

## ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТНЫМ КОМПЛЕКСОМ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

*Алексеева Ю.А., асс., Коренькова Т.В., к.т.н., доц., Конох И.С., ст. преп.  
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина  
E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

Разработана структура и алгоритм функционирования экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом при стабилизации технологического параметра. Проведен анализ режимов работы системы при переменном графике водопотребления.

**Ключевые слова:** экстремальная система управления, гидротранспортный комплекс, критерий оптимальности.

**Введение.** Вероятностный характер водопотребления требует непрерывных изменений в режиме работы насосных станций (НС) коммунального хозяйства. Эта задача решается с помощью систем автоматического управления (САУ) НС, реализующих требуемые технологические законы регулирования: стабилизацию давления, производительности или гидравлической мощности в системе подачи воды [1-4]. В большинстве случаев САУ НС направлена на поддержание заданного значения давления в диктующей точке (ДТ) сети [1, 2].

Для решения задач энергоресурсосбережения, повышения эффективности функционирования НС, САУ должна осуществлять минимизацию потерь мощности во всех звеньях технологической системы с учетом реальных режимов водопотребления и меняющихся эксплуатационных характеристик оборудования [5, 6].

В работах [5-8] предложена структура системы энергоуправления насосным комплексом (НК), позволяющая путем анализа режимов энергопотребления и перераспределения потерь мощности в гидротранспортном комплексе (ГТК) выбрать рациональный режим работы НС, оценить реальное техническое состояние элементов НК и принять решение о целесообразности дальнейшей эксплуатации технологического оборудования.

В общем случае, оптимальные САУ проектируются, исходя из требований обеспечения тех или иных показателей качества. В качестве критерия оптимальности в зависимости от цели управления могут быть выбраны различные технические или экономические показатели управляемого процесса. В оптимальных системах обеспечивается не просто некоторое повышение того или иного технико-экономического показателя качества, а достижение минимально или максимально возможного его значения [9-12].

Если критерий оптимальности выражает технико-экономические потери (ошибки системы, время переходного процесса, расход энергии, средств, стоимость и т. п.), то оптимальным будет такое управление, которое обеспечивает минимум критерия оптимальности. Если же он выражает рентабельность (к. п. д., производительность, прибыль и т. д.), то оптимальное управление должно обеспечить максимум критерия оптимальности [9].

Критерий оптимальности может характеризовать как один показатель качества системы управления, являющийся для нее основным, так и несколько показателей.

Чаще всего критерий оптимальности задается в виде интегрального квадратичного функционала от нескольких функций  $\varphi_i(t)$  [10]:

$$I = \int_0^T \sum_{i=1}^n g_i j_i^2(t) dt,$$

где  $g_i$  – заданные весовые коэффициенты.

Важной частью задачи оптимизации является определение назначения минимизируемого функционала качества, а также выбор весовых коэффициентов показателей, входящих в этот функционал, которые априори неизвестны. Эта часть проблемы не может целиком решаться формализованными методами. Она требует глубокого изучения управляемых процессов, обоснования главного назначения рассматриваемой системы [11].

В практике часто встречаются случаи, когда требуется определить экстремум функционала качества при условии, что другие функционалы должны иметь заданное значение. При решении классическим вариационным методом эта задача, известная под названием изопериметрической, сводится к задаче на условный экстремум [10].

Примером изопериметрической задачи может служить нахождение оптимальной диаграммы тока и скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения при ограничениях на нагрев. Ускорение и, следовательно, быстродействие двигателя пропорционально току якоря. Одновременно ток якоря связан с нагревом двигателя, на который при частных разгонах и торможениях накладываются определенные ограничения (например, электропривод реверсивных прокатных станков) [10].

**Цель работы.** Разработка структуры и алгоритма функционирования экстремальной САУ ГТК при стабилизации технологического параметра.

**Материал и результаты исследования.** Применительно к САУ ГТК, оптимизация ее работы базируется на технологической составляющей – минимуме рассогласования между требуемым и текущим значениями напора  $DH_{dt}$  и энергетической – минимуме суммарных потерь мощности  $DP$  [13, 14].

