

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ НАСОСНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ

А. Г. Лютов¹, М. Б. Новоженин², В. А. Огородов³

¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru, ³ogorodov.v@ugatu.su

^{1,3} ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

² ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (МИРЭА-РТУ)

Поступила в редакцию 07.10.2021

Аннотация. Прецедентный подход, применяемый для автоматизированного управления режимами работы насосных комплексов, позволяет уменьшить или полностью устранить различные нестационарные гидравлические процессы, в том числе кавитацию. Рассмотрены условия возникновения в насосных комплексах колебаний гидродинамического характера, способствующих возникновению или активизации указанных нежелательных процессов, с построением моделей на основе метода электроанalogии и применением критериев устойчивости теории автоматического управления. Полученные результаты позволяют осуществлять формирование и использование базы прецедентов при управлении режимами работы насосных комплексов с учетом колебательности динамических процессов.

Ключевые слова: центробежный насос; прецедентный подход, колебательные процессы; напорно-расходная характеристика; метод электроанalogии.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Технологические процессы перекачивания жидкостей широко используются в различных отраслях промышленности – в коммунальном хозяйстве, водоснабжении и водоотведении, при транспортировке нефтепродуктов и т.д., а также в авиационной технике [1]. Для этого обычно применяются насосные комплексы (НК), под которыми подразумеваются один или несколько насосов с прилегающими к ним трубопроводами. Наибольшее распространение получили НК на основе центробежных насосов (ЦН) в силу их значительной производительности, высокого КПД и удобства в эксплуатации.

Среди способов управления режимами работы ЦН можно выделить управление на основе прецедентного подхода [2], который позволяет установить взаимосвязь между текущим режимом работы, реализуемым управляющим воздействием и предполагаемым результатом.

К одному из негативных факторов при работе ЦН относится то, что при определенных условиях в НК могут возникать колебания, в том числе гармонические, которые обуславливают или активизируют различного рода нестационарные гидравлические процессы, в частности такие, как кавитация. Она имеет место при локальном снижении давления в ЦН или трубопроводе до давления насыщенных паров с последующим схлопыванием образующихся полостей, заполненных газом или паром [3, 4]. Это явление приводит к эрозии рабочих органов ЦН, шумам, вибрации и пульсациям давления в системе и, как следствие, уменьшению производительности, к снижению КПД, повышению износа и разрушению элементов, уменьшению срока службы насосного оборудования.

С целью снижения влияния указанных негативных факторов при управлении НК (выборе режимов работы) необходим учет условий возникновения колебательных процессов.

В связи с этим, определение условий возникновения колебательных процессов, выявление соответствующих режимных областей при управлении ЦН и предоставление дополнительной информации для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении НК является важной и актуальной задачей.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Основной характеристикой НК, отражающей изменение режима его работы является напорно-расходная характеристика (НРХ). С ее помощью можно определить рабочую точку как пересечение характеристики сети (с увеличением расхода Q происходит увеличение и напора H) и характеристики ЦН (с увеличением расхода уменьшается напор). Изменение положения рабочей точки приводит к изменению режима работы НК.

Так как колебательные процессы относятся к категории динамических, то для эффективного исследования динамических процессов в НК методами теории автоматического управления для линейных систем [5] целесообразна линеаризация НРХ в области рабочей точки. При этом для описания данных динамических процессов необходимо воспользоваться значениями дифференциальных сопротивлений в рабочей точке НРХ: $R_c = \left. \frac{dH_c}{dQ} \right|_{Q_0} > 0$,

$R_{цн} = \left. \frac{dH_{цн}}{dQ} \right|_{Q_0} < 0$, где R_c – дифференциальное сопротивление сети, $R_{цн}$ – дифференциальное

сопротивление ЦН (рис. 1).

