

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

**Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvский, канд. техн. наук, доц.**

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрены варианты управления магистральными системами горячего водоснабжения, дана оценка целесообразности регулирования параметров технологического процесса с помощью различных систем управления. Отражена эффективность существующих систем автоматического управления магистральной трубопроводной системой горячего водоснабжения. Изложенный материал может быть использован для оценки необходимости внедрения систем управления в магистральных трубопроводных системах.

#### *Введение*

Математическое описание источника горячего водоснабжения (ГВС) с двухуровневым повышением давления насосными агрегатами сетевого контура и магистрального трубопровода (МТП) как объекта с распределенными параметрами представлено в [1].

Регулирование параметров в МТП можно получить, используя запорную арматуру (задвижку) или устройства регулирования скорости асинхронного двигателя насосного агрегата (АД НА). Регулирование параметров с помощью запорной арматуры может быть ручным (без применения средств автоматизации) и автоматизированным (с помощью регулятора), но в любом случае является неэкономичным. В данном случае можно говорить о потерях энергии и, как следствие, уменьшении КПД магистральной трубопроводной системы ГВС. Регулирование с помощью задвижки приводит более чем к двукратному увеличению потерь мощности в сравнении с регулированием скорости АД НА [1].

Условие качественного ГВС – соблюдение в заданных пределах расхода, давления, температуры теплоносителя.

Для построения системы автоматического управления (САУ) выполняется сравнительный анализ следующих систем управления:

- САУ электроприводами насосных агрегатов с обратной связью по давлению в конце МТП для гиперболического регулятора давления;
- нерегулируемая схема САУ давлением МТС ГВС с одновременным и всерным пуском НА;
- преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ–АД) с заданием скорости АД как функции давления;
- САУ на базе автоматизированного электропривода с ПЧ–АД с контролем давления за сетевым контуром перед МТП;
- электропривод клапана с регулированием давления в МТП как функции технологического параметра в заданной точке МТП.

С целью оценки эффективности работы предложенных систем моделируется пуск четырех сетевых НА второй ступени повышения давления с выходом на значение давления 845590 Па к конечной точке трубопровода.

**САУ электроприводами насосных агрегатов с обратной связью по давлению в конце МТП для гиперболического регулятора давления**

Основой синтеза САУ является расчет параметров регулятора, обеспечивающий снижение колебаний давления в МТП на заданном уровне. При этом главной задачей является компенсация резонансных явлений с помощью регулируемого электропривода.

Особенностью предлагаемой мето-

дики является расчет регуляторов как синтеза систем подчиненного регулирования координат. При этом синтез регулятора скорости выполняется без учета распределенных свойств объекта управления, а синтез регулятора давления выполняется на основании критерия выбора регулятора с учетом анализа объекта управления на уровне ЛАЧХ участков МТП различной протяженности.

Структурная схема САУ представлена на рис. 1.

