

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ**

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

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

Разработана энергетическая модель насосного комплекса, учитывающая кавитационные автоколебания в трубопроводной сети. Показано, что формирование гармонического тестового воздействия на вход энергетической модели позволяет определить частоту кавитационных пульсаций путем анализа сигнала гидравлической мощности. Получено, что при совпадении частоты тестового воздействия и частоты кавитационных пульсаций форма сигнала гидравлической мощности приближается к сигналу мощности без учета кавитации.

**Ключевые слова:** насосный комплекс, гидравлическая мощность, кавитационные автоколебания, тестовый сигнал.

**ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КРИТЕРІЮ**

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

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

Розроблено енергетичну модель насосного комплексу, яка враховує кавітаційні коливання в трубопровідній мережі. Показано, що формування гармонічного тестового впливу на вхід енергетичної моделі дозволяє визначити частоту кавітаційних пульсацій шляхом аналізу сигналу гідравлічної потужності. Отримано, що при співпадинні частоти тестового впливу й частоти кавітаційних пульсацій форма сигналу гідравлічної потужності наближається до сигналу потужності без урахування кавітації.

**Ключові слова:** насосний комплекс, гідравлічна потужність, кавітаційні автоколивання, тестовий сигнал.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Гидротранспортные системы (ГТС) относятся к технологическим комплексам, функционирование которых сопровождается появлением сложных гидродинамических процессов: кавитационных, турбулентных, помпажных [1].

Одними из наиболее негативных по последствиям являются кавитационные процессы, характеризующиеся возникновением периодических колебаний давления в гидросистеме с амплитудой до 25 % от действующего значения и частотой в пределах  $f_{kav} = 2 - 50$  Гц [2, 3]. Возникновение кавитационных процессов сопровождается образованием кавитационных каверн – полостей, заполненных паром или газом, характеризующихся длиной  $l_{kav}$ , объемом  $V_{kav}$  и периодом пульсаций  $T_{kav}$  [4]. Для кавитационных каверн характерны определенные фазы их развития (рис. 1): время роста каверны  $T_1$ , время стабилизации ее длины  $T_2$ , промежуток времени между разрушением фронта предыдущей и возникновением последующей каверны  $T_3$ , которая может возникать как после, так и до разрушения предыдущей [4].

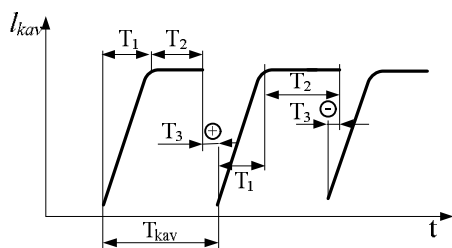


Рисунок 1 – Развитие каверны во времени

Параметры кавитационных автоколебаний изменяются во времени и зависят от многих факторов: частоты вращения электродвигателя, допустимой высоты всасывания и величины давления на входе насоса, режима водопотребления – и в реальных условиях эксплуатации являются неизвестными.

Природа возникновения кавитационных пульсаций в настоящее время еще недостаточно полно объяснена и требует дальнейшего изучения. Однако бесспорным остается факт, что развитие пульсирующей каверны – процесс периодический с характерной для данного режима частотой, приводящий к изменению энергетических показателей всего насосного комплекса из-за наличия потерь мощности на кавитацию, роста суммарных потерь мощности на транспортировку жидкости, снижения КПД насосных агрегатов. С учетом сказанного, определение параметров гидродинамических процессов напрямую связано с изменением энергетических показателей ГТС.

Одним из вариантов решения указанной задачи является разработка системы формирования тестовых воздействий на вход ГТС, позволяющей исследовать энергетические процессы в гидросистеме и определить информационные признаки в спектрах мощности для идентификации параметров насосных комплексов (НК) и рассматриваемых гидродинамических процессов. При этом для анализа можно рассматривать тестовые сигналы различной формы: ступенчатые, импульсные, гармонические и т.п. Сказанное заслуживает внимания при запуске и модернизации насосного оборудования, анализе текущего состояния НК, в системах энергопрогноза, мониторинга и диагностики электрогидравлического оборудования.

