

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ

**Д.П. Гаврилов, В.Г. Барабанов**

*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград*

Современный электропривод представляет собой совокупность электродвигателя, силового преобразователя и устройства управления. Асинхронный электропривод часто применяется в промышленности в составе насосов, вентиляторов и компрессоров.

Плавное регулирование подачи насосов в соответствии с текущим давлением в системе водоснабжения является актуальной задачей систем автоматического управления насосными установками (НУ).

Частотное регулирование позволяет управлять насосом за счет изменения частоты вращения электродвигателей насосов с помощью преобразователей частоты (ПЧ). ПЧ является одним из современных технических средств автоматизации промышленного электропривода и экономии электроэнергии.

В разрабатываемой системе регулирование подачи воды осуществляется по показателям датчика давления. Сигнал от датчика давления сравнивается с сигналом задания. При рассогласовании между этими сигналами ПИД-регулятор задает частоту вращения крыльчатки насоса. Таким образом, при отсутствии потребителей давление в магистрали будет расти, пока сигнал с датчика давления не поступит на вход ПИД-регулятора, который снизит частоту вращения насоса, и тем самым уменьшится подача воды и энергопотребление двигателя.

Для данной системы автоматического управления была разработана математическая модель. Она была исследована с помощью пакета Simulink приложения MATLAB. Цель исследования – это работа НУ в критических режимах, а также проверка правильности синтеза регулятора и анализ переходных процессов в системе управления.

Результаты исследования являются основой для написания программы управления. Алгоритм работы насосной установки разработан таким образом, чтобы обеспечить плавное и точное регулирование давления в гидравлической сети. Для программной реализации данного алгоритма был использован программный пакет CoDeSys для программируемых логических контроллеров (ПЛК) ОВЕН.

Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки.

Данная система рекомендована для использования на насосных станциях водоснабжения. Она позволит улучшить выходные характеристики для потребителя, повысить надежность сети водоснабжения, уменьшить износ насосного оборудования и сократит расходы на потребляемую электроэнергию.

*Ключевые слова: насосная установка, преобразователь частоты, автоматизированный электропривод, программа управления, ПИД-регулятор, программируемый логический контроллер (ПЛК).*

### **Введение**

Применение энергосберегающих технологий в большей мере определяется общей эффективностью электропривода. На сегодняшний день уже более 67 % всей производимой в мире электроэнергии потребляется электрическими двигателями [1]. Разработка современных и экономичных систем управления электроприводом является актуальной областью развития современной электронной промышленности.

Асинхронный электропривод на данный момент является более распространенным. Он используется в насосах, вентиляторах и компрессорах [2].

Для привода циркуляционных насосов сегодня используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Насос вместе с электроприводом образует насосный агрегат (НА) [3].

Для обеспечения постоянной безаварийной работы используются контрольно-измерительная аппаратура:

## Расчет и конструирование

- датчик давления в нагнетающем трубопроводе;
- реле сухого хода во всасывающем трубопроводе;
- датчики температуры обмоток электродвигателя насоса;
- датчики температуры подшипников насоса;
- датчики вибрации.

НА совместно с контрольно-измерительной и запорной арматурой представляет насосную установку (НУ) [4].

Плавное регулирование подачи насосов в соответствии с текущим давлением в гидравлической сети является актуальной задачей систем автоматического управления насосными установками (НУ) [5]. Проанализировав накопленный опыт и актуальные проблемы в данной сфере, было предложено разработать автоматизированную систему управления насосной установкой с частотным регулированием, обладающую высокой энергоэффективностью и повышенной точностью регулирования.

### 1. Расчетная схема, принятые допущения

Выделяют два различных режима работы преобразователя частоты: поддержание выходной частоты и стабилизация внешнего параметра.

В режиме поддержания выходной частоты соответствующее значение может вводиться с пульта оператора, входа потенциометра (аналогового входа) или совокупностью сигналов дискретных входов. Преобразователь анализирует сигнал задания частоты и определяет необходимую выходную частоту [6].

Современные ПЧ используют векторное управление асинхронным двигателем. Этот способ увеличивает точность частотного регулирования и применяется там, где необходимо поддерживать момент на валу двигателя при низких скоростях вращения и обеспечить стабилизацию скорости при скачках нагрузки [7].