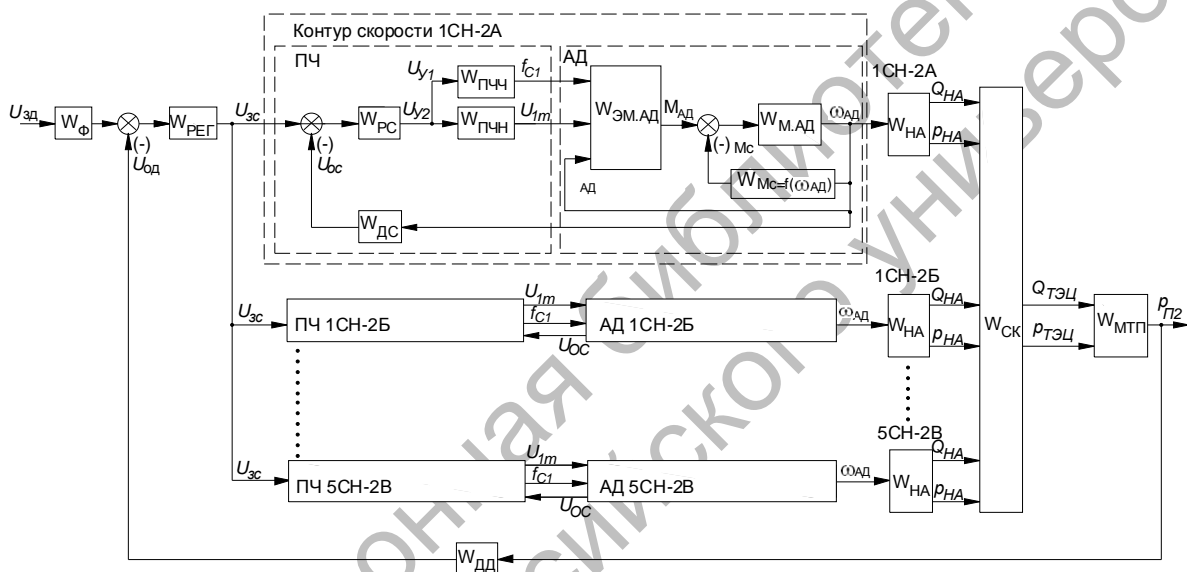


Рис. 1. Структурная схема САУ электроприводами НА МТП ГВС

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $U_{зд}$  – напряжение задания давления;  $U_{зс}$  – напряжение задания скорости;  $U_{од}$  – напряжение сигнала обратной связи датчика давления;  $U_{ос}$  – напряжение сигнала обратной связи датчика скорости;  $U_{y1}$  – напряжение канала управления напряжением;  $U_{y2}$  – напряжение канала управления частотой;  $U_{1m}$  – амплитудное значение напряжения статора;  $f_{c1}$  – частота напряжения статора;  $M_{АД}$  – электромагнитный момент АД;  $Q_{НА}$  ( $p_{НА}$ ) – расход (давление) НА;  $Q_{ТЭЦ}$  ( $p_{ТЭЦ}$ ) – расход (давление) на выходе источника ГВС;  $Q_{П2}$  ( $p_{П2}$ ) – расход (давление) в заданной точке конечной точки МТП;  $W_{ЭМ.АД}$  – передаточная функция электромехани-

ческой части АД;  $W_{М.АД}$  – передаточная функция механической части АД;  $W_{Мс}$  – передаточная функция возмущающего воздействия на валу АД;  $W_{РС}$  – передаточная функция регулятора скорости;  $W_{РЕГ}$  – передаточная функция датчика давления;  $W_{Ф}$  – передаточная функция фильтра контура давления;  $W_{ДС}$  – передаточная функция датчика скорости;  $W_{ДД}$  – передаточная функция датчика давления;  $W_{СК}$  – передаточная функция сетевого контура;  $W_{МТП}$  – передаточная функция МТП.

Предполагается, что компенсация колебаний технологических параметров в МТП будет выполняться за счет рассчитываемого контура давления. Расчет па-

раметров регулятора осуществляется по принципу подчиненного регулирования.

Расчет регулятора давления выполняется для передаточной функции МТП как объекта с распределенными параметрами [1], при этом рассчитывается коэффициент обратной связи по давлению  $K_{ДР}$  и выбирается малая некомпенсируемая постоянная  $T_{\mu}$ . Внешний контур настраивается на симметричный оптимум, рассчитывается фильтр. Передаточная функция регулятора давления внешнего контура примет вид:

$$W_{РЕГ}(s) = W_{\Phi}(s) \times \frac{K_{ДС}(T_{НА}s + 1)}{2 \cdot T_{\mu} K_{ДР} K_{ТЭЦ} K_{Г2} K_{НА} s} \times \frac{W_{МТП}(s)}{0,00001s^2 + 0,0001s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_{ДС}$  – коэффициент обратной связи контура скорости;  $K_{ТЭЦ}$  – передаточная функция сетевого контура ТЭЦ;  $K_{НА}$ ,  $T_{НА}$  – параметры передаточной функции насосного агрегата;  $K_{Г2}$  – передаточная функция коллекторного узла сетевого контура ТЭЦ (рассчитаны в [1]).

Анализ синтезированного регулятора выполняется с помощью ЛАЧХ передаточной функции замкнутого контура давления с учетом передаточной функции МТП и регулятора давления МТП.

$$W_{ЗКР}(s) = [W_{РЕГ}(s) \cdot K_{ТЭЦ} \cdot W_{КС}(s) \times W_{НА}(s) \cdot W_{МТП}(s)] / [1 + K_{ДР} K_{ТЭЦ} \times W_{РЕГ}(s) \cdot W_{КС}(s) \cdot W_{НА}(s) \cdot W_{МТП}(s)]. \quad (2)$$

Графики моделирования переходных процессов САУ с обратной связью по давлению представлены на рис. 2.

