

УДК 628.440.22

Р.В. Федюн, В.А. Бунеев

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра автоматике и телекоммуникаций
E-mail: frv76@list.ru , foldor@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СТАНЦИИ ПОДКАЧКИ ВОДЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

Abstract

Fedyun R.V., Buneev V.A. Dynamical processes in automatic control system of water pump machine while working in conditions of water consumption. The problem of water pressure's varying while non-constant water consumption is analyzed. Typical emergency situations are described. Water's pressure maintaining on a required level is proposed as a function of the automatic control system. Dynamical processes in automatic control system of water pump are modeled and analyzed.

Keywords: pumping station, hydraulic parameters, mathematic model, pressure, PID-regulator, transmitting function.

Анотація

Федюн Р.В., Бунеев В.О. Управління гідравлічними параметрами станції підкачування води при зміні навантаження. Виконано аналіз впливу нерівномірного споживання води на тиск станції підкачування. Розглянуто типові ситуації. У функції запропонованої системи автоматичного управління входить підтримка тиску води на заданому рівні. Виконано моделювання й аналіз динамічних процесів у системі автоматичного управління станцією підкачування.

Ключові слова: станція підкачування, гідравлічні параметри, математична модель, тиск, ПІД-закон управління, передаточна функція.

Аннотация

Федюн Р.В., Бунеев В.А. Управление гидравлическими параметрами станции подкачки воды при изменении нагрузки. Выполнен анализ влияния неравномерного потребления воды на давление станции подкачки. Рассмотрены типовые ситуации. В функции предложенной системы автоматического управления входит поддержание давления воды на заданном уровне. Выполнено моделирование и анализ динамических процессов в системе автоматического управления станцией подкачки.

Ключевые слова: станция подкачки, гидравлические параметры, математическая модель, давление, ПИД-закон управления, передаточная функция.

Общая постановка проблемы.

Городская система водоснабжения характеризуется случайным изменением потребления воды в некоторых заранее известных пределах, зависящих от времени суток. Жесткая работа насоса по ступенчатому графику требуемой подачи позволяет добиться требуемого давления в магистрали и подачи лишь в идеальном случае — соответствии подачи насоса потреблению конечными потребителями. В иных случаях изменение потребления в одну сторону вызовет изменение давления в другую, что особенно заметно на

стыке двух ступеней графика подачи насоса. В таком случае давление в магистрали может превышать требуемое в несколько раз, что непременно приведет к разрыву магистральных и потребительских трубопроводов. Уменьшение давления приводит к невозможности подачи воды высотным потребителям и ухудшает подачу в целом.

Работа насоса по ступенчатому графику даже в автоматическом режиме не является подходящей, в связи с чем возможно использование непрерывного регулирования по величине давления в магистрали. Данное регулирование легко осуществляется с помощью широко выпускаемых высокоинтеллектуальных частотных преобразователей.

Постановка задач исследования.

Для исследования динамических процессов в системе автоматического управления насосной установкой необходимо решить следующие задачи:

- 1) получить математическое описание и провести моделирование исходного объекта при различных объемах потребления воды и фиксированной частоте вращения электропривода и проанализировать результаты;
- 2) на основе моделирования определить недостатки и аварийные ситуации в объекте, и возможность их устранения путем введения в систему регулятора;
- 3) провести моделирование объекта с системой автоматического управления при различных объемах потребления воды и проанализировать результаты.

Решение задач и результаты исследований.

Станция подкачки воды состоит из приводного электропривода, непосредственно насосного агрегата и задвижки. Станции подкачки, входящие в состав городской системы водоснабжения, оснащены асинхронными электроприводами, центробежными насосными агрегатами и поворотными либо шиберными задвижками. Асинхронные электроприводы (АД), питаемые напряжением U с частотой f обеспечивают заданную частоту вращения n насосных агрегатов (НА), которые способны обеспечивать напор H и подачу Q , принадлежащие напорной характеристике, соответствующей данной частоте. Работу станции подкачки можно разделить на две составляющих — работу в пусковом режиме и работу в номинальном режиме. Первый режим характеризуется разгоном насоса с нулевой скорости до номинальной и, соответственно, таким же повышением давления. Во избежание аварийных ситуаций и учитывая редкость данного режима пуск насоса осуществляется вручную на закрытую задвижку. При достижении давлением насоса номинального значения задвижка открывается и начинается подача воды в магистраль. Полное открытие задвижек характеризует начало номинального режима работы, который может быть доверен системе автоматического управления. Как видно, задвижки используются при пуске насосных агрегатов, поэтому в номинальном режиме работы установки как ее часть они не рассматриваются.

