

УДК 621.64:621.3:537

АНАЛИЗАТОР ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Т. В. Коренькова, В. Г. Ковальчук, Д. И. Родькин

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

Показана возможность применения метода гармонического анализа сигналов мощности в нестационарных режимах работы электрогидравлического комплекса. Для автоматизации процедуры частотного анализа мощности разработан энергоанализатор, который позволяет исследовать энергетические процессы в электрогидравлическом комплексе при изменении их в реальном времени с сохранением полной информации об исходных сигналах, формирующих мощность. Получено, что волновые процессы в трубопроводе в нестационарных режимах сопровождаются усилением переменных составляющих энергетических сигналов, особенно их низкочастотной компоненты. Предложено для оценки процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе использовать показатели, базирующиеся на определении среднеквадратичных значений мощности.

Ключевые слова: электрогидравлический комплекс, процессы энергопреобразования, энергоанализатор, гидравлическая мощность.

АНАЛИЗАТОР ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ В ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

Т. В. Коренькова, В. Г. Ковальчук, Д. Й. Родькін

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

Показано можливість застосування методу гармонічного аналізу сигналів потужності в нестационарних режимах роботи електрогидравлічного комплексу. Для автоматизації процедури частотного аналізу потужності розроблено енергоаналізатор, який дозволяє досліджувати енергетичні процеси в електрогидравлічному комплексі при зміні їх у реальному часі зі збереженням повної інформації про вихідні сигнали, що формують потужність. Отримано, що хвильові процеси в трубопроводі в нестационарних режимах супроводжуються посиленням змінних складових енергетичних сигналів, особливо їх низькочастотної компоненти. Запропоновано для оцінки процесів енергоперетворення в електрогидравлічному комплексі використовувати показники, що базуються на визначенні середньоквадратичних значень потужності.

Ключові слова: електрогидравлічний комплекс, процеси енергоперетворення, енергоаналізатор, гідравлічна потужність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Электрогидравлические комплексы (ЭГК) представляют собой сложную систему энергопреобразования, где при изменении режимов работы насосных агрегатов (НА) на трубопроводную сеть выполняются условия для возникновения нестационарных гидродинамических процессов. Последние сопровождаются неустановившимся течением жидкости с изменением во времени основных технологических (напора, расхода, скорости движения потока и др.) и энергетических (мощность, потери мощности, КПД) параметров [1–6].

Различают периодические и переходные нестационарные гидравлические процессы [1, 2]. Примером периодических нестационарных процессов являются кавитационные режимы работы насосного и трубопроводного оборудования, которые характеризуются периодическим образованием и схлопыванием пузырьков газа в потоке жидкости. Это приводит к появлению автоколебаний давления в гидросистеме с частотой от 0,5 до 50 Гц [1, 4, 5].

Переходные гидродинамические процессы возникают при действии каких-либо возмущений, вызывающих закон движения того или иного элемента гидросистемы. Так, в случае резкого останова НА,

например по причине аварийного отключения электроэнергии, в трубопроводной системе неизбежно возникают волновые процессы различной природы: гидравлические удары, колебания и пульсации давления, резонансные явления и т.д. [1, 2, 6], что часто становится причиной разрушения трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры, поломок насосов или других нарушений нормальной работы ЭГК. Явление гидроудара хорошо известно как наиболее разрушительная по своим последствиям разновидность неустановившегося движения жидкости волнового характера. При этом возможно повышение давления на величину, существенно превышающую рабочее значение, а также понижение давления до вакуума, сопровождающееся кавитацией с разрывом сплошности потока.

Анализ [1, 3, 6] показал, что ЭГК характеризуются низкой управляемостью электрогидравлического оборудования в нестационарных режимах работы, приводящей к возникновению различного рода аварийных ситуаций. При этом существующие подходы управления оборудованием ЭГК в аварийных режимах решают лишь локальные задачи и срабатывают по факту возникновения аварии. В ра-

ботах [7, 8] доказана непосредственная связь управляемости ЭГК с процессами потребления или генерации энергии, где переменная во времени составляющая энергетического режима, характеризующая энергообменный процесс между элементами силового канала ЭГК, приводит к снижению энергетической управляемости рассматриваемой системы.

С учетом сказанного, является обоснованным анализ процессов энергопреобразования в силовом канале ЭГК с целью определения влияния нелинейных процессов, происходящих в технологическом контуре, на энергетические режимы системы, которые количественно характеризуются набором электрических (напряжением, током), энергетических (мощностью, потерями мощности, КПД), механических (частотой вращения и моментом), а также технологических параметров (производительностью, давлением). При этом энергетические переменные: электрическая, механическая, гидравлическая мощность дают конкретную характеристику протекающего процесса преобразования энергии и позволяют выполнить оценку эффективности процессов энергопреобразования в ЭГК.

В таких условиях является оправданным синтез временной функции мощности (электрической, гидравлической) гармоническим рядом, параметры которого рассчитываются на периоде повторяемости сигнала [7, 8]. Следует отметить, что формально временной интервал, на котором определяется мощность, может быть произвольным, т.к. любую аналитическую зависимость, удовлетворяющую правилу Дирихле, можно разложить в тригонометрический ряд [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 равны произведению ортогональных гармонических составляющих временных сигналов напряжений и токов (напоров и расходов).