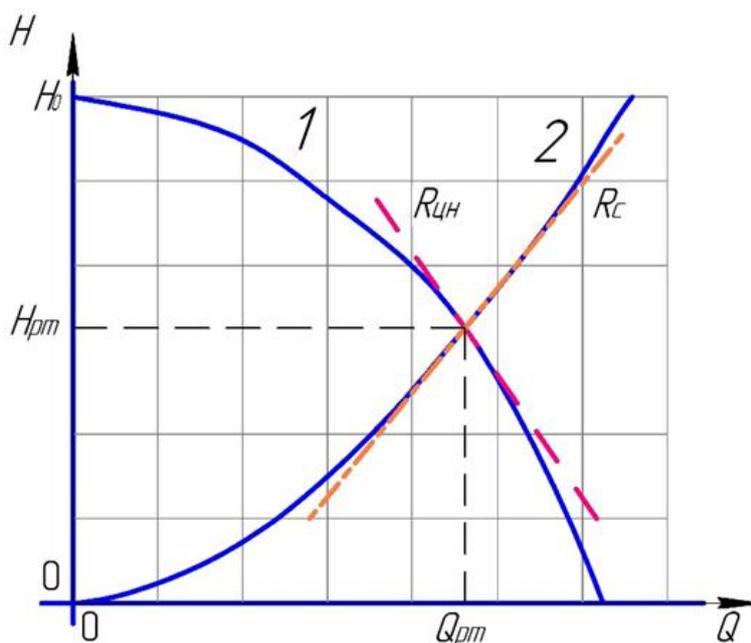


Рис. 1. Напорно-расходная характеристика центробежного насоса (1) и сети (2)

Существуют различные схемы включения ЦН в НК. В качестве примера рассмотрим типовую схему включения ЦН, приведенную на рис. 2.

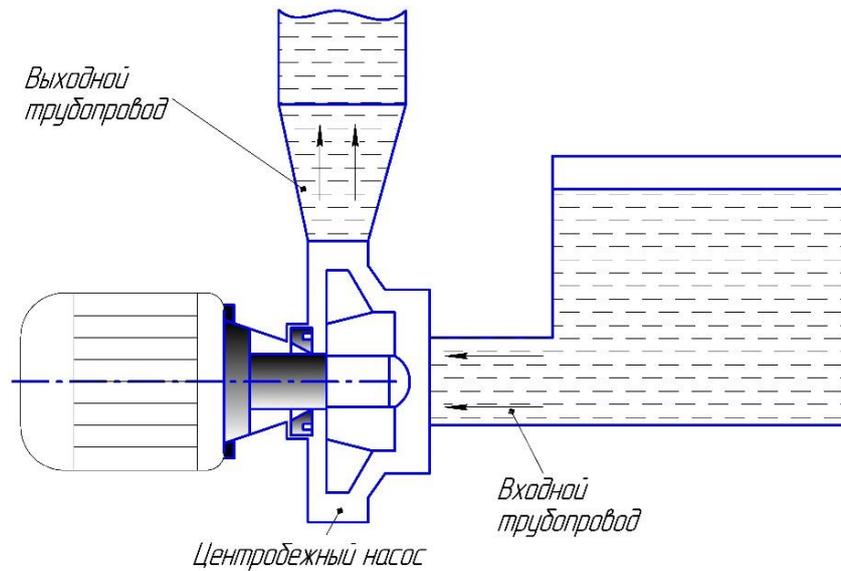


Рис. 2. Схема включения ЦН

На рис. 3 приведена схема автоматизированной системы управления НК с применением прецедентного подхода [6].