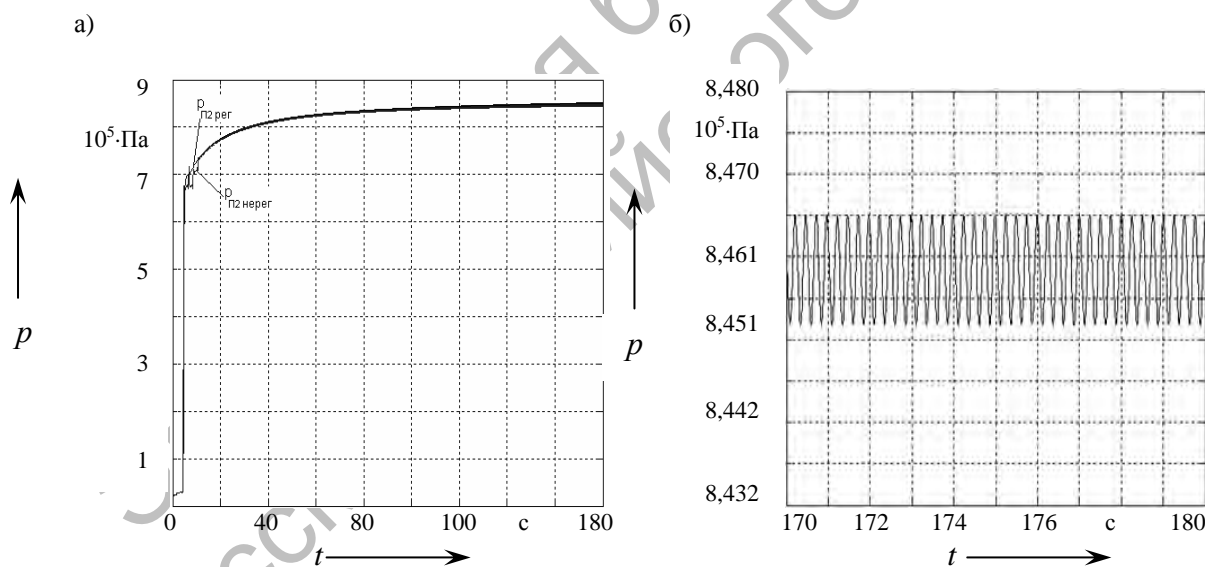


Рис. 2. Графики переходных процессов САУ с обратной связью по давлению в конце МТП:  $P_{Т2.НЕРЕГ}$  – веерное включение четырех НА по нерегулируемой схеме;  $P_{Т2.РЕГ}$  – регулирование давления в МТП с помощью САУ

### Нерегулируемая САУ давлением МТС ГВС с одновременным и веерным пуском НА

Для воспроизведения существующих режимов работы МТС ГВС (см. рис. 1) преобразуется в структурную схему, представленную на рис. 3.

Структурная схема содержит только неизменяемую часть САУ, что позволяет выполнить моделирование нерегулируемой САУ давлением МТС ГВС с одновременным и веерным пуском НА. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

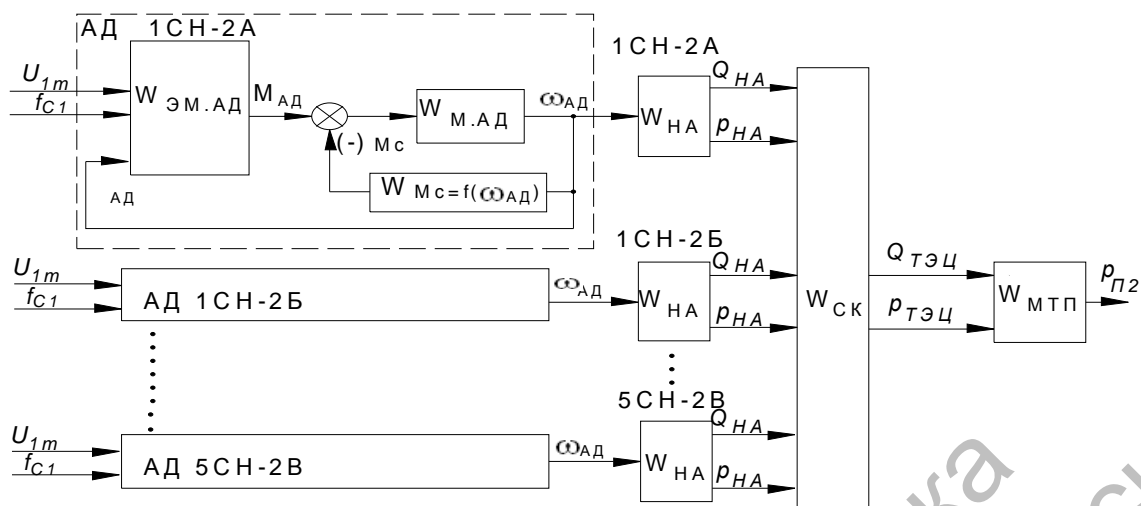


Рис. 3. Структурная схема нерегулируемой САУ давлением МТП ГВС

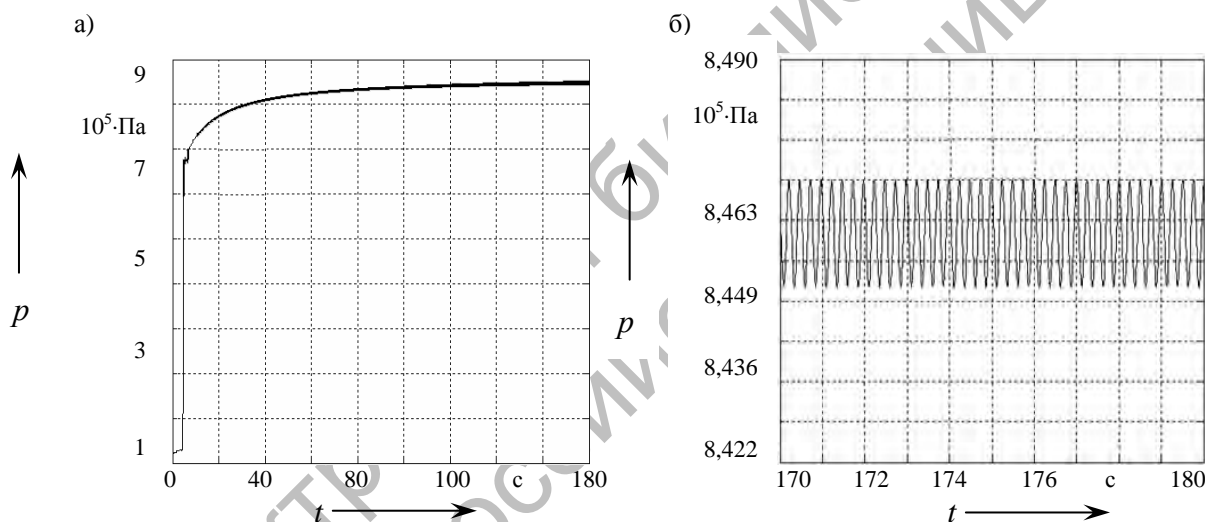


Рис. 4. Графики переходных процессов давления нерегулируемой САУ

### САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления

С помощью разработанной математической модели в MATLAB выполняется моделирование САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления. Рис. 1 преобразуется в структурную схему, представленную на рис. 5.