Для получения динамических характеристик объекта необходимо получить передаточные функции составляющих частей станции подкачки — асинхронного электропривода и центробежного насоса.

Асинхронный электропривод является хорошо изученным объектом, по переходным процессам в нем существует значительное количество литературы, поэтому нахождение его передаточной функции затруднений не представляет.

Будем искать передаточную функцию асинхронного двигателя как отношение частоты вращения ротора к частоте питающего напряжения. В [1] предлагается эту передаточную функцию разбить на две составляющих — «момент/частота» и «частота/момент» для возможности учета момента сопротивления, действующего на вал двигателя. Тогда структурная схема при управлении частотой напряжения статора будет выглядеть так (см. Рис.1):

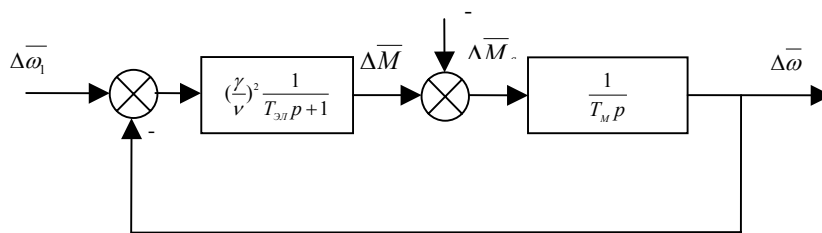


Рисунок 1 — Структурная схема асинхронного электродвигателя при управлении частотой питающего напряжения

По данной структурной схеме получим передаточную функцию по управляющему воздействию в относительных единицах:

$$W(p)_{AD} = \left(\frac{\gamma}{v}\right)^2 \frac{1}{(T_{эм} p + 1)T_m p + \left(\frac{\gamma}{v}\right)^2} = \frac{k_{AD}}{T_{эм} T_m p^2 + T_m p + k_{AD}}, \tag{1}$$

где T_m — механическая постоянная времени двигателя, $T_{эм}$ — электромагнитная постоянная времени двигателя, $\gamma = U_{1\alpha}/U_{1\text{ном}}$ — относительное напряжение статора (к номинальному), $v = \Omega_1/\Omega_{1н}$ — относительная частота напряжения статора (к номинальной).

Данная передаточная функция справедлива для случая, когда потокосцепление статора есть величина постоянная, т.е. одновременно с изменением частоты питающего напряжения изменяется и его величина в соответствии с выражением: $U_{1\alpha}/\omega_1 = const$, что обеспечивается в современных преобразователях частоты.

Преобразуем (1):

$$W(p)_{AD} = \frac{k_{AD}}{T_{эм} T_m p^2 + T_m p + k_{AD}} = \frac{1}{\frac{T_{эм} T_m}{k_{AD}} p^2 + \frac{T_m}{k_{AD}} p + 1} = \frac{1}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} \tag{2}$$

Аналитическое нахождение параметров передаточной функции двигателя требует наличия конструктивных и электрических параметров двигателя. Однако, параметры двигателя со временем эксплуатации значительно изменяются, поэтому целесообразно получать параметры передаточной функции методами идентификации по кривой разгона двигателя. Для передаточной функции вида(2) при холостом ходу для двигателя А-400У-0,38/0,66-6УЗ параметры были получены экспериментально и функция приняла вид:

$$W(p)_{AD} = \frac{1}{0.17 p^2 + 0.74 p + 1} \tag{3}$$

Момент сопротивления будет представлять собой момент на валу крыльчатки насоса и являться возмущающим воздействием для передаточной функции двигателя.