Тогда критерий оптимальности имеет вид:

$$I_{ob} = \int_0^t (\Delta H_{dt}(t) + K_p \Delta P(t)) dt \Rightarrow \min \quad (1)$$

где  $\Delta H_{dt}(t) = \frac{|H_{p.treb.}(t) - H_{p.tek.}(t)|}{H_{ns.nom.}(t)}$  – модуль относительного рассогласования по напору в ДТ сети;

$\Delta P(t) = \frac{|\Delta P_{\Sigma tek.}(t)|}{\Delta P_{\Sigma tek.}(t)}$  – модуль относительных суммарных потерь мощности в ГТК;  $K_p$  – весовой коэффициент по мощности;  $H_{p.treb.}(t)$ ,  $H_{p.tek.}(t)$  – требуемое и текущее значения напора в сети потребителя, соответственно;  $H_{ns.nom.}(t)$  – номинальное значение напора на выходе НС;

$DP_{Snom} = DP_{AD} + DP_{TM} + DP_{TP}$  – номинальные суммарные потери мощности НС;  $DP_{AD}$ ,  $DP_{TM}$ ,  $DP_{TP}$  – потери мощности в асинхронном двигателе, турбомеханизме, трубопроводе;  $DP_{Stek}$ ,  $DP_{Snom}$  – текущие и номинальные потери мощности НС соответственно.

Критерием оптимальности (1) выступает скалярная величина: чем меньше значение рассматриваемого критерия, тем лучше поведение системы. Вычисления выполняются на периоде времени, соответствующем одним суткам, в течение которых интегрируется сумма величин  $\Delta H_{dt}(t)$  и  $DP(t)$ .

Весовые коэффициенты при слагаемых в подынтегральном выражении (1) приняты на основе

анализа приоритетности решаемых задач в ГТК. Так как основным назначением НК является реализация требуемых технологических законов регулирования, то коэффициент при  $\Delta H_{dt}(t)$  имеет максимальный вес, равный единице. Решение задачи энергоресурсосбережения обеспечивается поддержанием минимального значения суммарных потерь мощности  $DP(t)$ , что является сопутствующей задачей при отработке требуемого технологического режима в соответствии с заданной точностью поддержания параметра. Поэтому весовой коэффициент по мощности принят равным  $K_p = 0.3$ .

Для определения оптимального значения управляющей величины  $u(t)$  (частота питающей сети  $f(t)$ ) при изменении условий работы ГТК достаточно использовать мгновенные значения критерия оптимальности:  $I(t) = \Delta H_{dt}(t) + K_p DP(t)$ .

Принципиально задача оптимизации (1) решается с помощью экстремальной системы автоматического управления, использующей принцип непосредственного измерения производной критерия оптимальности  $dI/du$  [9-12].

Структурная схема экстремальной САУ ГТК при стабилизации технологического параметра (рис. 1) построена на базе предложенной авторами модели ПЧ – АД – насос – гидросеть – потребитель, математическое описание которой приведено в [7, 8] и дополнительно содержит блок определения критерия оптимальности  $I = F(\Delta H_{dt}, DP)$  и логический блок, включающий процедуру поиска оптимального значения критерия качества, блок ограничения управляющего воздействия.

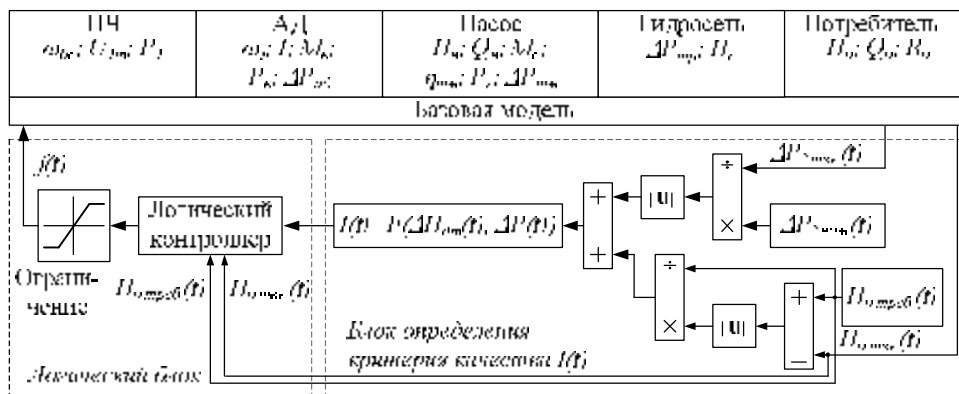


Рисунок 1 – Блок-схема математической модели экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом

Анализ энергетических режимов работы ГТК выполнен для водопроводной НС с параметрами:

– преобразователя частоты (пч):  $f_s = f_n = 50$  Гц;  $T_{пч} = 0,3$  с;  $k_{пч} = 1$ ;