Параметры и структура регулятора скорости и датчика скорости аналогичны структурной схеме на рис. 1. Расчет требуемого давления выполняется при формировании сигнала задания 10 В, что соответствует давлению в конечной точке

МТП 845590 Па. Результаты САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления представлены на рис. 6.

### ПЧ-АД с контролем давления за сетевым контуром перед МТП

Так как источник ГВС имеет сложную структуру, то на практике местом снятия показаний давления является вход МТП.

Структурная схема САУ (см. рис. 1) преобразуется в структурную схему, представленную на рис. 7.

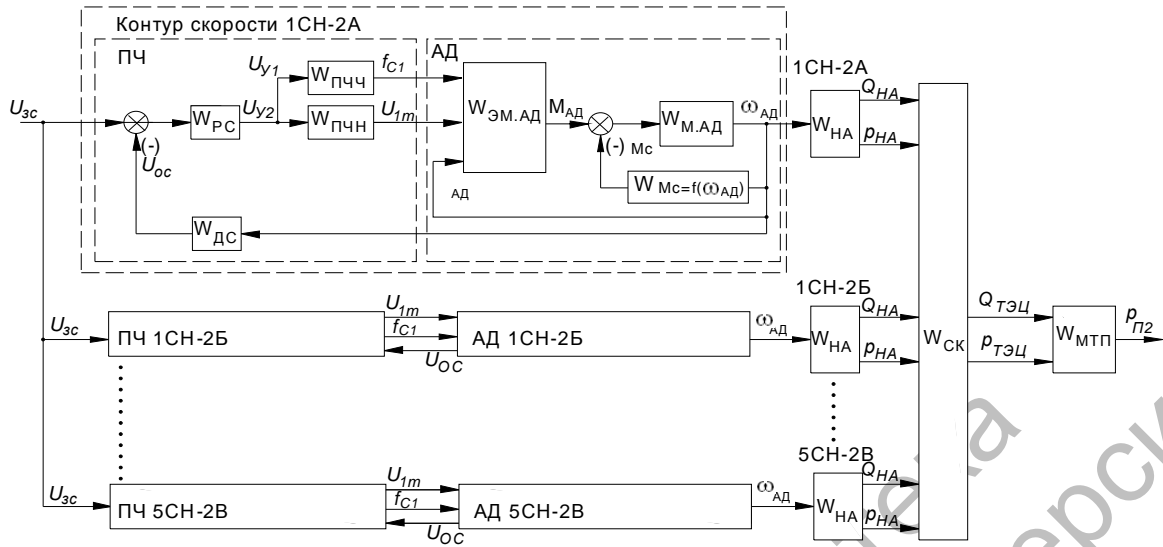


Рис. 5. Структурная схема САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления МТС ГВС

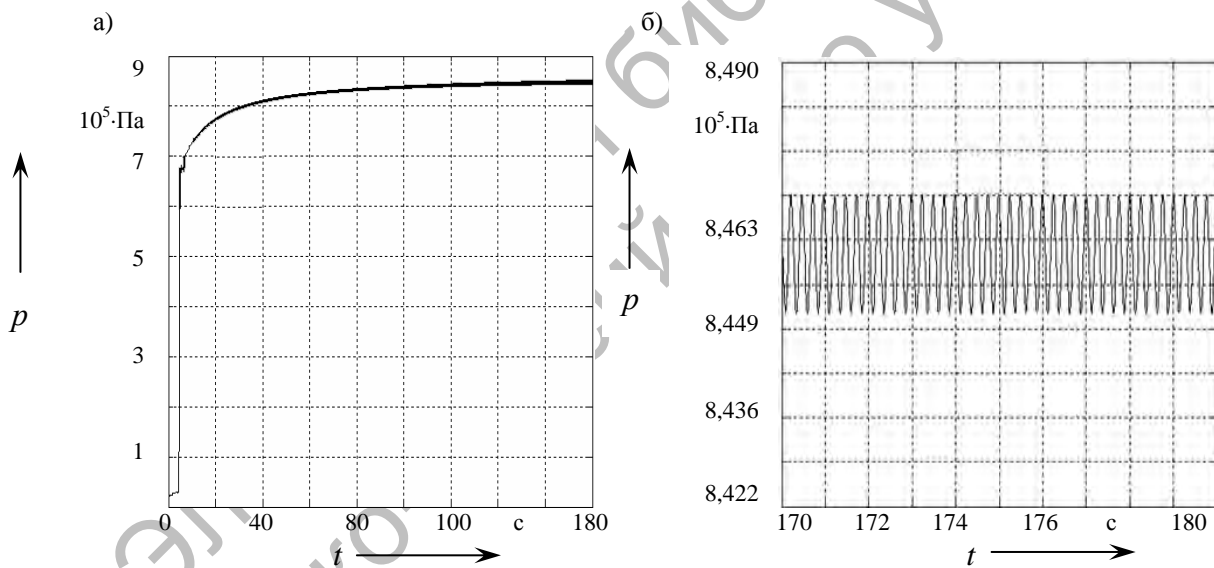


Рис. 6. Графики переходных процессов давления САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления МТП

Выполнен расчет параметров контура по принципу подчиненного регулирования с настройкой регулятора давления на симметричный оптимум. Расчет датчика давления и малой некомпенсируемой постоянной времени выполнен аналогично структурной схеме (см. рис. 1).