В режиме стабилизации внешнего параметра система управления основывается на ПИД-регуляторе, на который приходит сигнал задания параметра (уставки) и сигнал с датчика регулируемой величины [8]. ПИД-регулятор вырабатывает сигнал управления для ПЧ, который при изменении скорости вращения электродвигателя поддерживает управляемую величину, равную заданной (рис. 1). ПЧ устанавливается между электрической сетью и электродвигателем для функционирования обратной связи [9]. На соответствующий аналоговый вход ПЛК или ПЧ поступает информация с датчика давления, установленного в магистраль на выходе из насосного агрегата. На преобразователь частоты подается сигнал задания давления [10]. Система управления определяет дельту между действительным и заданным значением давления и вырабатывает требуемое выходное воздействие (значение выходной частоты) в соответствии с заданным параметром закона регулирования. В качестве рабочего параметра может также использоваться расход жидкости, давление, температура. Значение уставки устанавливается с пульта оператора, внешнего аналогового входа или совокупностью сигналов на дискретных выходах [11].

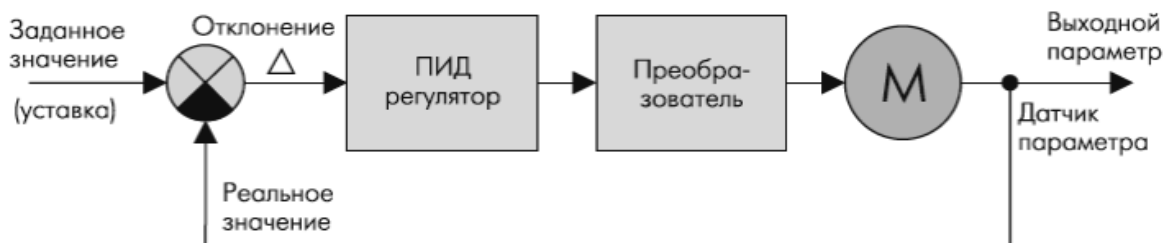


Рис. 1. Использование ПИД-регулятора в системе управления насосом

### 2. Расчетные зависимости (модели)

#### 2.1. Расчет ПИД-регулятора

Основным критерием качества регулирования является желаемая передаточная функция (ЖПФ). К заданной системе регулирования необходимо применить метод настройки контура регулирования на технический оптимум [12]. Передаточную функцию получим из выражения:

$$W_{p.жел}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)} \tag{1}$$

Передаточная функция представляет собой выражение:

$$W_{пер}(p) = \frac{W_{p.жел}(p)}{W_{оу}(p) \cdot W_{ос}(p)} \tag{2}$$

где  $W_{оу}(p)$  – передаточная функция объекта,  $W_{ос}(p)$  – передаточная функция обратной связи,  $W_{p.жел}(p)$  – ЖПФ разомкнутого контура.

$$W_{пер}(p) = \frac{1}{\frac{2 \cdot T_m \cdot p \cdot (T_m + 1)}{K_{пч-д} \cdot K_n \cdot K_{дд}} \cdot \frac{T_m \cdot T_n \cdot p^2 + T_n \cdot p + 1}{2 \cdot T_m \cdot K_{пч-д} \cdot K_n \cdot K_{дд} \cdot p}} \tag{3}$$

Из результата ясно, что данная ПФ является ПИД-регулятором с заданными коэффициентами усиления.

Определим коэффициенты ПИД-регулятора:

$$K_{п} = \frac{T_m}{2 \cdot K_{пч} \cdot K_d \cdot K_{нас} \cdot K_{д.н}} = \frac{0,025}{2 \cdot 3,125 \cdot 3,14 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 0,012,$$

$$K_{и} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{пч} \cdot K_{нас} \cdot K_{д.н}} = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 3,125 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 14,7,$$

$$K_{д} = \frac{T_m \cdot T_{\int}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{пч} \cdot K_{нас} \cdot K_{д.н}} = \frac{0,025 \cdot 0,022}{2 \cdot 0,01 \cdot 3,125 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 0,017,$$
(4)

где  $K_{п}$  – пропорциональный коэффициент,  $K_{и}$  – интегральный коэффициент,  $K_{д}$  – дифференциальный коэффициент, которые необходимы для построения регулятора в реальной системе регулирования давления [13].

### 2.2. Математическая модель насоса и трубопровода

Оптимальное энергопотребление оказывает существенное влияние на жизненный цикл насоса [14]. Рассмотрим основные методы, которые приводят к снижению энергопотребления насосов.

Проанализируем работу насосов с помощью соответствующих характеристик насосов. На рис. 2 показаны характеристики насоса ТР 100-240/2 при номинальной частоте вращения 2750 об/мин.