– центробежного насоса:  $Q_n = 2000$  м<sup>3</sup>/с;  $H_n = 100$  м;  $P = 760$  кВт;  $n_n = 980$  об/мин;  $T_n = 0,106$  с;  $k_n = 1$ ;  $A_2 = 118$ ;  $B_2 = 20,384$ ;  $C_2 = -94,888$ ;

– асинхронного двигателя:  $P = 800$  кВт;  $J = 7,3$  кгм<sup>2</sup>;  $\omega_n = 103,254$  с<sup>-1</sup>;  $\beta = 2856$ ;  $T_e = 0,194$ ;

– трубопровода и потребителя:  $d = 0,8$  м;  $k_e = 2$  мм;  $T_c = 4$  с;  $H_c = 10$  м;  $R_c = R_n = 291,6$  с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;  $l = 20,28$ ;  $c = 4264$ ;  $r = 0,62$ ;

– модели водопотребления:  $K = 8847,21$ ;  $a_1 = 1228,5$ ;  $a_2 = 6,66$ ;  $a_3 = 99,78$ ;  $a_4 = 25,22$ ;  $a_5 = 9,92$ .

Обычно, в водопроводных ГТК стабилизация напора в ДТ гидросети должна осуществляться с точностью, лежащей в пределах (0,1÷5) % [1, 2].

Управляющим воздействием в САУ ГТК является частота питающей сети  $f(t)$  электропривода насосного агрегата (НА), а напряжение  $U(t)$ , подведенное к электродвигателю меняется в соответствии с выбранным законом частотного управления. Для механизмов с вентиляторным моментом нагрузки закон частотного управления имеет вид

$U/f^n = const$ , где  $n$  – показатель степени, зависящий от параметров трубопровода (статического напора, гидродинамического сопротивления) и турбомеханизма. В рассматриваемом случае  $n = 2$ .

Поиск оптимального значения  $f(t)$  производится в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 2, где  $f_{ini}$ ,  $df_{ini}$  – начальные значения частоты и приращения частоты  $f$ , соответственно;  $df$  – приращение частоты в процессе поиска экстремума;  $DI$ ,

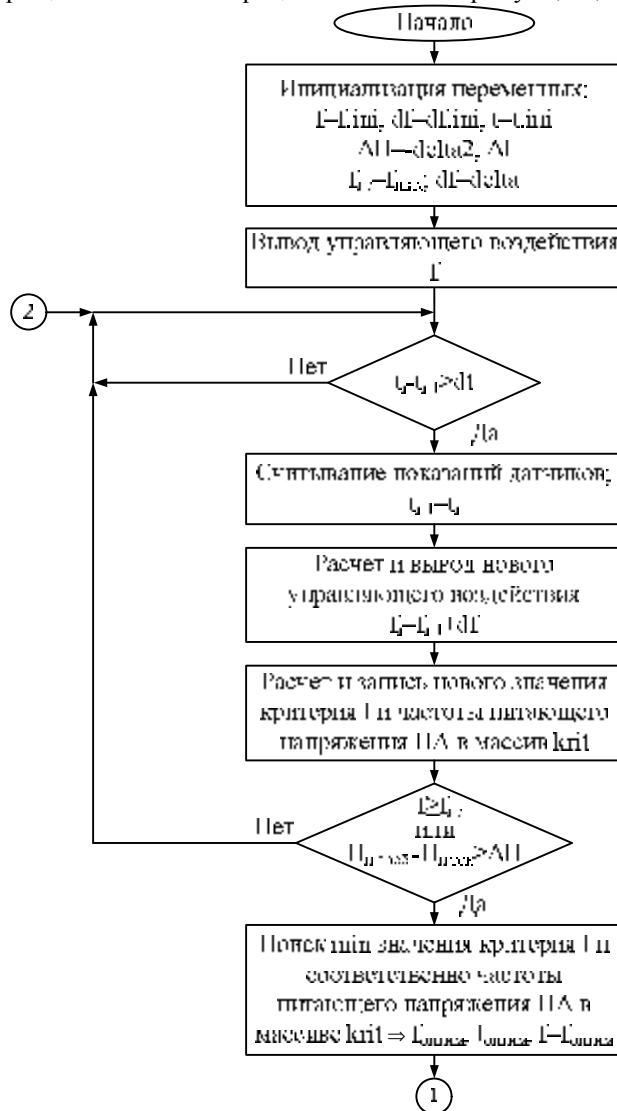
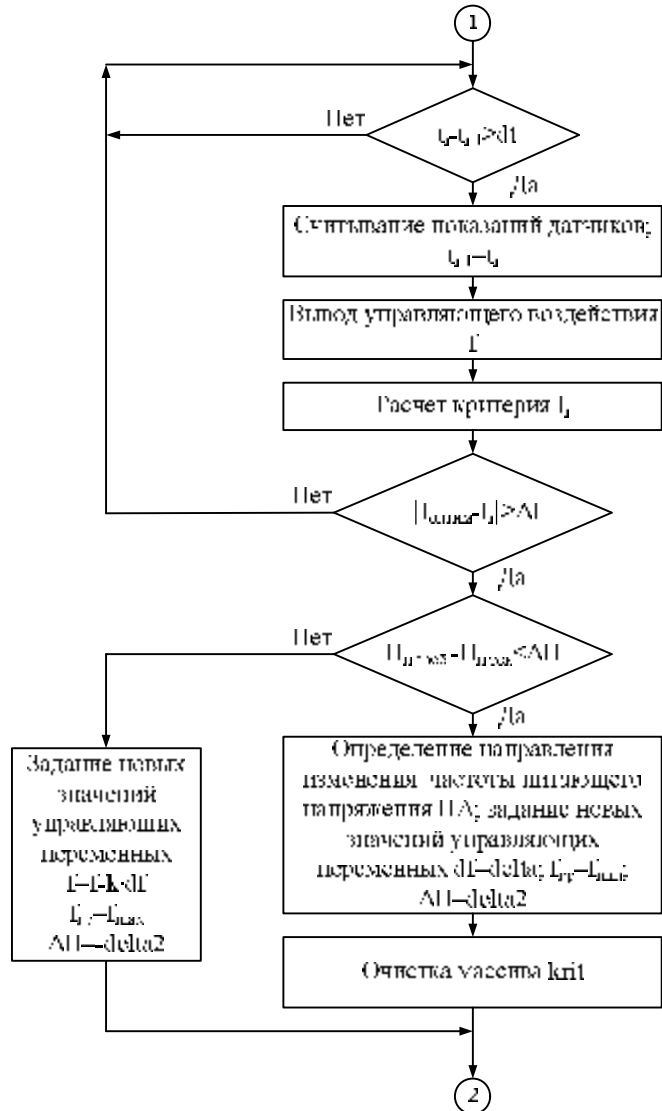