Результаты моделирования схемы

(см. рис. 7) на базе САУ на базе автоматизированного электропривода с ПЧ-АД с контролем давления за сетевым контуром перед МТП представлены на рис. 8. Анализ амплитуды колебаний давления и ЛАЧХ показал наличие колебаний с той же частотой во всем рабочем диапазоне частот, однако, с меньшей амплитудой.

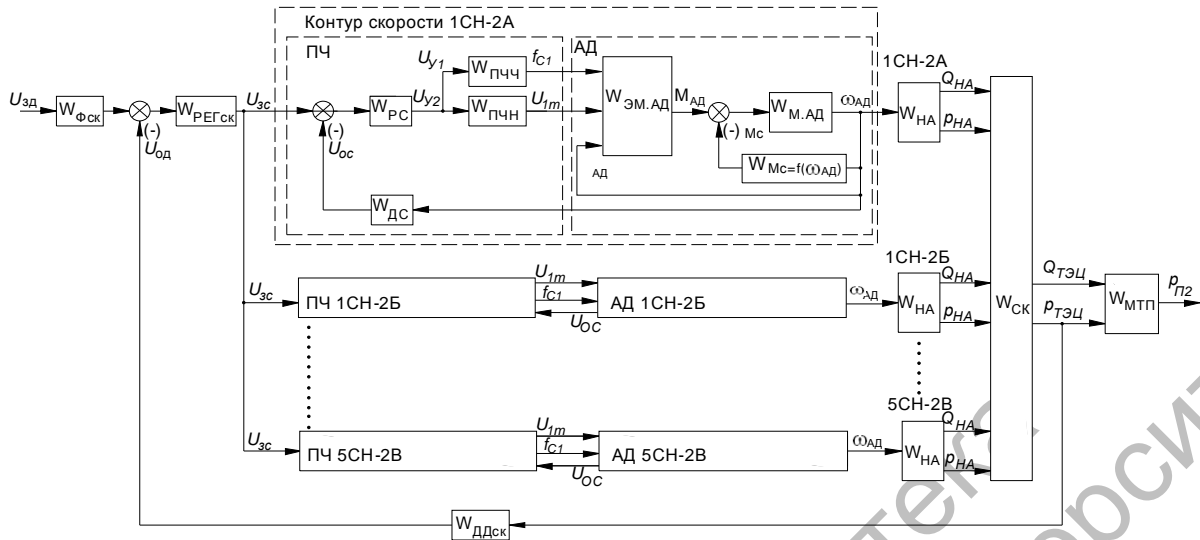


Рис. 7. Структурная схема САУ на базе автоматизированного электропривода с ПЧ–АД с контролем давления за сетевым контуром (СК) перед МТП

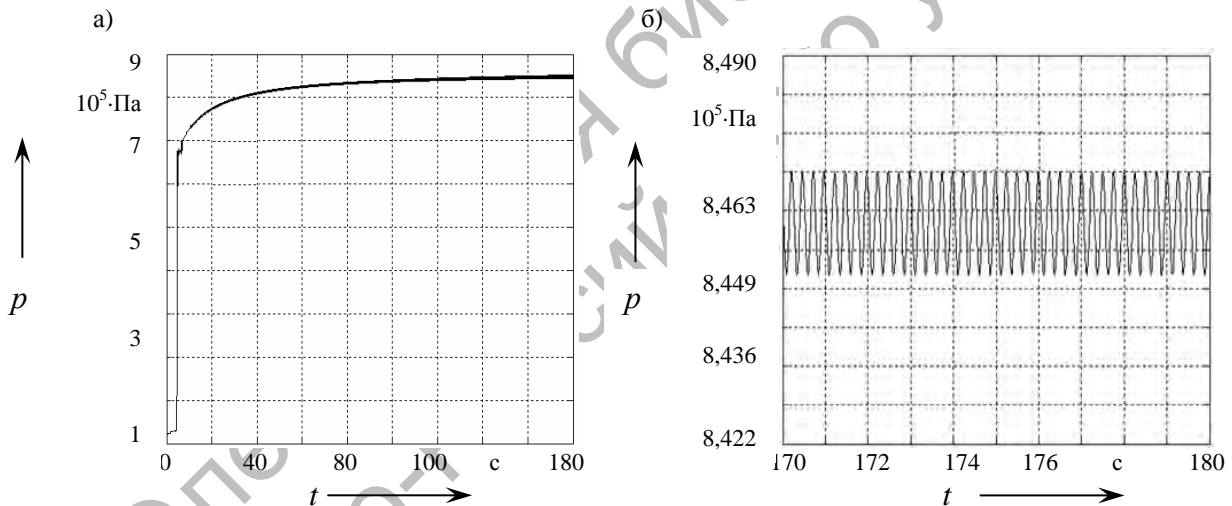


Рис. 8. Графики переходных процессов САУ на базе автоматизированного электропривода с ПЧ–АД с контролем давления за СК перед МТП