Найдем параметры функции (1) и перейдем от относительных единиц к абсолютным.

Имея конструктивные параметры двигателя, можно вычислить коэффициент $\left(\frac{\gamma}{v}\right)^2$.

Согласно условию постоянства потокосцепления статора, данный коэффициент будет постоянным в любом диапазоне изменения частот питающего напряжения, поэтому достаточно знать параметры номинального режима работы двигателя. Согласно справочным данным, рассматриваемый двигатель рассчитан на напряжение 6000В с частотой 50Гц. Тогда, переходя к абсолютным величинам:

$$\left(\frac{\gamma}{\nu}\right)^2 = \left(\frac{U}{f}\right)^2 = \left(\frac{6000}{50}\right)^2 = 14400B^2 \cdot c^2.$$

Выполняя над (3) преобразования, обратные преобразованиям в выражении (2) получаем:

$$W(p)_{АД} = \frac{14400}{(0.23p + 1) \cdot 10656p + 14400}. \tag{4}$$

Введем коэффициент усиления электродвигателя, который будет характеризовать соответствие частоте вращения ротора в установившемся режиме частоте питающего напряжения. Согласно справочным данным, при частоте питающего напряжения 50 Гц частота вращения ротора составляет 1000 об/мин.

Как известно, $n_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s)$, об/сек, где f_1 — частота питающего напряжения, p — число полюсов, s — скольжение. В процессе работы двигателя величина скольжения изменяется, однако в устойчивом режиме не превышает 2–5%, поэтому для определения коэффициента усиления двигателя ею можно пренебречь. Тогда:

$$k = \frac{n_{2уст}}{f_{1уст}} = \frac{1000}{50} = 20 \tag{5}$$

Прежде чем рассматривать центробежный насос как объект управления, рассмотрим условия его эксплуатации. В рассматриваемом комплексе насос работает на трубопроводы большой длины (минимум 1 км). Динамические процессы в таких трубопроводах обладают значительной длительностью и на несколько порядков продолжительнее гидродинамических процессов в насосах. Поэтому при анализе переходных режимов в рассматриваемых станциях подкачки генераторы гидравлической энергии можно считать практически безынерционными звеньями и в качестве динамических использовать их статические характеристики. [2]

На рис. 2 представлена статическая характеристика насоса Д 2500-62 для частоты вращения крыльчатки 730 об/мин.

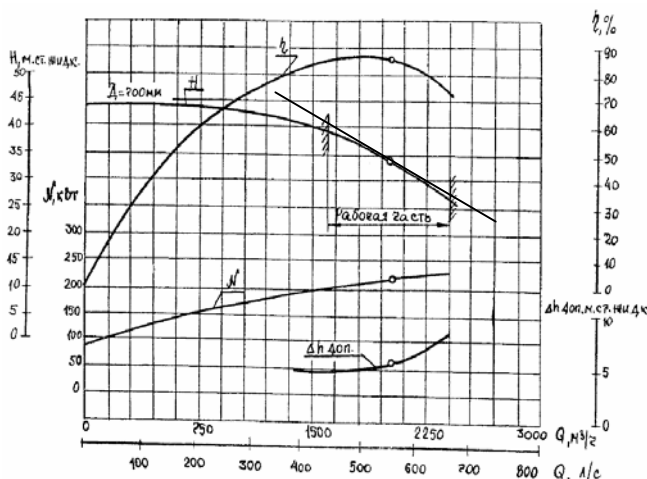


Рисунок 2 — Характеристика насоса Д 2500-62 (18 НДс) при n=730 об/мин

Для определения последнего коэффициента обратимся к правилам подобия для центробежных насосов[2]. Согласно им, между рабочими точками при различной частоте вращения крыльчатки существуют зависимости вида:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad (6)$$

где Q, H, P — расход, напор и потребляемая мощность насоса, n — частота вращения.

Как видно из (6), линейна лишь зависимость $Q = f(n)$, $H = f(n)$ же нелинейна, следовательно, требуется провести ее линеаризацию, если это представляется возможным.