В [7–9] доказано, что энергетический спектр оказывается существенно шире спектра гармоник исходных сигналов, что связано с появлением канонических (одночастотных) и неканонических (разночастотных) компонент мощности. При этом показатели энергопроцессов должны определяться на базе среднеквадратичных оценок мощности и ее компонент. Предложенные в [7] показатели энергорежимов являются базовой платформой для анализа процессов энергопреобразования в электромеханических комплексах с различной физической природой анализируемых сигналов.

Для автоматизации процедуры частотного анализа мощности разработан энергоанализатор, который позволяет исследовать энергетические процессы в ЭГК при изменении их в реальном времени с сохра-

нением полной информации об исходных сигналах, формирующих мощность.

С учетом сказанного, целью работы является исследование процессов энергопреобразования в ЭГК в нестационарных режимах работы с использованием анализатора спектра сигналов мощности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

А. Метод частотного анализа мощности электрогидравлического комплекса

При возникновении различного рода нестационарных процессов (кавитационных, турбулентных, пульсациях напора и т.п.) в трубопроводной системе энергопроцессы в ЭГК носят характер периодических установившихся колебаний мощности на анализируемом интервале времени [4, 5]. Изменение нагрузочного режима в гидросистеме в результате развития, например, кавитационных автоколебаний влияет не только на гидравлические характеристики ЭГК, но и приводит к изменению электрического тока и, следовательно, электромагнитной мощности, подводимой к статорным обмоткам двигателя. Сказанное позволяет представить сигналы напряжения и тока, напора и расхода обобщенным рядом Фурье, а также аппроксимировать сигналы мощности в виде суммы гармонических составляющих (косинусных и синусных компонент).

Применительно к трехфазной системе, например, электрическому двигателю как базовому элементу любого электромеханического комплекса, электромагнитная мощность, передаваемая на вал электрической машины, будет равна сумме мощностей отдельных фаз питающего напряжения. Так, 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) имеет вид [7]:

$$P_{elA}(t) = u_A(t)i_A(t) = \left(\sum_{n=1}^N U_{na} \cos(\Omega_n t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(\Omega_n t) \right) \times \left(\sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(\Omega_m t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(\Omega_m t) \right). \quad (3)$$

Путем преобразования сигнала мощности в частотной области получим

$$P_{elA}(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0} + \sum_{k=1}^K P_{ka} \cos(\Omega_k t) + \sum_{k=1}^K P_{kb} \sin(\Omega_k t), \quad (4)$$

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

мощности; $\sum_{k=1}^K P_{ka}$ – амплитудное значение суммар-

ной косинусной составляющей мощности; $\sum_{k=1}^K P_{kb}$ –

амплитудное значение суммарной синусной составляющей 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:

$$P_{el}(t) = P_{elA}(t) + P_{elB}(t) + P_{elC}(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t), \quad (5)$$

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.

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

$$P_{mech}(t) = P_{el}(t) - \Delta P_{\Sigma ed}(t), \quad (6)$$

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

Определение параметра $\Delta P_{\Sigma ed}(t)$ в выражении (6) базируется на составлении уравнений баланса мощностей на элементах схемы замещения электрического двигателя, которые определяются в соответствии с зависимостями, приведенными в [7–9].

Рассматривая электромагнитную мощность как входную мощность насосного агрегата, связанного одним валом с электрической машиной, можно записать:

$$P_{mech}(t) = M_{ed}(t)\omega(t), \quad (7)$$

где $M_{ed}(t)$ – вращающий момент электродвигателя; $\omega(t)$ – частота вращения двигателя.

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

Нестационарные режимы работы ЭГК, как указывалось выше, приводят к возникновению различного рода волновых процессов в трубопроводе, которые характеризуются периодическим изменением напора и расхода:

$$H_p(t) = \sum_{j=1}^J H_{pj0} + \sum_{j=1}^J H_{pj} \cos(\Omega_j t - \delta_j) = \sum_{j=1}^J H_{pj0} + \sum_{j=1}^J H_{pja} \cos(\Omega_j t) + \sum_{j=1}^J H_{pjb} \sin(\Omega_j t); \quad (8)$$

$$Q_p(t) = \sum_{l=1}^L Q_{l0} + \sum_{l=1}^L Q_l \cos(\Omega_l t - \gamma) = \sum_{l=1}^L Q_{l0} + \sum_{l=1}^L Q_{la} \cos(\Omega_l t) + \sum_{l=1}^L Q_{lb} \sin(\Omega_l t), \quad (9)$$

где j, l – номер гармоник сигналов напора и производительности соответственно; J, L – число гармоник сигналов напора и производительности соответственно; H_{pj0}, H_{pj} – амплитудные значения

постоянной и переменной составляющих сигнала напора соответственно, м; Q_{pl0}, Q_l – амплитудные значения постоянной и переменной составляющих сигнала производительности соответственно, м³/с; $H_{pja} = H_{pj} \cos \delta$; $H_{pjb} = H_{pj} \sin \delta$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала напора соответственно, м; $Q_{pla} = Q_{pl} \cos \gamma$;

$Q_{plb} = Q_{pl} \sin \gamma$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала производительности соответственно, м³/с; Ω_j, Ω_l – круговая частота сигналов напора и производительности соответственно; δ, γ – углы сдвига сигналов напора и производительности относительно начала координат соответственно.