**Электропривод клапана с регулированием давления в МТП как функции технологического параметра в заданной точке МТП**

В качестве измеряемых параметров могут выступать давление, расход и температура теплоносителя МТП. Расход и температура для таких систем контролируются для неперевышения установленного порога давления с целью

исключения паровой фазы. Регулирование давления на прямом участке трубопровода с помощью регулирующего клапана осуществляется в прямом трубопроводе только посредством обратной связи по давлению. Таким образом, рассматривается САУ давлением МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулирующим клапаном. Перекрытие сечения трубопровода яв-

ляется возмущающим воздействием в работе МТП. Резкое закрытие клапана вызывает рост обратной волны давления и, как следствие, гидроудар. В силу данной особенности время полного закрытия МТП в таких системах для диаметра МТП 1000 мм составляет от 30 с до 2 мин. Реализация длительного закрытия клапана осуществляется с помощью редуктора с большим передаточным числом.

Структурная схема САУ (см. рис. 1) преобразуется в структурную схему,

представленную на рис. 9, в которой:  $W_{\text{Фкл}}$  – передаточная функция фильтра регулятора давления регулирующего клапана;  $W_{\text{РЕГкл}}$  – передаточная функция регулятора давления регулирующего клапана;  $W_{\text{ПРкл}}$  – передаточная функция преобразователя напряжения регулирующего клапана;  $W_{\text{АДкл}}$  – передаточная функция АД регулирующего клапана;  $W_{\text{РЕДкл}}$  – передаточная функция редуктора регулирующего клапана;  $W_{\text{КЛ}}$  – передаточная функция регулирующего клапана.

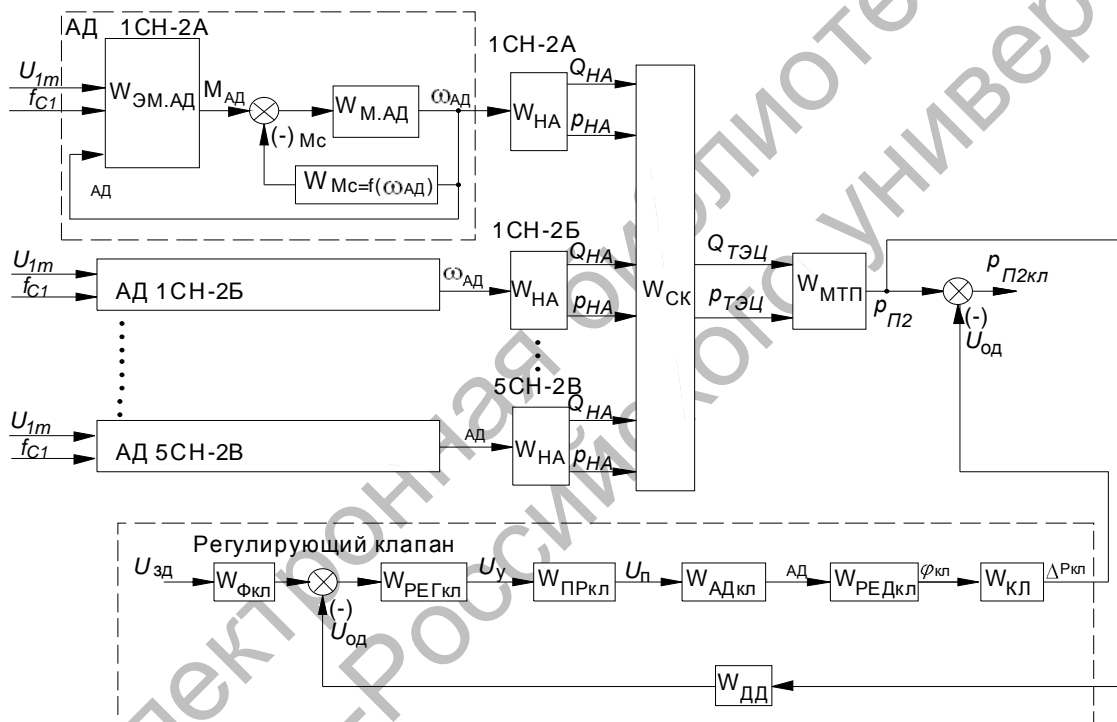


Рис. 9. Структурная схема САУ давления МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулируемым клапаном

В состав обратной связи входит фильтр, благодаря которому с датчика давления на вход регулятора поступает действующее, а не мгновенное значение давления, что исключает раскачивание системы. Процесс регулирования в таких системах является инерционным.

Расчет параметров контура давления выполнен по принципу подчиненного регулирования с настройкой регулятора давления на симметричный оп-

тимум.

