

УДК 621. 62.004

## КОНЦЕПЦІЯ УПРАВЛЯЕМОСТІ ГИДРОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

*Коренькова Т.В., к.т.н., доц., Рожко В.Г., магістрант**Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского  
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20**E-mail: saue@polytech.poltava.ua.*

Виконаний аналіз режимів енергоспоживання в найпростішій лінійній системі і в системі з наявністю нелінійностей на базі моделі «нереверсивний перетворювач-двигун». Обґрунтовано розширене поняття керованості, яка визначається властивостями і характеристиками кожного із елементів, які входять до складу системи.

**Ключові слова:** електромеханічна система, керованість, миттєва потужність, насосна установка.

The modes of energy consumption are in-process analysed in the simplest linear system and in the system with the presence of nonlinearity on the base of model «unreversible transformer-engine». The concept of dirigibility, which is determined properties and descriptions each of elements which enter in the complement of the system, is grounded extended.

**Keywords:** electromechanics system, dirigibility, instantaneous power, pumping setting.

**Введение.** Современные насосные установки (НУ) и технологические комплексы на базе их представляют собой сложную электрогидравлическую систему взаимосвязанных между собой элементов: электропривода (ЭП), системы управления, технологического механизма, трубопроводной арматуры, сети потребителя [1, 2]. До сих пор при анализе процессов в гидротранспортных комплексах (ГТК), в особенности в неустановившихся режимах, явления, происходящие в отдельных его элементах и системах, рассматривались изолировано друг от друга: в системе электроснабжения электропривода насосных установок, непосредственно в самой системе электропривода, в главном технологическом механизме – насосе, в гидравлической сети. Параметры, характеризующие работу элементов гидротранспортного комплекса, представляют собой сложные нелинейные зависимости. Именно по этой причине исследование процессов в гидротранспортной системе может быть выполнено только с использованием подходов, учитывающих свойства систем электропривода, насоса и гидравлической сети.

Гидротранспортные системы работают в условиях воздействия различного рода факторов: управляющих, возмущающих и задающих воздействий, изменяющихся в процессе работы, и возникающих как в нормальных (эксплуатационных), так и в штатных (аварийных) ситуациях. В связи с этим, для повышения качества функционирования электротехнического комплекса с турбомеханизмами весьма важно знать, обладает ли объект свойством управляемости или нет [3, 4].

Любая электромеханическая система (ЭМС), включающая преобразователь энергии, электрический двигатель, технологический механизм, характеризуется рядом электрических, энергетических и механических параметров: напряжения, тока, мощности, частоты вращения и момента; производи-

тельности и давления технологического механизма, и др.

Применительно к гидротранспортной установке к управляющим элементам относятся запорная арматура, преобразователи частоты; к управляемым – насосная установка, гидродинамическая сеть, связанные понятием управляемости системы и находящиеся во взаимодействии друг с другом. Повышение управляемости в этом случае важно в следующих направлениях: при контроле и управлении давлением и производительностью в гидросистеме, при оптимизации энергетических режимов работы турбомеханизмов, при управлении процессами, протекающими в ходе развития последствий аварийного отключения насосов, резкого закрытия клапанов, и др. В последнем случае снижение послеаварийных последствий может быть достигнуто за счет использования имеющихся или создаваемых управляющих технических средств, как самого электропривода, так и элементов коммуникационной сети, что непосредственно связано с управлением энергопроцессами и формированием соответствующих воздействий на объекты гидротранспортной системы. Так, при внезапном отключении электроэнергии, приводящем к возможному реверсу жидкости и частоты вращения насосов, система электропривода должна обладать свойствами преобразования гидравлической энергии в электрическую – управляя тормозными режимами системы электропривода можно добиться снижения динамических нагрузок в трубопроводной системе. Однако, это зависит от целого ряда факторов: характеристик насосных агрегатов, свойств и параметров гидродинамической сети, характеристик трубопроводной арматуры и т.п. Таким образом, управляемость ЭМС непосредственно связана с процессом потребления (генерации) энергии.

**Цель работы** – обоснование концепции управляемости гидротранспортного комплекса.

**Матеріал и результати дослідження.** Структурна схема ГТК представлена на рис. 1. Виконаний раніше аналіз показав, що основною причиною, визначає надійність и работоспособність комплексу, ефективність його функціонування, являється відсутність інформації, методів и засобів використання її для удосконалення технологічних характеристик роботи обладнання.

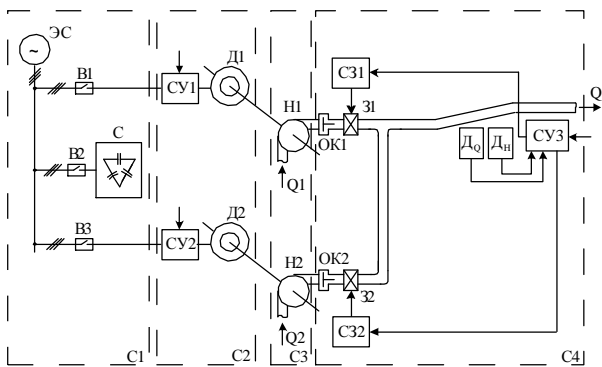


Рисунок 1 – Блок-схема гідротранспортного комплексу:

С1 – система електропостачання; С2 – система електропривода; С3 – технологічний механізм (насос); С4 – гідродинамічна мережа; ЭС - енергосистема; В1-В3 – автоматичні вимикачі; С – конденсатори; СУ1, СУ2 – системи управління електродвигачами; Д1, Д2 – електродвигачі; Н1, Н2 – насоси; ОК1, ОК2 – обратні клапани; З1, З2 – регулювальні задвижки; СЗ1, СЗ2 – системи управління задвижками; Д<sub>0</sub>, Д<sub>н</sub> – датчики витрати и тиску

Система електропостачання С1, зв'язана з енергосистемою ЭС, включає розподільчу апаратуру, конденсатори С. Найбільш небажаний режим електропостачання спостерігається при аварії в енергосистемі, що призводить до втрати напруги в живлячих ланках обох двигачів. Аварійне відключення, зв'язане з втратою напруги, являється достатньо рідким явищем, но наслідки його найбільш відчутні в плані економічних втрат, які включають:

- втрати з-за порушення технологічного циклу подачі води;
- втрати від відключення двигача и наступного його включення; цей процес зв'язан з інтенсивним зниженням ресурсу работоспособності ізоляції и подшипників двигача и насоса;
- раптове відключення двигача, як правило, призводить до спрацювання засобів гідрозахисту (обратного клапана), при швидкому схлопуванні якого відбувається різке підвищення тиску в трубопроводі – гідравлічний удар, наслідками якого являються пориви труб, срыв запорно-захисної арматури и др.

Розглянуті явища особливо небажані в зв'язі з зношеністю обладнання насосних

станцій, що спостерігається практично повсюдно в вітчизняній практиці. Крім того, втрата напруги, починаючи з моменту відключення автоматичних вимикачів В1 и В2, призводить до повної втрати управляємості не тільки основного силового електротехнічного обладнання, но и допоміжного – систем управління задвижками и т.п. В системах регульованого електропривода в перетворювальних пристроях встановлюються потужні ємнісні фільтри, здатні запасати значуще кількість енергії. Тому, при аварійних відключеннях запасена енергія, як правило, не використовується для того или іншого удосконалення управляємості системи в цілому.

В системах електропривода С2 насосних агрегатів (рис. 1) перетворення енергії, як правило, здійснюється в одному напрямку: енергія, споживана з боку мережі, перетворюється в механічну и поступає на вал технологічного механізму – насоса. Інші режими роботи двигачів, так звані гальмівні режими, не використовуються в практичних цілях, в частині для управління процесами при раптовому зникненні напруги.

Третій елемент системи С3 (рис. 1) - насос - розглядається достатньо спрощено з використанням математичного апарату для опису статических напорно-витратних характеристик. Динамічні властивості насоса представляються зв'язаними з статическими в основному для насосного режиму насоса, який, являється лише частиною можливих режимів. Однак, для насосного обладнання характерні режими, аналогічні електричним машинам, – їх обратність при зміні знака гідравлічної потужності. Урахування цього фактора в практичних цілях дозволить вирішити багато завдань, зв'язаних з збільшенням локальних или інтегрованих показувачів управляємості всього ГТК.

Обратні клапани ОК1, ОК2 - пристрої, перекривають трубопровід в тому випадку, коли продуктивність насоса змінює свій знак. При цьому гідравлічне опір клапана змінюється від мінімального до максимального в закритому стані, що дозволяє вирішити одну з завдань принципового характеру – локалізацію перевищення тиску, т.е. здійснити управління елементами технологічного комплексу в процесі розвитку аварії. Задвижки З1, З2 в системі забезпечують закриття каналу гідросистеми и виконують роль пасивного регулюючого органу при необхідності зниження продуктивності насосного агрегату. Управління задвижкою здійснюється з використанням виконавчого механізму, а в окремих випадках вручну. Швидкість виконавчого механізму невелика и, як правило, можливості запорно-регульованої апаратури типу управляємих задвижок не використовуються для управління процесом зниження динамічних перепадів тиску при аварійному відключенні елек-

трических двигателей. При решении задачи повышения управляемости ГТК в аварийных режимах необходимо снижать быстродействие обратных клапанов и увеличивать его применительно к задвижкам. В этой связи приобретает принципиальную возможность регулирование скорости закрывания задвижки с целью создания воздействий для демпфирования гидроударных волн.

В четвертую систему С4 (рис. 1) входит гидротранспортный трубопровод, с помощью которого осуществляется подача воды потребителям. В настоящее время неустановившиеся процессы в гидросети исследуются с использованием аппарата телеграфных уравнений, который как показывает анализ, дает хорошие результаты в пневмосетях. В гидравлических сетях происходят процессы, которые не имеют места в пневмосистемах. Это, прежде всего, несжимаемость воды. При этом наблюдается явление растворения газа (кислорода) в воде или его выделение в зависимости от давления воды и температуры. Появление пузырьков газа и последующее их схлопывание связано с фактическим изменением внутреннего объема, эквивалентного в некотором отношении явлению сжимаемости. Указанный процесс носит периодический характер, зависит от давления воды и ее температуры. Период колебаний давления на выходе при постоянной температуре и давлении пропорционален количеству воды, проходящей по трубопроводу в единицу времени. Более сложные условия (меняющиеся давление и температура) приводят к сложным зависимостям количества образования пузырьков в единицу времени и их схлопывания. Анализ этого вопроса заслуживает особого внимания и соответствующего исследования.

Резюмируя сказанное, можно сделать следующие выводы:

- в системах управления ГТК в силу специфических характеристик приводов, насосов, водоводов, защитной аппаратуры отсутствует однозначное соответствие между управляющими сигналами и выходными параметрами;
- в аварийных ситуациях в ГТК отсутствует единая система защит, нет теоретических исследований и, соответственно, технических решений по управлению аварийными процессами с использованием регулировочных свойств элементов, входящих в ГТК.

Снижение управляемости ГТК, как правило, происходит из-за определенного сочетания характеристик оборудования, чаще всего из-за наличия зон нечувствительности, различного рода нелинейностей и др. При исследовании управляемости ЭМС необходимо знать энергетические параметры в идеальной системе (при отсутствии наиболее характер-

ных нелинейностей) и уметь определять режим энергопотребления в системе с теми-же параметрами при наличии нелинейностей, отражающих специфику работы технологического механизма. Сравнимая процессы потребления энергии в обоих анализируемых случаях, производится оценка управляемости системы. При этом управляющие воздействия в идеальной и нелинейной системах должны быть одинаковы по амплитуде постоянной составляющей, а также по амплитуде и частоте переменной составляющей.

Для анализа энергетических режимов ГТК использован аппарат мгновенной мощности, позволяющий исследовать энергопроцессы и решать задачи идентификации параметров различных электротехнических, электромеханических и другого рода устройств [5].

Исследования, выполненные в работе, приведены для ряда случаев:

- для идеальной (линейной) электромеханической системы насосной установки, работающей на трубопроводную сеть;
- для нелинейной системы «неревверсивный преобразователь – двигатель – насосная установка – гидросеть» с учетом нелинейного характера изменения сопротивления якорной цепи, магнитного потока, нелинейных свойств насосного агрегата и гидросети.

Структурная схема моделируемой системы приведена на рис. 2, где сплошными линиями показана модель идеальной (линейной) системы, пунктирными - вводимые нелинейности.

В простейшем случае, для анализа режимов энергопотребления асинхронный электропривод насосной установки представлен линеаризованной моделью двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Математическая модель электрического двигателя представлена известными из [6] дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{я}} &= k\phi\omega + I_{\text{я}}R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}; \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} &= k\phi I - M_{\text{с}}; \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{я}}$  - номинальное напряжение на обмотке якоря;  $k\phi$  - магнитный поток;  $\omega$  - угловая скорость вращения;  $I_{\text{я}}$  - ток якоря;  $R_{\Sigma}$  - суммарное сопротивление;  $L_{\Sigma}$  - суммарная индуктивность;  $J_{\Sigma} = 3J_{\text{д}}$  - суммарный момент инерции ЭМС;  $J_{\text{д}}$  - момент инерции двигателя;  $M_{\text{с}}$  - момент статический.



где  $H_0$  - напор, развиваемый насосом при нулевой подаче;  $R_b$  - внутреннее сопротивление насоса;  $Q_H(t)$  - подача насоса;  $v(t) = \omega(t)/\omega_H(t)$  - относительная частота вращения рабочего колеса насоса.

Для учета инерционности процессов, происходящих в насосном агрегате, введем дифференциальное уравнение вида:

$$T_H \frac{dH_H(t)}{dt} + H_H(t) = k \cdot Q_H(t), \quad (8)$$

где  $T_H$  - постоянная времени насоса;  $k = Q_{max}/H_{max}$  - коэффициент передачи насоса.

Гидравлическая мощность на выходе насоса:

$$P_{\Gamma}(t) = H_H(t) \cdot Q_H(t) \cdot \rho \cdot g, \quad (9)$$

где  $\rho$  - плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

Тогда, момент сопротивления, создаваемый насосом:

$$M_C(t) = P_{\Gamma}(t)/\eta_H \cdot \omega(t), \quad (10)$$

где  $\eta_H = 0,75$  - коэффициент полезного действия насоса.

Коммуникационная сеть представлена совокупностью  $i$ -тых участков трубопровода, каждый из которых характеризуется своей длиной, диаметром, геодезическим перепадом, установленной регулировочной арматурой.

Математическое описание  $i$ -го участка сети имеет вид [7]:

$$W_{i1}(t) = \frac{Q_i(t)}{H_i(t) - \Delta H_i(t) - \Delta H_{i+1}(t)} = \frac{k_i}{T_i \cdot p + 1};$$

$$W_{i2}(t) = \frac{\Delta H_i(t)}{Q_i(t) - Q_{OCi}(t)} = \frac{C_i}{p}; \quad (11)$$

$$W_{i3} = \frac{Q_{OCi}^2(t)}{\Delta H_i(t)} = R_{ci}(t),$$

где  $\Delta H_i(t)$ ,  $\Delta H_{i+1}(t)$  - потери напора на рассматриваемом и последующих участках гидросети, соответственно;  $C_i = \frac{W_{Ti}}{Q_i} = \frac{\pi \cdot d_{Tpi}^2 \cdot l_i}{4 \cdot Q_i}$  - постоянная времени

заполнения трубопровода жидкостью (для трубопровода круглого сечения);  $Q_i(t)$  - производительность в  $i$ -ом участке трубопровода;  $R_{ci}$  - гидравлическое сопротивление трубопровода, определяется выражением (3);  $W_{Ti}$  - объем  $i$ -го участка гидросети;  $d_{Tpi}$  - диаметр  $i$ -го участка трубопровода;  $\Delta H_{\Sigma}(t) = \Delta H_1(t) + \Delta H_2(t) + H_{CT}(t)$  - суммарные потери напора во всей гидросети;  $H_2(t) = H_1(t) - \Delta H_1(t)$  - напор на входе во второй участок трубопровода.

Часто при аварийных режимах в ГТК происходит реверс потока жидкости, который возможно предотвратить с помощью обратного клапана. При установке в напорном патрубке НА обратного клапана должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} & \text{- при } H_{рабi}(t) > 0, \quad Q_{НАСi}(t) = \frac{H_{рабi}(t) \cdot k_{Hi}}{T_{Hi} \cdot p + 1}; \\ & \text{- при } H_{рабi}(t) \leq 0, \quad Q_{НАС}(t) = 0. \end{aligned}$$

Задающее воздействие, подаваемое на вход системы, имеет полигармонический характер:

$$U(t) = U_0 + U_{km} \sin k\Omega t, \quad (12)$$

где  $U_0$  - постоянная составляющая (нулевая гармоника);  $U_{km}$  - амплитудное значение напряжения  $k$ -й гармоники;  $\Omega = 2\pi f$  - угловая частота переменной составляющей напряжения.

Параметры моделируемой системы:

- электродвигатель -  $P_H = 75$  кВт;  $U_H = 220$  В;

$I_H = 340,9$  А;  $n_0 = 1500$  об/мин;

- насоса -  $P_H = 75$  кВт;  $Q_H = 0.1$  м<sup>3</sup>/с;

$H_H = 46$  м;  $n_H = 1450$  об/мин;  $\eta_H = 75\%$ ;

- гидравлической сети -  $d = 0.4$  м;  $l = 150$  м.

Спектры мощности источника питания, гидравлической мощности насоса и трубопроводной сети при задающем напряжении вида  $U(t) = 5 + 5 \sin \Omega t$ ,

где  $\Omega = 12.56 \text{с}^{-1}$ , приведены на рис. 4. Получено, что кривая мгновенной мощности источника питания в линейной системе имеет четко определенный спектр - 1, 2 и 3 гармоники, причем амплитудное значение первой гармоники в 1,8 раз больше нулевой и в 2 раза больше второй. Аналогичная ситуация наблюдается и в спектрах гидравлических мощностей насоса и трубопроводной сети.

При введении нелинейностей в якорную цепь и обмотку возбуждения электропривода насосной установки в спектре мощности источника питания появляются высшие гармонические -  $k = 0...10$ , причем амплитудные значения основных гармоник уменьшаются приблизительно в 10 раз. Таким образом, нелинейные свойства элементов системы оказывают существенное влияние на энергетические процессы, протекающие в ней, следствием чего, является снижение управляемости системы. В результате исследований получено, что при снижении амплитуды переменной составляющей напряжения, спектр мгновенной мощности ЭМС приближается к виду спектра в идеальной системе - амплитудные значения высших гармоник значительно снижаются.

Влияние частоты подаваемого сигнала напряжения на энергетические процессы, происходящие в системе, отображает рис. 5.

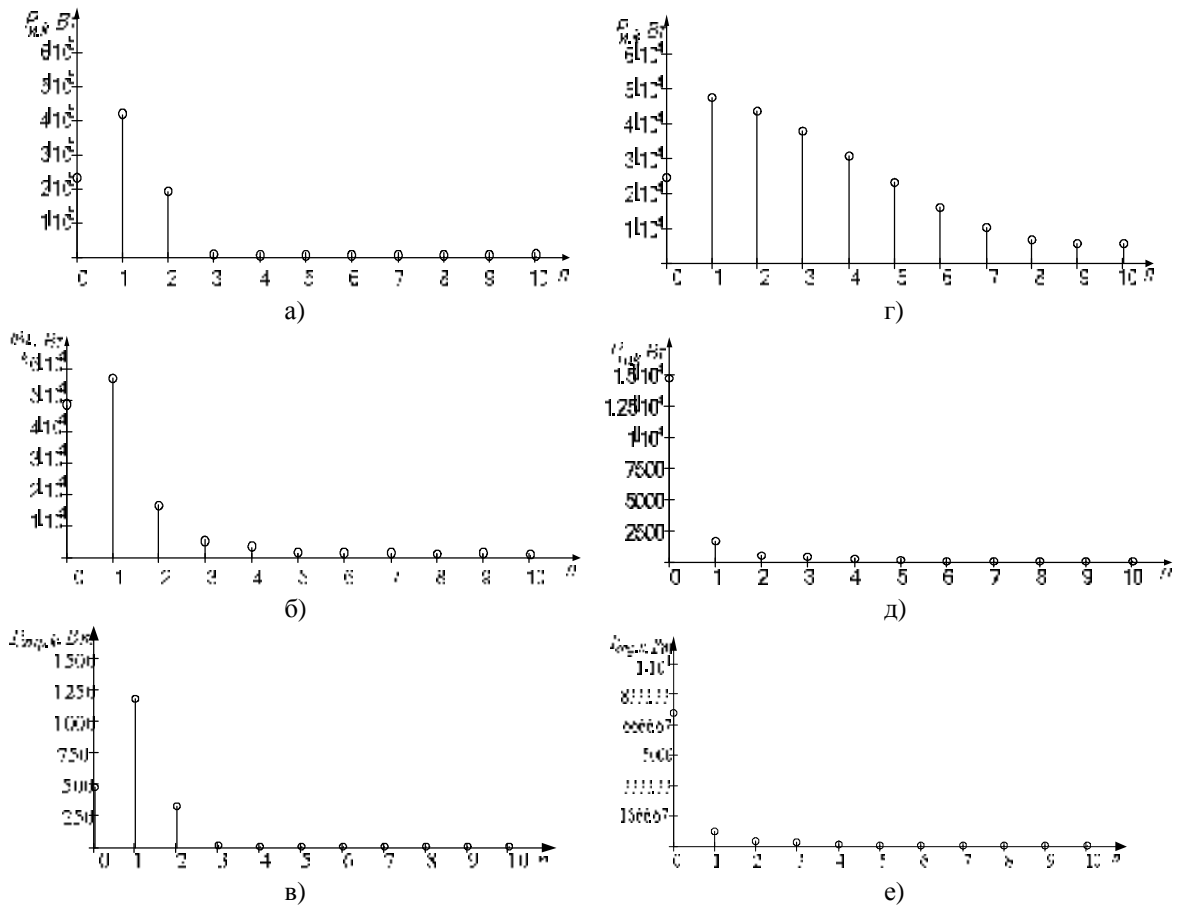


Рисунок 4 – Спектры мощности источника питания, гидравлической мощности насоса и гидравлической мощности трубопроводной сети в идеальной системе (а, б, в) и в системе «неревверсивный преобразователь – двигатель – насосная установка – трубопроводная сеть» (г, д, е)

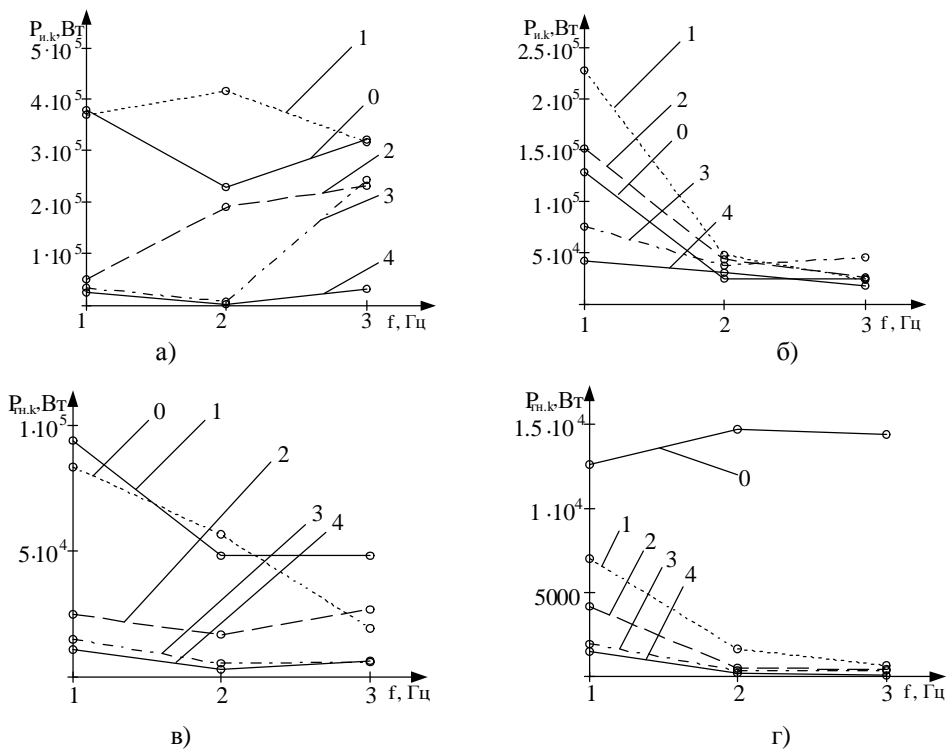


Рисунок 5 – Кривые зависимости значений амплитуд гармоник мощности источника питания и гидравлической мощности насоса от изменения частоты подаваемого сигнала напряжения в линейной системе (а, б) и в системе «неревверсивный преобразователь–двигатель–насосная установка–трубопроводная сеть» (в, г)

Введение третьей составляющей в сигнал подаваемого напряжения  $U(t) = 5 + 5 \sin \Omega t + 5 \sin 3\Omega t$  приводит к более явному проявлению высших гармонических в спектрах мгновенной мощности (рис. 5). В нелинейной системе в кривой мощности источника питания просматривается увеличение амплитуд всех гармоник в 1,2 раза; в гидравлических мощностях насоса и трубопроводной сети наблюдается незначительное их уменьшение.

Анализ спектров мощностей для ГТК с обратным клапаном в трубопроводной сети, приведенных на рис. 7, 8, показал, что при срабатывании клапана, препятствующего противотоку жидкости через насосный агрегат при возникновении той или иной аварийной ситуации, появляются высшие гармоники в спектрах гидравлических мощностей насоса и трубопровода.

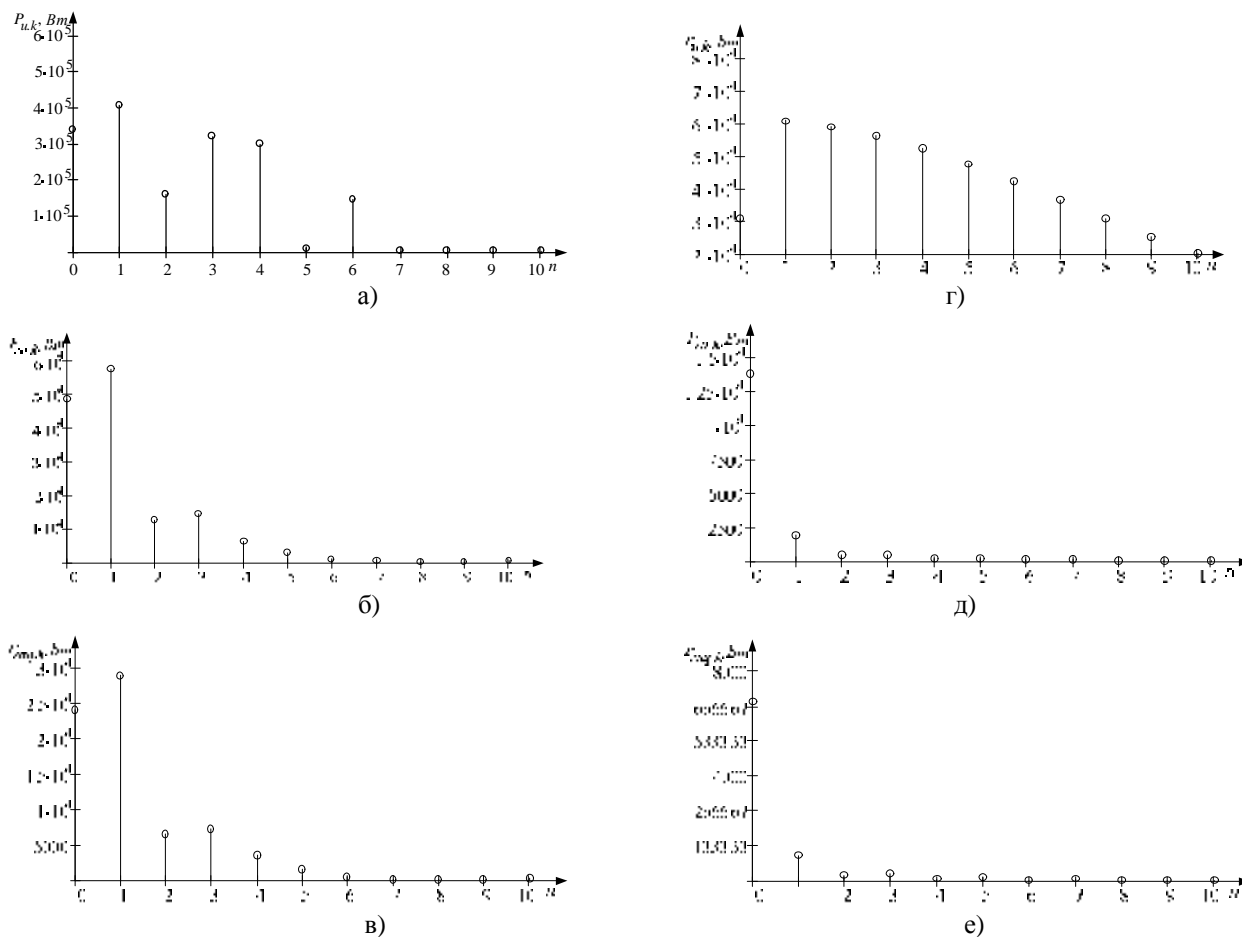


Рисунок 6 – Спектры мощностей источника питания, гидравлической насоса и трубопроводной сети в идеальной системе (а, б, в) и в системе «неревверсивный преобразователь – двигатель –насосная установка – трубопроводная сеть» (г, д, е) при напряжении вида  $U(t) = 5 + 5 \sin \Omega t + 5 \sin 3\Omega t$

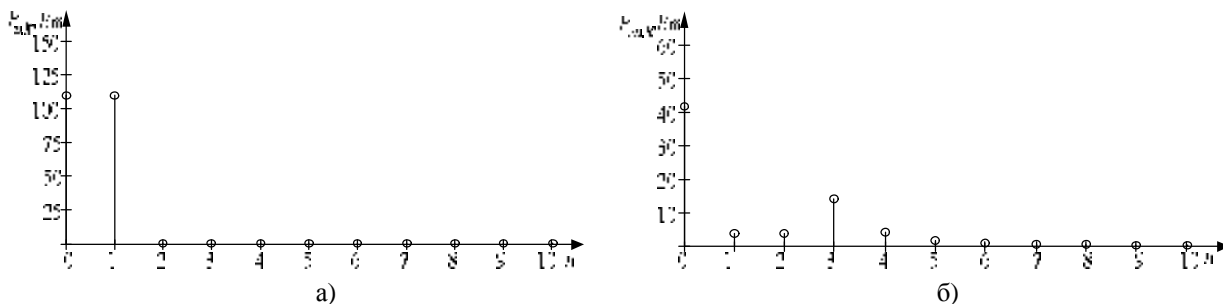


Рисунок 7 – Спектр мощности источника питания а) и гидравлической мощности насоса б) в нелинейной системе с обратным клапаном в трубопроводной сети

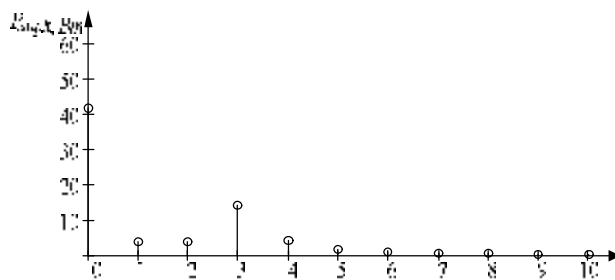


Рисунок 8 – Спектр гидравлической мощности в трубопроводной сети в нелинейной системе с обратным клапаном

**Выводы.** Полученные результаты позволяют расширить понятие управляемости технологического комплекса - свойство реагирования объекта на управляющие, возмущающие и задающие воздействия в технологических и аварийных режимах, направленное на повышение энергоэффективности, экономичности и надежности работы гидротранспортной системы.

Управляемость технологической установки определяется свойствами и характеристиками каждого из элементов, входящего в структуру системы.

В основе оценки управляемости ЭМС лежит анализ процессов преобразования мощности во всех звеньях технологической цепи. Использование аппарата мгновенной мощности при анализе управляемости позволяет исследовать энергопроцессы в электрических, механических и гидравлических узлах ЭМС.

В работе показано, что снижение управляемости ЭМС гидротранспортного комплекса сопровождается энергетическими процессами с высшими гармоническими в спектрах мощностей, амплитуду которых можно изменять управляющими и задающими воздействиями определенного вида. Указанный подход может быть применен для анализа сигналов напора и расхода на выходе насосной установки и в трубопроводной сети с целью определения ограничений допустимыми значениями при возникновении аварийных ситуаций, связанных с внезапным отключением электроэнергии, гидравлическими ударами и т.п. В системе управления электроприводом насосного комплекса такие защитные функции могут быть реализованы формированием обратных связей по скорости нарастания технологических параметров системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. -360с.
2. Карелин В.Я., Новодережкин Р.А. Насосные станции с центробежными насосами. – М.: Стройиздат, 1983. – 224с.
3. Коренькова Т.В. Управляемость как категория технического совершенства и технологического соответствия электромеханических систем гидротранспортных комплексов / Научно-прикладный журнал «технічна електродинаміка». Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 7 Київ 2006. – С. 49 – 52.
4. Коренькова Т.В. О проблеме повышения качества функционирования гидротранспортных систем / Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – Вип. 45/2005. – С. 328-331.
5. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004. – Вип.15. – С. 10-18.
6. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. та ін. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. -376с.
7. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Особенности моделей водопроводных насосных комплексов / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету; Зб. наук. пр. КДПУ. –Вип. 4(44). – Кременчук: КДПУ, 2007. -С. 143-147.

Стаття надійшла 18.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.