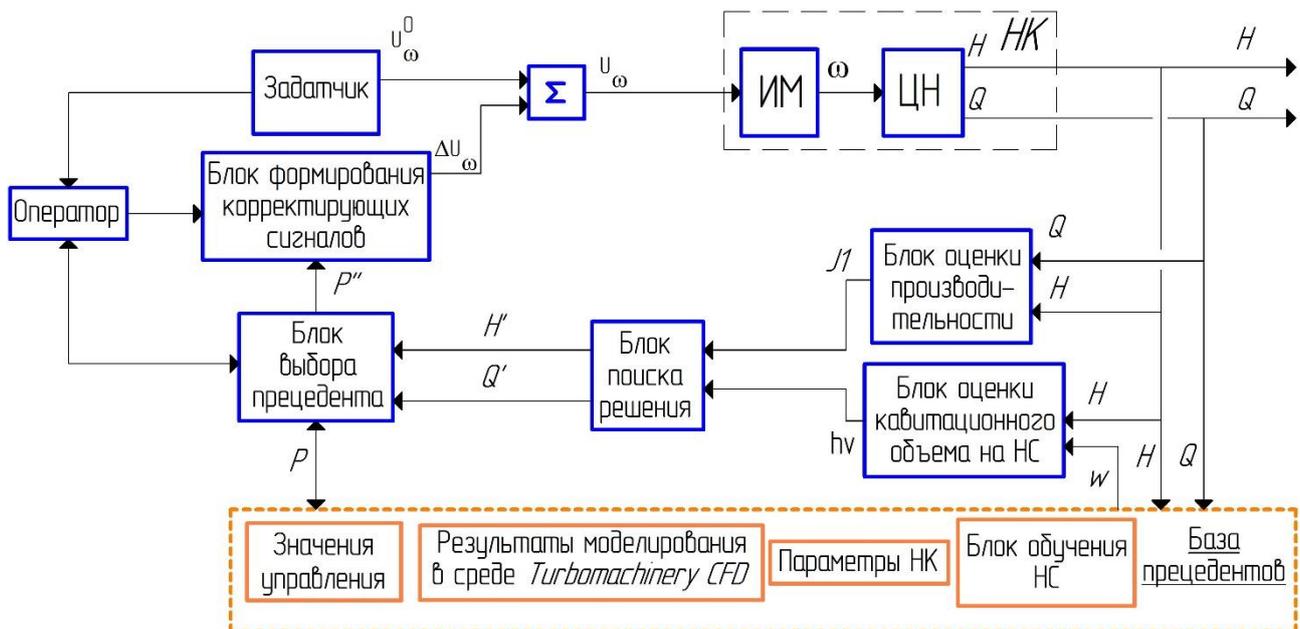


Рис. 3. Структурная схема системы автоматизированного управления НК с применением прецедентного подхода

Задатчик системы формирует управляющее воздействие, соответствующее требуемой круговой частоте вращения рабочего колеса центробежного насоса U_{ω}^0 .

Блок определения кавитационного объема с помощью нейронной сети определяет величину кавитации h_v для используемого режима работы на основе весов w из базы прецедентов. Блок оценки производительности при помощи критерия оценки производит определение отклонения производительности насосного комплекса J_1 от заданной.

Блок поиска решения с помощью алгоритма Хука-Дживса формирует набор подходящих прецедентов $P = \{H', Q'\}$, используя значения критерия оценки производительности J_1 и кавитационного объема h_v .

Блок выбора прецедента производит проверку предлагаемых прецедентов P на математической модели процесса перекачивания жидкости, формирует заключения об их пригодности P'' .

Блок формирования корректирующих сигналов предлагает отобранные воздействия оператору для последующего принятия решения о коррекции управления $\{\Delta U_\omega\}$ насосным комплексом.

База прецедентов, сформированная в режиме off-line, состоит из результатов моделирования в среде Turbomachinery CFD: возможных значений управляющих воздействий с учетом ограничений, статических и динамических параметров и характеристик насосного комплекса, настройки весов нейронной сети.

Прерывания в системе реализованы по времени и по инициативе оператора.

ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для построения динамической модели процесса перекачивания жидкости с целью эффективного анализа условий возникновения колебательных процессов целесообразно воспользоваться методом электроанalogии [7], получившим применение при моделировании гидравлических процессов.

Рассмотрим модель НК, сформированную с помощью метода электроанalogии (рис. 4).

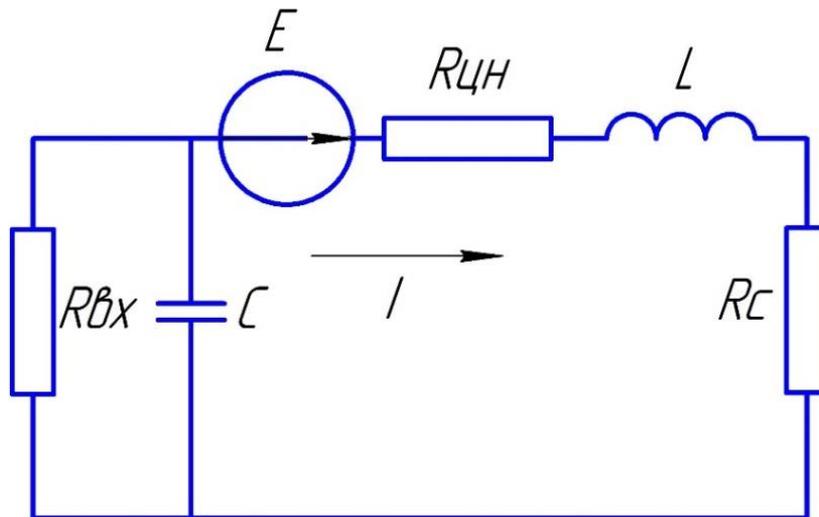


Рис. 4. Модель насосного комплекса, построенная на основе метода электроанalogии

На рис. 4: E – электрический эквивалент напора, развиваемого ЦН; I – электрический эквивалент расхода; R_c , $R_{цн}$, R_{ex} – эквиваленты гидравлических дифференциальных сопротивлений сети центробежного насоса, всасывающего (входного) трубопровода (соответственно); C – динамический элемент (электрическая емкость), отражающий упругие свойства жидкости и элементов конструкции насосного комплекса; L – динамический элемент (индуктивность), отражающий инерционность потока жидкости [8].

Используя приведенную выше модель, составим уравнение электрической цепи в комплексной области в соответствии со 2-м законом Кирхгофа:

$$E(j\omega) = I(j\omega) \cdot (R_c + R_{цн} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \cdot R_{ex}), \quad (1)$$

$$\frac{1}{j\omega C} + R_{ex}$$

или

$$E(j\omega) = I(j\omega) \cdot \left(\frac{(R_c + R_{\text{цн}} + j\omega L) \cdot (1 + j\omega CR_{\text{ex}}) + R_{\text{ex}}}{1 + j\omega CR_{\text{ex}}} \right). \quad (2)$$

После раскрытия скобок, группировки и перехода, в соответствии с преобразованием Лапласа [5], к операторной форме записи ($p = j\omega$), получим:

$$E(p) = I(p) \cdot \left(\frac{LCR_{\text{ex}} p^2 + (CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L)p + (R_c + R_{\text{цн}} + R_{\text{ex}})}{1 + CR_{\text{ex}} p} \right). \quad (3)$$

Соответствующая передаточная функция будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{1 + CR_{\text{ex}} p}{LCR_{\text{ex}} p^2 + (CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L)p + (R_c + R_{\text{цн}} + R_{\text{ex}})}. \quad (4)$$

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для анализа устойчивости и степени колебательности динамической системы с передаточной функцией (4) в рабочей точке НРХ, необходим анализ характеристического полинома (знаменателя) передаточной функции (4):

$$LCR_{\text{ex}} p^2 + (CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L)p + (R_c + R_{\text{цн}} + R_{\text{ex}}). \quad (5)$$

Необходимым условием устойчивости динамических процессов в системах второго порядка является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения [5]. Так как коэффициент при p^2 заведомо положителен, то анализ сводится к получению условий положительности двух других коэффициентов.

В частности, для среднего коэффициента необходимо, чтобы:

$$CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L > 0, \quad (6)$$

или

$$R_c + R_{\text{цн}} > \frac{-L}{CR_{\text{ex}}}. \quad (7)$$

Учитывая, что значения напоров могут быть определены по известным зависимостям [7]: $H_{\text{цн}} = H_0 - aQ^2$, $H_c = bQ^2$, где $H_{\text{цн}}$ – напор, развиваемый центробежным насосом; H_c – напор гидравлической сети, и, принимая соответственно значения дифференциальных сопротивлений: $R_{\text{цн}} = \frac{dH}{dQ} = -2aQ$, $R_c = \frac{dH}{dQ} = 2bQ$, получим следующее неравенство:

$$2Q(a - b) < \frac{L}{CR_{\text{ex}}}, \quad (8)$$

или

$$a - b < \frac{L}{2QCR_{\text{ex}}}. \quad (9)$$

В то же время $a = \frac{H_0 - H_{\text{цн}}}{Q^2}$, $b = \frac{H_c}{Q^2}$, отсюда получим выражение

$$\frac{H_0 - H_{\text{шн}} - H_c}{Q^2} < \frac{L}{2QCR_{\text{ex}}}, \quad (10)$$