Рисунок 2 – Алгоритм функционирования экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом

Работа алгоритма поясняется графиками изменения относительных значений параметров экстремальной САУ ГТК при  $R_n = 10R_{нп}$  (рис. 3), где:  $H_{п.тек.} = H_{п.тек.}/H_{нс.ном.}$ ;  $H_{п.треб.} = H_{п.треб.}/H_{нс.ном.} = 0,3$  – текущее и требуемое значения напора в сети потребителя соответственно;  $f_{min} = 25$  Гц;  $f_{max} = 50$  Гц.

Отличительной особенностью алгоритма является последовательное приращение управляющего воздействия  $f$ , которое происходит до тех пор, пока частота  $f$  не достигнет граничного значения  $f_{gp}$  или рассогласование по напору не превысит заданной величины  $DH$ . На каждом шаге значения критерия  $I$  и частоты  $f$  сохраняются в массиве *krit* для дальней-

$DH$  – максимально допустимые отклонения критерия качества и напора, соответственно;  $delta$ ,  $delta2$  – константы, задающие знак и величину изменения частоты и напора на текущем этапе поиска, соответственно;  $t_i$ ,  $t_{i-1}$  – значения времени на текущем и предыдущем этапе оптимизации;  $f_{min}$ ,  $f_{max}$  – минимально и максимально допустимые значения частоты;  $dt$  – шаг изменения времени процесса оптимизации.



шей обработки. После достижения граничных значений из массива выбирается значение частоты  $f$ , соответствующее минимальному значению критерия оптимальности  $I$ . Этим объясняется увеличение значения критерия после прохождения точки минимума (рис. 3) на участке времени 25-35 с. Такой порядок работы САУ обеспечивает определение глобального экстремума критерия качества.

Новый поиск выполняется, когда текущее значение критерия  $I$  отклоняется от оптимального  $I_{opt}$  на величину  $DI$ . Направление изменения частоты  $f$  определяется знаком изменения критерия качества  $I$ ,

которое, в свою очередь, зависит от знака изменения напора.

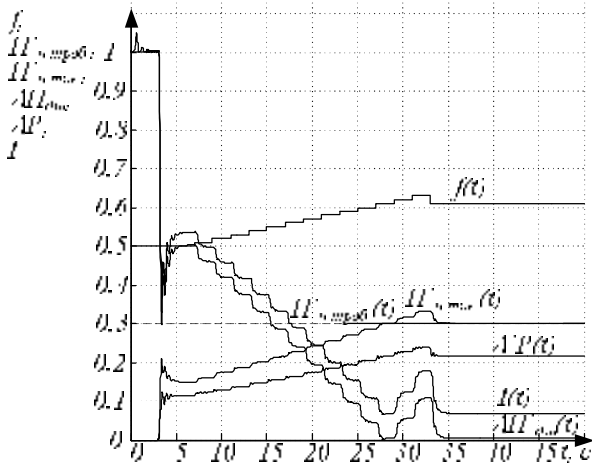


Рисунок 3 – Графики изменения относительных значений параметров экстремальной САУ ГТК при  $R_n = 10R_{nn}$

На рис. 4 приведены кривые изменения относительных значений параметров ГТК в замкнутой

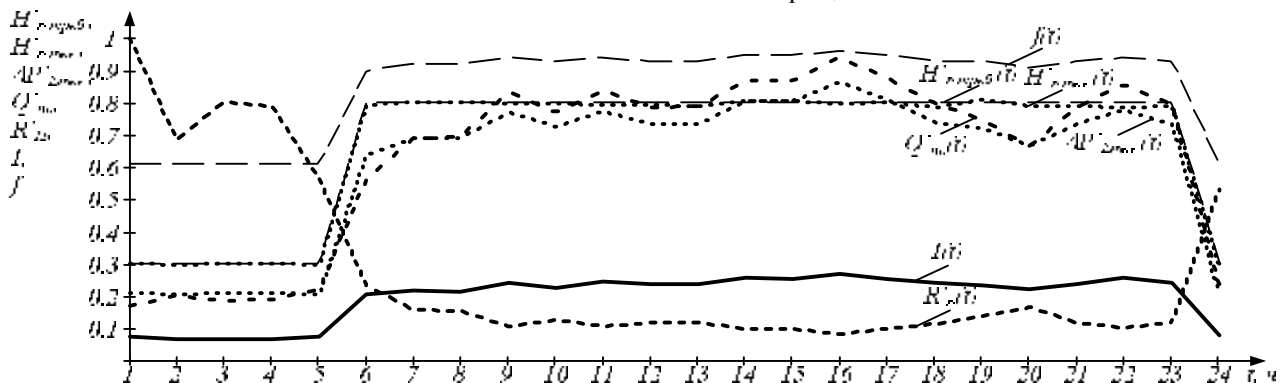


Рисунок 4 – Кривые изменения относительных значений параметров ГТК в замкнутой экстремальной САУ от времени при обработке суточного графика водопотребления  $Q(t)$

**Выводы.** Разработанная экстремальная система автоматического управления гидротранспортным комплексом позволяет осуществлять минимизацию потребляемой электроэнергии во всех звеньях технологического контура при стабилизации напора в диктующей точке гидросети. Управление энергетическими режимами насосной станции осуществляется путем поиска значения частоты питающего напряжения, соответствующего минимальному значению критерия качества.

Предложенная система позволяет достичь снижения энергопотребления гидротранспортным комплексом, продлить срок службы технологического оборудования.

экстремальной САУ от времени при обработке суточного графика водопотребления  $Q(t)$ , где:  $Q_{nc}^* = Q_{nc}/Q_n$  – производительность на выходе НС;  $DP_{Smek}^* = DP_{Smek}/DP_{Sn}$  – суммарные потери в ГТК;  $DP_{Sn} = 309 \text{ кВт}$ ;  $R_n^* = R_n/R_{n,max}$  – максимальное гидродинамическое сопротивление в сети потребителя;  $R_{n,max} = 3432,4 \text{ с}^2/\text{м}^2$ . В связи с изменением режима работы потребителя во времени в рассматриваемой САУ НК требуемому значению напора  $H_{n,mpob}^* = 0,8$  соответствует интервал времени с  $5^{00}$  до  $23^{00}$ , а значению  $H_{n,mpob}^* = 0,3$  – с  $23^{00}$  до  $5^{00}$ .

Переменный график водопотребления имитируется путем приложения возмущающего воздействия в сети потребителя:

$$R_n(t) = A_2 + B_2 Q(t) + C_2 Q(t)^2 - H_c^* Q(t)^2,$$

где  $Q(t) = K + a_1 p_{дт}(t) + a_2 K_q(t) + a_3 K_{дн}(t) + a_4 T(t) + a_5 p_0(t)$  – многофакторная регрессионная модель водопотребления;  $K$  – постоянный коэффициент модели;  $a_1 - a_5$  – коэффициенты регрессии;  $p_{дт}$  – давление в диктующей точке, атм;  $K_q$  – коэффициент часов суток;  $K_{дн}$  – коэффициент дня недели;  $T$  – температура воздуха, °C;  $p_0$  – атмосферное давление, мм. рт. ст. [15].

Анализ работы замкнутой экстремальной САУ ГТК с учетом реальных режимов водопотребления показал, что стабилизация напора в гидросети обеспечивается с точностью  $(0,2 \div 1,6\%) H_{n,mpob}^*$ , при этом минимизация потерь мощности во всех звеньях технологической системы осуществляется изменением частоты вращения НА.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б. С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Петросов В. А. Устойчивость водоснабжения / В. А. Петросов. – Харьков: Фактор, 2007. – 357 с.
3. Карелин В. Я. Насосы и насосные станции / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
4. Алексеева Ю. А. Энергетическая эффективность регулируемого насосного агрегата при стабилизации технологического параметра / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного

університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2007(44), ч. 2. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С.107-111.

5. Алексеева Ю. А. Система повышения эффективности насосного комплекса с энергонаблюдателем в контуре управления / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Проблемы автоматизованого електроприводу. Теорія й практика. Тематичний випуск науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» - Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 377-381.

6. Алексеева Ю. А. Принципы построения автоматизированной системы комплексного повышения эффективности насосных станций / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2009(56), ч. 1 – Кременчук: КДПУ, 2009. – С. 146-149.

7. Alekseeva J. Power forecast system in pumping complex in technological parameters regulating / J. Alekseeva, T. Korenkova // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського: Зб. наук. пр. КДУ. – Вип. 3/2010(62), ч. 1 – Кременчук: КДУ, 2010. – С. 108-111.

8. Алексеева Ю. А. Энергетические процессы в гидротранспортной системе с меняющимися эксплуатационными характеристиками насосного оборудования / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського: Зб. наук. пр. КДУ. – Вип. 3/2010(62), ч. 2 – Кременчук: КДУ, 2010. – С. 83-85.

9. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования – Киев: Вища школа, 1975. – 421 с.

10. Власов К. П. . Специальный курс по теории автоматического управления / К. П. Власов. – Харьков.: Политехнический институт им. В. И. Ленина, 1974. – 198 с.

11. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987.- 712 с.

12. Чаки Ф. Современная теории управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Ф. Чаки. – М.: Мир, 1975. – 422 с.

13. Алексеева Ю. А. Требования к построению системы энергоуправления насосным комплексом / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 2/2010 (10). – С. 17-22.

14. Iuliia Alieksieieva. The Structure And Algorithms Of The System Of Pumping Complex Power Control / Iuliia Alieksieieva, Tetyana Korenkova // Conference Archives РТЕТIS, Vol. 28, 2010. – P. 111-115.

15. Алексеева Ю. А. Модель водопотребления в системе энергоуправления насосным комплексом / Ю. А. Алексеева, Т. В. Коренькова, В. Н. Сидоренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3-4/2008 (4). – С. 54-58.

Стаття надійшла 02.12.2010 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.

## ЕКСТРЕМАЛЬНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГІДРОТРАНСПОРТНИМ КОМПЛЕКСОМ ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПАРАМЕТРУ

*Алексеева Ю.О., ас., Коренькова Т.В., к.т.н., доц., Конох І.С., ст. викл.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна  
E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

Розроблено структуру та алгоритм функціонування системи оптимального управління гідротранспортним комплексом при стабілізації технологічного параметра. Проведено аналіз режимів роботи системи при змінному графіку водоспоживання.

**Ключові слова:** екстремальна система управління, гідротранспортний комплекс, критерій оптимальності.

## EXTREMAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEM HYDROTRANSPORT COMPLEX AT STABILIZATION TECHNOLOGICAL PARAMETER

*Alekseeva J., ass., Korenkova T., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Konokh I., Sen. Lect.  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine  
E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

The structure and operation algorithm of optimal control system of hydrotransport complex in the stabilization technological variable have been developed. The analysis of the modes of the system with a variable schedule of water consumption has been conducted.

**Key words:** extremal control system, hydrotransport complex, optimality criterion.