Анализ рассматриваемой САУ выполняется с помощью ЛАЧХ передаточной функции рассматриваемой системы, которая аналогична передаточной функции нерегулируемой САУ. Контур регулирующего клапана является здесь возмущающим воздействием.

Результаты моделирования САУ давлением МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулиру-

щим клапаном представлены на рис. 10. Анализ амплитуды колебаний и ЛАЧХ показал рост амплитуды колебаний дав-

ления с той же частотой во всем рабочем диапазоне частот по причине внесения в систему возмущающего воздействия.

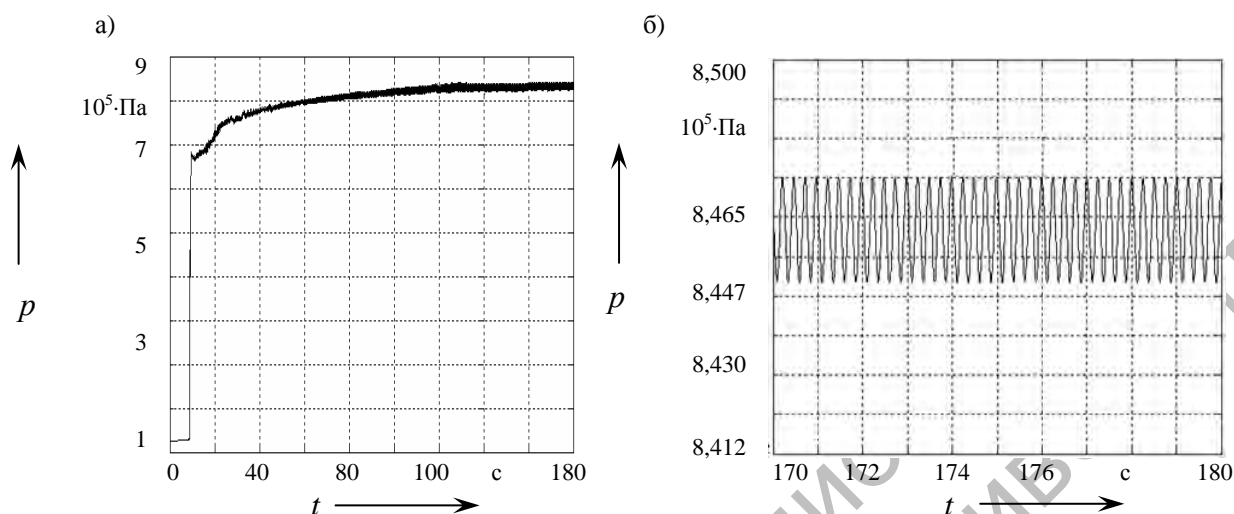


Рис. 10. Графики переходных процессов давления в САУ давления МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулирующим клапаном

Передаточное число и передаточная функция редуктора регулирующего клапана:

$$K_{\text{РЕДкл}} = \frac{\omega_{\text{ДВкл}}}{\omega_{\text{КЛ}}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30 \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 2}{30 \cdot 2}$$

$$W_{\text{РЕДкл}}(s) = \frac{1}{K_{\text{РЕДкл}} s}$$

В качестве АД используется АИР 80В4У3 ( $P_{\text{НОМ}} = 1500$  Вт;  $n_{\text{НОМ}} = 1410$  об/мин; КПД = 78,5 %;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}} = 5,3$ ;  $I_{\text{max}}/I_{\text{НОМ}} = 2,4$ ;  $J_{\text{ДВ}} = 0,0034$  кг·м<sup>2</sup>). Данный АД имеет следующие параметры:  $s_{\text{НОМ}} = 0,05$ ;  $M_{\text{К}} = 24,21$  Н·м;  $M_{\text{НОМ}} = 10,09$  Н·м;  $s_{\text{К}} = 0,27$ ;  $T_{\text{Э}} = 0,012$  с;  $\beta = 1,2$  Н·м/с/рад.

Приведенный момент инерции АД рассчитывается исходя из условия  $J_{\text{РЕДкл}} + J_{\text{КЛ}} = 4 \cdot J_{\text{ДВ.кл}}$ . Приведенный момент инерции и механическая постоянная времени АД примет вид:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{ДВкл}} + \frac{J_{\text{РЕДкл}} + J_{\text{КЛ}}}{K_{\text{РЕДкл}}^2}$$

$$T_{\text{М}} = J_{\Sigma} / \beta$$

Представив регулирующий клапан в виде одномассовой расчетной схемы, передаточная функция примет вид:

$$W_{\text{АДск}} = (T_{\text{Э}} T_{\text{М}} s^2 + T_{\text{М}} s + 1)^{-1}$$

С учетом высокого порядка малости произведения  $T_{\text{Э}} T_{\text{М}}$  передаточная функция АД примет вид:

$$W_{\text{АДск}} = (T_{\text{М}} s + 1)^{-1}$$

Передаточная функция преобразователя напряжения представлена коэффициентом усиления для линеаризованной модели  $W_{\text{Пкл}}(s) = K_{\text{Пкл}}$ .

