

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2023)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия

выходит 4 раза в год _____

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://10.48081/BNAS6555>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., профессор

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А.И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Кошеков К.Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е.В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.,	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***Ю. Ф. Булатбаева¹, Р. Б. Косымбаев²**

^{1,2}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда

e-mail: julia_my_angel@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА

В статье приведены результаты исследования об эффективности применения преобразователя частоты на насосных станциях первого подъема. Насосные станции первого подъема отличаются от насосных станций второго, третьего подъема тем, что работают на аккумулирующую емкость. Применение преобразователя частоты на насосных станциях первого подъема повышает энергоэффективность насосных агрегатов путем регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей и стабилизации уровня жидкости в аккумулирующих емкостях на одном уровне. В качестве объекта исследования выступает береговая насосная станция обогатительной фабрики Нурказган, предназначенная для забора воды и перекачки из Самаркандского в приемный резервуар. Проведен ряд исследований с применением математического моделирования в ППП Matlab&Simulink. На основе известных данных о насосных агрегатах, установленных на насосной станции была построена модель насосного агрегата со стабилизацией уровня воды в приемном резервуаре. В результате моделирования были получены основные зависимости основных параметров насоса от потребления жидкости из резервуара. С изменением потребления жидкости из резервуара изменяется скорость вращения насосного агрегата, напор и потребляемая мощность. Подача насоса и потребление в это время равны друг другу, поэтому необходимая мощность соответствует потребляемой мощности, в чем и состоит энергосбережение.

Ключевые слова: преобразователь частоты, насосная станция, энергоэффективность, электродвигатель, ППП Matlab&Simulink.

Введение

На сегодняшний день значительная часть электродвигателей в промышленности служит для привода насосных агрегатов. Насосные установки зачастую оборудованы асинхронными электродвигателями, что предоставляет возможность широкого выбора способов управления насосными агрегатами [1].

На практике сейчас имеется положительный опыт применения регулируемого электропривода на насосных станциях второго и третьего подъема. На десятках насосных станций второго подъема используются насосные агрегаты с регулируемым электроприводом [2].

Совсем по-другому обстоят дела с оценкой целесообразности применения регулируемого электропривода на насосных станциях первого подъема. Основным отличием процесса работы между насосными станциями первого и следующих подъемов является то, что первые работают не на водопроводную сеть, а на аккумулирующие емкости: резервуары, отстойники, бассейны, фильтры. Аккумулирующие емкости помогают сгладить нестабильность водопотребления. Из-за попыток сокращения строительных работ на некоторых станциях емкости резервуара недостаточно, чтобы выполнять аккумулирующую функцию. В этом случае аккумулирующий эффект снижается. Необходимость регулирования подачи насосных агрегатов возникает при необходимости поддержания уровня жидкости в резервуарах и реализуется циклическим включением и отключением насосных агрегатов с применением устройств плавного пуска [3].

В технической литературе практически не рассматривается целесообразность применения регулируемого электропривода для насосных агрегатов первого подъема. Однако эта проблема, несомненно, является актуальной, учитывая, что все города, крупные и промышленные предприятия нашей страны имеют станции первого подъема, оснащенные насосными агрегатами большой мощности [4].

В качестве объекта исследования выступает береговая насосная станция обогатительной фабрики Нурказган, предназначенная для забора воды из Самаркандского водохранилища и перекачки в приемный резервуар технической воды для подачи воды на обогатительную фабрику. На береговой насосной станции установлено два центробежных насоса Д630-90, оснащенные асинхронными электродвигателями 5АНЗ15В4 мощностью 250 кВт (1 рабочий, 1 резервный).

Материалы и методы

Для исследования эффективности применения преобразователя частоты на береговой насосной станции обогатительной фабрики Нурказган была

разработана имитационная модель системы автоматического регулирования в ППП Matlab&Simulink.

