been developed. Account is based on transformation of hyperbolic transfer functions of the pipeline to a second order relaxation circuit. The received decision allows supervising output parameter in any point of the main hot waterway pipelines. It is directed on exception of hydraulic impacts, reliability of systems and operational term improvement.