или

$$H_{\text{шн}} + H_c > H_0 - \frac{L}{2CR_{\text{ex}}} \cdot Q. \quad (11)$$

В рабочей точке (пересечении НРХ) напоры равны между собой: $H_{\text{шн}} + H_c = 2H$, тогда из (11) получим условие:

$$2H > H_0 - \frac{L}{2CR_{\text{ex}}} \cdot Q, \quad (12)$$

или

$$H > \frac{H_0}{2} - \frac{L}{4CR_{\text{ex}}} \cdot Q. \quad (13)$$

Полученное условие позволяет построить границу колебательной устойчивости и выделить на НРХ области, соответствующие разной степени колебательности гидравлических процессов в насосном комплексе (рис. 5).

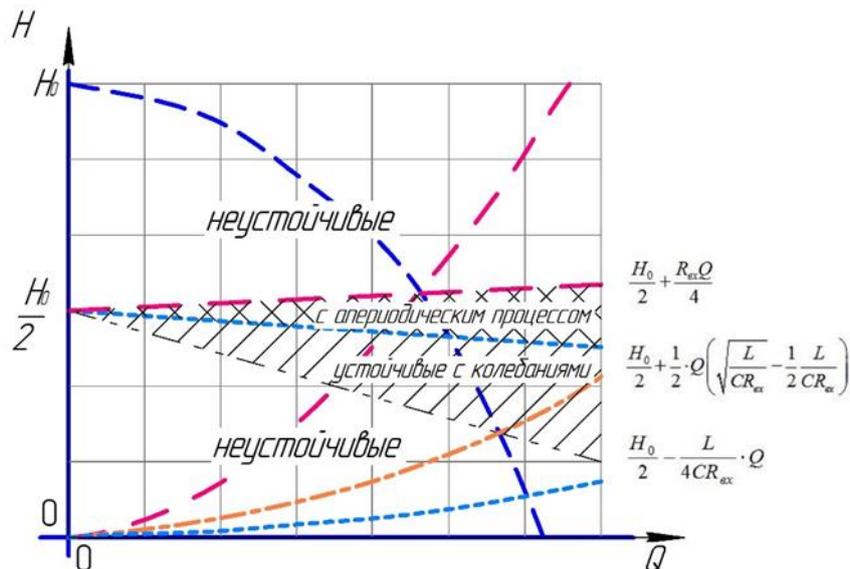


Рис. 5. Напорно-расходная характеристика центробежного насоса с выделенными областями различной степени колебательности (неустойчивые процессы, колебательные и аперiodические процессы)

Условие положительности значений свободного члена характеристического уравнения передаточной функции (4) исследуемой системы:

$$R_c + R_{\text{шн}} + R_{\text{ex}} > 0. \quad (14)$$

Учитывая, аналогично вышеизложенному, что $R_{\text{шн}} = \frac{dH}{dQ} = -2aQ$, $R_c = \frac{dH}{dQ} = 2bQ$, получим неравенство:

$$R_{\text{ex}} > 2Q(b-a). \quad (15)$$

Принимая, также аналогично, что $a = \frac{H_0 - H_{цн}}{Q^2}$, $b = \frac{H_c}{Q^2}$ и $H_{цн} + H_c = 2H$, получим

$$b - a = \frac{2H - H_0}{Q^2}, \tag{16}$$

или

$$H < \frac{H_0}{2} + \frac{R_{ex} Q}{4}. \tag{17}$$

Полученное условие, дополнительно к предыдущему позволяет построить границу аperiодической устойчивости и выделить на НРХ соответствующие области (рис. 5).

