

В. Б. КЛЕПИКОВ, д.т.н., проф. НТУ «ХПИ»

П. А. КОРОТАЕВ, ассистент НТУ «ХПИ»

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Введение. Для Украины, которая обеспечена собственными топливными энергоресурсами лишь на 48% от потребностей, проблема энергоресурсосбережения крайне важна. Экономия электроэнергии – один из наиболее эффективных путей энергосбережения [1].

В [2] отмечено, что при существующей изношенности тепловых электростанций, качества угля и графике сменности режимов работы коэффициент полезного действия электростанций доходит до 28% и даже 25%. При этом, как показано в [3], с учетом затрат на добычу и транспортировку энергетических ресурсов оказывается, что каждая единица сэкономленной электроэнергии обеспечивает в энергетическом эквиваленте 5 единиц топливных энергоресурсов. Это значит, что экономия электроэнергии является исключительно эффективным средством их сбережения. Известно, что наибольшие потери электроэнергии имеют место у потребителя [3]. Основным потребителем, как известно, является электропривод (ЭП), на долю которого приходится около 70% всей вырабатываемой электроэнергии. Автоматизированный ЭП, являясь средством оптимизации технологических процессов позволяет существенно сократить как прямые так и косвенные расходы электроэнергии, обеспечивая, так называемый, синергетический эффект умножения экономии электроэнергии, что обеспечивается не только снижением потребления электроэнергии по счетчику, установленному на ЭП, но и в результате оптимизации электроприводом технологического процесса за счет исключения энергетических затрат на производство, транспортирование сэкономленных расходных материалов, затрат на ремонт и восстановительные работы, увеличения качества и долговечности выпускаемой продукции и т.п.

Турбомеханизмы, к которым относятся и центробежные насосы для перекачки воды и других жидкостей, потребляют до 25 % всей вырабатываемой электроэнергии. Работа этих систем отличается неравномерным потреблением воды, тепловой энергии, воздуха в течение суток в зависимости от погодных условий, времени года.

Выпускаемые насосные агрегаты обычно оснащаются нерегулируемым электроприводом. Регулирование подачи осуществляется при этом дросселированием на стороне нагнетания. Характерным примером являются многие станции горячего и холодного водоснабжения и системы отопления зданий. Механизмы этих станций, выбранные исходя из максимальной производительности, значительную часть времени работают с меньшей производительностью, что определяется изменением потребления воды в разные периоды времени. Среднесуточная нагрузка насосов холодного водоснабжения составляет 50-55% максимальной. Существующие системы водоснабжения с нерегулируемым электроприводом не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощности при уменьшении расхода воды, а также обуславливают при этом существенный рост давления (напора) в системе, что приводит к утечкам воды и значительному числу порывов магистралей водоснабжения [4].

Современные системы, в частности на базе частотно-регулируемого электропривода, показывают существенную экономию энергетических и материальных ресурсов [5, 6]. Именно эти системы позволяют в условиях высокой степени износа материально-технической базы ЖКХ резко повысить энергоэффективность работы, качество предоставляемых услуг и существенно снизить аварийность, при этом создается возможность высвобождения средств для рефинансирования и планомерного обновления оборудования и капитального ремонта коммуникаций.

Особо неприятным фактором для эксплуатации являются многочисленные порывы водопроводных сетей, которые возникают после кратковременного отключения напряжения питания. По данным Харьковского КП «ПТП «Вода» основное число порывов приходится при включении насосных агрегатов в работу. В 2011г. при потере электроснабжения всего на 10 минут после возобновления электропитания и пуска насосных агрегатов возникло около 100 порывов, но ликвидировать за сутки удавалось лишь 17 [4].

Вышеуказанное свидетельствует о том, что исследование энергоресурсосберегающего электропривода, в том числе решающего проблемы водопроводных сетей, является важной и актуальной задачей.

Порывы, как это было показано в [7], являются следствием волновых процессов, возникающих в электромеханогидравлической системе с распределенными параметрами. Было показано, что пуск электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты по определенному закону изменения частоты преобразователя может устранить порывы водопроводной сети. Существует много насосных станций второго подъема, на которых преобразователь частоты установлен только на одном насосном агрегате. А электропривод остальных запускаются прямым пуском электропривода, который сопровождается бросками повышенного давления.

© В.Б. Клепиков, П.А. Коротаев, 2015

Цель работы – Выяснить возможность устранения бросков давления при прямых пусках электроприводов с учетом волновых процессов электромеганогидравлической системе с несколькими насосами, работающими на единую систему водоснабжения.