Насос должен обеспечивать напор на гребенке около 7 м вод.ст и расход от 750 м³ до 1050 м³ в период пикового потребления. Необходимо найти его рабочую точку. Из характеристики на рис. 2 видно, что при частоте вращения 730 об/мин насос обеспечивает большие значения напора и расхода, чем требуется, следовательно, необходимо искать рабочую точку на другой характеристике, соответствующей меньшей частоте вращения. Помимо этого, для определения коэффициентов усиления по напору и расходу необходимо построить траекторию движения рабочей точки в зависимости от частоты вращения крыльчатки(исходя из выражений (6)). Методом подбора была выбрана точка (1800; 37) на характеристике рис. 3, которая может быть преобразована в точку (781; 6.94) путем уменьшения частоты вращения крыльчатки до 317 об/мин.

Как видно из расходно-напорных характеристик насоса (рис. 2), рабочий участок представляет собой промежуток с малой крутизной, поэтому можно представить его в виде линейного. Таким образом, получаем линеаризованную характеристику $H=f(Q)$.

Построив траектории движения рабочей точки по осям расхода и напора при увеличении числа оборотов (рис.3), вычислим коэффициенты усиления по расходу:

$$k_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta n} = \frac{370}{150} = 2.46 \text{ м}^3/(\text{об/мин}) \quad (7)$$

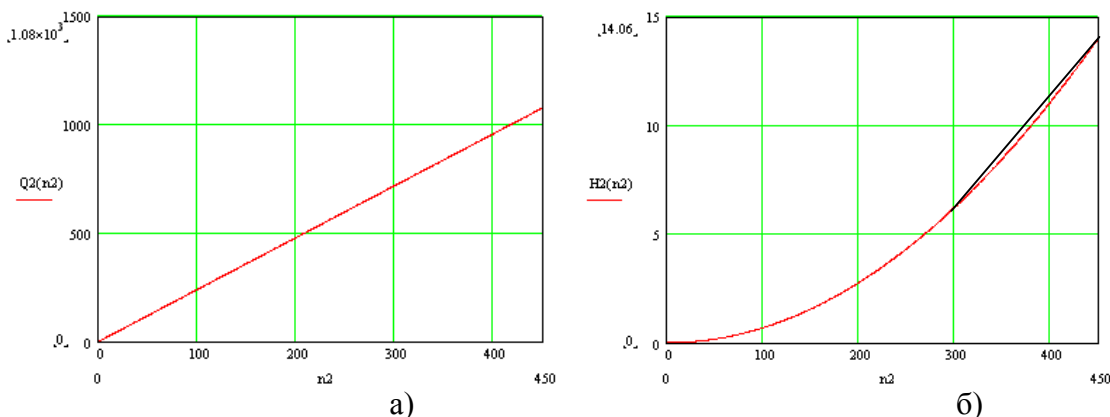


Рисунок 3 — Движение рабочей точки по оси расхода (а) и напора (б) в зависимости от частоты вращения

Как было сказано выше, насос должен обеспечить подачу от 750 до 1050 м³, что возможно при его работе на частотах вращения от 304 до 425 об/мин. На этом участке частот характеристика движения рабочей точки по оси напора (рис.3(б)) нелинейна, следовательно, необходимо выполнить линеаризацию кривой первого порядка. По полученной аппроксимации получим коэффициент усиления:

$$k_H = \frac{\Delta H}{\Delta n} = \frac{7.92}{150} = 0.053 \text{ м.вод.ст.}/(\text{об/мин}) \quad (8)$$

Далее, считая рабочую расходно-напорную характеристику линейной, можно сделать вывод, что в диапазоне частот вращения 304..425 об/мин ее перемещение по осям Q и H

линейно и осуществляется с коэффициентами k_Q и k_H . Таким образом, получаем передаточные функции:

$$W_Q(p) = k_Q = 2.46 \quad ; \quad W_H(p) = k_H = 0.053 \quad (9)$$

Определим также коэффициент изменения напора при изменении расхода в рабочей части характеристики:

$$k_{\Delta H Q} = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{16}{800} = 0.02 \quad \text{м.вод.ст./}(м^3/\text{час}) \quad (10)$$