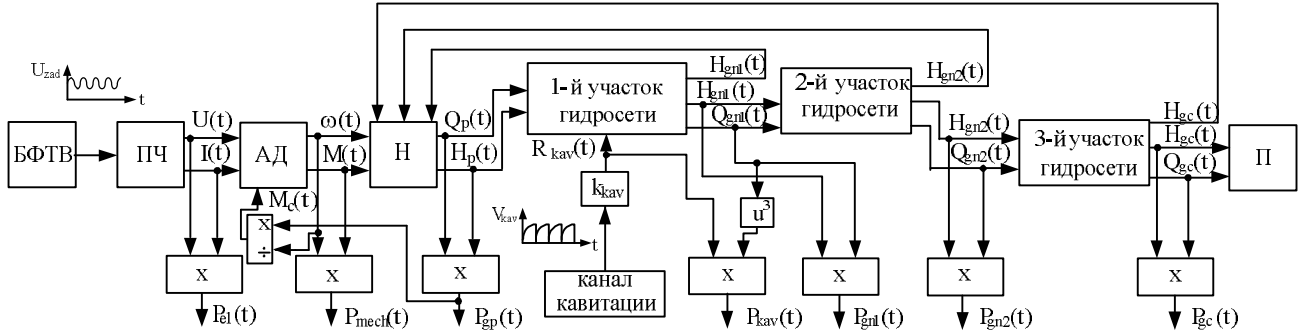


Рисунок 2 – Энергетическая модель насосного комплекса:

БФТВ – блок формирования тестового воздействия; ПЧ–АД – преобразователь частоты–асинхронный двигатель; Н – насос; П – потребитель

Целью работы является анализ энергетических процессов в ГТС и определение динамических параметров кавитационных явлений при формировании гармонического тестового воздействия на входе насосного комплекса.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исследование энергетических процессов в НК выполнено на базе энергетической модели (рис. 2), включающей: блок формирования входного тестового воздействия, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, насос, трубопроводную сеть, потребитель и канал кавитации, подключенный к первому участку гидросети. Математическое описание элементов, входящих в структуру предложенной модели, приведено в [3].

Функционирование НК сопровождается непрерывным преобразованием параметров энергетического режима: электрической мощности  $P_{el}(t)$  в механическую  $P_{mech}(t)$ , а затем в гидравлическую мощность  $P_{gp}(t)$  насоса, трубопроводной сети  $P_{gni}(t)$  и потребителя  $P_c(t)$ .

Гидравлическая мощность на выходе насосного агрегата:

$$P_{gp}(t) = \rho g Q_p(t) H_p(t), \quad (1)$$

где  $H_p(t)$ ,  $Q_p(t)$  – сигналы напора и производительности, соответственно;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность жидкости.

Гидравлическая мощность на  $i$ -том участке трубопровода:

$$P_{gni}(t) = \rho g Q_i(t) H_i(t), \quad (2)$$

где  $H_i(t)$ ,  $Q_i(t)$  – сигналы напора и производительности на  $i$ -том участке трубопровода, соответственно.

Мгновенная гидравлическая мощность потребителя:

$$P_{gc}(t) = \rho g Q_c(t) H_c(t), \quad (3)$$

где  $H_c(t)$ ,  $Q_c(t)$  – напор и производительность у потребителя, соответственно.

Возникновение кавитационных процессов в гидросистеме сопровождается появлением непроеизводительных потерь мощности:

$$\Delta P_{kav}(t) = \rho g Q_{gn1}(t) \Delta H_{kav}(t), \quad (4)$$

где  $\Delta H_{kav}(t) = R_{kav}(t) Q_{gn1}^2(t)$  – потери напора в канале кавитации;  $R_{kav} = \frac{\zeta_{kav}}{2gS^2} = K_{kav} V_{kav}$  – гидравлическое сопротивление, создаваемое кавитационными кавернами;

$V_{kav} = \frac{1}{T_{kav}} \int_0^T (Q_{gn1}(t) - Q_p(t)) dt$  – объем кавитационной каверны;  $T_{kav} = \frac{V_{kav}}{G} \gamma$  – постоянная времени кавитационной каверны;  $G$  – весовой расход жидкости;  $\gamma$  – удельный вес жидкости [3].

На вход системы подается тестовое задающее воздействие, включающее постоянную  $U_0$  и знакопеременную  $U_{var} \cos(\Omega t)$ , составляющие:  $U_{zad}(t) = U_0 + U_{var} \cos(\Omega t)$ , где  $\Omega = 2\pi f_{zad}$  – круговая частота;  $f_{zad}$  – частота сигнала задания;  $t$  – время изменения сигнала;  $U_0, U_{var}$  – амплитудные значения постоянной и знакопеременной составляющих сигнала задания.