Материалы исследования. На рис.1 показана математическая модель в структурной форме электропривода двух насосных установок, работающих на водопроводную сеть.

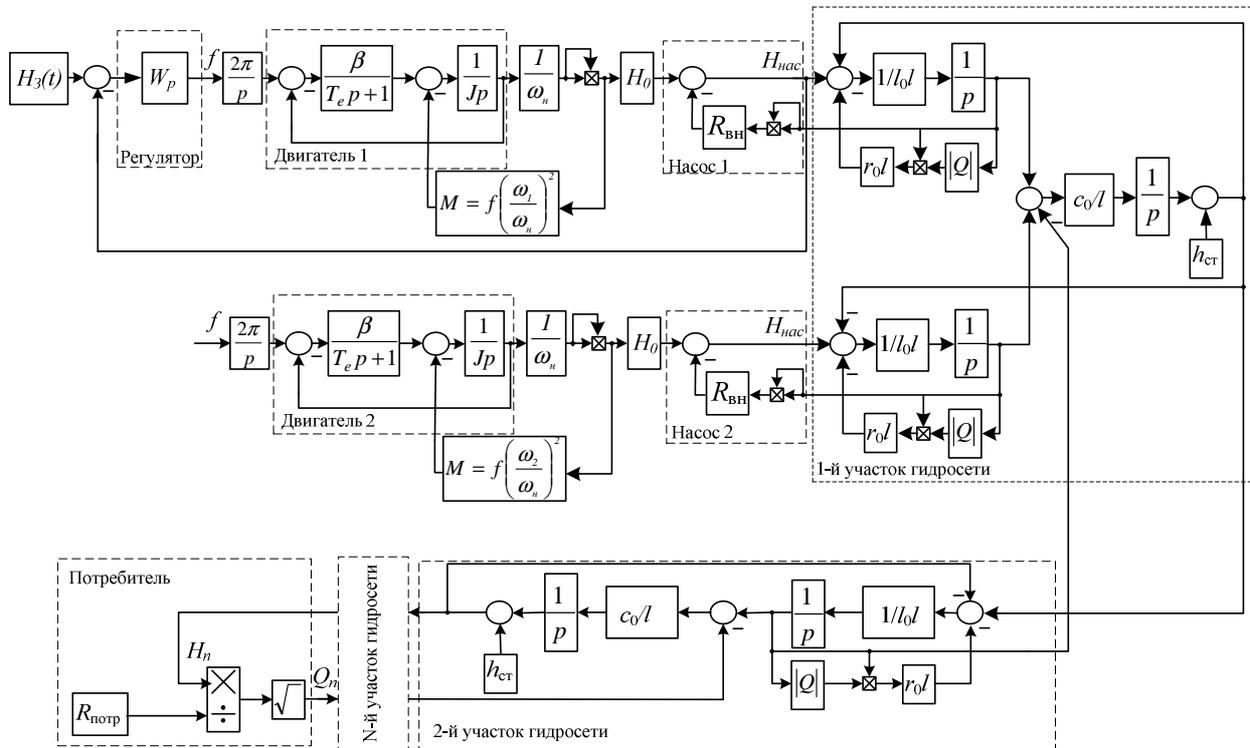


Рис. 1 – Математическая модель в структурной форме электроприводов насосной станции с двумя насосами, работающими на водопроводную сеть

Асинхронный двигатель (АД) электропривода насоса принят в виде модели, в которой звено электромеганогидравлического преобразования энергии представлено апериодическим звеном первого порядка [8].

Математическая модель может быть получена при рассмотрении следующих соотношений:

$$\begin{cases} T_s \frac{dM(t)}{dt} = \beta(\omega_0(t) - \omega(t)) - M(t); \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - M_c(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}$ – угловая скорость электромагнитного поля АД, рад/с, f_1 – частота питания, Гц; p_n – число пар полюсов обмотки статора, M – момент АД, Нм, M_c – момент сопротивления насоса, Нм, T_s – электромагнитная постоянная времени, с⁻¹; J – суммарный момент инерции насосного агрегата, кг·м²; β – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АД

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k} \quad (2)$$

Уравнение линеаризованной механической характеристики АД:

$$M = \frac{2M_k}{s_k} s \quad (3)$$

где M_k – критический момент АД, Нм, s , s_k – текущее и критическое скольжения (то есть скольжение при $M=M_k$) АД.