Для получения структурной схемы разомкнутой системы необходимо учесть момент сопротивления на валу двигателя. Данный момент будет соответствовать моменту на валу насоса, и его можно определить из известной зависимости:

$$P = M\omega \quad (11)$$

Для центробежного насоса на рис. 2 представлена зависимость мощности $N=f(Q, n=730)$, от которой, используя (6), можно перейти к характеристике при любой частоте. Как видно, участок данной кривой, соответствующий рабочему диапазону, практически линейен. Выберем точку (1800; 210) на кривой мощности и проанализируем ее поведение при изменении частоты вращения рабочего колеса.

Как видно из рис. 4, существует нелинейность графика мощности в пределах требуемых частот вращения. Представим ее кривой первого порядка и определим коэффициент усиления по мощности для данного диапазона частот вращения:

$$k_P = \frac{\Delta P}{\Delta n} = \frac{34.62}{150} \cdot 10^3 = 230 \text{ Вт/(об/мин)} \quad (12)$$

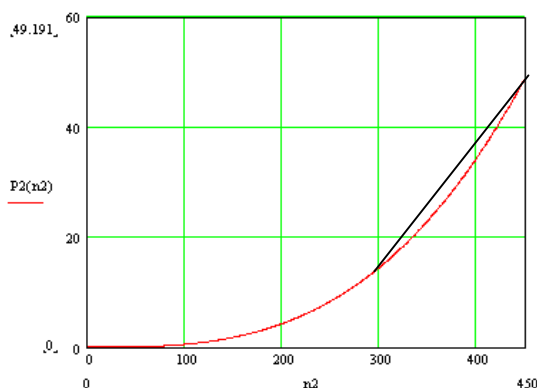


Рисунок 4 — Изменение мощности, потребляемой насосом при данной рабочей точке в зависимости от частоты вращения

Тогда передаточная функция будет выглядеть как:

$$W_P(p) = k_P = 230 \quad (13)$$

Определим также коэффициент изменения мощности в зависимости от изменения расхода на рабочем участке характеристики:

$$k_{\Delta P Q} = \frac{\Delta P}{\Delta Q} = \frac{30}{800} \cdot 10^3 = 37.5 \text{ Вт/(м}^3/\text{час)} \quad (14)$$

Получим структурную схему разомкнутой системы (рис.5), в которой учитываются момент сопротивления на валу двигателя, возмущения, связанные с изменением потребления воды и начальные значения мощности и напора, связанные с линеаризацией характеристик мощности и напора на рабочем участке.