Структурная схема электродвигателя при управлении частотным способом со стабилизацией уровня будет представлена в виде типовых динамических звеньев, а структурная схема насоса будет представлена в виде функциональных блоков, которые реализуют зависимости подачи, напора, мощности и момента статического сопротивления от скорости [5].

Исходные данные приведены в виде паспортных данных по приводному электродвигателю и насосу [6].

Паспортные данные по приводному электродвигателю:

- 1 Номинальная мощность – $P_{\text{ном}} = 250$ кВт;
- 2 Номинальное напряжение – $U_{\text{ном}} = 380/660$ В;
- 3 Номинальное скольжение – $s_{\text{ном}} = 0,02$;
- 4 Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1485$ об/мин;
- 5 Номинальный КПД – $\eta_{\text{дв.ном}} = 0,943$;
- 6 Номинальный коэффициент мощности – $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$;
- 7 Перегрузочная способность двигателя – $\lambda = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2$;
- 8 Момент инерции двигателя – $J_{\text{дв}} = 3,7$ кг·м².

Паспортные данные по центробежному насосу:

- 1 Паспортная подача – $Q_{\text{ном}} = 630$ м³/ч;
- 2 Паспортный напор – $H_{\text{ном}} = 90$ м;
- 3 Паспортный КПД – $\eta_{\text{н.ном}} = 0,82$.

Структурная схема насосного агрегата представлена на рисунке 1.

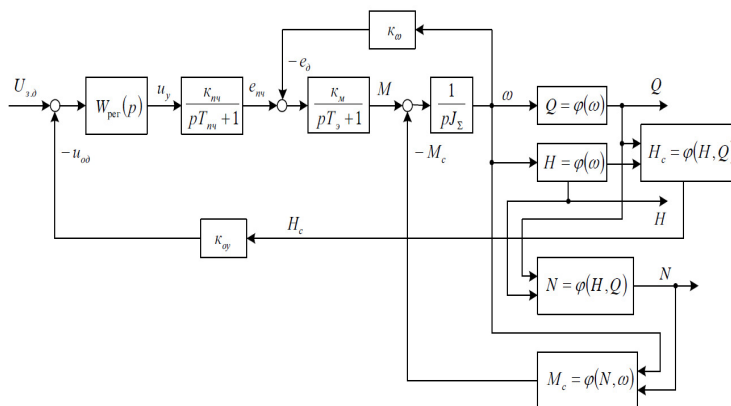


Рисунок 1 – Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре

В блоках на структурной схеме на рисунке 1 будут реализованы зависимости подачи $Q=f(\omega)$, напора $H=f(\omega)$, мощности $N=f(Q,H)$, и момента статического сопротивления $M_c=f(N,\omega)$ от угловой скорости насоса [7].

Дополнительные данные, необходимые для расчета:

- 1 Плотность перекачиваемой жидкости - $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$;
- 2 Разница геодезической высоты между высотой установки насоса и высотой подъема воды (высота подъема жидкости) - $H_{\text{под}}=30 \text{ м}$;
- 3 Высота резервуара $H_p=9 \text{ м}$;
- 4 По данным предприятия потребление жидкости из резервуара колеблется от 150 до 600 $\text{м}^3/\text{ч}$, а среднее потребление составляет около $Q_{\text{п.ср}}=300 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- 5 Время работы насоса в год $T_p=8050 \text{ час/год}$;

Функциональная схема модели насосного агрегата с численными значениями для насоса Д-630-90 и двигателем 5АН315В4 приведена на рисунке 2.