Уравнение движения АД:

$$M - M_c = Jp\omega \quad (4)$$

Учитывая, что $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$, можно (4) представить как

$$M = \frac{2M_k}{s_k} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (5)$$

Значение электромагнитной постоянной времени T_3 определяется по соотношению [8]:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi f_{1,n} s_k}, \quad (6)$$

При работе турбомеханизма с противодавлением H_c статический момент M_c на валу описывается зависимостью:

$$M_c = M_0 v^2 + (M_n - M_0) v \sqrt{\frac{H_0 v^2 - H_c}{H_0 - H_c}}, \quad (7)$$

где $v = \omega / \omega_{ном}$ – относительная скорость обращения рабочего колеса насоса, ω , ω_n – текущая и номинальная частоты вращения насоса, c^{-1} , H_0 – напор, который развивает насос при нулевой подаче (закрытая задвижка), м; H_c – противодавление в гидравлической сети, м, M_n – номинальный момент турбомеханизма, Нм; $M_0 = P_0 / \omega_{ном}$ – момент, Нм, обусловленный мощностью на валу турбомеханизма при нулевом расходе и номинальной скорости вращения.

Центробежные насосы служат для повышения кинетической и потенциальной энергии потока жидкости путем влияния лопаток рабочего колеса на поток. На практике зависимость напора от подачи (напорная характеристика) определяется для каждого насоса экспериментально. С достаточной степенью точности в пределах рабочей зоны напорная характеристика центробежного насоса может быть представлена параболой вида [9]

$$H = H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - R_{вн} Q^2, \quad (8)$$

где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление насоса, c^2/m^5 :

$$R_{вн} = \frac{H_0 - H_n}{Q_n^2}; \quad (9)$$

H_n , Q_n – номинальный напор и подача насоса, м, m^3/c .

Предполагаем, что преобразователь представляет собой безинерционное звено, а стабилизация осуществляется с помощью ПИ-регулятора давления с передаточной функцией:

$$W_p = k_p + \frac{k_p}{T_p p} \quad (10)$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора давления, T_p – постоянная интегрирование регулятора давления, с.

Трубопроводную сеть представим известными уравнениями [10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\lambda}{d} \frac{1}{S^2} \frac{Q|Q|}{2g} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $H = p/(\rho g)$, Q – напор и расход жидкости в текущем сечении трубопровода соответственно, м, m^3/c , p – давление в текущем сечении трубопровода, Па, $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения, m^2 , d – диаметр трубопровода, м, λ – безразмерный коэффициент сопротивления трубопровода, c – скорость распространения ударной волны в рабочей среде, м/с, ρ – плотность рабочей среды, kg/m^3 , $g = 9,81 m/c^2$ – ускорение свободного падения.

Решение уравнений (11) с помощью метода конечных разностей позволяет представить трубопроводную сеть конечным числом участков с равными параметрами и перейти от частных производных к разностным аналогам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &= \frac{H_{вых.уч} - H_{вх.уч}}{l_{уч}}; \\ \frac{\partial Q}{\partial x} &= \frac{Q_{вых.уч} - Q_{вх.уч}}{l_{уч}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $l_{уч} = LN$ – длина участка трубопровода; L – длина трубопроводной сети, м, N – число участков, на которые разбитый трубопровод, $H_{вх.уч}$, $H_{вых.уч}$ – напор на входе и выходе участка, м, $Q_{вх}$, $Q_{вых}$ – расход на входе и выходе участка, m^3/c .

Тогда для i -ого участка уравнения напора и расхода будут иметь вид:

$$\begin{cases} H_i - H_{i-1} + l_0 l_{\text{уч}} \frac{dQ_i}{dt} + r_0 l_{\text{уч}} Q_i |Q_i| = 0; \\ \frac{dH_i}{dt} + c_0 \frac{1}{l_{\text{уч}}} (Q_i - Q_{i-1}) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $r_0 = \frac{\lambda}{2gS^2d}$; $c_0 = \frac{c^2}{Sg}$; $l_0 = \frac{1}{Sg}$ – удельные параметры участка трубопровода, $H_i = h_i + h_{cmi}$, Q_i , $H_{i-1} = h_{i-1} + h_{cmi-1}$,

Q_{i-1} – напор и расход на выходе и входе i -ого участка трубопровода соответственно, $\lambda = 0,11 \left(\frac{k_e}{d} \right)^{0,25}$ – коэффициент сопротивления трубопровода, k_e – коэффициент жесткости трубы, м, h_{cmi} , h_{cmi-1} – высота расположения конца и начала i -ого участка относительно оси насоса соответственно, м, $h_i = \frac{p_i}{\rho g}$, $h_{i-1} = \frac{p_{i-1}}{\rho g}$ –

абсолютный напор на выходе и входе i -ого участка трубопровода, м, p_i , p_{i-1} – абсолютное давление на выходе и входе i -ого участка трубопровода, Па.

