

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья
УДК 621.22-546
DOI: 10.14529/ctcr220412

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРЕЦЕДЕНТНОМ УПРАВЛЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ НАСОСНЫМ КОМПЛЕКСОМ С УЧЕТОМ КАНАЛА БАЙПАСА

А.Г. Лютов, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>
М.Б. Новоженин, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>
И.К. Шевцов, ilyxa-s007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5797-8566>
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. При прецедентном управлении автоматизированными насосными комплексами необходим учет характеристик динамических процессов с целью уменьшения или полного устранения различных нестационарных гидравлических процессов, в том числе кавитации. В статье рассмотрены условия возникновения в насосных комплексах локальных колебаний гидродинамического характера, способствующих возникновению или активизации указанных нежелательных процессов, с построением динамических моделей на основе метода электроанalogии и применением критериев устойчивости теории автоматического управления. Осуществлено построение математической модели локальных динамических процессов, анализ условий устойчивости и степени колебательности, их численное моделирование. Определение данных условий предоставляет дополнительную информацию для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении насосным комплексом. **Цель исследования:** определение условий устойчивости локальных динамических процессов при прецедентном управлении автоматизированным насосным комплексом с учетом канала байпаса на основе моделирования с использованием метода электроанalogии. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы методы математического моделирования, в частности метод электроанalogии, методы теории автоматического управления с использованием аппарата передаточных функций, методы численного моделирования с применением программного комплекса SimInTech. **Результаты.** Осуществлено построение динамической модели насосного комплекса с учетом канала байпаса на основе метода электроанalogии. Это позволило провести анализ устойчивости и степени колебательности процесса перекачивания жидкости с использованием методов теории автоматического управления. Полученные в аналитическом виде условия, находящиеся в зависимости от статических и динамических параметров насосного комплекса, определили границы областей на напорно-расходной характеристике с определенной степенью устойчивости и колебательности динамических процессов. **Заключение.** Результаты исследования позволяют определить условия, при которых в насосных комплексах на основе центробежных насосов, оснащенных каналом байпаса, возникают локальные колебательные процессы, способствующие возникновению или активизации нежелательных гидродинамических процессов. Данные условия позволяют осуществлять формирование и использование базы прецедентов при управлении режимами работы насосных комплексов с учетом фактора колебательности.

Ключевые слова: насосный комплекс, байпас, кавитация, автоматизированная система, прецедентный подход, электроанalogия, динамическая модель, колебательность

Для цитирования: Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Шевцов И.К. Моделирование динамических процессов при прецедентном управлении автоматизированным насосным комплексом с учетом канала байпаса // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 119–130. DOI: 10.14529/ctcr220412

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220412

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES DURING PRECEDENT CONTROL OF THE AUTOMATED PUMP SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE BYPASS CHANNEL

A.G. Lutov, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

M.B. Novozhenin, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>

I.K. Shevtcov, ilyxa-s007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5797-8566>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The precedent management of automated pumping systems requires consideration of the characteristics of dynamic processes in order to reduce or completely eliminate various non-stationary hydraulic processes, including cavitation. The article considers the conditions of local hydrodynamic oscillations in pump complexes, which contribute to the emergence or activation of these undesirable processes, with the construction of dynamic models based on the electric analogy method and the use of stability criteria for the theory of automatic control. A mathematical model of local dynamic processes was built, stability conditions and degree of oscillation were analyzed, and their numerical modeling was carried out. The definition of these conditions provides additional information for the reasonable selection of precedents in the automated control of the pump complex. **Research objective:** Determination of conditions for stability of local dynamic processes in case management of the automated pump system taking into account the bypass channel based on modeling using the electric analogy method. **Materials and methods.** To conduct the study, methods of mathematical modeling were used, in particular, the method of electric analogy, methods of the theory of automatic control using the apparatus of transfer functions, methods of numerical modeling using the SimInTech software complex. **Results.** A dynamic model of the pump system was built taking into account the bypass channel based on the electric analogy method. This allowed an analysis of the stability and degree of vibrancy of the fluid pumping process using methods of automatic control theory. The conditions obtained in analytical form, depending on the static and dynamic parameters of the pump complex, determined the boundaries of the regions on the pressure-flow characteristic with a certain degree of stability and oscillation of dynamic processes. **Conclusion.** The results of the study make it possible to determine the conditions under which local oscillatory processes occur in pumping complexes based on centrifugal pumps equipped with a bypass channel, which contribute to the emergence or activation of undesirable hydrodynamic processes. These conditions make it possible to create and use a base of precedents when controlling the operating modes of pump systems taking into account the oscillation factor.

Keywords: pump complex, bypass, cavitation, automated system, precedent approach, electrical analogy, dynamic model, oscillation

For citation: Lutov A.G., Novozhenin M.B., Shevtcov I.K. Simulation of dynamic processes during precedent control of the automated pump system taking into account the bypass channel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(4):119–130. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220412

Введение

При прецедентном управлении автоматизированными насосными комплексами (НК) [1, 2], реализующими технологические процессы перекачивания жидкостей во многих отраслях промышленности, необходим учет условий возникновения в НК нежелательных динамических процессов, в частности колебательных, наличие которых приводит к появлению различного рода нестационарных гидравлических процессов. Среди таких процессов наибольший ущерб вызывает кавитация [3–5], которая служит источником разрушения рабочих органов, шумам, вибрации и пульсациям давления в системе и, как следствие, снижению производительности, уменьшению КПД, повышению износа и уменьшению срока службы НК. Кавитация представляет собой серьезную проблему в связи с трудностью оперативного контроля ее возникновения и обеспечения безкавитационных режимов работы НК [6], которые включают в себя один или несколько насо-

сов, а также всасывающий и напорные трубопроводы. Основное распространение получили НК с центробежными насосами (ЦН) по причине массогабаритных показателей, высокой производительности и способности перекачивать загрязненные среды [7].