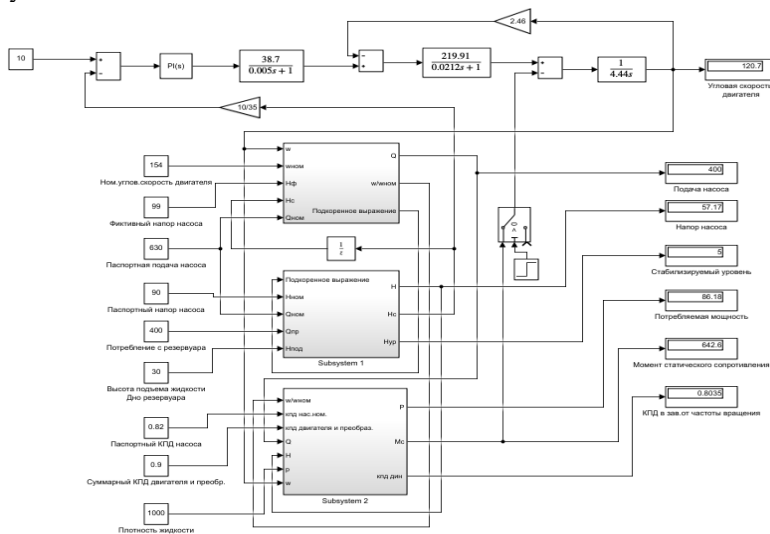


Рисунок 2 – Функциональная схема модели насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре

В подсистеме Subsystem реализована зависимость подачи насоса от угловой скорости насоса:

$$Q = Q_{\text{ном}} \sqrt{\frac{H_{\phi} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 - H_c}{H_{\phi} - H_c}}$$

В подсистеме Subsystem 1 реализованы зависимости напора насоса от угловой скорости насоса и статического напора от расхода жидкости. Зависимость напора насоса от угловой скорости насоса описывается уравнением

$$H = H_c + (H_{\text{ном}} - H_c) \frac{H_{\phi} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 - H_c}{H_{\phi} - H_c},$$

а статического напора от расхода жидкости следующим уравнением

$$H_{\text{ур}} = H_c - H_{\text{под}}.$$

При этом стабилизируемым параметром является статический напор. Уровень жидкости в резервуаре вычисляется по формуле

$$H_{\text{ур}} = H_c - H_{\text{под}}.$$

В Subsystem2 собраны зависимости КПД, активной мощности насоса, потребляемой мощности насосом и статического момента сопротивления насоса от угловой скорости.

Описанные ниже зависимости используются для определения КПД, статического момента насоса, мощности, и потребляемой электроэнергии в режиме стабилизации уровня жидкости

$$\eta_n = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^{0,36}}$$

$$N = \frac{\rho Q H}{102 \eta_n}$$

$$M_{н.с} = \frac{\rho \times Q \times H \times 10^3}{\omega \times 102 \times \eta_n}$$

Потребляемая мощность насосом вычисляется путем деления активной мощности насоса на произведение КПД преобразователя и двигателя.

Результаты и обсуждение

Изменяя потребление жидкости из аккумулирующей емкости, фиксируем численные значения параметров. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования при стабилизации уровня жидкости в резервуаре

$Q_n, \text{м}^3/\text{ч}$	$\omega, \text{рад/с}$	$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	$H, \text{м}$	$H_{\text{уп}}, \text{м}$	$P, \text{кВт}$
150	96,2	150	38,12	5	22,13
200	99,65	200	40,54	5	31,27
250	103,9	250	43,66	5	41,93
300	108,9	300	47,47	5	54,47
350	114,5	350	51,98	5	69,26
400	120,7	400	57,17	5	86,66
450	127,3	450	63,06	5	107
500	134,3	500	69,64	5	130,7
550	141,7	550	76,92	5	158,1
600	149,3	600	84,89	5	189,6