Характеристика системы потребления на выходе водопроводной магистрали представлена соотношением [11]:

$$H_{\text{номр}} - h_{cm} = R_{\text{номр}} Q_{\text{номр}}^2, \quad (14)$$

где $H_{\text{номр}}$, $Q_{\text{номр}}$ – напор и расход в сети потребителя, м, м³/с, $R_{\text{номр}}$ – номинальное гидравлическое сопротивление потребителя, с²/м⁵, h_{cm} – статический напор потребителя, м.

На насосной станции обычно размещается несколько насосных агрегатов, работающих одновременно на одну и ту же водопроводную магистраль. Регулирование подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов, имеющих различные характеристики, иллюстрируется рис. 2. Если два насоса с суммарной характеристикой 2 работают на сеть с характеристикой 1 в точке А с производительностью Q_A и необходимо уменьшить их производительность до Q_A' , то это можно сделать двумя способами: уменьшить частоту вращения обоих насосов (их характеристики 3 и 4 и суммарная характеристика 2') или снизить, но более значительно, частоту вращения одного из насосов (характеристика 5 при сниженной частоте вращения). Регулирование производительности изменением частоты вращения одновременно двух насосов по своим показателям равноценно регулированию частоты вращения насоса при его одиночной работе.

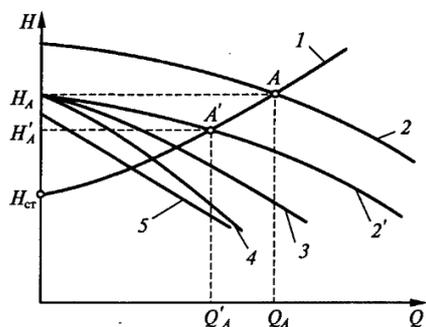


Рис. 2 – Регулирование подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов

С точки зрения экономичности регулирования более выгодным является одновременное изменение частоты вращения всех параллельно работающих насосов. Однако это связано с увеличением капитальных затрат на оснащение всех агрегатов регулируемым электроприводом. Поэтому для большинства насосных станций достаточно иметь только один регулируемый агрегат и осуществлять более глубокое регулирование отключением отдельных насосов.

При параллельной работе нагнетателей с разными характеристиками представляется целесообразным определять средний КПД нагнетателей [11]:

$$\eta_{cp} = \frac{Q_1 \cdot H_1 + Q_2 \cdot H_2}{Q_1 \cdot H_1 / \eta_1 + Q_2 \cdot H_2 / \eta_2}, \quad (15)$$

где Q_1 , H_1 , η_1 – производительность, давление, КПД первого насоса,

Q_2 , H_2 , η_2 – производительность, давление, КПД второго насоса.

Из формулы (15) следует, что более мощные нагнетатели должны работать с максимальным КПД, а регулировать расход в системе целесообразнее менее мощным нагнетателем [11].

Первое моделирование проводилось для насосной станции, осуществляющей подачу воды с помощью насосного агрегата, состоящего из двигателя 1 мощностью $P_n = 15$ кВт и насоса с номинальным напором и производительностью соответственно $H_n = 28$ м и $Q_n = 80$ м³/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет $H_0 = 29$ м. Параметры нерегулируемого насосного агрегата, состоящего из двигателя 2 и насоса 2 принимались равными регулируемому. Для расчетов водопроводной сети взято $N = 20$ участков трубопровода, удельные параметры которых равны: $r_0 = 20,5$ с²/м⁶, $l_0 = 3,2$ с²/м³, $c_0 = 3 \cdot 10^6$ м⁻¹.