Для насосного комплекса с параметрами  $H_n = 62,5 \text{ м}$ ,  $Q_n = 0,347 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P_n = 200 \text{ кВт}$ ,  $\eta_n = 0,86$ ,  $\omega_n = 311 \text{ с}^{-1}$  и тестовым сигналом вида  $U_{zad}(t) = 40 + 40 \cos(\Omega t)$  с частотой, изменяющейся в диапазоне  $f_{zad} = 0,5 - 50 \text{ Гц}$ , получены кривые изменения мгновенной гидравлической мощности и ее амплитудные спектры в системе без учета кавитационных процессов (рис. 3) и при возникновении кавитационных явлений с частотой пульсаций  $f_{kav} = 1,5 - 10 \text{ Гц}$  (рис. 4–9). При этом для анализа в работе рассмотрены кривые гидравлической мощности на выходе второго участка трубопроводной сети, где наиболее заметны кавитационные колебания.

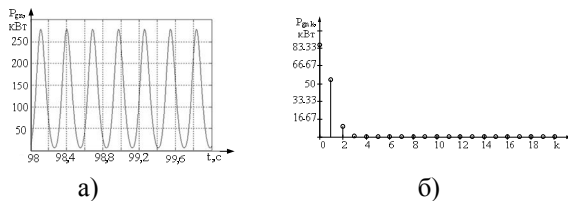


Рисунок 3 – Кривая изменения гидравлической мощности а) и ее амплитудный спектр б) при частоте тестового сигнала  $f_{zad} = 3,5$  Гц

Получено, что в гидросистеме без учета кавитационных процессов при гармоническом тестовом сигнале  $U_{zad}(t)$  с частотой  $f_{zad} = 3,5$  Гц кривая гидравлической мощности также носит гармонический характер с периодом  $T_{gn} = 0,286$  с. При этом в амплитудном спектре мощности присутствуют нулевая, первая и вторая гармоники (рис. 3).

Возникновение кавитационных автоколебаний в трубопроводной сети НК приводит к искажению формы сигнала гидравлической мощности и появлению высших гармонических в ее амплитудном спектре (рис. 4–9).

Степень искажения формы сигнала  $P_{gni}(t)$  зависит от соотношения частоты тестового воздействия и частоты кавитационных пульсаций. Так, при их равенстве  $f_{zad} = f_{kav}$  форма сигнала и амплитудный спектр гидравлической мощности приближаются к сигналу мощности в гидросистеме без учета

кавитации (рис. 4,б; рис. 6,б; рис. 8,в). Сказанное является принципиально важным в реальных условиях эксплуатации НК: при известной частоте входного сигнала и кривой  $P_{gni}(t)$ , определенной по результатам измерений напора  $H(t)$  и расхода  $Q(t)$  в требуемой точке трубопроводной сети, можно оценить частоту кавитационных явлений в гидросистеме.

При формировании частоты тестового сигнала  $f_{zad} > f_{kav}$  происходит изменение периода сигнала мгновенной гидравлической мощности, который отличен как от периода входного воздействия, так и от периода кавитационных колебаний. Так, для тестового сигнала с  $T_{zad} = 0,1$  с и при наличии кавитационных автоколебаний с  $T_{kav} = 0,28$  с сигнал гидравлической мощности на втором участке трубопроводной сети имеет период, равный  $T_{gn} = 0,5$  с (рис. 6,г). Сказанное позволяет сделать вывод о том, что канал кавитации, являясь генератором высших гармоник с частотами, не совпадающими с частотами входного воздействия, приводит к трансформации частотного спектра гидравлической мощности в трубопроводной системе. Для гармонического анализа сложных периодических колебаний, возникающих в результате влияния нелинейных элементов или процессов нахождение сигнала в рассматриваемой энергетической цепи, эффективным средством является использование математического аппарата рядов Фурье [5].

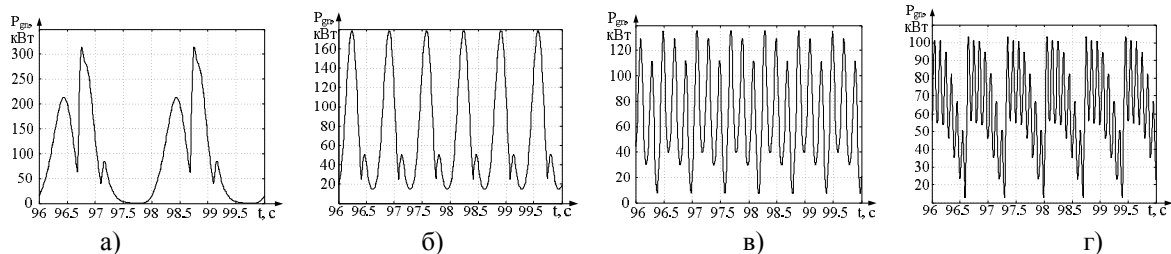


Рисунок 4 – Кривые изменения мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav1} = 1,5$  Гц при различных частотах тестового сигнала:

а)  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б)  $f_{zad2} = 1,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 5$  Гц; г)  $f_{zad4} = 10$  Гц

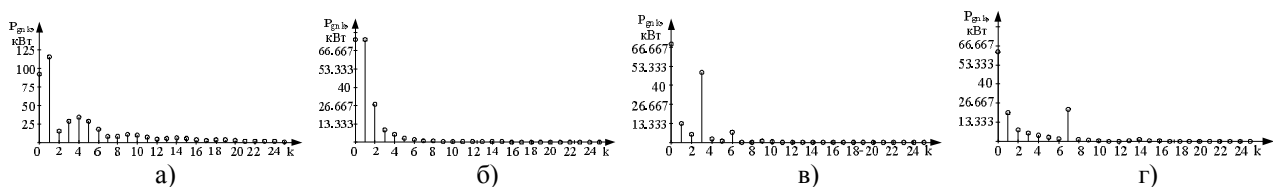


Рисунок 5 – Амплитудные спектры мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav1} = 1,5$  Гц при различных частотах тестового сигнала:

а)  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б)  $f_{zad2} = 1,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 5$  Гц; г)  $f_{zad4} = 10$  Гц

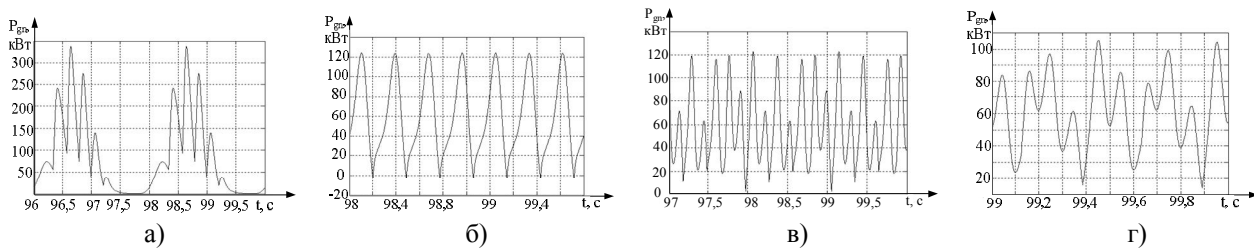


Рисунок 6 – Кривые изменения мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav1} = 3,5$  Гц при различных частотах тестового сигнала:  
 а) при  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б) при  $f_{zad2} = 3,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 6,5$  Гц; г)  $f_{zad4} = 10$  Гц

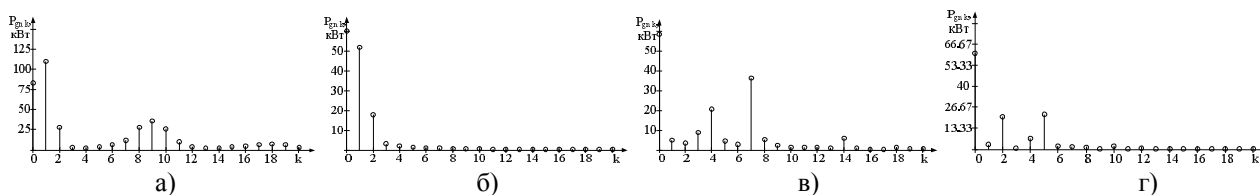


Рисунок 7 – Амплитудные спектры мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav1} = 3,5$  Гц при различных частотах тестового сигнала:  
 а)  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б)  $f_{zad2} = 3,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 6,5$  Гц; г)  $f_{zad4} = 10$  Гц

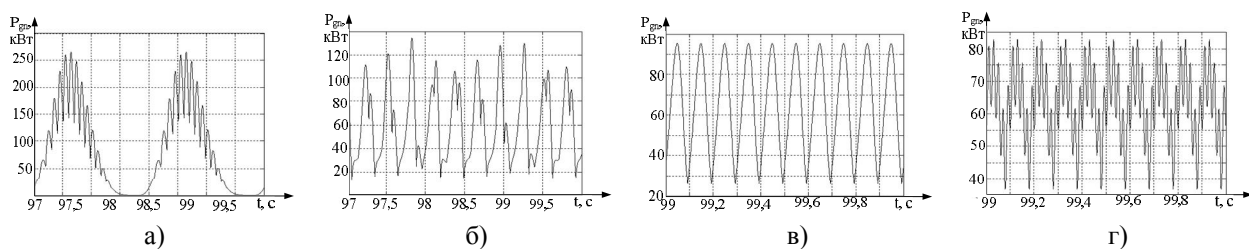


Рисунок 8 – Кривые изменения мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav2} = 10$  Гц при различных частотах тестового сигнала:  
 а)  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б)  $f_{zad2} = 3,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 10$  Гц; г)  $f_{zad4} = 50$  Гц