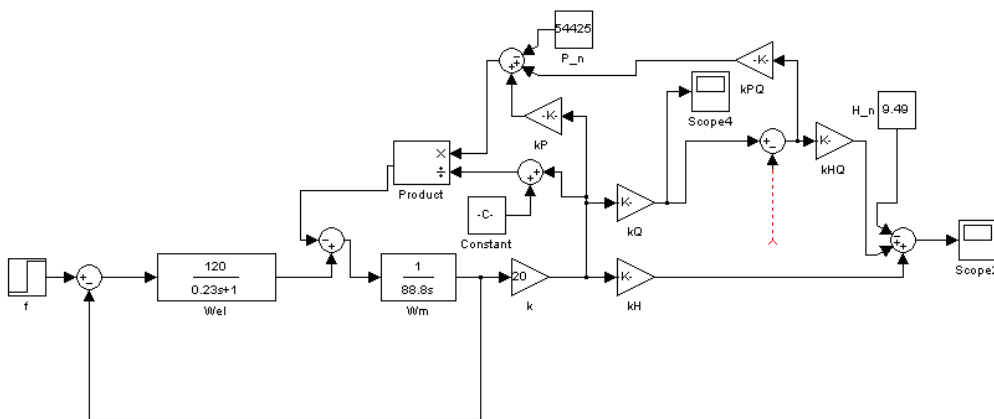


Рисунок 5 — Структурная схема станции подкачки

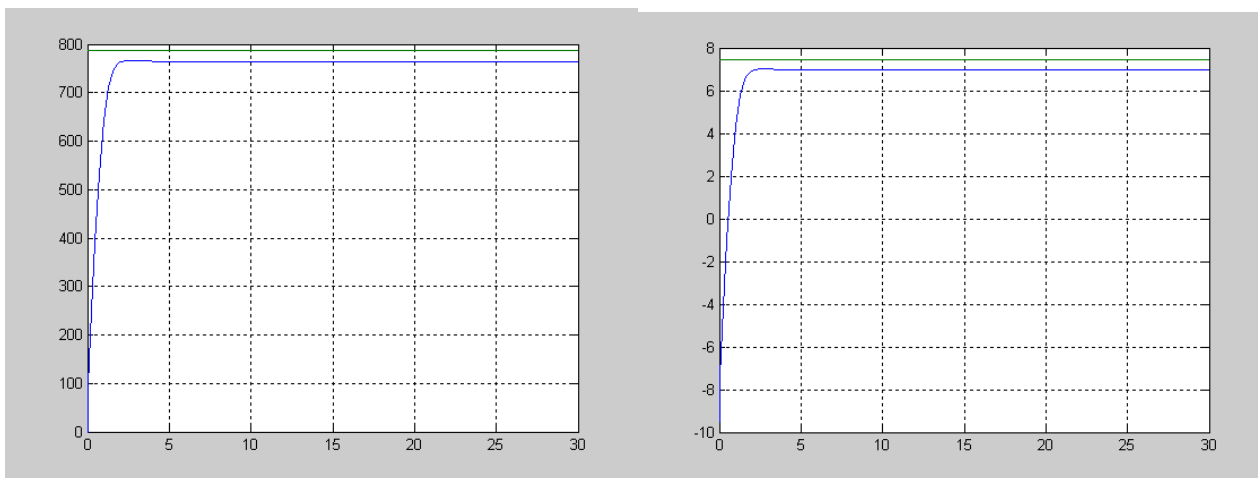
Проведем моделирование для следующих случаев: 1) объем потребления соответствует объему подачи насоса; 2) объем потребления динамический со случайными высокочастотными колебаниями.

В получившихся графиках участок нарастания кривой до установившегося режима не рассматривается, т.к. является вспомогательным для возможности осуществления расчетов в Simulink.

Из анализа графиков на рис. 6 видно, что при установке частоты вращения насоса для обеспечения ожидаемого потребления воды и напора реальные подача и напор оказываются меньше из-за наличия момента сопротивления.

Графики на рис. 7 показывают ситуацию при линейном изменении потребления от превышения над подачей на 200 м³ до уменьшения на 200 м³. В этом случае насос способен обеспечить подачу воды, но давление в трубопроводе не остается постоянным и изменяется обратно пропорционально потреблению, причем максимальное значение напора составляет порядка 11 м.вод.ст. при сниженном потреблении, являющимся типичным для городской системы, что наверняка вызовет порывы трубопровода, рассчитанного на напор 7 м.вод.ст.