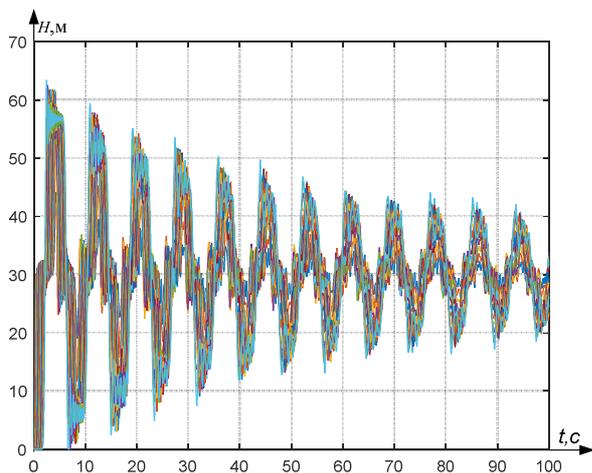


Рис. 3 – Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата

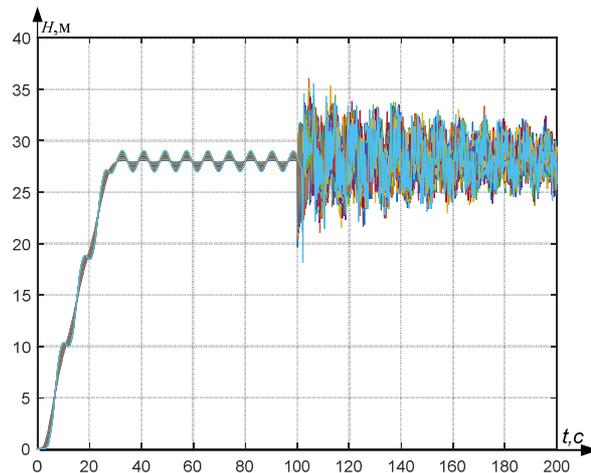


Рис.4 - Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты

Из рис. 3 видно, что при запуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата повышение напора $H_{max}=63$ м, что в 2,2 раза превышает номинально значение. При пуске первым насосного агрегата с регулируемым электроприводом максимальное повышение напора составляет $H_{max}=36$ м, что в 1,3 раза больше номинального значения и в 1,8 раза меньше чем максимальное значение давления при запуске первым насоса с нерегулируемым электроприводом.

Второе моделирование проводилось для насосной станции, осуществляющей подачу воды с помощью насосного агрегата, состоящего из двигателя 1 мощностью $P_n=15$ кВт и насоса с номинальным напором и производительностью соответственно $H_n=28$ м и $Q_n=80$ м³/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет $H_0=29$ м. Нерегулируемого насосный агрегат состоит из двигателя 2 мощностью $P_n=30$ кВт и насоса 2 с номинальным напором и производительностью соответственно $H_n=36$ м и $Q_n=200$ м³/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет $H_0=40$ м. Для расчетов водопроводной сети взято $N=20$ участков трубопровода.

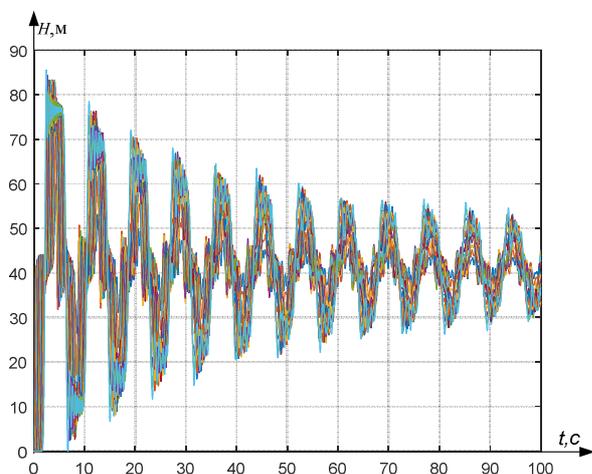


Рис. 5 – Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата

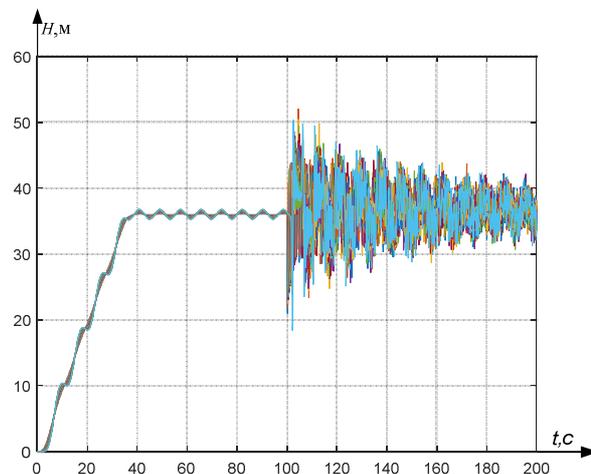


Рис.6 - Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты

Из рис. 5 видно показал, что при запуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата повышение напора $H_{max}=85,5$ м, что в 2,4 раза превышает номинально значение. При пуске первым насосного агрегата с регулируемым электроприводом максимальное повышение напора составляет $H_{max}=52$ м, что в 1,4 раза больше номинального значения и в 1,6 раза меньше чем максимальное значение давления при запуске первым насоса с нерегулируемым электроприводом.