Тогда гидравлическая мощность на выходе насосного агрегата

$$P_{hp}(t) = \rho g H_p(t) Q_p(t), \quad (10)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости.

Подставив выражения (8) и (9) в (10) и выполнив преобразования, получим

$$P_{hp}(t) = \sum_{r=1}^R P_{rhp0} + \sum_{r=1}^R P_{rhp_a} \cos(\Omega_r t) + \sum_{r=1}^R P_{rhp_b} \sin(\Omega_r t), \quad (11)$$

где r, R – номер и число гармоник сигнала гидравлической мощности на выходе насоса соответственно; $P_{rhp}, P_{rhp_a}, P_{rhp_b}$ – 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

$$P_{hnetj}(t) = \rho g H_j(t) Q_p(t), \quad (12)$$

где $H_j(t)$ – сигнал напора на j -том участке трубопровода.

Гидравлическая мощность у потребителя:

$$P_{hcon}(t) = \rho g H_{con}(t) Q_p(t), \quad (13)$$

где $H_{con}(t)$ – сигнал напора у потребителя (в конечной точке трубопроводной сети).

С учетом сказанного, общее уравнение энергобаланса ЭГК имеет вид:

$$P_{el}(t) = \Delta P_{\Sigma ed}(t) + \Delta P_{hp}(t) + \Delta P_{hnetj}(t) + P_{hcon}(t), \quad (14)$$

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.

Последнее выражение может быть использовано для определения энергетических параметров ЭГК при изменении во времени режима работы потребителя, в задачах идентификации параметров гидросистемы [10].

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

$$P_{ei} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_i^2(t) dt} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^K P_{k0i} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^K P_{kai} \right)^2 / 2 + \left(\sum_{k=1}^K P_{kbi} \right)^2 / 2}. \quad (15)$$

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 [8]:

$$k_{cap} = P_{ehcon} / P_{eel}, \quad (16)$$

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

Приведенное выражение позволяет учесть наличие переменных составляющих мощности в энергетическом канале ЭГК, обусловленных возникновением в контуре энергопреобразования нелинейных процессов, отражающих специфику работы электропривода (ЭП) технологического механизма.

В реальных условиях коэффициент пропускной способности $k_{cap} < 1,0$. При увеличении числа элементов в энергетическом канале эффективная мощность P_{ehcon} снижается, что приводит, соответ-

ственно, 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 [8]:

$$k_{pc} = P_{e iid} / P_{e ir}, \quad (17)$$

где $P_{e iid}, P_{e ir}$ – 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 $P_{ehp}, P_{ehnetj}, P_{ehcon}$ в соответствующих режимах работы, так и всей системы в целом, используя для анализа значения эффективной входной электрической мощности в идеальном $P_{e iid}$ и реальном $P_{e ir}$ ЭГК.

В. Структура энергоанализатора в составе лабораторного электрогидравлического комплекса

Анализ энергетических процессов ЭГК в нестандартных режимах работы выполнен на базе лабораторной физической модели, включающей: два центробежных насоса, оснащенных регулируемым электроприводом (ЭП); систему разветвленного трубопровода, содержащую горизонтальные и вертикальные участки с установленной запорно-регулирующей и защитной арматурой, приемные резервуары, кавитационные трубки Вентури разного поперечного сечения; регулируемый дисковый затвор; устройства для регулирования частоты вращения электродвигателей насосов и дискового затвора на базе преобразователей частоты. Внешний вид и функциональная схема физической модели ЭГК показаны на рис. 1, 2 соответственно.



Рисунок 1 – Общий вид физической модели ЭГК

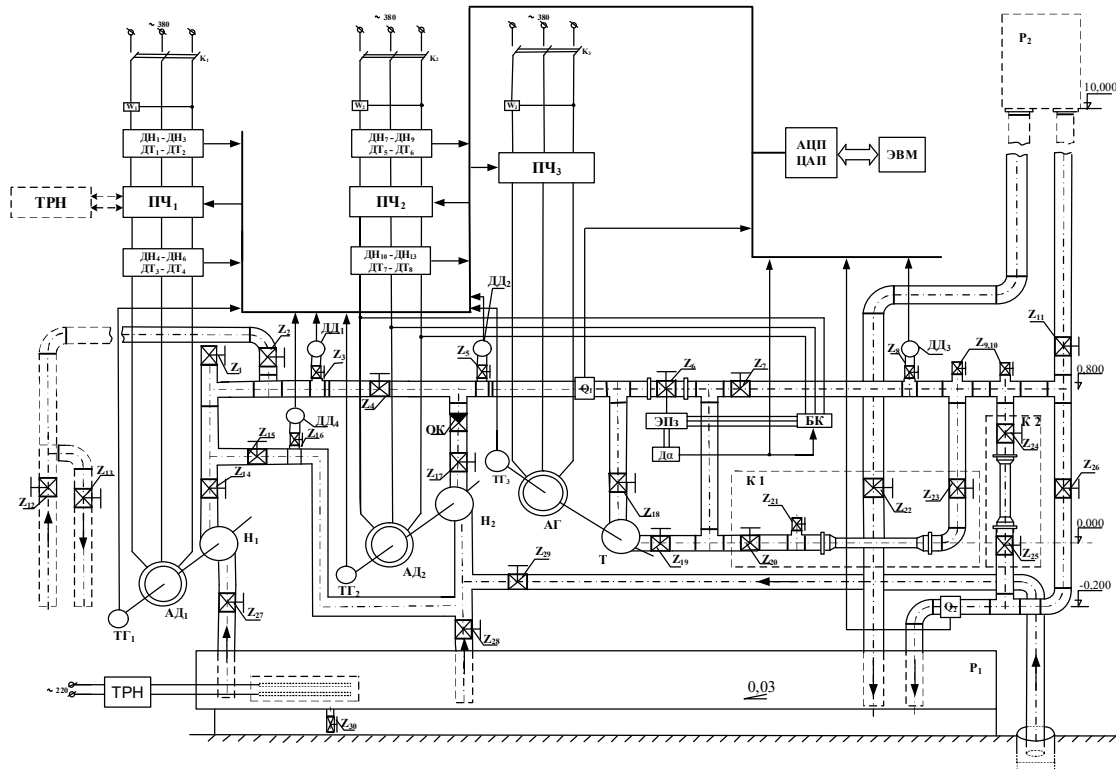


Рисунок 2 – Функциональная схема лабораторного стенда ЭГК

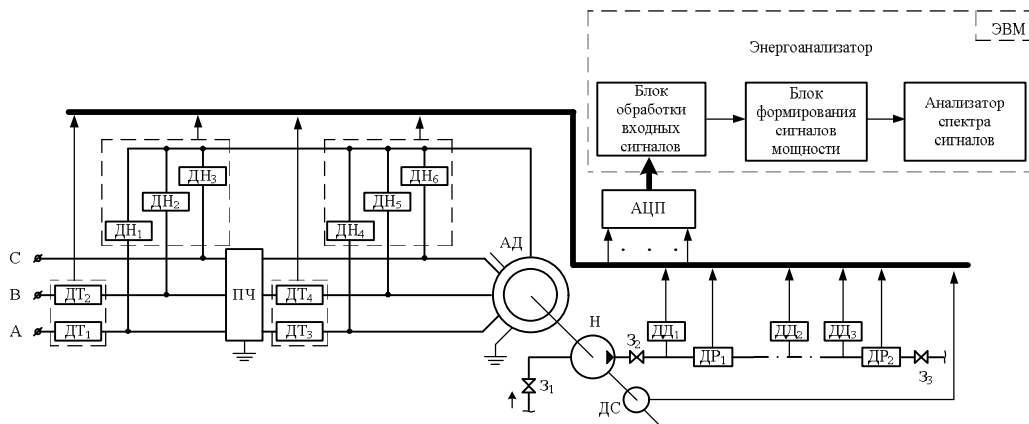


Рисунок 3 – Функциональная схема контрольно-измерительного блока электрогидравлического комплекса

Технические показатели используемого оборудования приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические показатели электрооборудования

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Номинальная мощность, 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, 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 технологических и механических параметров ЭГК с персональным компьютером (ЭВМ), выполнена посредством аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы LCard E440-14.

Для управления характеристиками модуля использовалось специальное программное обеспечение LGraf, с помощью которого осуществлялось отображение и протоколирование измеряемых параметров.

Для формирования и частотного анализа электрических (ток, напряжение), технологических (напор, расход), а также энергетических (электрическая и гидравлическая мощность) сигналов в структуре КИЗБ предусмотрен энергоанализатор – программный модуль, включающий: блок обработки входных сигналов, поступающих непосредственно с датчиков; блок формирования временной функции мощности, получаемой произведением исходных сигналов (напряжения и тока, напора и расхода); анализатор спектра сигналов, позволяющий представить кривые токов и напряжений, напоров и расходов, а также сигналов мощности тригонометрическим рядом в виде суммы постоянной и гармонических (косинусных и синусных) составляющих.

Работу анализатора демонстрируют окна лицевых панелей программного модуля (рис. 4–10).

Окно задания исходных параметров энергетического режима ЭГК (рис. 4) предусматривает загрузку временных сигналов фазных напряжений и токов, напора и расхода, считываемых непосредственно с датчиков, определение базовой частоты исходных сигналов и коррекцию их с использованием масштабных коэффициентов. Для проведения частотно-

го анализа электрических и гидравлических сигналов имеется возможность задания периода разложения временной функции и уровня значимости гармоник.

Анализатор спектра позволяет воспроизводить временные сигналы электрических параметров (тока, напряжения и мощности) в трехфазной системе, суммарной электромагнитной мощности, подводимой к статору электрического двигателя (рис. 7, 9), а также сигналы гидравлических параметров (напора, расхода и мощности) как на выходе насосного агрегата, так и в трубопроводной сети (рис. 8, 10). Частотную характеристику полученных кривых отражают спектры (амплитудные, фазовые) для различных компонент (косинусных или синусных) рассматриваемых сигналов (рис. 7–10).

Возможности энергоанализатора предусматривают формирование математических функций, описывающих гармонические составляющие мощности (электрической, гидравлической) в форме произведения ортогональных гармонических составляющих исходных сигналов (напряжения и тока, напора и расхода), образующих мощность, а также их среднеквадратичных оценок (рис. 5, 6).

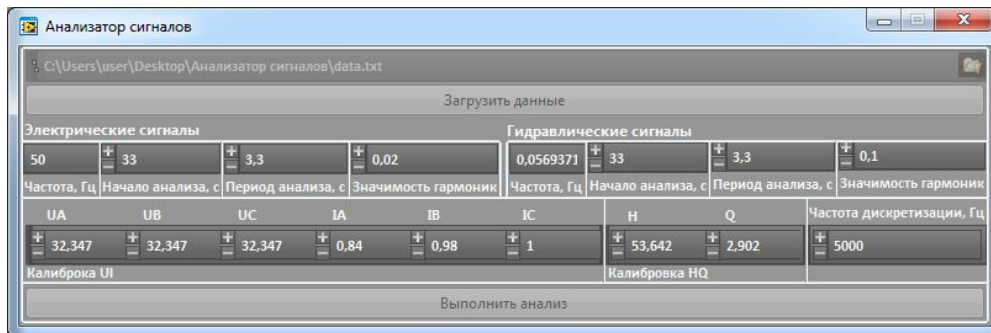


Рисунок 4 – Окно задания исходных параметров энергоанализатора



Рисунок 5 – Окно отображения ортогональных составляющих напряжения, тока и мощности, а также их среднеквадратичных оценок