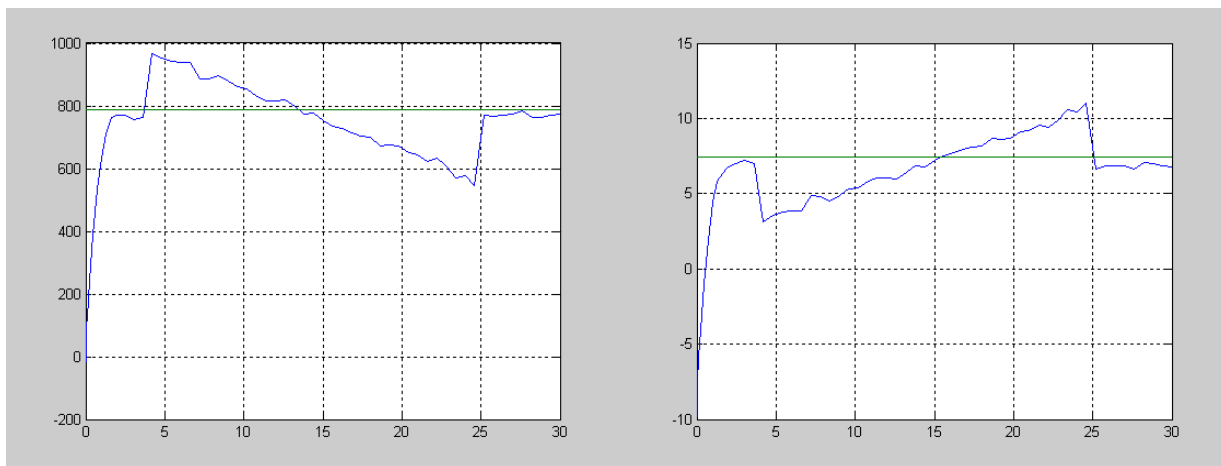
Для устранения статической ошибки напора и потребления при соответствии подачи потреблению, а также поддержания постоянства напора при динамическом изменении потребления в систему вводится ПИ-регулятор.



а)

б)

Рисунок 6 — Подача (а) и напор (б) насоса при соответствии объема потребления объему подачи



а)

б)

Рисунок 7 — Подача (а) и напор (б) насоса при динамическом изменении объема потребления

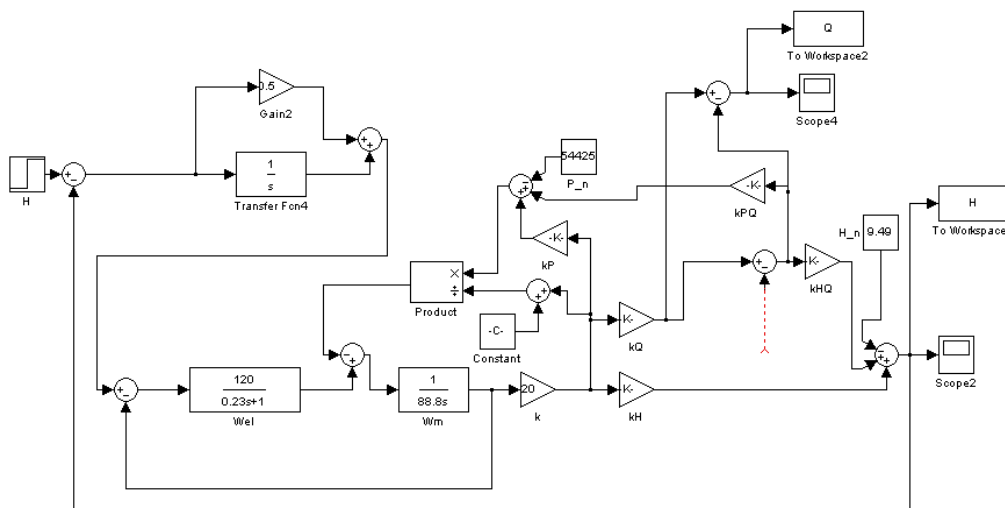


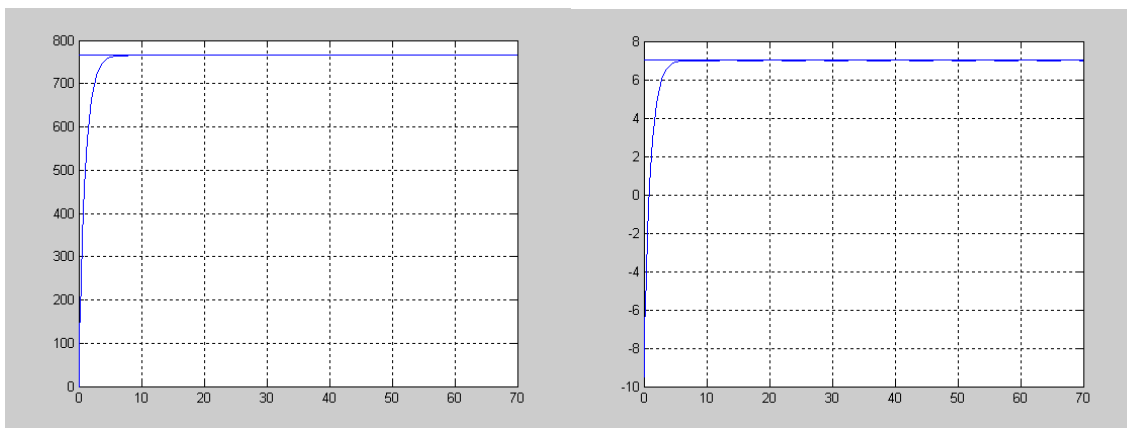
Рисунок 8 — Структурная схема станции подкачки

Проведем моделирование для тех же условий, что и для системы без регулятора, однако увеличим время моделирования и зададим более сложный график потребления воды. В качестве коэффициентов регулятора выбраны следующие: $K_p=0.5$; $T_I=1$.

В общем случае, данный график потребления воды является крайне быстротечным, что практически не встречается в реальной системе снабжения, однако это сделано для оценки возможности отработки более инерционных процессов.

Как видно из графиков (рис.9), при соответствии объема потребления объему подачи, статическая ошибка отсутствует, что обусловлено наличием интегрирующей составляющей регулятора.

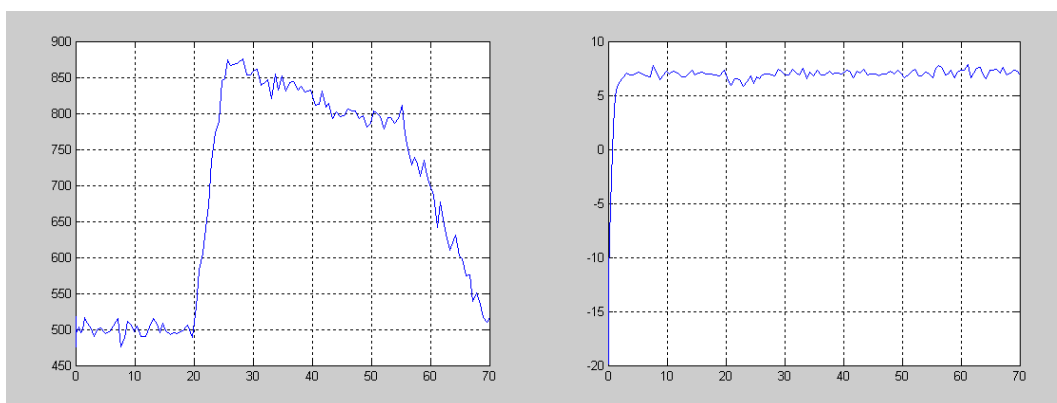
На рис. 10 приведены результаты моделирования для случая динамического изменения потребления, причем объемы потребления в основном меньше номинальных. Исходя из графика на рис. 10(б) видно, что величина напора соответствует требуемым 7 м.вод.ст. с отклонениями порядка 0.3–0.4 м.вод.ст, что не является критичным для системы водоснабжения.



а)

б)

Рисунок 9 — Подача (а) и напор (б) насоса при соответствии объема потребления объему подачи



а)

б)

Рисунок 10 — Подача (а) и напор (б) насоса при динамическом изменении объема потребления

Выводы.

1. Показана возможность линеаризации напорных характеристик насосного агрегата в малых пределах для получения линейной модели станции подкачки.
2. Проведенное моделирование показывает возможность возникновения аварийных ситуаций в системе водоснабжения при уменьшении потребления воды и неизменной частоте вращения насосного агрегата и также наличие статических ошибок.
3. Введение в систему управляющего устройства с интегрирующими свойствами (ПИ-регулятор) устраняет статическую ошибку а также поддерживает на постоянном уровне давление в трубопроводе при различной величине потребления воды.

Литература

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 392 с., ил.
2. Гейер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1987. — 270 с.

Здано в редакцію:
18.02.2009р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Зорі А.А.