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Передаточная функция (4) может быть представлена в обобщенном виде передаточной функции колебательного звена:

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + k}, \tag{18}$$

где

$$\begin{cases} T^2 = LCR_{ex} \\ 2\xi T = CR_{ex} \cdot (R_c + R_{цн}) + L \end{cases} \tag{19}$$

Используя данные выражения и учитывая, что условие $0 < \xi < 1$ соответствует области колебательных, а $1 \leq \xi$ области аperiодических динамических процессов, а также применяя изложенный выше подход к построению соответствующих областей, можно получить следующее дополнительное условие аperiодичности переходных процессов:

$$H > \frac{H_0}{2} + \frac{1}{2} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{L}{CR_{ex}}} - \frac{1}{2} \frac{L}{CR_{ex}} \right). \tag{20}$$

Соответствующая граница областей изображена на рис. 5.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для иллюстрации характера переходных процессов в насосном комплексе, характерных для выделяемых на НРХ областей, осуществлен численный эксперимент (расчетные параметры которого представлены в табл. 1) с использованием динамической модели в виде передаточной функции (4).

Таблица 1

Параметры для расчетов математической модели

Параметр	I эксперимент	II эксперимент	III эксперимент
<i>a</i>	1,6		
<i>b</i>	1,36	0,383	0,06
<i>Q</i>	4,5	5,5	6
<i>L</i>	180		
<i>C</i>	1,0039		
Rвх	13,4		

Результаты численного моделирования процессов в рассматриваемой динамической системе в математическом пакете Matlab для различного расположения рабочей точки НРХ представлены на рис. 6.