Клапан может быть описан с помощью двух зависимостей: зависимость коэффициента местного сопротивления клапана как функции угла поворота клапана  $\xi_{\text{КЛ}} = f(\varphi_{\text{КЛ}})$  и изменения дав-



ления на выходе клапана как функции коэффициента местного сопротивления клапана  $\Delta p_{кл} = f(\xi_{кл})$ . Обе зависимости являются нелинейными, но, в данном случае, когда рабочий участок составляет от  $0,5r_{НОМ.КЛ}$  до  $r_{НОМ.КЛ}$ , с погрешностью менее 1 % функции можно заменить уравнениями прямой [2], откуда передаточная функция имеет вид  $W_{кл}(s) = K_{кл}$ .

В качестве малой некомпенсируемой постоянной принимается постоянная времени двигателя. В соответствии с полученными параметрами контура регулирования передаточная функция регулятора, фильтра и замкнутого контура клапана примут вид:

$$W_{РЕГск}(s) = \frac{4T_M s + 1}{4T_M s} \cdot \frac{K_{РЕДкл}}{2T_M K_{ДР} K_{Пкл} K_{кл}};$$

$$W_{Фск}(s) = \frac{1}{4T_M s + 1};$$

$$W_{Зск}(s) = \frac{W_{РЕГкл} W_{ПРкл} W_{АДкл} W_{РЕДкл} W_{КЛ}}{1 + W_{ДД} W_{РЕГкл} W_{ПРкл} W_{АДкл} W_{РЕДкл} W_{КЛ}}.$$

Передаточная функция САУ давления МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулирующим клапаном и ЛАЧХ (при  $s = j\omega$ ):

$$W_{САУкл}(s) = W_{АД}(s) \cdot W_{НА}(s) \times K_{ТЭЦ} \cdot W_{МТП}(s) \cdot (1 - W_{Зск}(s));$$

$$L_1(\omega) = 20lg [W_{САУск}(j\omega, l)].$$

Математическая модель в среде MATLAB регулирующего клапана давления представлена на рис. 11.

Все рассмотренные САУ выходят на установившееся значение, при этом имеют различные амплитуды колебаний давления при выходе на установившийся режим. Максимальное значение отклонений от установившегося значения в момент времени 170...180 с отражено в табл. 1.

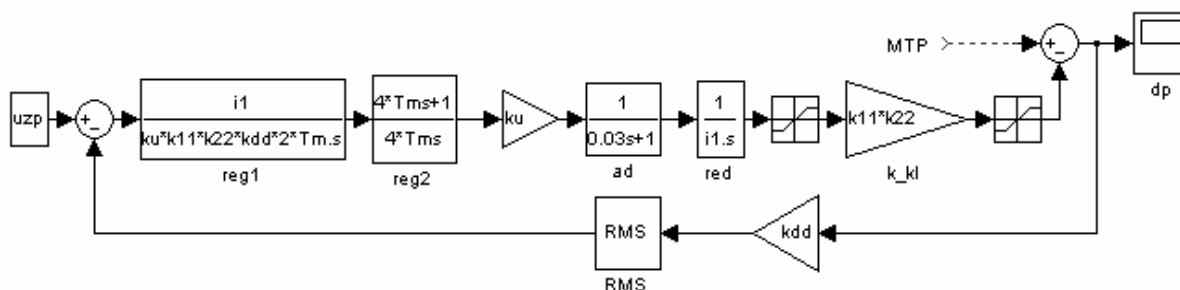


Рис. 11. Математическая модель регулирующего клапана давления в среде MATLAB

Табл. 1. Максимальное значение отклонений давления от установившегося значения в момент времени 170...180 с

Наименование САУ	Максимальное значение отклонений давления, Па
Нерегулируемая САУ давлением МТП ГВС	0,034
САУ давлением МТП на базе регулятора давления с электроприводным регулирующим клапаном	0,044
САУ с ПЧ-АД с заданием скорости АД как функции давления МТС ГВС	0,033
САУ на базе автоматизированного электропривода с ПЧ-АД с контролем давления за СК перед МТП	0,03
САУ с обратной связью по давлению в конце МТП	0,024

Далее проверяется возможность разработанной САУ обрабатывать различные сигналы задания. Результаты моделирования совпадают с заданием с требуемой погрешностью в 1 %.

### **Выводы**

В статье отражена эффективность существующих систем автоматического управления магистральной трубопроводной системой горячего водоснабжения. Изложенный материал может быть использован для оценки необходимости

внедрения систем управления в магистральных трубопроводных системах.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Автушенко, Н. А.** Эффективность управления переходными процессами в магистральных трубопроводах горячего водоснабжения / Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 105–113.
2. **Рабинович, Е. З.** Гидравлика / Е. З. Рабинович. – 4-е изд. – М. : Физ.-мат. лит-ра, 1963. – 408 с. : ил.

РУП «Могилевэнерго» ф-л Могилевские тепловые сети  
Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 23.03.2010

**N. A. Avtushenko, G. S. Lenevsky**  
**The regulation of technological parameters in hot water supply systems**

The scientific paper deals with the variants of controlling main systems of hot water supply and estimates the expediency of the technological process parameters regulation by means of various control systems. The efficiency of existing systems of automatic control of hot water supply mains is evaluated. The material presented can be used for the estimation of the necessity of the introduction of control systems in the main pipeline systems.