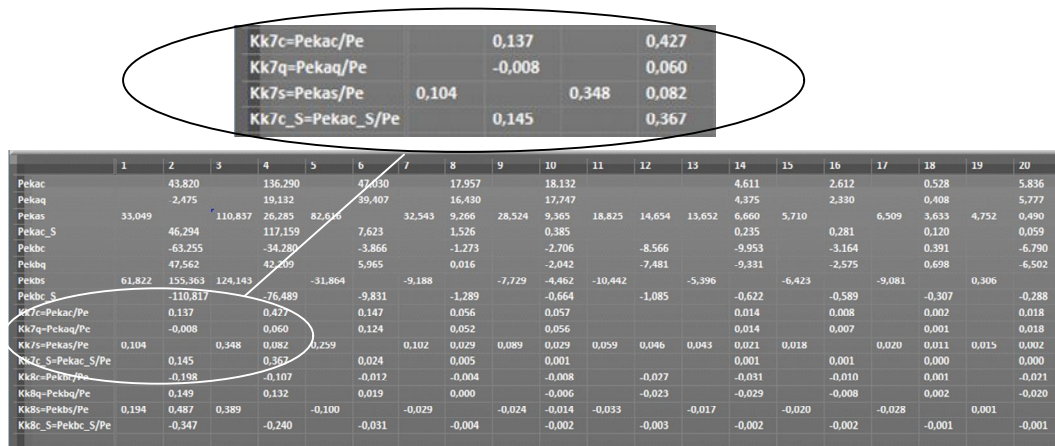


Рисунок 6 – Окно отображения расчетных значений коэффициентов энергорежима

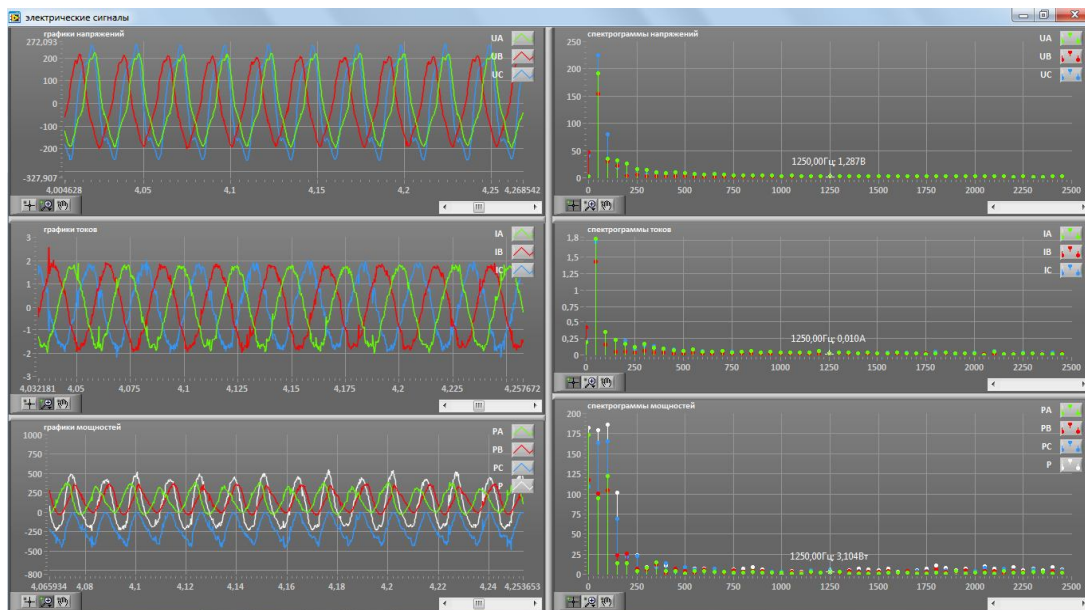


Рисунок 7 – Окно отображения электрических сигналов и их спектры при развитии кавитации в гидросистеме

С. Исследование энергопроцессов в электрогидравлическом комплексе в нестационарных режимах работы

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, 2].

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 всасывающей трубке насоса обеспечивается рост зоны разрежения на входе рабочего колеса, приводящей к появлению кавитационных пульсаций в гидросистеме.

В качестве примера на рис. 7, 8 приведены кривые изменения фазных напряжений, токов и фазных мощностей, а также кривые напора, расхода и гидравлической мощности на выходе насоса при развитии кавитационных процессов в системе с частотой $f_{kav} = 0,3$ Гц. Спектральный анализ сигналов напора $H_p(t)$ и гидравлической мощности $p_{hp}(t)$ на выходе насоса показал, что кавитационные колебания сопровождаются появлением переменных составляющих напора и мощности, а именно их низкочастотной компоненты (рис. 8). Это приводит к росту среднеквадратичного значения мощности и, соответственно, к снижению энергоуправляемости ЭГК.

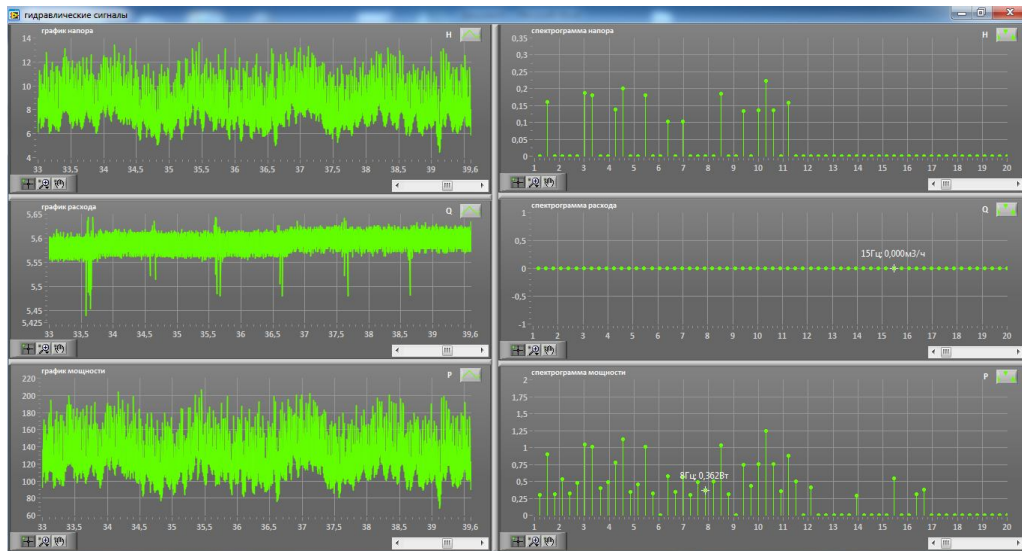


Рисунок 8 – Окно отображения гидравлических сигналов и их спектры при развитии кавитации в гидросистеме

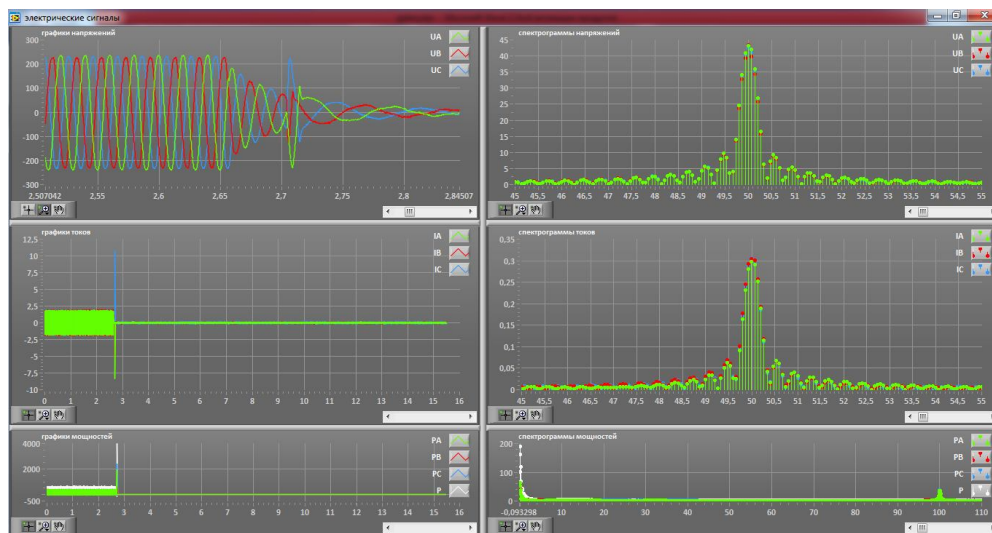


Рисунок 9 – Окно отображения электрических сигналов и их спектры при гидроударе в трубопроводной сети

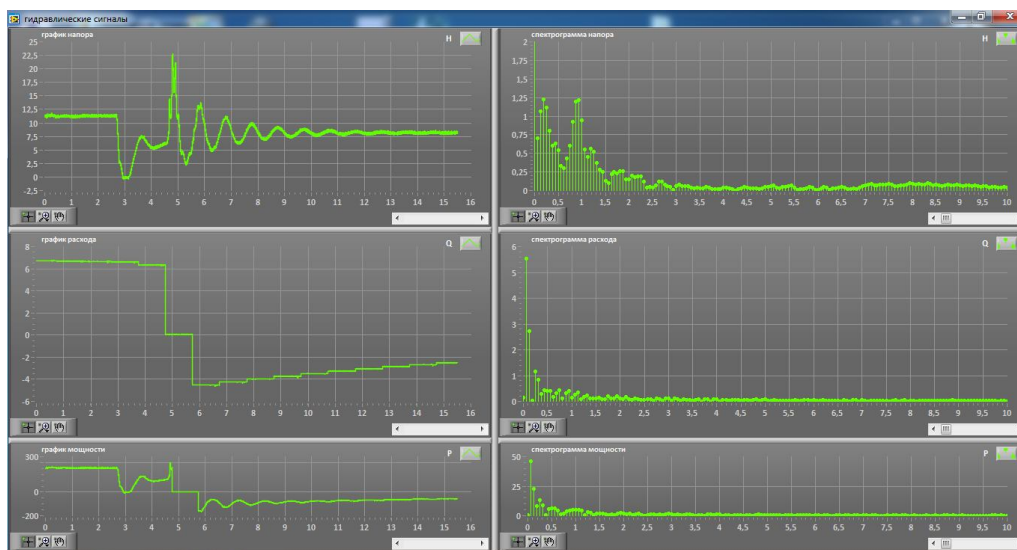


Рисунок 10 – Окно отображения гидравлических сигналов и их спектры при гидроударе в трубопроводной сети

Для ЭГК одним из наиболее опасных по последствиям режимов является аварийное отключение электроэнергии, в результате которого в трубопроводной системе возникают волновые процессы различной природы. Последние, в свою очередь, приводят к возникновению гидравлических ударов, негативно сказывающихся на работе электрогидравлического оборудования.

Для исследования влияния волновых процессов в гидросистеме на энергетические параметры ЭГК рассмотрен случай аварийного останова НА при работе на трубопроводную сеть с противодавлением. Увеличение амплитуды волновых процессов в гидросистеме достигнуто за счет резкого закрытия задвижки в напорном патрубке насоса после незначительного по времени движения жидкости в обратном направлении. Полученные при этом кривые изменения фазных токов и напряжений на выходе преобразователя частоты асинхронного двигателя насоса, а также кривые изменения напора и расхода в гидросистеме показаны, соответственно, на рис. 9, 10 в левой части приведенных окон. Гармонический анализ приведенных кривых выполнен, соответственно, на рис. 9, 10 справа. Частота дискретизации по каждому измеряемому параметру составила 6 кГц.

Получено, что возникающие в гидросистеме колебания давления характеризуются высокой плотностью низкочастотных (от 1 до 2 Гц) гармоник напора, расхода и гидравлической мощности, что обусловлено распространением по трубопроводу волн высокого давления.

Следует предположить, что в отличие от гармонического состава электрических сигналов, по которым тяжело определить наличие волновых процессов в трубопроводе из-за обрыва энергетической связи между ротором и статором электрической машины, частотный анализ механических характеристик ЭГК позволит в большей мере оценить влияние возникающих волновых процессов в трубопроводной сети на насосный агрегат.

ВЫВОДЫ. Показано, что использование метода гармонического анализа сигналов мощности (электрической, гидравлической) позволяет выполнить оценку процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе в нестационарных режимах его работы.

Предложенный подход к построению энергоанализатора позволяет исследовать энергопроцессы при изменении их в реальном времени с сохранением полной информации об исходных сигналах, формирующих мощность, учитывать проявление специфических свойств электромеханического оборудования, появление переменных составляющих мощности, обусловленных неустановившимся движением жидкости в трубопроводе. При этом для оценки процессов энергопреобразования и энергоуправляемости электрогидравлического комплекса оправдано использование показателей, базирующихся на определении среднеквадратичных значений мощности как

на отдельных элементах, так и в системе в целом.

Получено, что при возникновении нелинейных гидродинамических процессов в технологическом контуре электрогидравлического комплекса происходит усиление переменных составляющих мощности, особенно их низкочастотной компоненты. Это приводит к росту эффективного значения мощности и, соответственно, к снижению пропускной способности и энергоуправляемости электрогидравлической системы. Сказанное заслуживает особого внимания в вопросах построения систем контроля и защиты электрогидравлического оборудования в нестационарных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневикий К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.
2. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
3. Roy J.K., Roy P.K., Basak P. Water hammer protection in water supply system: A new approach with practical implementation // Proceedings of ICCIA Kolkata. – 2011. – PP. 1–6.
4. Biluš I., Predin A. Experimental analysis of thermo-dynamical surge at water pump inlet // Journal of energy technology. – 2010. – Iss. 3 (3). – PP. 67–74.
5. Stopa M.M., Cardoso F., Martinez C.B. Incipient Detection of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2014. – Iss. 50 (1). – PP. 120–126.
6. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
7. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Оценка процессов энергопреобразования с использованием составляющих мгновенной мощности // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 152–167.
8. Коренькова Т.В. Показатели процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе // Науково-прикладний журнал «Технічна електродинаміка». – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 5. – С. 128–130.
9. Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Мгновенная мощность сигналов произвольной формы // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (12). – С. 10–21.
10. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Power Model of an Electrohydraulic Complex with Periodic Nonlinear Processes in the Pipeline Network. // 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Tatranská Lomnica, The High Tatras, Slovakia September 21–23, 2015. – PP. 345–352 // IEEE Catalog Number CFP15EDQ-USB. – ISBN 978-1-4673-9661-5.

ANALYZER OF ELECTROHYDRAULIC COMPLEX ENERGY CONVERSION PROCESSES

T. Korenkova, V. Kovalchuk, D. Rodkin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

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

Purpose. Research of energy conversion processes in the electrohydraulic complex in nonstationary modes of operation with using a power signals spectrum analyzer. **Methodology.** The use method of power signals (electrical, hydraulic) harmonic analysis allows to execute estimate energy conversion processes in electrohydraulic complex in nonstationary modes of operation, to determine energy processes indicators on the base of power components root-mean-square estimation. **Results.** It was found that the emergence nonlinearity hydrodynamic processes in electrohydraulic complex technologic circuit is amplified power variable components, especially low-frequency components. This leads to an increase in power effective value and respectively to decrease of the power capacity and power controllability of electrohydraulic system. **Originality.** Energy analyzer allows you to research the energy conversion process in electromechanical complexes with various physical nature of the analyzed signals. **Practical value.** Developed energy analyzer is intended to automation of the power (electric, hydraulic) frequency analysis procedures and define energy mode indicators on the basis of root-mean-square power values. The above deserves special attention in matters of building control systems and protection of the electrohydraulic equipment in nonstationary modes. References 12, tables 1, figures 10.

Key words: electrohydraulic complex, energy conversion processes, energy analyzer, hydraulic power.

REFERENCES

1. Vishnevskiy, K.P. (1986), "Perekhodnie procesy v napornikh sistemakh vodopodach [Transients in pressurized water supply systems], Agropromizdat, Moscow. (in Russian)
2. Popov, D.N. (1982), *Nestatsionarnyye gidromekhanicheskie protsessy* [Nonstationary hydromechanical processes], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
3. Roy, J.K., Roy, P.K. and Basak, P. (2011), "Water hammer protection in water supply system: A new approach with practical implementation", *Proceedings of ICCIA Kolkata*, pp. 1–6.
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. Stopa, M.M., Cardoso, F. and Martinez, C.B. (2014), "Incipient Detection of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 50, no. 1, pp. 120–126.
6. Leznov, B.S. (2006), *Energozberegenie i regulyryemuy elektropriyvod v nasosnuh i vozdyhodyvnuh ystanovkah* [Energy saving and adjustable drive for pump and blower installations], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian).
7. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2012), "Evaluation of the energy conversion process with using the instantaneous power components", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, Vol. 4, no. 20, pp. 152–167. (in Russian)
8. Korenkova, T. (2014), "Energy conversion processes indicators in the electrohydraulic complex", *Naukovo-prykladnyy zhurnal «Tekhnichna elektrodynamika»*, *IED NANU*, no. 5, pp. 128–130. (in Russian).
9. Rodkin, D., and Korenkova, T. (2010), "Instantaneous power of the arbitrary waveform", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, Vol. 4, no. 12, pp. 10–21. (in Russian)
10. Zagirnyak, M., Kovalchuk, V. and Korenkova, T. (2015), "Power Model of an Electrohydraulic Complex with Periodic Nonlinear Processes in the Pipeline Network", *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, Tatranská Lomnica, The High Tatras, Slovakia September 21–23, 2015, pp. 345–352, *IEEE Catalog Number CFP15EDQ-USB*, ISBN 978-1-4673-9661-5.

Стаття надійшла 21.02.2016.