Выводы. Таким образом, для снижения давления в водопроводной магистрали во время пуска электроприводов насосной станции с несколькими насосными агрегатами, один из которых имеет регулируемый электропривод с преобразователем частоты напряжения, каждый прямой пуск нерегулируемых электроприводов насосных агрегатов следует выполнять обязательно после запуска электропривода с частотным преобразователем.

Список литературы: 1. Стратегия энергосбережения в Украине: аналитические справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / под ред. В.А. Жовтянского, М.М. Кулика, Б.С. Стогния – К.: Академперіодика, 2006. – т. 1-510 с. 2. Товажнянский Л.Л. Проблемы энергетики на межі XXI століття: Навч. посіб. / Л.Л. Товажнянский, Б.О. Левченко. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – С. 57 – 86. 3. Клепиков В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2008. – № 30. – с.18-21. 4. Буряковская Т. Харьковские коммунальщики готовятся к зиме / Т. Буряковская // Время. – 2011. – №673. – С. 1. 5. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишиматов, В.Н. Поляков – М.: Академия. – 2004. 6. Клепиков В.Б. К итогам эксплуатации энергосберегающего электропривода станции второго подъема п.г.т. Солоницевка / В.Б. Клепиков, П.А. Коротаев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. - №5. – С. 15 – 18. 7. Клепиков В.Б. Волновые процессы в электромеханогидравлической системе при пуске электропривода насосного агрегата / В.Б. Клепиков, П.А. Коротаев // Техническая электродинамика. – Киев, 2014. – №5. – С. 131-133. 8. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. 9. Онищенко Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков – М., Энергия, 1972. – 240 с. 10. Вишневецкий К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи / К.П. Вишневецкий – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с. 11. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, А.Д. Новиков – М.: Академия, 2007. - 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zhovtyanskiy, V. A., M. M. Kulik, B. S. Stogniy. Strategiya energosberezheniya v Ukraine: analiticheskie spravochnyie materialy v 2-h tomah. Obschie osnovy energosberezheniya. Kiev: Akademperіodika, 2006. Print. 2. Tovazhnyanskiy, L. L., B. O. Levchenko. Problemi energetiki na mezhl XXI stolIttya. Harkov: NTU "HPI", 2006. 57–86. Print. 3. Klepikov, V. B., V. Y. Rozov. "O roli elektroprivoda v reshenii problemy energoresursosberezheniya v Ukraine". Vestnik natsionalnogo tehni Cheskogo universiteta «Harkovskiy politehni Cheskiy institut». No. 30. 2008. 18-21. Print. 4. Buryakovskaya, T. "Harkovskie kommunalschiki gotovyatsya k zime" Vremya. No. 673. 2011. Print. 5. Braslavskiy, I. Y., Z. S. Ishmatov, V. N. Polyakov Energosberegayuschiy asinhronniy elektroprivod. Moscow: Akademiya. 2004. Print. 6. Klepikov, V. B., P. A. Korotaev. "K itogam ekspluatatsii energosberegayuschego elektroprivoda stantsii vtorogo pod'ema p.g.t. Solonitsevka". Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit. No. 5. 2011. 15–18. Print. 7. Klepikov V. B., P. A. Korotaev. "Volnovyye protsessy i v elektromehanogidravli Cheskoy sisteme pri puske elektroprivoda nasosnogo agregata" Tehni Cheskaya elektrodinamika. Kiev. No.5. 2014. 131-133. Print. 8. Klyuchev, V. I. Teoriya elektroprivoda. Moscow: Energoatomizdat. 2001. Print. 9. Onischenko, G. B., M. G. Yunkov Elektroprivod turbomehanizmov. Moscow: Energiya. 1972. Print. 10. Vishnevskiy, K. P. Perekhodnyie protsessy i v napornyyih sistemah vodopodachi. Moscow: Agropromizdat. 1986. Print. 11. Belov, M. P., A. D. Novikov. Avtomatizirovanniy elektroprivod tipovyih proizvodstvennyih mehanizmov i tehnologicheskikh kompleksov. Moscow: Akademiya. 2007. Print.

Поступила (received) 20.07.2015