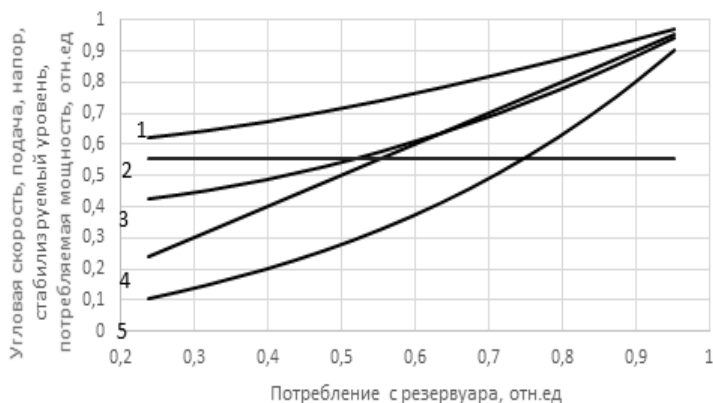
С повышением потребления жидкости увеличивается скорость насоса, напор и потребляемая мощность. Подача насоса и потребление равны друг другу, поэтому необходимая мощность соответствует потребляемой мощности [8].

Таблица 2 – Результаты моделирования при стабилизации уровня жидкости в резервуаре в относительных единицах

$Q_n^*, \text{м}^3/\text{ч}$	$\omega^*, \text{рад/с}$	$Q^*, \text{м}^3/\text{ч}$	$H^*, \text{м}$	$H_{\text{уп}}^*, \text{м}$	$P^*, \text{кВт}$
0,238095	0,624676	0,238095	0,423556	0,555556	0,105381
0,31746	0,647078	0,31746	0,450444	0,555556	0,148905
0,396825	0,674676	0,396825	0,485111	0,555556	0,199666
0,47619	0,707143	0,47619	0,527444	0,555556	0,259381
0,555555	0,743507	0,555555	0,577555	0,555556	0,329809

0,63492	0,783767	0,63492	0,635222	0,555556	0,412666
0,714285	0,826624	0,714285	0,700667	0,555556	0,509523
0,79365	0,872078	0,79365	0,773778	0,555556	0,62238
0,873015	0,92013	0,873015	0,854667	0,555556	0,752856
0,95238	0,969481	0,95238	0,943222	0,555556	0,902856

Известно, что среднее водопотребление жидкости из резервуара составляет 300 м³/час при времени работы насоса 8050 час/год. С помощью модели определяем потребляемую мощность насосного агрегата $P_2 = 54,47$ кВт при стабилизации уровня жидкости в резервуаре $H_{ур} = 5$ м [9]. Графические зависимости основных параметров насоса от потребления жидкости из резервуара приведены на рисунке 3.



1 – угловая скорость, 2 – стабилизируемый уровень, 3 – напор,
4 – подача, 5 – потребляемая мощность

Рисунок 3 – Графические зависимости основных параметров насоса от потребления жидкости из резервуара

Величина потребляемой электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре

$$W_2 = P_2 \times T_p = 54,47 \times 8760 = 477157 \text{ кВтчас/год.}$$

Если не используется регулируемый электропривод, то поддержание уровня воды в резервуаре осуществляется путем циклического управления насосными агрегатами, то есть включением/отключением насосного агрегата

в зависимости от уровня в резервуаре [10]. При этом, можно считать насос работает при номинальных значениях подачи и напора, а мощность, потребляемая насосом, составляет:

$$P_1 = \frac{\rho \times Q_{\text{ном}} \times H_{\text{ном}}}{102 \times \eta_{\text{н.ном}} \times \eta_{\text{дв.ном}}} = \frac{1000 \times 0,175 \times 90}{102 \times 0,82 \times 0,943} = 199,68 \text{ кВт.}$$

Учитывая, что при среднем водопотреблении равном 300 м³/ч насосный агрегат будет работать в течении 11 часов в сутки для того, чтобы повысить уровень воды в резервуаре на необходимый уровень, то потребление электроэнергии при использовании нерегулируемого электропривода насоса

$$W_1 = P_1 \times T_p = 199,68 \times 4015 = 801715 \text{ кВтчас/год.}$$

Экономия электроэнергии при использовании частотно-регулируемого электропривода в системе стабилизации уровня жидкости в резервуаре:

$$\Delta W_{\text{эл}} = W_1 - W_2 = 801715 - 477157 = 324558 \text{ кВтчас/год.}$$

В этом и заключается концепция энергосбережения при работе преобразователя частоты в качестве управляющего устройства.