Характеристика  $Q-H$  насосов промышленного исполнения описываются уравнением:

$$H = H_{\phi} - S_r Q^2 \tag{5}$$

где  $H_{\phi}$  – напор при нулевой подаче (фиктивный), м;  $S_r$  – сопротивление гидравлической сети насоса;  $S_r Q^2$  – гидравлические потери напора внутри насоса, зависящие от типа жидкости, конструкции насоса, скорости вращения и т. д. [15].

Вычисление потерь в насосе происходит упрощённо через коэффициент  $S_r$ . Для вычисления необходимо по экспериментальным данным найти координаты двух точек на графике характеристики насоса. Используя т.1 и т.2 на рис. 2, определим сопротивление гидравлической сети и фиктивный напор насоса ТР 100-240/2:

$$S_r = \frac{H_1 - H_2}{Q_1^2 - Q_2^2} = \frac{24 - 22}{4,8^2 - 3^2} = 0,142,$$
(6)

$$H_{\phi} = H_1 + S_r Q_1^2 = 24 + 0,142 \cdot 4,8^2 = 27,3.$$

Рабочие параметры насоса зависят от частоты вращения его рабочего колеса [16]. Уравнение,

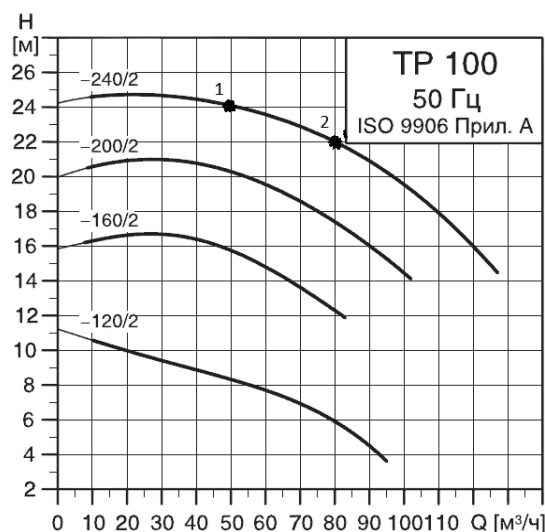


Рис. 2. Номинальные характеристики насоса ТР 100-240/2

## Расчет и конструирование

описывающее напорную характеристику центробежного насоса при изменении его частоты вращения:

$$H_i = H_\phi \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - S_T Q^2, \quad (7)$$

где  $\omega_0$  – номинальная частота,  $\omega$  – частота, с которой вращается рабочее колесо. Из формулы (7) становится понятно, что гидравлические потери в насосе могут полностью не зависеть от частоты вращения при одиночной подаче [17].

Варьирование частоты вращения рабочего колеса насоса  $\omega$  и пренебрежение величиной статического напора  $H_{ст}$  позволяет изменять параметры насоса (подача, напор и мощность) по законам гидравлического подобия:  $Q = \omega$ ,  $H = \omega^2$ ,  $P = \omega^3$  [12].

При расчете мощности на валу насоса используется график КПД насоса. Обычно электроприводы центробежных насосов выбираются для обеспечения максимально возможного расхода

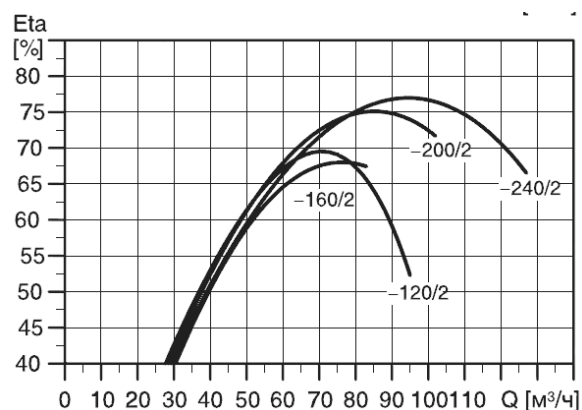


Рис. 3. КПД центробежного насоса TP 100-240/2

при заранее заданном напоре системы [18]. При увеличении  $\omega$  КПД насоса резко возрастает (рис. 3), это необходимо учитывать при расчете характеристик насоса. Так пропорционально мощности насоса могут изменяться как гидравлические потери в насосе, так и потери на трение в подшипниках в сальниках [19].