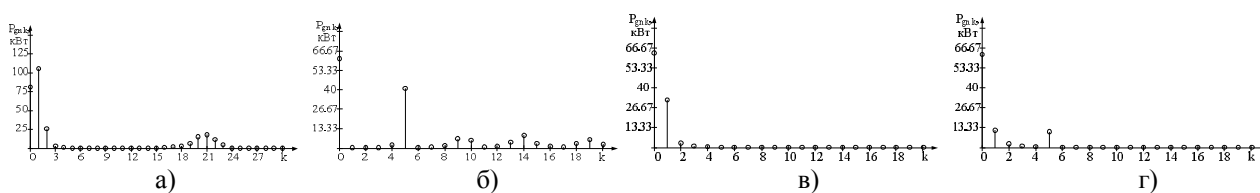


Рисунок 9 – Амплитудные спектры мгновенной гидравлической мощности с  $f_{kav2} = 10$  Гц при различных частотах тестового сигнала:  
 а)  $f_{zad1} = 0,5$  Гц; б)  $f_{zad2} = 3,5$  Гц; в)  $f_{zad3} = 10$  Гц; г)  $f_{zad4} = 50$  Гц

Разложение сигнала гидравлической мощности на постоянную и знакопеременную составляющие с помощью аппарата мгновенной мощности позволяет составить уравнения энергетического баланса технологического комплекса. Такой подход дает возможность определять большее количество неизвестных параметров.

**ВЫВОДЫ.** Показано, что кавитационные процессы сопровождаются появлением пульсаций расхода и гидравлической мощности, что приводит к изменению энергетического состояния всего технологического комплекса.

Доказана возможность формирования тестовых задающих воздействий в насосном комплексе для определения динамических параметров

кавитационных процессов в гидротранспортных системах.

Анализ полученных сигналов гидравлической мощности показал, что при задании тестового синусоидального сигнала с частотой, соизмеримой с частотой кавитационных колебаний, анализируемый сигнал гидравлической мощности имеет форму и амплитудный спектр, близкие к сигналу мощности в системе без кавитации. Сказанное позволяет определить частоту гидродинамических процессов, что является весьма важным в задачах идентификации параметров насосных комплексов, диагностики технического состояния электрогидравлического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вишнеvский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.

#### ESTIMATION OF HYDROTRANSPORT SYSTEMS DYNAMIC PARAMETERS WITH THE USE OF POWER CRITERION

V. Kovalchuk, T. Korenkova, O. Serduk

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: viktorija\_kovalc@mail.ru

An energy model of the pumping complex taking into account the cavitations self-oscillation in the pipeline network has been developed. It has been shown that the formation of the harmonic test influence on the energy model input allows determination of the frequency of cavitations pulsations by analysis of hydraulic power signal. It has been found that when the frequency of test influence and frequency of cavitations pulsations waveform hydraulic power signal is approaching to the signal power without cavitation.

**Key word:** pumping complex, hydraulic power, cavitations self-oscillation, test signal.

#### REFERENCES

1. Vishnevskiy K.P. *Transients in pressurized water supply systems*. – M.: Agropromizdat, 1986. – 135 p. [in Russian]

2. Pilipenko V.V., Zadontsev V.V., Natanzon M.S. *Cavitation oscillations and the dynamics of hydraulic systems*. – M.: Mechanical engineering, 1977. – 352 p. [in Russian]

3. Serdyuk O.O., Korenkova T.V. Dynamic processes in hydrotransport complex taking into account cavitation events // *Bulletin of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"*. – Kharkov: NTU «KPI», 2010. – № 28. – PP. 375–382. [in Russian]

2. Пилипенко В.В., Задонцев В.В., Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

3. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Динамические процессы в гидротранспортном комплексе с учетом кавитационных явлений // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 375–382.

4. Грянюк Л.П., Папира А.Н. Лопастные насосы. – Л.: Машиностроение, 1975. – 432 с.

5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

Стаття надійшла 18.05.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.