Выводы

Проведя анализ результатов исследования, был сделан вывод, о том, что при применении преобразователя частоты на насосных станциях первого подъема энергопотребление снижается в 2 раза. Также стоит заметить, что эффективность применения преобразователя частоты зависит от водопотребления и характеристики трубопровода. Для применения преобразователя частоты на насосных станциях первого подъема необходимо, чтобы присутствовала потребность в регулировании подачи в широких диапазонах. Также не имеет смысла применение преобразователя частоты в системах с высоким статическим напором (разность геодезических отметок между наивысшей точкой подачи воды и местом установки насоса), равным 60-70% от напора насосного агрегата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Аникин, Ю. В., Царев, Н. С., Ушакова, Л. И. Насосы и насосные станции : учебное пособие. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018.– 138 с.

- 2 **Зуев, К. И.** Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: учебное пособие. – Владимир: Издательство ВлГУ, 2016. – 224 с.
- 3 **Лезнов, Б. С.** Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
- 4 **Фашиленко, В. Н.** Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учебное пособие. – М. : Издательство «Горная книга», 2012. – 260. с.
- 5 **Дьяконов, В. П.** MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
- 6 **Кацман, М. М.** Электрические машины. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
- 7 **Шарапов, В. М., Полищук, Е. С.** Датчики: Справочное пособие. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
- 8 **Абакумов, А. М.** Исследование системы стабилизации уровня жидкости в резервуарах // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2021. – Т.29. – № 1. – С. 104-119.
- 9 **Денисенко, В. П.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
- 10 **Денисенко, В. П.** ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97.

REFERENCES

- 1 **Anikin, YU. V., Carev, N. S., Ushakova, L. I.** Nasosy i nasosnye stancii: uchebnoe posobie [Pumps and pumping stations: a tutorial]. – Ekaterinburg: Ural University Publishing house, 2018. – 138 p.
- 2 **Zuev, K. I.** Avtomatizaciya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: uchebnoe posobie [Automation of water supply and sanitation systems: a tutorial]. – Vladimir: VIGU Publishing house, 2016. – 224 p.
- 3 **Leznov, B. S.** Chastotno-reguliruemyy elektroprivod nasosnyh ustanovok [Frequency-controlled electric drive of pumping units]. – Moscow : Mechanical engineering, 2013. – 176 p.
- 4 **Fashchilenko, V. N.** Reguliruemyy elektroprivod nasosnyh i ventilyatornyh ustanovok gornyh predpriyatij: uchebnoe posobie [Controlled electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises: Tutorial]. – Moscow : Publishing house «Mining book», 2012. – 260 p.
- 5 **D'yakonov, V. P.** MATLAB. Polnyj samouchitel' [MATLAB. Complete tutorial.]. – Moscow : DMK Press, 2012. – 768 p.

6 **Kacman, M. M.** Elektricheskie mashiny [Electric machines]. – Moscow: Publishing center «Academy», 2013. – 496 p.

7 **Sharapov, V. M.,** Polishchuk, E. S. Datchiki: Spravochnoe posobie [Sensors: Reference Guide]. – Moscow : Technosphere, 2012. – 624 p.

8 **Abakumov, A. M.** Issledovanie sistemy stabilizatsii urovnya zhidkosti v rezervuarah [Study of the liquid level stabilization system in tanks] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series «Technical Sciences». – 2021. – V.29. – № 1. – P. 104–119.

9 **Denisenko, V. P.** PID-regulyatory: principy postroeniya i modifikatsii [PID controllers: principles of construction and modification] // Modern automation technologies. – 2006. – № 4. – P. 66–74.