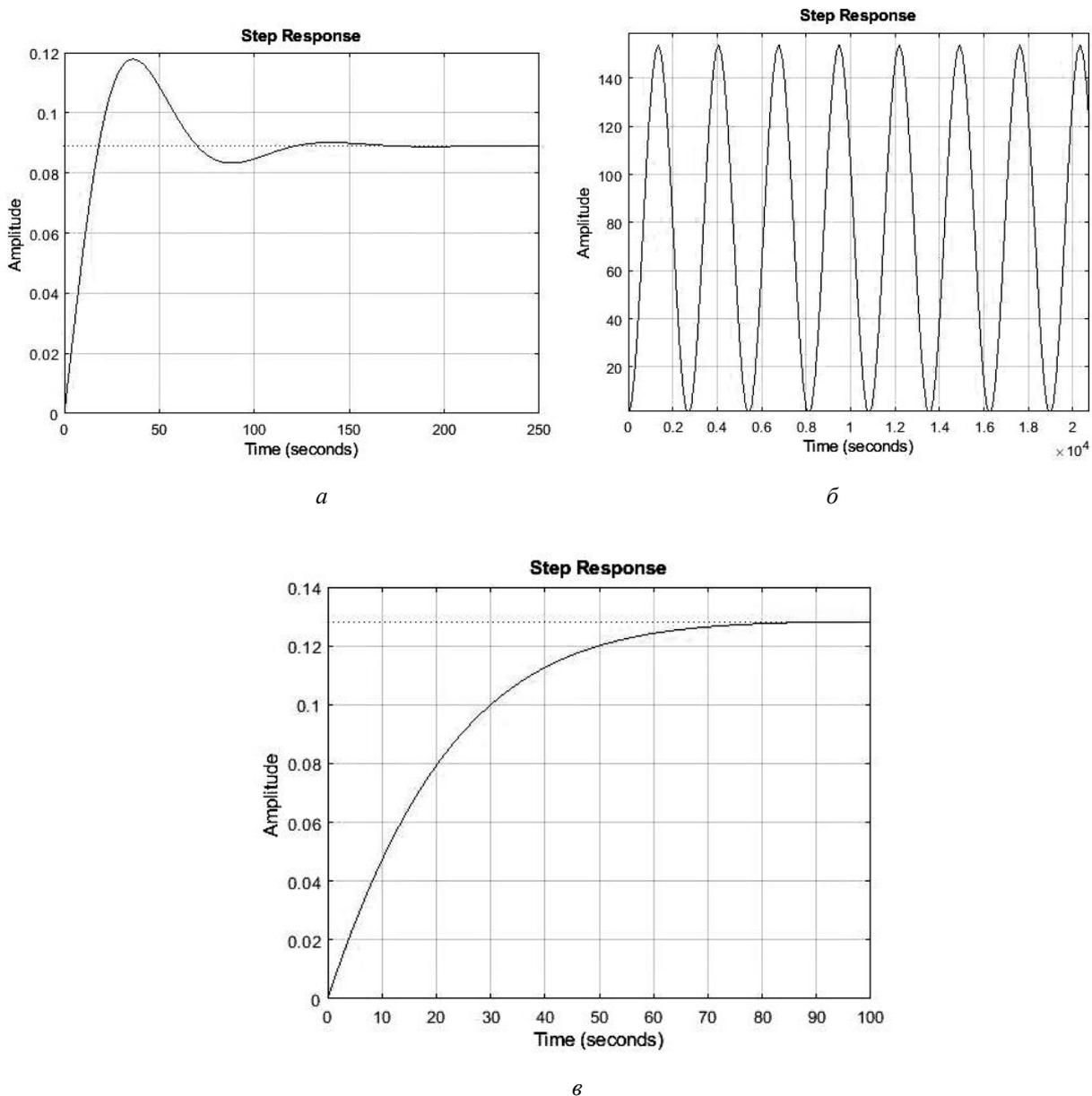


Рис. 6. Графики переходных процессов при различных условиях моделирования:
а – в области устойчивых колебательных процессов; б – на границе устойчивости;
в – в области апериодических (монотонных) процессов

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схема включения ЦН в НК определяет структуру динамической модели, выстраиваемую на основе метода электроанalogии, а также набор элементов, в том числе динамических, входящих в данную модель.

Полученные в процессе анализа динамической модели результаты позволяют выделить на НРХ НК области, характеризующиеся той или иной степенью устойчивости и колебательности динамических процессов при перекачивании жидкости. Это позволяет предоставить дополнительную информацию для обоснованного выбора прецедентов (с наименьшей степенью колебательности) при автоматизированном управлении НК.

Для определения границ соответствующих областей необходима предварительная идентификация параметров модели (L , C , $R_{\text{вх}}$), в частности экспериментально-расчетным путем, а также с применением имитационного моделирования с использованием численных методов.

Доверительный интервал идентифицируемых параметров позволяет уточнить границу каждого из режимов:

$$H < \frac{H_0}{2} + \frac{(R_{\text{вх}} \pm \delta)Q}{4}, \quad (21)$$

$$H > \frac{H_0}{2} - \frac{1}{4} \left(\frac{L}{CR_{\text{вх}}} \pm \Delta \right) \cdot Q, \quad (22)$$

$$H > \frac{H_0}{2} + \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{L}{CR_{\text{вх}}}} \pm \sqrt{\Delta} \right) \cdot Q - \frac{1}{4} \left(\frac{L}{CR_{\text{вх}}} \pm \Delta \right) \cdot Q, \quad (23)$$

где $\pm \delta$ – поправочный коэффициент $R_{\text{вх}}$ для доверительного интервала; $\pm \Delta$ – поправочный коэффициент $\frac{L}{CR_{\text{вх}}}$ для доверительного интервала. В этом случае границы областей будут иметь вид секторов, ширина которых определяется величиной соответствующих поправочных коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследования позволяют определить условия возникновения нежелательных колебательных процессов в системах перекачивания жидкости на основе ЦН в зависимости от статических и динамических параметров НК.

Использованный для построения динамической модели подход на основе метода электроанalogии дал возможность осуществить анализ устойчивости и степени колебательности процесса перекачивания жидкости методами теории автоматического управления. Полученные аналитические соотношения позволили определить границы соответствующих режимных областей на НРХ, соответствующих той или иной степени устойчивости и колебательности динамических процессов.

Предложенный подход рассмотрен на примере одной из схем включения ЦН в НК, но может быть применен к другим возможным схемам с построением соответствующих моделей по методу электроанalogии.

Выявление соответствующих режимных областей на НРХ предоставляет дополнительную информацию для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении НК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краев М. В., Лукин В. А., Овсянников Б. В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем. М.: Машиностроение, 1985. 128 с. [M. V. Kraev, V. A. Lukin, B. V. Ovsyannikov, *Low-flow pumps of aviation and space systems*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1985.]
2. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд.: пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с.: ил. [J. Jarratano, G. Riley, *Expert systems: principles of development and programming*, 4th ed.: translated from English. Moscow: ООО "I. D. Williams", 2007.]
3. Высокооборотные лопаточные насосы / под ред. Б. В. Овсянникова и В. Ф. Чебаевского. М.: Машиностроение, 1975. 336 с. [B. V. Ovsyannikov, V. F. Chebaevsky (eds.), *High-speed vane pumps*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1975.]
4. Li S. C. Cavitation of Hydraulic Machinery. Imperial College Press, 2000. 492 p. [S. C. Li, *Cavitation of Hydraulic Machinery*. Imperial College Press, 2000.]
5. Певзнер Л. Д. Теория систем управления. СПб.: Лань, 2013. 424 с. [L. D. Pevzner, *Control systems theory*, (in Russian). St. Petersburg: Lan, 2013.]
6. Лютов А. Г., Новоженин М. Б. Методология автоматизированного контроля и управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 9.

C. 468–474. DOI: 10.17587/mau.22.468-474. [A. G. Lutov, M. B. Novozhenin, "Methodology of automated monitoring and control of pumping complex operating modes in conditions of cavitation", (in Russian), in *Mechatronika, avtomatizacia, upravlenie*, vol. 22, no. 9, pp. 468-474, 2021.]

7. **Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R.** Modeling Centrifugal Pump Systems from a System-Theoretical Point of View // IEEE 18th Mechatronika 2018 (Brno, Tschechien, December 5–7 2018), 2018. Pp. 1-8. [F. Goppelt, T. Hieninger, R. Schmidt-Vollus, "Modeling Centrifugal Pump Systems from a System-Theoretical Point of View", in *IEEE 18th Mechatronika 2018*, Brno, Tschechien, 2018, pp. 1-8.]

8. **Nollau R.** Modellbildung und Simulation technischer Systeme. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. Pp. 179-186. [R. Nollau, *Modellbildung und Simulation technischer Systeme*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, проф. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж. электрон. техн. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. управления слож. техн. объектами.

НОВОЖЕНИН Максим Борисович, ст. преп. каф. автоматических систем. Дипл. инженер (УГАТУ, 2011). Канд. техн. наук по автоматизации технол. процессов (ОГУ, 2020). Иссл. в обл. управления слож. техн. объектами.

ОГОРОДОВ Владимир Алексеевич, доц. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1975). Канд. техн. наук по технол. произв. ЛА (КАИ, 1985). Иссл. в обл. автоматиз. техн. процессов.

METADATA

Title: Research of the conditions for the occurrence of vibratory processes in the automated control of pumping complexes based on precedents.

Authors: A. G. Lutov¹, M. B. Novozhenin², V. A. Ogorodov³

Affiliation:

^{1,3} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

² Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation – Russian Technological University (MIREA – Russian Technological University), Russia.

Email: ¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru, ³ogorodov.v@ugatu.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 101-110, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The precedent approach used for the automated control of operating modes of pumping complexes makes it possible to reduce or completely eliminate various unsteady hydraulic processes, including cavitation. The article discusses the conditions for the occurrence of oscillations of a hydrodynamic nature in pumping complexes, contributing to the emergence or activation of these undesirable processes, with the construction of models based on the method of electrical analogy and the application of stability criteria of the theory of automatic control. The results obtained allow the formation and use of a base of precedents when controlling the operating modes of pumping complexes, taking into account the oscillation factor.

Key words: electric centrifugal pump; oscillatory processes; pressure-flow characteristic; method of electrical analogy.

About authors:

LUTOV, Alexey Germanovich, Prof. Head of Dept. of Automation of Technological Processes. Dipl. Electronics Engineer (USATU, 1985). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2005).

NOVOZHENIN, Maxim Borisovich, Senior Teacher of Dept. of Automated Systems. Dipl. Engineer (USATU, 2011). Cand. of Tech. Sci. (OGU, 2020).

OGORODOV, Vladimir Alekseevich, Prof. Dept. of Aviation Technology. Dipl. engineer-mechanic (UAI, 1975). Cand. of Tech. Sci. (KAI, 1985).