Закон, связывающий расход воды через трубопровод и напор, требуемый для создания этого расхода, называют характеристикой трубопровода или характеристикой гидравлической сети и описывают уравнением [20]:

$$H_i = H_{ст} + S Q^2, \quad (8)$$

где  $S$  – местные сопротивления трубопровода;

$H_{ст}$  – статический напор;  $S Q^2 = H_m$  – потери напора по длине трубопровода.

Сетью водопотребления называют совокупность трубопроводов различных по величине, форме и материалу. Математически описывается уравнением (8).

По причине сложности точного математического описания модели современных трубопроводов, стабилизация напора в каждой точке сети водопотребления совершенно не возможна. Для упрощения системы выбирают несколько точек трубопровода, называемых диктующими. При выборе диктующей точки предпочтение отдается наиболее удаленным и расположенным на наиболее высоких отметках точкам [21].

### 3. Исследование динамики системы управления насосной установкой в MATLAB Simulink

Для моделирования системы управления был использован пакет Simulink приложения MATLAB. В реальной гидравлической сети, давление не может измениться скачкообразно, а изменяется постепенно. Цель исследования – это имитация работы насосной установки в критическом режиме, а также проверка правильности синтеза регулятора системы управления. Переходные процессы в системе управления НУ исследуются с помощью модели асинхронного двигателя, с учетом временной постоянной насоса [22]. Чтобы исследовать работу НУ в динамике в Simulink, разработана модель, которая дает возможность наложить определенные ограничения и подать на вход системы управления разнообразные варианты задающего воздействия. Схема разработанной модели системы управления НУ представлена на рис. 4.

Модель составлена из стандартных блоков библиотек. Определенный блок выполняет заданную функцию схемы управления. Данная модель имеет и отличные блоки, которые предназначены для того, чтобы обеспечения работоспособности и визуализации результатов моделирования.

Анализ динамического режима в виде переходных процессов, полученных в ходе моделирования системы, представлен на рис. 5 и 6.

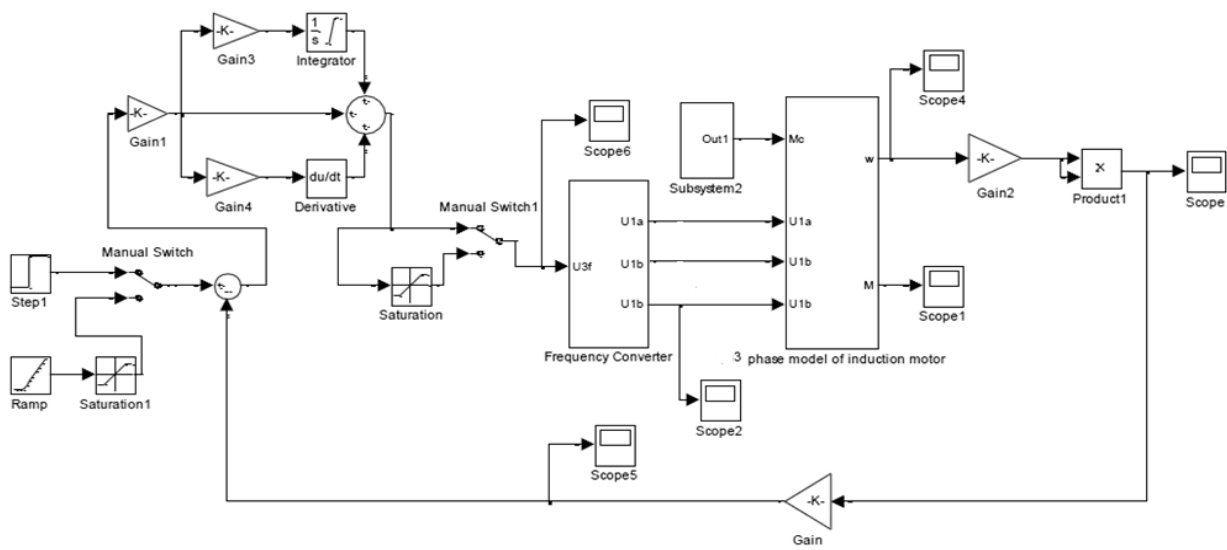
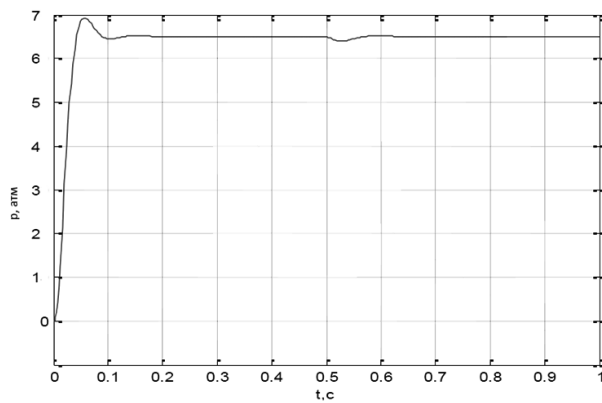
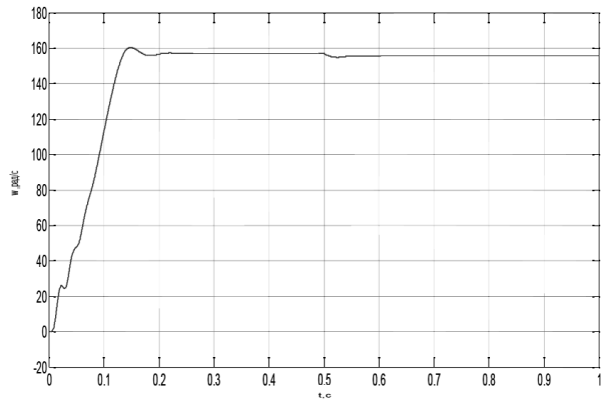


Рис. 4. Схема модели САУ НУ

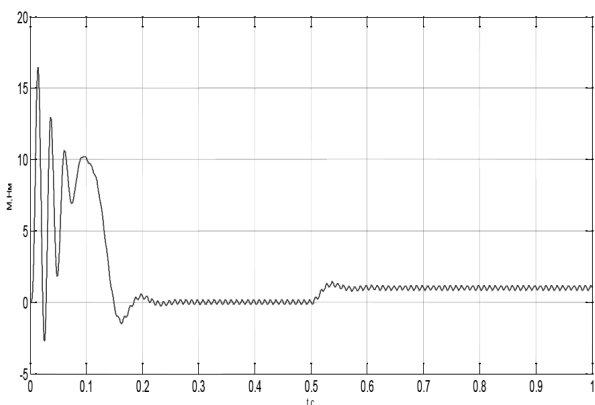


а)

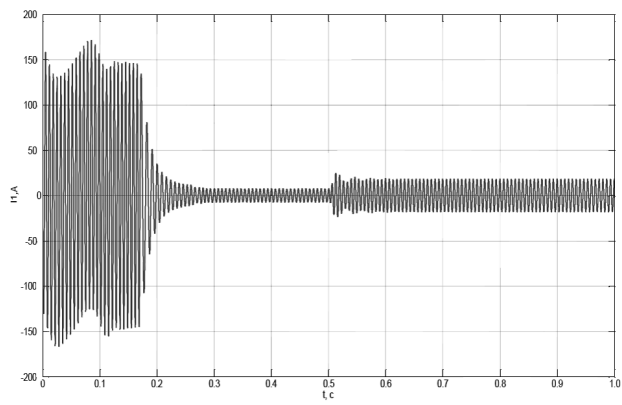


б)

Рис. 5. Графики изменения давления (а) и скорости (б), при реакции на скачок сигнала задания и наброс нагрузки



а)



б)

Рис. 6. График изменения момента (а) и тока фазы (б), при скачке сигнала и набросе нагрузки

По полученным результатам можно судить, что модель системы быстро отрабатывает заданное возмущающее воздействие и возвращается в исходное устойчивое состояние с заданными показателями качества, соответственно синтез ПИД-регулятора проведен верно.

## Расчет и конструирование

Полученные результаты были использованы для создания программы управления насосной установкой. Аппаратно система управления реализована на ПЛК ОВЕН 110. Для программной реализации данного алгоритма был использован программный пакет CoDeSys 3.5.

### Выводы

Проанализировав современные методы управления насосными агрегатами (НА), было выявлено, что частотное регулирование является наиболее современным методом управления асинхронным двигателем и может быть использовано в системах водоснабжения, так как обеспечивает защиту НА и более плавное управление, чем классические методы.

1. Для рассматриваемой системы управления насосами была составлена математическая модель. Она позволяет исследовать систему и определить ее эффективность до начала проектирования.

2. При моделировании в приложении MATLAB Simulink было проведено исследование работы насосов в критических режимах, в ходе которого получены графики переходных процессов в системе управления и проверена правильность синтеза регулятора.

3. Был произведен синтез системы управления и выбор физической реализации датчиков. Синтезированная система полностью соответствует требованиям, представленным во втором пункте данной работы.

4. Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки.

### Обсуждение и применение

Развитие современной электронной техники требует создание все новых более эффективных и точных систем управления. Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки. Панель оператора позволяет упростить управление и повысить его качество, благодаря отображению архивов аварий и графиков основных параметров насосной установки.

Разработанная программа рекомендована для использования на насосных станциях водоснабжения. Она позволит улучшить выходные характеристики для потребителя, повысить надежность сети водоснабжения, уменьшить износ насосного оборудования и сократит расходы на потребляемую электроэнергию.

### Литература

1. Попович, Н.Г. Теория электропривода / Н.Г. Попович, Н.Г. Борисюк. – Казань: Высш. шк., 2003. – 494 с.
2. Красильников, А.М. Применение автоматизированных насосных установок с каскадным управлением в системах водоснабжения / А.М. Красильников // Строит. инжиниринг. – 2005. – № 12. – С. 69–77.
3. Коренькова, Т.В. Исследование системы ПЧ-АД-Насос-Гидросеть / Т.В. Коренькова, Д.А. Михайличенко // Вестн. Кременчугского гос. политехн. ун-та. – 2003. – Т. 33, вып. 19. – С. 377.
4. Ильинский, Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издат. центр «Академия», 2008. – 553 с.
5. Барабанов, В.Г. Использование программного комплекса CoDeSys для разработки системы автоматического управления насосной установкой с применением преобразователя частоты / В.Г. Барабанов, Д.П. Гаврилов // Известия ВолгГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2016. – № 8 (187). – С. 103–105.
6. Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve / W.G. Zhang, W.D. Yang, F.X. Dou, L.J. Wang // Petrochemical Equipment. – 2016. – Vol. 45. – № 6. – P. 73–76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016
7. Ke, L. Modeling and Simulation of Variable Frequency Pump Control Fatigue Test Machine / L. Ke, Y.C. Liu // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2016. – Vol. 29. – № 1. – P. 92–102. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.13
8. Gong, Q.H. The Design and Implementation of Fuzzy Control Algorithm for Frequency Conversion System of Pump / Q.H. Gong // Advanced Materials Research. International Conference

on *Mechatronics and Intelligent Materials*, Lijiang. – 2014. – Vol. 971–973. – P. 785–788. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.785

9. *The Research of Energy-saving in Air Conditioning Water Cooling System by Frequency Conversion Pump and Constant Pressure Control* / H.J. Wang, F. Wang, Y.Y. Huang, L. Zhang // *Applied Mechanics and Materials. 2nd International Conference on Mechanics and Control Engineering, Beijing*. – 2014. – Vol. 446–447. – P. 1207–1210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1207

10. Zhou, D. *Application Research on Frequency Conversion Technology on the Pump Control in Chemical Works* / D. Zhou, F. Zeng // *Advanced Materials Research. International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, Chengdu*. – 2011. – Vol. 338. – P. 748–753. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.338.748

11. Лезнов, Б.С. *Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподувающих установках* / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 433 с.

12. Петров, Д.Н. *Регулируемый привод в насосных установках* / Д.Н. Петров, Ю.В. Сербин // *Силовая электроника*. – 2005. – № 4. – С. 27–30.

13. Петров, Д.Н. *Применение современных преобразователей частоты* / Д.Н. Петров, Ю.В. Сербин // *Силовая электроника*. – 2005. – № 1. – С. 8–11.

14. Копырин, В.Г. *Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода* / В.Г. Копырин, Е.В. Бородацкий // *Силовая электроника*. – 2006. – № 7. – С. 33–35.

15. Wei, H. *Variable Structure Robust Design for Variable Frequency Pump-control-motor Speed Governing System* / H. Wei, P. Li, H. Jia // *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. – 2009. – Vol. 40. – № 10. – P. 188–192.

16. Xiuhe, L. *Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving* / L. Xiuhe // *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun*. – 2010. – Vol. 3. – № 610276. – P. 431–434. DOI: 10.1109/CMCE.2010.5610276

17. Yang, S. *Intelligent Control Technology for Frequency Conversion Pump in Air Conditioning Systems* / S. Yang, Q. Ren // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2013. – Vol. 180 AISC. – pp. 665–669. DOI: 10.1007/978-3-642-31656-2\_9

18. Захаренков, А.В. *Использование частотного управления для двигателей вентиляторов и насосов в системах автоматического контроля для конегерационных заводских котлов* / А.В. Захаренков, Е.В. Бородацкий // *Русский электрический инжиниринг*. – 2005. – № 8. – С. 54–58.

19. Козаченко, В.Ф. *Микропроцессорная система контроля для преобразователей частоты для используемых на заводах асинхронных электрических двигателях насосов и вентиляторов* / В.Ф. Козаченко, В.П. Миколаенко, А.Л. Кудряшов // *Электротехника*. – 2005. – № 7. – С. 29–33.

20. Оксененко, А.Ю. *Анализ частотных свойств гидравлических насосов клапанного типа с фазным управлением* / А.Ю. Оксененко, А.И. Зерняк, З.Ю. Лур // *Рус. инженер. исследования*. – 1993. – № 4. – С. 7–13.

21. Tianyi, Z. *Online Optimization Control Method Based on Extreme Value Analysis for Parallel Variable Frequency Hydraulic Pumps in Central Air Conditioning Systems* / Z. Tianyi, Z. Jili, M. Liangdong // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 47. – № 1. – P. 330–338. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.07.00

22. Tan, Z.J. *Robust Controller Design for Variable Frequency Pump-control Steering Hydraulic System of Hybrid Wheel Loader* / Z.J. Tan, J.H. Han, J. Yao // *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban)/Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. – 2013. – Vol. 45. – № 1. – P. 177–182.

**Гаврилов Дмитрий Петрович**, магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, gavrilovdp94@yandex.ru.

**Барабанов Виктор Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, vbarabanov@vstu.ru.

Поступила в редакцию 7 марта 2017 г.

**DEVELOPMENT AND STUDY OF CONTROL SYSTEMS PUMPING UNIT**

**D.P. Gavrilov**, *gavrilovdp94@yandex.ru*,

**V.G. Barabanov**, *vbarabanov@vstu.ru*

*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation*

Modern is a collection of electric motor, the power converter and control unit. Asynchronous electric commonly used in industry as part of drive pumps, fans, compressors and other mechanisms for which it is important to maintain the engine speed. Infinitely adjustable feed pump in accordance with the current pressure in the water system is an urgent task of automatic control systems of pumping units.

Frequency control allows you to control the pump by changing the speed using frequency converters (FC) of electric pumps. FC is one of the modern means of industrial automation and electric power saving.

The developed system of water flow regulation is carried out by pressure gauges. The signal from the pressure sensor is compared with the reference signal. In case of inconsistency between these signals PID controller sets the pump impeller speed. Thus, consumers in the absence of line pressure will rise until the signal from the pressure sensor input is not received at a PID controller. That will reduce the pump speed and thus reduce the water flow and engine power.

For this automatic control system mathematical model was developed. She was examined by a package SIMULINK MATLAB applications. The purpose of research is to work well, in critical conditions, as well as validation and synthesis of control analysis of transients in the control system.

The results of the study are the basis for writing the control program. The algorithm of the pumping unit is designed to provide smooth and accurate regulation of the pressure in the hydraulic network. For the software implementation of this algorithm was used the software package CoDeSys for programmable logic controllers (PLC) OWEN.

Application of PLC and developed programs greatly enhance the possibility of installation in question.

This system is recommended for use at pumping stations of water supply. It will improve the output characteristics for the consumer, improve the reliability of water supply, to reduce wear of pumping equipment and reduce the cost of consumed electricity.

*Keywords: pump system, frequency converter, automatic electric, program control, PID controller, programmable logic controller (PLC).*

**References**

1. Popovich N.G. *Teoriya elektroprivoda* [Electric Drive Theory]. Kazan': Vysshaya shkola, 2003. 494 p.
2. Krasil'nikov A.M. [The Use of Automated Pumping Systems with Cascade Control in Water Supply Systems]. *Stroitel'nyy inzhiniring* [Construction Engineering]. 2005, no. 12, pp. 69–77. (in Russ.)
3. Koren'kova T.V., Mikhaylichenko D.A. [A Study of the System FC-AD-Pump-PR]. *Vestnik Kremenchugskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnic University]. 2003, vol. 33, no. 19, pp. 377. (in Russ.)
4. Il'inskiy N.F., Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie* [Electric Drive: Energy Saving]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya" [Publishing Center "Academy"], 2008. 553 p.
5. Barabanov V.G, Gavrilov D.P. [The Usage of Software CoDeSys for the Development of Automatic Control System of Pumping Unit with the Use of Converters for Frequency]. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Bulletin of the Volgograd State Technical University, Ser. Progressive technologies in mechanical engineering], 2016, no. 8 (187), pp. 103–105. (in Russ.)
6. Zhang W.G., Yang W.D., Dou F.X., Wang L.J. Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve. *Petrochemical Equipment*, 2016, vol. 45, no. 6, pp. 73–76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016
7. Ke L., Liu Y.C. Modeling and Simulation of Variable Frequency Pump Control Fatigue Test Machine. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics.* – 2016, vol. 29, no. 1, pp. 92–102. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.13



8. Gong Q.H. The Design and Implementation of Fuzzy Control Algorithm for Frequency Conversion System of Pump. *Advanced Materials Research. International Conference on Mechatronics and Intelligent Materials, Lijiang*, 2014, vol. 971–973, pp. 785–788. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.785
9. Wang H.J., Wang F., Huang Y.Y., Zhang L. The Research of Energy-saving in Air Conditioning Water Cooling System by Frequency Conversion Pump and Constant Pressure Control. *Applied Mechanics and Materials. 2nd International Conference on Mechanics and Control Engineering, Beijing*, 2014, vol. 446–447, pp. 1207–1210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1207
10. Zhou D., Zeng F. Application Research on Frequency Conversion Technology on the Pump Control in Chemical Works. *Advanced Materials Research. International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, Chengdu*, 2011, vol. 338, pp. 748–753. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.338.748
11. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive in Pump and Blower Installations]. Moscow, *Energoatomizdat*, 2006, 433 p.
12. Petrov D. N., Serbin Yu.V. [Variable Speed Drive in Pumping Units]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2005, no. 4, pp. 27–30. (in Russ.)
13. Petrov D. Serbin Yu.V. [The Use of Modern Frequency Converters]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2005, no. 1, pp. 8–11. (in Russ.)
14. Kopyrin V.G., Borodatskiy E.V. [Automation of Pumping Stations with the Use of Frequency-regulated Electric Drive]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2006, no. 7, pp. 33–35. (in Russ.)
15. Wei H., Li P., Jia H. Variable Structure Robust Design for Variable Frequency Pump-Control-motor Speed Governing System. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2009, vol. 40, no. 10, pp. 188–192.
16. Xiuhe L. Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun*, 2010, vol. 3, no. 610276, pp. 431–434. DOI: 10.1109/CMCE.2010.5610276
17. Yang S., Ren Q. Intelligent Control Technology for Frequency Conversion Pump in Air Conditioning Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2013, vol. 180 AISC, pp. 665–669. DOI: 10.1007/978-3-642-31656-2\_9
18. Zakharenkov A.V. Using Frequency-Controlled Fan and Pump Drives in Automatic Control Systems for Cogeneration Plant Boilers. *Russian Electrical Engineering*, 2005, vol. 75, no. 8, pp. 54–58. (in Russ.)
19. Kozachenko V.F., Mikolaenko V.P., Kudryashov A.L. Microcontroller Control System for Frequency Converters for Plant-Oriented Asynchronous Electric Drives of Pumps and Fans. *Elektrotehnika*, 2005, no. 7, pp. 29–33. (in Russ.)
20. Oksenenko A.Y., Zhernyak A.I., Lur'e Z.Y. Analysis of the Frequency Properties of the Capacity of a Valve-Type Hydraulic Pump with Phase Control. *Russian Engineering Research*, 1993, no. 4, pp. 7–13. (in Russ.)
21. Tianyi Z., Jili Z., Liangdong M. Online Optimization Control Method Based on Extreme Value Analysis for Parallel Variable Frequency Hydraulic Pumps in Central Air Conditioning Systems. *Building and Environment*, 2012, vol. 47, no. 1, pp. 330–338. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.07.00
22. Tan Z.J., Han J.H., Yao J. Robust Controller Design for Variable Frequency Pump-Control Steering Hydraulic System of Hybrid Wheel Loader. *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) / Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, vol. 45, no. 1, pp. 177–182.

Received 7 March 2017

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гаврилов, Д.П. Разработка и исследование системы управления насосной установкой / Д.П. Гаврилов, В.Г. Барабанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202

## FOR CITATION

Gavrilov D.P., Barabanov V.G. Development and Study of Control Systems Pumping Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 11–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170202