10 **Denisenko, V. P.** PID-regulyatory: voprosy realizatsii [PID controllers: implementation issues] // Modern automation technologies. – 2007. – № 4. – P. 86–97.

Материал поступил в редакцию 13.03.23.

*Ю. Ф. Булатбаева¹, Р. Б. Косымбаев²

^{1,2}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

Материал баспаға 13.03.23 түсті.

БІРІНШІ КӨТЕРУ СОРҒЫ СТАНЦИЯЛАРЫНДА ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШІН ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада бірінші көтеру сорғы станцияларында жиілік түрлендіргішін пайдалану тиімділігін зерттеу нәтижелері келтірілген. Бірінші көтеру сорғы станциялары екінші, үшінші көтеру сорғы станцияларынан ерекшеленеді, өйткені олар сақтау цистернасында жұмыс істейді. Бірінші көтеру сорғы станцияларында жиілік түрлендіргішін пайдалану асинхронды электр қозғалтқыштарының айналу жиілігін реттеу және сақтау цистерналарындағы сұйықтық деңгейін бір деңгейде тұрақтандыру арқылы сорғы қондырғыларының энергия тиімділігін арттырады. Зерттеу нысаны Самарқандтан су алуға және қабылдау резервуарына айдауға арналған Нұрқазған байыту комбинатының жағалау сорғы станциясы болып табылады. MATLAB&Simulink ҚБП-де математикалық модельдеуді қолдану арқылы бірқатар зерттеулер жүргізілді. Сорғы станциясында орнатылған сорғы қондырғылары туралы белгілі мәліметтер негізінде қабылдау резервуарындағы су деңгейін тұрақтандыратын

сорғы қондырғысының моделі құрылды. Модельдеу нәтижесінде сорғының негізгі параметрлерінің резервуардағы сұйықтық ағынына негізгі тәуелділігі алынды. Резервуардағы сұйықтық ағыны өзгерген кезде сорғы қондырғысының айналу жылдамдығы, қысым және қуат тұтыну өзгереді. Осы уақыт ішінде сорғыны беру және тұтыну бір-біріне тең, сондықтан қажетті қуат қуат тұтынуға сәйкес келеді, бұл энергияны үнемдеу.

Кілтті сөздер: жиілік түрлендіргіші, сорғы станциясы, энергия тиімділігі, электр қозғалтқышы, MATLAB&Simulink ҚБП.

*Yu. F. Bulatbaeva¹, R. B. Kosymbaev²

^{1,2}Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Material received on 13.03.23

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING A FREQUENCY CONVERTER AT PUMPING STATIONS OF THE FIRST LIFT

The article presents the results of a study on the effectiveness of using a frequency converter at pumping stations of the first lift. Pumping stations of the first lift differ from pumping stations of the second, third lift in that they operate on a storage tank. The use of a frequency converter at pumping stations of the first lift increases the energy efficiency of pumping units by regulating the rotational speed of asynchronous electric motors and stabilizing the liquid level in storage tanks at the same level. The object of the study is the coastal pumping station of the Nurkazgan processing plant, designed for water intake and pumping from the Samarkand to the receiving tank. A number of studies have been carried out using mathematical modeling in the ASP Matlab&Simulink. Based on the known data on pumping units installed at the pumping station, a model of a pumping unit with stabilization of the water level in the receiving tank was built. As a result of modeling, the main dependences of the main parameters of the pump on the consumption of liquid from the tank were obtained. With a change in the consumption of liquid from the tank, the rotation speed of the pumping unit, the pressure and the power consumption change. The pump supply and consumption at this time are equal to each other, so the required power corresponds to the power consumption, which is energy saving.

Keywords: frequency converter; pumping station, energy efficiency, electric motor, ASP Matlab&Simulink.

Теруге 13.03.2023 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

3,44 Mb RAM

Шартты баспа табағы 23.59. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4039

Сдано в набор 13.03.2023 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

3,44 Mb RAM

Усл. печ. л. 23.59. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4039

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz