

УДК 621.64:621.3:537

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ РАЗВИТИИ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Т. В. Коренькова, А. А. Сердюк, В. Г. Ковальчук

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: viktoria_kovalc@mail.ru

Показано влияние кавитационных процессов в трубопроводе на энергетические режимы электрогидравлического комплекса. Доказано, что развитие кавитационных автоколебаний в системе приводит к росту потерь гидравлической мощности на трение жидкости, увеличению переменной составляющей мощности, снижению энергоэффективности всей электротехнической системы. Предложен метод анализа процессов энергопреобразования в энергетическом канале электрогидравлического комплекса, базирующийся на представлении мощности в виде суммы гармонических составляющих, полученных в результате произведения ортогональных компонент сигналов напряжений и токов, напоров и расходов. Показана возможность оценки энергоэффективности электрогидравлической системы путем определения коэффициента пропускной способности энергетического канала и коэффициента энергоуправляемости, в основе которых лежит среднеквадратичная оценка сигналов электрической и гидравлической мощности. Выполнен анализ процессов энергопреобразования на базе физической модели электрогидравлического комплекса при развитии нелинейных процессов в трубопроводной сети. Получены кривые изменения показателей энергоэффективности электрогидравлического комплекса от степени развития нелинейных процессов в гидросистеме.

Ключевые слова: электрогидравлический комплекс, кавитационные автоколебания, энергетические процессы, гидравлическая мощность, энергоуправляемость, пропускная способность энергетического канала.

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ РОЗВИТКУ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРУБОПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ

Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: viktoria_kovalc@mail.ru

Показано вплив кавітаційних процесів у трубопроводі на енергетичні режими електрогидравлічного комплексу. Доведено, що розвиток кавітаційних автоколивань у системі призводить до росту втрат гідравлічної потужності на тертя рідини, збільшенню змінної складової потужності, зниження енергоефективності всієї електротехнічної системи. Запропоновано метод аналізу процесів енергоперетворення в енергетичному каналі електрогидравлічного комплексу, який базується на поданні потужності у вигляді суми компонент сигналів напруг та струмів, напорів та витрат. Показано можливість оцінки енергоефективності електрогидравлічної системи шляхом визначення коефіцієнта пропускної здатності енергетичного каналу та коефіцієнта енергокерованості, в основі яких лежить середньоквадратична оцінка сигналів електричної та гідравлічної потужності. Виконано аналіз процесів енергоперетворення на базі фізичної моделі електрогидравлічного комплексу при розвитку нелінійних процесів у трубопроводній мережі. Отримано криві зміни показників енергоефективності електрогидравлічного комплексу від ступеня розвитку нелінійних процесів у гідросистемі.

Ключові слова: електрогидравлічний комплекс, кавітаційні автоколивання, енергетичні процеси, гідравлічна потужність, енергокерованість, пропускна здатність енергетичного каналу.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время насосные агрегаты и комплексы на базе их являются машинами массового применения, которые широко используются во многих областях хозяйственной деятельности страны. Электрогидравлические комплексы (ЭГК) самого разнообразного назначения являются важнейшими объектами жизнеобеспечения человека, его хозяйственной и производственной деятельности. Несмотря на важность этих объектов, им уделяется мало внимания в части их совершенствования, снижения энергетических затрат и т.п.

ЭГК характеризуются низкой управляемостью режимами работы технологического оборудования при возникновении различного рода неустойчивых процессов, а существующие подходы управления насосным и трубопроводным оборудованием в таких режимах решают лишь локальные задачи.

Так, в насосных установках (НУ) из-за кавитации могут возникать автоколебания давления, при которых движение перекачиваемой среды будет нестационарным [1–8]. Вследствие этого нарушается сплошность потока жидкости, происходит рост гидравлических сопротивлений, увеличиваются потери гидравлической мощности на трение в трубопроводе.

Одним из путей обеспечения кавитационной защиты гидравлического оборудования является использование средств частотно-регулируемого электропривода (ЭП), достаточно широко внедряемого в последнее время в НУ водо- и теплоснабжения для регулирования технологических параметров. Изменение частоты вращения насоса позволяет контролировать появление зон с пониженным давлением, в результате образования которых в перекачиваемой жидкости происходит образование кавитационных каверн. Последнее, в свою очередь, приводит к изме-

нению параметров энергорежима ЭГК, характеризующегося появлением переменных составляющих в сигналах напора $H(t)$, расхода $Q(t)$ и гидравлической мощности $p_h(t) = \rho g H(t) Q(t)$, что приводит к снижению энергоэффективности и надежности работы используемого оборудования, где ρ – плотность жидкости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Поэтому в основе повышения энергоуправляемости ЭГК должны лежать вопросы контроля, оценки и управления энергообменными процессами, возникающими в гидросистеме при срабатывании элементов с нелинейными характеристиками, развитии кавитационных автоколебаний и т.п.

Целью работы является анализ процессов преобразования энергии в силовом канале ЭГК и оценка энергоэффективности гидротранспортной системы при возникновении кавитационных процессов в трубопроводной сети.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

А. Метод анализа процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе

Каждый из i -х элементов энергетического канала электромеханического комплекса (ЭМК) характеризуется параметрами энергетического режима $u_i(t)$ и $i_i(t)$, причем это не обязательно напряжение и ток, а величины, описывающие физический процесс преобразования энергии, произведение которых дает мощность $p_i(t) = u_i(t) i_i(t)$. Определив $p_i(t)$ для отдельных элементов, можно судить о картине преобразования энергии системы в целом. Отмеченный подход предоставляет возможность анализа энергопроцессов как в электрических, так и иного рода системах: механических, электромеханических, гидравлических и т.п., где исходные сигналы, формирующие мощность, могут иметь сложный характер изменения во времени.

Подтверждением сказанному являются ЭГК. В процессе функционирования в энергетическом канале ЭГК возникают разнообразные энергетические режимы, которые количественно характеризуются набором электрических (напряжением, током), энергетических (мощностью, потерями мощности, КПД) и механических параметров (частотой вращения и моментом), а также технологических показателей (производительностью и давлением). Энергетические переменные: электрическая $p_{el}(t)$ мощность, механическая $p_{mech}(t)$, гидравлическая $p_h(t)$ дают конкретную характеристику протекающего процесса преобразования энергии и позволяют выполнить оценку эффективности процессов энергопреобразования в ЭГК.

При возникновении различного рода нештатных ситуаций: пульсациях давления в трубопроводной системе, кавитационных процессах, гидравлических ударах и т.п. энергопроцессы в ЭГК носят характер периодических установившихся колебаний мощности на анализируемом интервале времени.

В этих условиях является оправданным синтез временной функции мощности (электрической, гидравлической) гармоническим рядом, параметры которого рассчитываются на периоде повторяемости сигнала [9]. Учитывая достаточную инерционность физических процессов, происходящих в ЭГК, является очевидным, что представление мощности в виде суммы гармонических составляющих однозначно описывает энергетические процессы в системе. При этом гармонические составляющие мощности формируются произведением ортогональных гармонических составляющих мгновенных напряжений и токов, напоров и расходов [10–14].

Применительно к трехфазной системе, например, электрическому двигателю как базовому элементу любого электромеханического комплекса (ЭМК), электромагнитная мощность, передаваемая на вал электрической машины, будет равна сумме мощностей отдельных фаз питающего напряжения. При вращающемся роторе электромагнитный момент создается всеми тремя фазами, которые нельзя рассматривать как энергетически независимые компоненты: мощности фаз определенным образом суммируются на нагрузке.

Временные сигналы напряжения и тока фазы A электрического двигателя могут быть представлены зависимостями вида:

$$u_A(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(\Omega_n t - \varphi_n) = \sum_{n=1}^N U_{na} \cos(\Omega_n t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(\Omega_n t); \quad (1)$$

$$i_A(t) = \sum_{m=1}^M I_m \cos(\Omega_m t - \psi_m) = \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(\Omega_m t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(\Omega_m t), \quad (2)$$

где n, m – номера гармоник напряжения и тока соответственно; N, M – число гармонических составляющих напряжения и тока; φ, ψ – фазовые углы сигналов напряжения и тока соответственно; Ω_n, Ω_m – круговые частоты изменения сигналов напряжения и тока соответственно; $U_{na} = U_n \cos \varphi_n$, $U_{nb} = U_n \sin \varphi_n$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала напряжения соответственно; $I_{ma} = I_m \cos \psi_m$, $I_{mb} = I_m \sin \psi_m$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала тока соответственно.

Временная функция электрической мощности фазы A с учетом (1), (2) и последующих преобразований в частотной области имеет вид:

$$p_{el A}(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0} + \sum_{k=1}^K P_{ka} \cos(\Omega_k t) + \sum_{k=1}^K P_{kb} \sin(\Omega_k t), \quad (3)$$

где $\sum_{k=1}^K P_{k0}$ – суммарная постоянная составляющая

мощности; $\sum_{k=1}^K P_{ka}$ – суммарная косинусная состав-

ляющая мощности; $\sum_{k=1}^K P_{kb}$ – суммарная синусная составляющая мощности; Ω_k – круговая частота k -ой гармоники мощности ($\Omega_k = |\Omega_n \pm \Omega_m|$); K – число гармонических составляющих мощности.

Тогда суммарная электрическая мощность трехфазной системы, подводимая к статорным обмоткам электрического двигателя, равна сумме мощностей отдельно взятых фаз:

$$p_{el}(t) = p_{elA}(t) + p_{elB}(t) + p_{elC}(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t), \quad (4)$$

где $p_{elB}(t), p_{elC}(t)$ – временные функции мощности фаз B и C соответственно; $u_B(t), u_C(t), i_B(t), i_C(t)$ – фазные напряжения и токи соответственно.

Получаемая суммарная электрическая мощность $p_{el}(t)$ трехфазной сети является базовым параметром для оценки реального энергетического режима электромеханической системы с учетом несимметрии питающего напряжения, возникновения вибраций в конструкции электрической машины, изменения нагрузочного режима вследствие развития нелинейных процессов в технологическом контуре.

Переход от трехфазной электрической мощности к однофазной электромагнитной мощности на валу электрического двигателя описывается равенством

$$p_{mech}(t) = p_{el}(t) - \Delta p_{\Sigma ed}(t), \quad (5)$$

где $\Delta p_{\Sigma ed}(t)$ – потери мощности в двигателе.

Определение параметра $\Delta p_{\Sigma ed}(t)$ в выражении (5) базируется на составлении уравнений баланса мощностей на элементах схемы замещения электрического двигателя, которые определяются в соответствии с зависимостями, приведенными в [15].

Рассматривая электромагнитную мощность как входную мощность технологического механизма, связанного одним валом с электрической машиной, можно записать:

$$p_{mech}(t) = M_{ed}(t)\omega(t), \quad (6)$$

где $M_{ed}(t) = M_s(t) + M_d(t)$ – вращающий момент электродвигателя; $M_s(t)$ – статический момент со-

противления; $M_d(t) = \frac{d}{dt} \left(J(t) \frac{\omega^2(t)}{2} \right) / \omega(t)$ – динамический момент электродвигателя; $J(t), \omega(t)$ – момент инерции и частота вращения двигателя соответственно.

Аналогичный результат может быть получен не только для мощности на валу двигателя, как это показано выше, но и для мощности технологической нагрузки.

Изменение режима работы потребителя, возникновение турбулентных и кавитационных процессов в насосе и трубопроводе характеризуется периодическим несинусоидальным изменением расхода на выходе насосного агрегата:

$$Q_p(t) = \sum_{l=1}^L Q_{l0} + \sum_{l=1}^L Q_l \cos(\Omega_l t - \gamma) = \sum_{l=1}^L Q_{l0} + \sum_{l=1}^L Q_{la} \cos(\Omega_l t) + \sum_{l=1}^L Q_{lb} \sin(\Omega_l t), \quad (7)$$

где l, L – номер и число гармоник сигнала расхода; Q_{l0}, Q_l – амплитудные значения постоянной и переменной составляющих сигнала расхода соответственно; $Q_{la} = Q_l \cos \gamma, Q_{lb} = Q_l \sin \gamma$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала расхода соответственно; Ω_l, γ – круговая частота и угол сдвига фазы сигнала расхода относительно начала координат соответственно.

Тогда гидравлическая мощность на выходе насосного агрегата:

$$p_{hp}(t) = \rho g H_p(t) Q_p(t) = A_2' v^2(t) Q_p(t) + B_2' v(t) Q_p^2(t) + C_2' Q_p^3(t), \quad (8)$$

где $H_p(t) = A_2 v^2(t) + B_2 v(t) Q_p(t) + C_2 Q_p^2(t)$ – напор, создаваемый насосным агрегатом; $A_2' = A_2 \rho g, B_2' = B_2 \rho g, C_2' = C_2 \rho g, A_2, B_2, C_2$ – коэффициенты аппроксимации паспортной напорно-расходной характеристики насоса; $v(t)$ – относительная частота вращения турбомеханизма; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости.

С учетом выражения (7), выполнив преобразования, получим:

$$p_{hp}(t) = \sum_{r=1}^R P_{rhp0} + \sum_{r=1}^R P_{rhp} \cos(\Omega_r t) + \sum_{r=1}^R P_{rhp} \sin(\Omega_r t), \quad (9)$$

где r, R – номер и число гармоник сигнала гидравлической мощности на выходе насоса соответственно; $P_{rhp0}, P_{rhp}, P_{rhp}$ – амплитудные значения постоянной и ортогональных косинусной и синусной составляющих сигнала гидравлической мощности насоса соответственно; Ω_r – круговая частота сигнала гидравлической мощности насоса.

Гидравлическая мощность на j -том участке трубопровода:

$$p_{hnej}(t) = \rho g H_j(t) Q_j(t), \quad (10)$$

где $H_j(t), Q_j(t)$ – сигналы напора и расхода на j -том участке трубопровода соответственно.

Гидравлическая мощность потребителя:

$$p_{hcon}(t) = \rho g H_{con}(t) Q_{con}(t), \quad (11)$$

где $H_{con}(t), Q_{con}(t)$ – сигналы напора и расхода у потребителя соответственно.

С учетом сказанного, общее уравнение энергобаланса ЭГК имеет вид:

$$p_{el}(t) = \Delta p_{\Sigma ed}(t) + \Delta p_{hp}(t) + \Delta p_{hnej}(t) + p_{hcon}(t), \quad (12)$$

где $\Delta p_{hp}(t) = p_{mech}(t) - p_{hp}(t)$, $\Delta p_{hnetj}(t) = p_{hnet(j)}(t) - p_{hnet(j+1)}(t)$ – потери мощности в насосе и на участках трубопроводной сети соответственно.

Мерой оценки качества энергопроцессов в ЭГК служит эффективная мощность, полученная как среднеквадратичное значение временной функции мощности (электрической, механической, гидравлической) на i -том элементе энергопреобразования:

$$P_{ei} = \sqrt{1/T \int_0^T p_i^2(t) dt} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^K P_{koi}\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^K P_{kai}\right)^2 / 2 + \left(\sum_{k=1}^K P_{kbi}\right)^2 / 2}. \quad (13)$$

Выражения (4)–(6), (8)–(10) дают возможность выполнить гармонический анализ мощности на элементах ЭГК, осуществить оценку переменной составляющей энергетического сигнала.

Одним из показателей, характеризующих непрерывный процесс энергопреобразования между источником питания и потребителем, является коэффициент пропускной способности энергетического канала ЭГК, определяемый как отношение эффективных мощностей на выходе и входе системы [12]:

$$k_{cap} = P_{ehcon} / P_{eel}, \quad (14)$$

где P_{ehcon}, P_{eel} – эффективная мощность потребителя и источника питания ЭГК соответственно.

Приведенное выражение, по сути, является аналогом коэффициента полезного действия (КПД), характеризующего энергетическое состояние системы в установившемся режиме работы. Однако, в отличие от КПД, k_{cap} позволяет учесть наличие переменных составляющих мощности в энергетическом канале ЭГК, обусловленных введением накопителей энергии различного рода, возникновение в контуре энергопреобразования нелинейных процессов, отражающих специфику работы электропривода технологического механизма.

В реальных условиях коэффициент пропускной способности $k_{cap} < 1,0$. При увеличении числа элементов в канале передачи мощности потребителю эффективная мощность P_{ehcon} снижается, что приводит, соответственно, к ухудшению пропускной способности энергетического канала ЭГК и более существенному снижению k_{cap} .

Для сравнительной оценки процессов энергопреобразования в различных режимах работы гидротранспортной системы предложен коэффициент энергоуправляемости ЭГК [12, 13]:

$$k_{pc} = P_{eoid} / P_{eir}, \quad (15)$$

где P_{eoid}, P_{eir} – эффективная мощность в идеальной (при отсутствии наиболее характерных нелинейностей в ЭГК) и реальной (при возникновении нелинейных гидродинамических процессов) системах на i -том элементе энергопреобразования соответственно.

Следует отметить, что можно оценивать энергоуправляемость как отдельных элементов на базе $P_{ehp}, P_{ehnej}, P_{econ}$ в соответствующих режимах работы, так и всей системы в целом, используя для анализа значения эффективной входной электрической мощности в идеальном P_{eoid} и реальном P_{eir} ЭГК.

Таким образом, предложенный подход к оценке энергоэффективности ЭГК позволяет анализировать энергопроцессы при изменении их в реальном времени с сохранением полной информации об исходных сигналах, формирующих мощность, учитывать проявление специфических свойств электромеханического оборудования, появление дополнительных переменных составляющих мощности, загружающих энергетический канал системы.

В. Характеристика лабораторного ЭГК

Анализ энергопроцессов в ЭГК выполнен на базе мелкомасштабной экспериментальной установки, включающей [16]: центробежный насос с асинхронным двигателем на одном валу; разветвленный трубопровод с установленной запорно-регулирующей арматурой и приемными резервуарами; регулируемый дисковый затвор с электроприводом; преобразователь частоты для изменения частоты вращения электродвигателя насоса; контрольно-измерительную аппаратуру (датчики тока, напряжения, частоты вращения, давления и расхода). Общий вид и функциональная схема физической модели ЭГК показаны на рис. 1, 2 соответственно.



Рисунок 1 – Общий вид физической модели ЭГК

Технические показатели электрогидравлического оборудования приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические показатели оборудования лабораторного стенда

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная мощность ЭД, Вт	830
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	1,7
Частота сети, Гц	50
Частота вращения, об/мин	2900
Максимальная подача, м ³ /ч	8
Максимальный напор, м	22
Номинальная мощность насоса, Вт	550

На рис. 3 приведена функциональная схема контрольно-измерительного блока (КИЗБ), в состав которого входят: четыре датчика тока ДТ1–ДТ4; шесть датчиков напряжения ДН1–ДН6, работающих на эффекте Холла; датчики давления ДД1–ДД3 фирм ОВЕН и JUMO; датчики расхода ДР1, ДР2 (в лабораторном комплексе использован двухканальный ультразвуковой счетчик Эргомера 125); датчик

скорости ДС (тахогенератор, установленный на одном валу с двигателем). Связь датчиков, осуществляющих измерение электрических, технологических и механических параметров ЭГК с персональным компьютером (ЭВМ), выполнена посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы LCard E440–14.

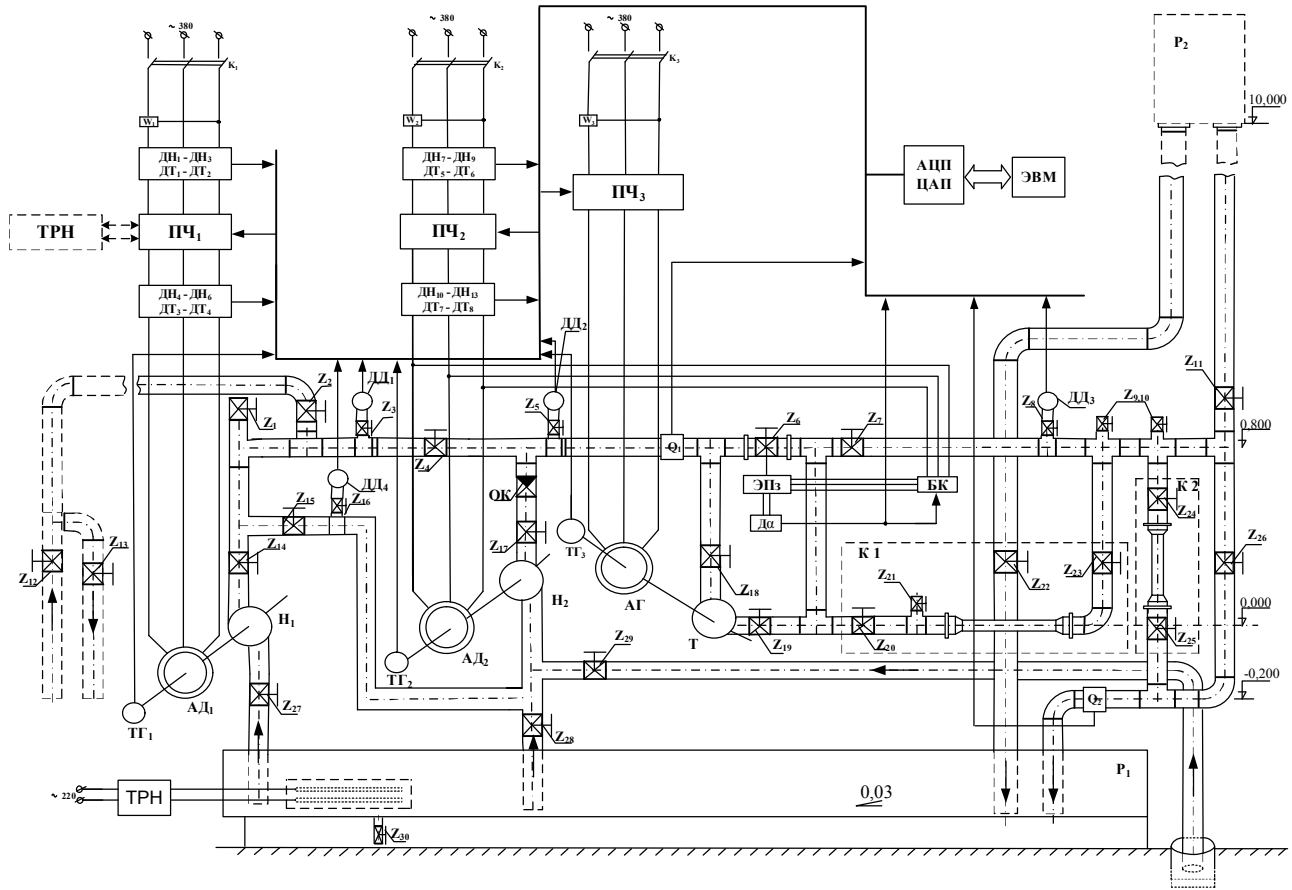


Рисунок 2 – Функциональная схема лабораторного стенда ЭГК

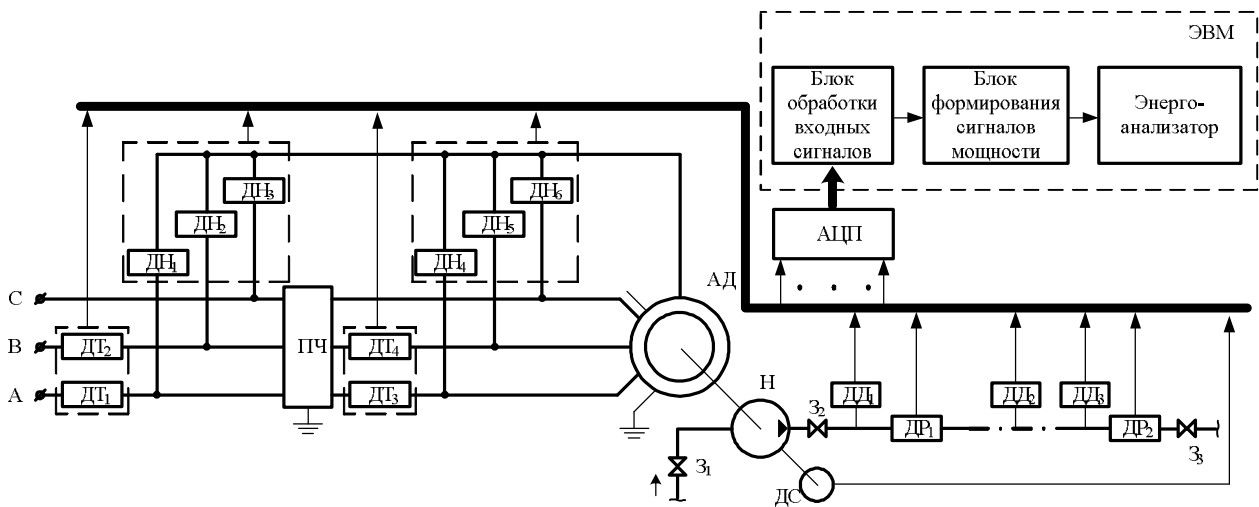


Рисунок 3 – Функциональная схема контрольно-измерительного блока экспериментальной установки

Для формирования и частотного анализа сигналов мгновенной мощности (электрической, гидравлической) в структуре КИЗБ предусмотрен программный модуль, включающий: блок обработки входных сигналов, поступающих непосредственно с датчиков; блок формирования мгновенной мощности, получаемой производением исходных сигналов; энергоанализатор, позволяющий представить кривые мгновенных значений токов и напряжений (напоров и расходов) обобщенным рядом Фурье, а также аппроксимировать сигналы мгновенной мощности в виде суммы гармонических составляющих.

С. Анализ динамических характеристик ЭГК при развитии нелинейных процессов в трубопроводной сети

Напорное движение жидкости характеризуется наличием нерастворенных пузырьков газа или воздуха, количество которых растет при понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров. Сказанное приводит к возникновению кавитационных явлений, которые наиболее часто наблюдаются в центробежных насосах, обычно работающих при больших значениях частот вращения, в отдельных местах рабочих лопаток, где создаются значительные местные скорости движения жидкости, также благоприятствующие возникновению кавитации, в трубопроводах со сложной геометрической конфигурацией и т.п. [1–8].

Для анализа влияния кавитационных процессов на энергетические характеристики ЭГК средствами регулируемого электропривода поддерживается постоянное значение гидравлической мощности $p_{hcon}(t)$ в сети потребителя. Путем прикрытия задвижки во всасывающем патрубке насоса обеспечивается рост зоны разрежения на входе рабочего колеса, приводящей к появлению кавитационных пульсаций в гидросистеме.

На рис. 4–6 приведены кривые изменения напора, расхода и гидравлической мощности у потребителя (в контрольной точке трубопроводной сети) при разной степени n_{kavcur} развития кавитационных процессов в гидросистеме, где $n_{kavcur} = V_{cur} / V_0$,

$$V_0 = 0,0008 \text{ м}^3, V_{cur} = \frac{1}{T_{kav}} \int_0^{T_{kav}} (Q_j(t) - Q_{j+1}(t)) dt -$$

начальное и текущее значения объема кавитационной каверны соответственно; T_{kav} – постоянная времени кавитационной каверны.

Анализ показал, что при большей степени прикрытия задвижки на входе насосного агрегата период T_{kav} кавитационных колебаний растет, что обусловлено увеличением объема кавитационных каверн, движущихся по трубопроводу. Так, в ЭГК с n_{kav5} колебания напора имеют более явно выраженный характер, чем в системе с n_{kav1} , при этом частота кавитационных автоколебаний составляет $f_{kav5} = 0,23$ Гц.

На рис. 4, 6 приведены частотные спектры сигналов напора и гидравлической мощности, подтверждающие появление низкочастотных составляющих, характерных для рассматриваемых кавитационных процессов в трубопроводе.

Изменение нагрузочного режима в гидросистеме в результате развития кавитационных автоколебаний влияет не только на гидравлические характеристики ЭГК, но и приводит к изменению тока $i(t)$ и электрической мощности $p_{el}(t)$, подводимой к статорным обмоткам двигателя. Для компенсации потерь мощности на кавитацию и поддержания требуемого значения гидравлической мощности $p_{con}(t)$ у потребителя средствами регулируемого ЭП меняют частоту f_{fc} питающего напряжения на выходе частотного преобразователя. Так, при $n_{kav1} = 3,7$ $f_{fc} = 44,4$ Гц; при $n_{kav5} = 31,3$ $f_{fc} = 50$ Гц.

На рис. 7–9 приведены кривые фазных напряжений $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$, токов $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ и мощностей $p_A(t), p_B(t), p_C(t)$ для разных степеней развития кавитации. Используя выражение (4), получены кривые изменения суммарной электрической мощности $p_{el}(t)$, подводимой к статору АД (рис. 10, 11).

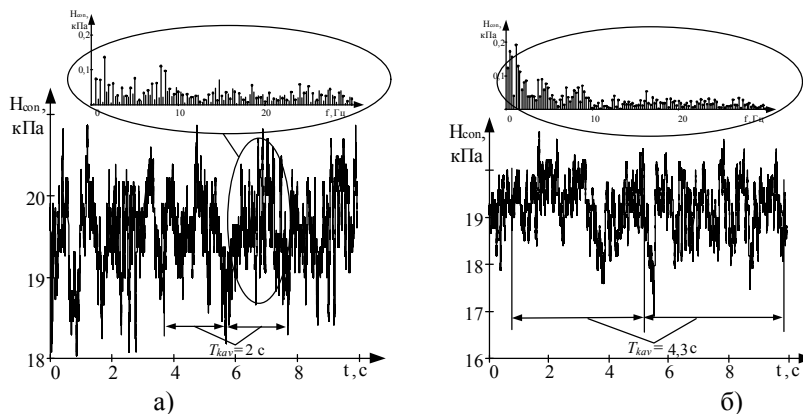


Рисунок 4 – Кривые изменения напора в трубопроводной сети в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

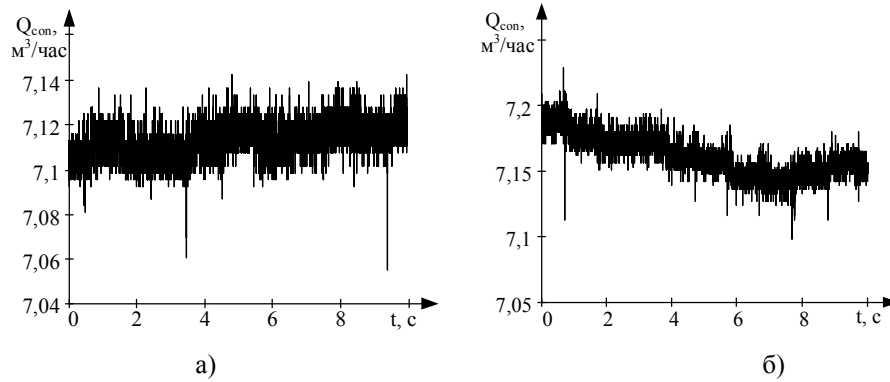


Рисунок 5 – Кривые изменения производительности в трубопроводной сети в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

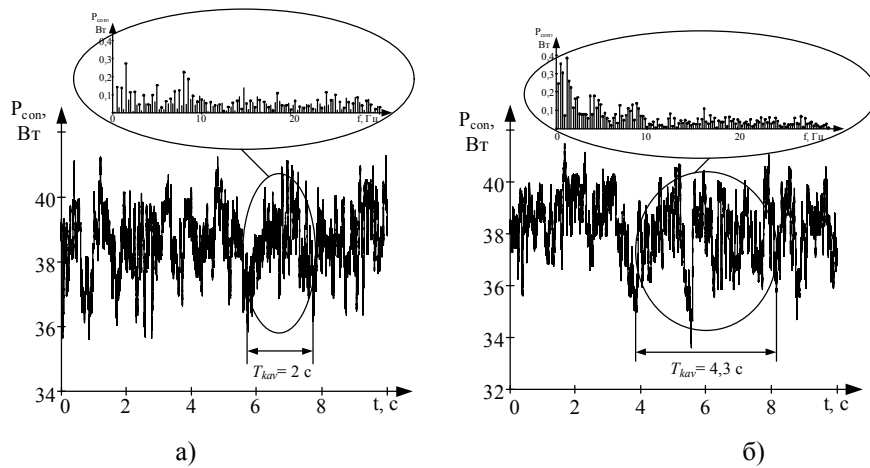


Рисунок 6 – Кривые изменения гидравлической мощности в сети потребителя в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

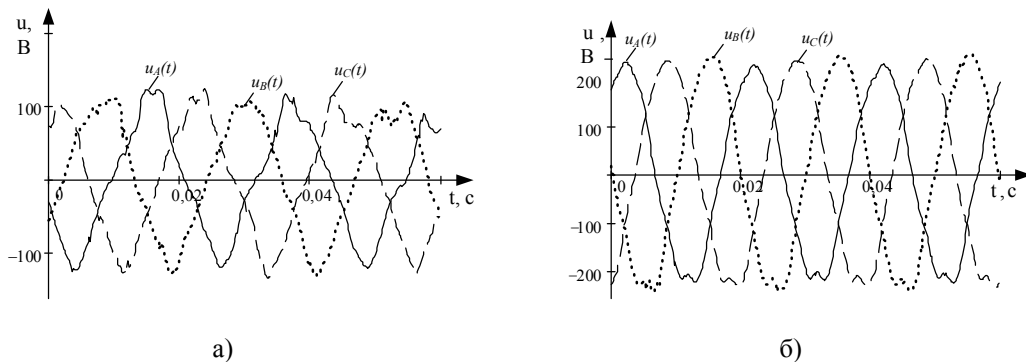


Рисунок 7 – Кривые изменения сигналов напряжения в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

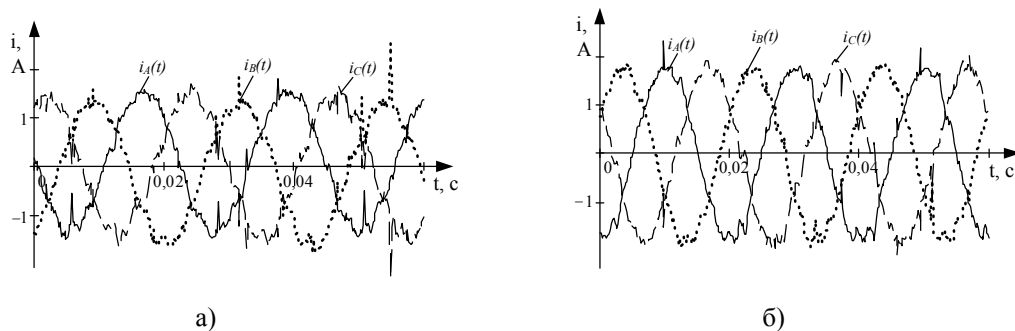


Рисунок 8 – Кривые изменения сигналов тока в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

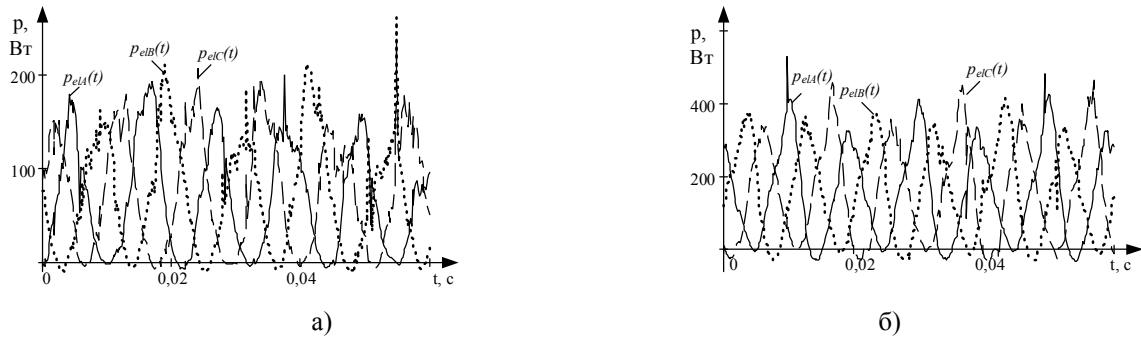


Рисунок 9 – Кривые изменения сигналов электрической мощности в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

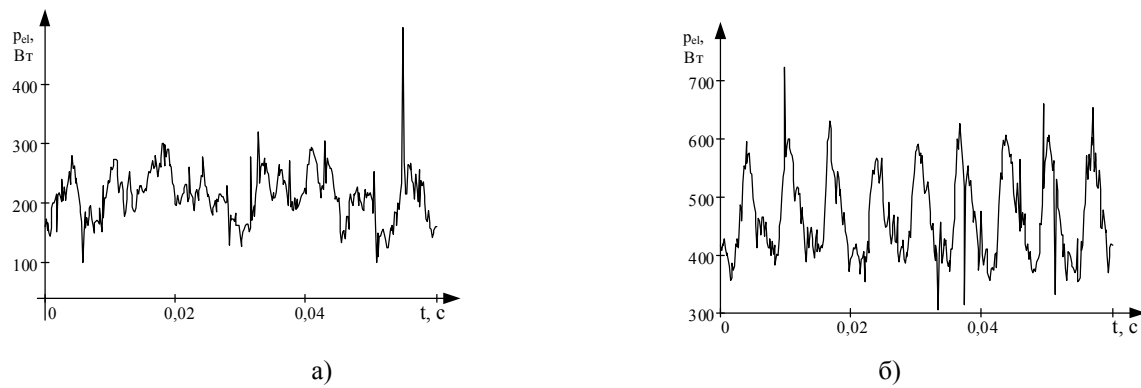


Рисунок 10 – Кривые изменения сигналов суммарной электрической мощности в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

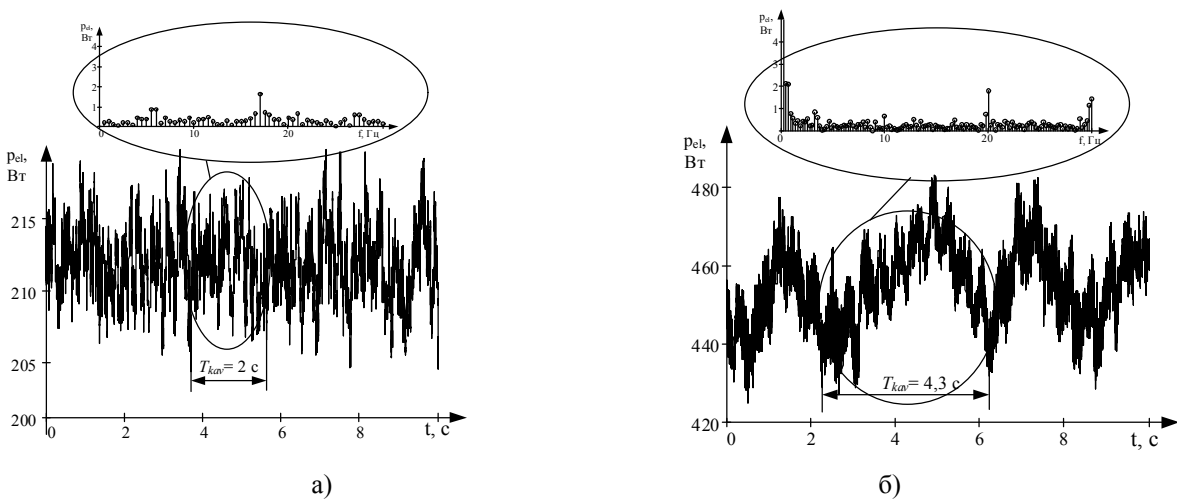


Рисунок 11 – Кривые изменения электрической мощности в системе с n_{kav1} (а) и n_{kav5} (б)

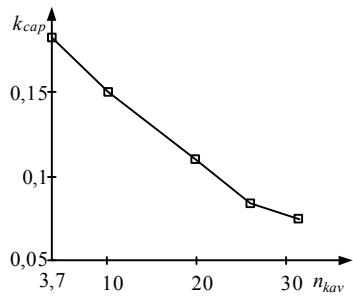
Таблица 2 – Эффективная мощность и показатели энергоэффективности ЭГК

Параметр	$n_{kav1} = 3,7$	$n_{kav2} = 7$	$n_{kav3} = 19,7$	$n_{kav4} = 26$	$n_{kav5} = 31,3$
P_{el}	216,937	225,976	341,063	467,647	478,89
P_{elhp}	51,82	51,433	51,468	51,893	51,457
P_{elcon}	38,402	38,41	38,419	38,461	38,469
k_{cap}	0,182	0,17	0,113	0,084	0,08
k_{pc}	1,0	0,96	0,636	0,464	0,452

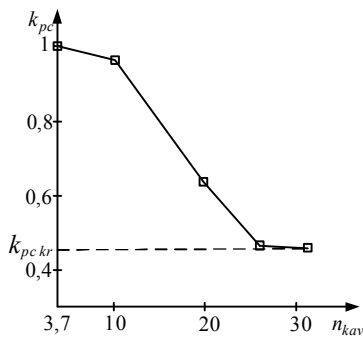
Анализ показал, что кавитационные процессы в технологическом контуре ЭГК характеризуются усилением переменной составляющей в сигналах электрической и гидравлической мощностей (рис. 6, 11), наличием в спектрах гармонических составляющих низкочастотного порядка.

В табл. 2 приведены значения эффективных мощностей и показатели энергоэффективности ЭГК.

На рис. 12 показаны кривые изменения коэффициентов k_{pc} и k_{cap} от степени n_{kav} развития кавитационных процессов в гидросистеме.



а)



б)

Рисунок 12 – Зависимости коэффициентов пропускной способности (а) и энергетической управляемости (б) от степени развития кавитации

Из анализа полученных кривых следует, что при малом значении $n_{kav1} = 3,7$, соответствующем режиму, где практически отсутствуют кавитационные явления, коэффициент пропускной способности энергетического канала ЭГК принимает максимальное значение $k_{cap1} = 0,182$. Интенсивное развитие кавитационных автоколебаний при степени $n_{kav5} = 31,3$ сопровождается снижением коэффициента k_{cap} в 2,2 раза ($k_{cap5} = 0,082$), что обусловлено ростом переменных составляющих в сигналах напора и гидравлической мощности. С целью компенсации отклонения гидравлической мощности потребителя от заданного значения необходимо увеличение частоты вращения электродвигателя насоса, что приводит к росту электрической мощности, подво-

димой к электроприводу насосного агрегата (табл. 2).

Несколько иная картина наблюдается при анализе энергоуправляемости ЭГК с нелинейными процессами в трубопроводе. Получено, что при малых степенях n_{kav1} , n_{kav2} система практически нечувствительна к возникновению кавитационных процессов в трубопроводе – коэффициент энергоуправляемости $k_{pc} = 1,0 - 0,96$; при больших степенях развития кавитации n_{kav3} , n_{kav4} коэффициент k_{pc} начинает резко снижаться и при n_{kav5} достигает критического значения $k_{pc\ kr} = 0,45$. Это режим, когда возможен кавитационный срыв работы насосного агрегата, что требует принятия соответствующих мер для исключения возможных аварийных режимов работы оборудования.

ВЫВОДЫ. Отмечено, что вследствие развития кавитационных процессов в трубопроводной сети возникают низкочастотные автоколебания давления и расхода, при которых движение перекачиваемой среды будет нестационарным. Установлено, что кавитационные явления приводят к перераспределению потерь мощности в энергетическом канале электрогидравлического комплекса, сопровождаются усилением переменной составляющей мощности, что приводит к снижению энергоэффективности используемого оборудования.

Показано, что энергопроцессы, происходящие в электрогидравлическом комплексе, носят характер периодических установившихся колебаний мощности на анализируемом интервале времени. В связи с этим является допустимым синтез временной функции мощности (электрической, гидравлической) гармоническим рядом, который формируется на базе ортогональных составляющих напряжений и токов, напоров и расходов.

Предложено использовать эффективную мощность как меру качества процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе при возникновении нелинейных кавитационных явлений в гидросистеме.

Установлено, что показателем, характеризующим непрерывный процесс энергопреобразования между источником и потребителем, является коэффициент пропускной способности энергетического канала электрогидравлического комплекса, представляющий собой отношение эффективной мощности потребителя к эффективной мощности источника питания. В результате экспериментальных исследований получено, что при возникновении нелинейных гидродинамических процессов в технологическом контуре электрогидравлического комплекса происходит усиление переменной составляющей мощности, что приводит к росту значения эффективной электрической мощности, подводимой к статору электродвигателя, и, соответственно, к снижению коэффициента пропускной способности

энергетического канала электрогидравлической системы.

Предложено использовать коэффициент энергетической управляемости для оценки процессов энергопреобразования в различных режимах работы электрогидравлического комплекса: при отсутствии кавитационных процессов и при их наличии. В качестве исходных параметров для такой оценки можно принимать эффективную мощность как отдельных элементов рассматриваемой системы (насоса, гидросети, потребителя), так и всего комплекса в целом, используя эффективную мощность на входе системы.

Получено, что при малых степенях развития кавитационных процессов в трубопроводе коэффициент энергоуправляемости практически не меняется и сохраняется на уровне максимального. При интенсивном развитии кавитационных процессов энергоуправляемость электрогидравлического комплекса заметно ухудшается, коэффициент энергоуправляемости приближается к критическому значению, при котором необходимо формирование соответствующих сигналов управления на электропривод насосного агрегата или трубопроводной арматуры для обеспечения кавитационной защиты гидравлического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
2. Вишнеvский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.
3. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.
4. Biluš I., Predin A. Experimental analysis of thermo-dynamical surge at water pump inlet // Journal of energy technology. – 2010. – Iss. 3/2010 (3). – PP. 67–74.
5. Predin A., Gregorc B., Biluš I. Cavitation swirl at the entrance of centrifugal pump // Journal of Energy Technology. – 2009. – Iss. 2/2009 (3). – PP. 85–98.
6. Marcelo Martins Stopa, Cardoso Filho and Carlos B. Martinez Incipient Detection of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps // IEEE Transactions On

Industry Applications. – 2014. – Iss. 50/2014 (1). – PP. 120–126.

7. Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.

8. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1997. – 352 с.

9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 545 с.

10. Родькин Д.И. Составляющие мгновенной мощности полигармонических сигналов // Электротехника. – 2003. – Вып. 3. – С. 38–42.

11. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 106–115.

12. Коренькова Т.В. Показатели процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе // Технічна електродинаміка. – 2014. – Вип. 5. – С. 128–130.

13. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Estimation of electromechanical systems power controllability according to instantaneous power component // Proceedings of International IEEE Conference IEPES. – 2014. – Kyiv. – PP. 266–272. – IEEE Catalog Number CFP1405X–PRT. – ISBN 978–1–4799–2266–6.

14. Zagirnyak M., Rodkin D., Korenkova T. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical review). – 2011. – Iss. 12b. – PP. 208–212.

15. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинин А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник КДПУ: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44), част. 2. – С. 130–136.

16. Патент на корисну модель № 58707, Україна, F04D 27/00. Тренажер гідротранспортної установки / Т.В. Коренькова, О.О. Сердюк, Д.Й. Родькін, В.М. Шоколов. – № 58707; зареєстровано 26.04.2011.

ESTIMATION OF ELECTROHYDRAULIC COMPLEX ENERGY EFFICIENCY DURING THE DEVELOPMENT PIPELINE NETWORK CAVITATION PROCESSES

T. Korenkova, O. Serduk, V. Kovalchuk

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: viktoria_kovalc@mail.ru

It has been shown the cavitation processes influence in the pipeline for electrohydraulic complex energy modes. It has been found that the cavitation self-oscillations development in the system leads to an increase in hydraulic power loss to the fluid friction, increasing the power variable component, reduce energy efficiency throughout the electrical system. It has been proposed a method for power conversion analyzing processes of the electrohydraulic complex power channel based on the power representation as a sum of harmonic components resulting from the product of voltages and currents, pressures and flow rate orthogonal signal components. The possibility of energy efficiency estimation electrohydraulic system by determining the power channel capacity coefficient and coefficient power controllability,

which are based on mean square estimation signal electric and hydraulic power has been shown. The energy conversion processes analysis based on a electrohydraulic physical model with the nonlinear processes development in the pipeline network has been executed. The curves of energy efficiency indexes the changes of electrohydraulic complex on the development of nonlinear processes degree in the hydraulic system has been obtained.

Key words: electrohydraulic complex, cavitation self-oscillations, power processes, hydraulic power, power controllability, power channel capacity.

REFERENCES

1. Popov, D.N. (1982), *Nestatsionarnye gidromekhanicheskie protsesi* [Nonstationary hydromechanical processes], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
2. Vishnevskiy, K.P. (1986), *Perekhodnie protsessy v napornikh sistemakh vodopodachi* [Transients in pressurized water supply systems], Agropromizdat, Moscow. (in Russian)
3. Karelin, V.Ya. (1975), *Kavitacionnye yavleniya v tsentrobeznykh i osevykh nasosah* [The cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
4. Biluš, I. and Predin, A. (2010), "Experimental analysis of thermo-dynamical surge at water pump inlet", *Journal of energy technology*, Vol. 3, no. 3, pp. 67–74.
5. Predin, A., Gregorc, B. and Biluš, I. (2009), "Cavitation swirl at the entrance of centrifugal pump", *Journal of Energy Technology*, Vol. 2, no. 3, pp. 67–82.
6. Stopa, Marcelo Martins, Filho, Cardoso and Carlos, B. Martinez (2014), Incipient Detection of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 50, no.1, pp. 120–126.
7. Arzumanov, Z.S. (1978), *Kavitatsiya v mestnykh gidravlicheskih soprotivleniyah* [Cavitation in local hydraulic resistance], Energiya, Moscow. (in Russian)
8. Pilipenko, V.V., Zadontsev, V.A. and Natanzon, M.S. (1997), *Kavitacionnye avtokolebaniya i dinamika gidrosistem* [Cavitation self-oscillations and the dynamics of hydraulic systems], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
9. Bronshteyn, I.N. and Semendiaev, K.A. (1967), *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashihsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges], Nauka, Moscow. (in Russian)
10. Rodkin, D.I. (2003), "Instantaneous power components of polyharmonic signals", *Elektrotehnika*, Vol. 3, pp. 38–42. (in Russian)
11. Rodkin, D.I. (2005), "Comment on the energy processes theory with polyharmonic signals. Part 2. The definition and using of energy mode indicators", *Visnyk KDPU: naukovyi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 32, pp. 106–115. (in Russian)
12. Korenkova, T.V. (2014), "Indices of the processes of energy conversion in an electric hydraulic complex", *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 5, pp. 128–130. (in Russian)
13. Zagirnyak, M., Kovalchuk, V. and Korenkova, T. (2014), "Estimation of electromechanical systems power controllability according to instantaneous power component", *Proceedings of International IEEE Conference IEPS 2014*, pp. 266–272, *IEEE Catalog Number CFP1405X-PRT, ISBN 978-1-4799-2266-6*
14. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2011), "Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability", *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical review)*, no. 12b, pp. 208–212.
15. Romashihin, Y.V., Rodkin, D.I. and Kalinov, A.P. (2007), "Energy method of identification of induction motors parameters", *Visnyk KDPU: naukovyi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 44, pp. 130–136. (in Russian)
16. Korenkova, T.V., Serdyuk A.A., Rodkin, D.Y. and Shokolov, V.M. (2011), The patent for utility model number 58707, Ukraine, F04D 27/00. *Trenazher hidrotransportnoyi ustanovky* [The simulator hydrotransport install], 26.04.2011 registered. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 18.09.2014.