В [1, 8] представлены результаты исследования условий возникновения колебательных процессов при автоматизированном управлении НК при помощи прецедентов без учета канала байпаса. Способ регулирования методом байпасирования, путем перепуска части жидкости во всасывающую линию насосов, предоставляет дополнительный канал управления НК с помощью управляемой задвижки. Это увеличивает пространство возможных состояний НК как динамического объекта и, соответственно, расширяет возможности управления и формирования потенциальных прецедентов при выборе рациональных (безкавитационных) режимов его работы.

Определение условий возникновения колебательных процессов в НК для различных способов регулирования, в том числе и методом байпасирования, построение границ колебательной устойчивости и, в конечном итоге, предоставление дополнительной корректирующей информации для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении НК является важной и актуальной задачей.

Напорно-расходная характеристика определяет изменение режима работы НК. Точка пересечения характеристики сети (с увеличением расхода Q происходит увеличение и напора H) и характеристики ЦН (с увеличением расхода уменьшается напор) называется рабочей точкой. Изменение положения рабочей точки приводит к изменению режима работы НК.

С целью исследования динамических процессов в НК на основе методов теории автоматического управления применительно к линейным системам [9] необходима линеаризация НРХ в области рабочей точки. Введем в рассмотрение дифференциальные сопротивления для описания динамических процессов в окрестностях рабочей точки НРХ:

$$R_c = \left. \frac{dH_c}{dQ} \right|_{Q_0} > 0; R_{цн} = \left. \frac{dH_{цн}}{dQ} \right|_{Q_0} < 0,$$

где $H_{цн}$ – напор, развиваемый ЦН; H_c – напор гидравлической сети; Q – расход жидкости в системе; R_c – дифференциальное сопротивление сети; $R_{цн}$ – дифференциальное сопротивление ЦН (рис. 1).

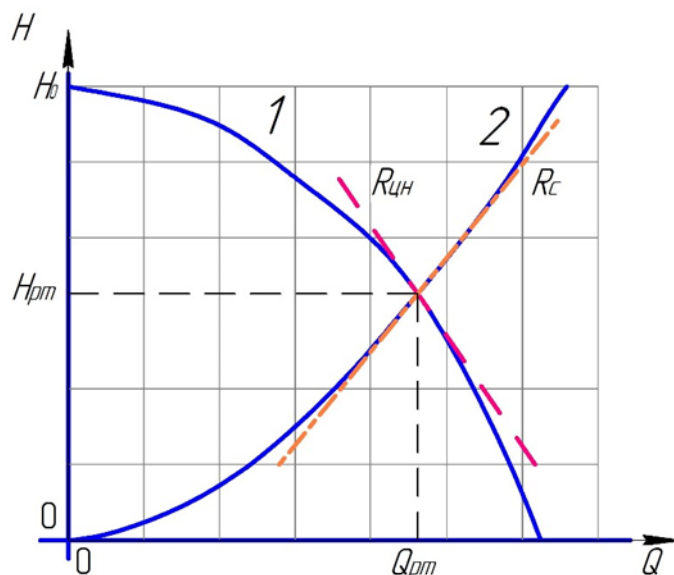


Рис. 1. НРХ ЦН (1) и сети (2)
Fig. 1. Pressure and flow characteristics
of centrifugal pump (1) and network (2)

В случае применения перепускного канала как средства управления режимом работы рассмотрим схему параллельного включения, представленную на рис. 2.

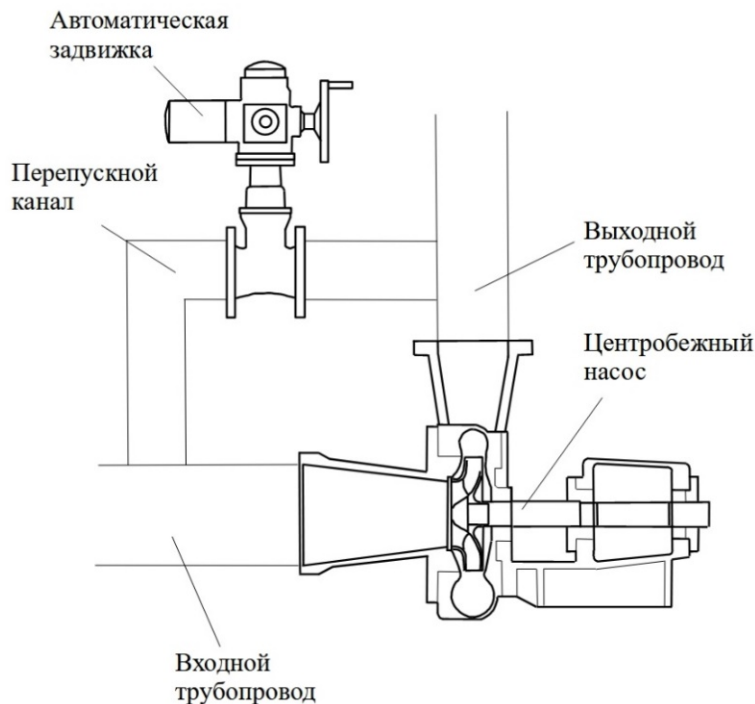


Рис. 2. Схема включения ЦН в НК
Fig. 2. Diagram of the centrifugal pump activation in the pump system

Структурная схема автоматизированной системы управления НК с применением прецедентного подхода [10] представлена на рис. 3.

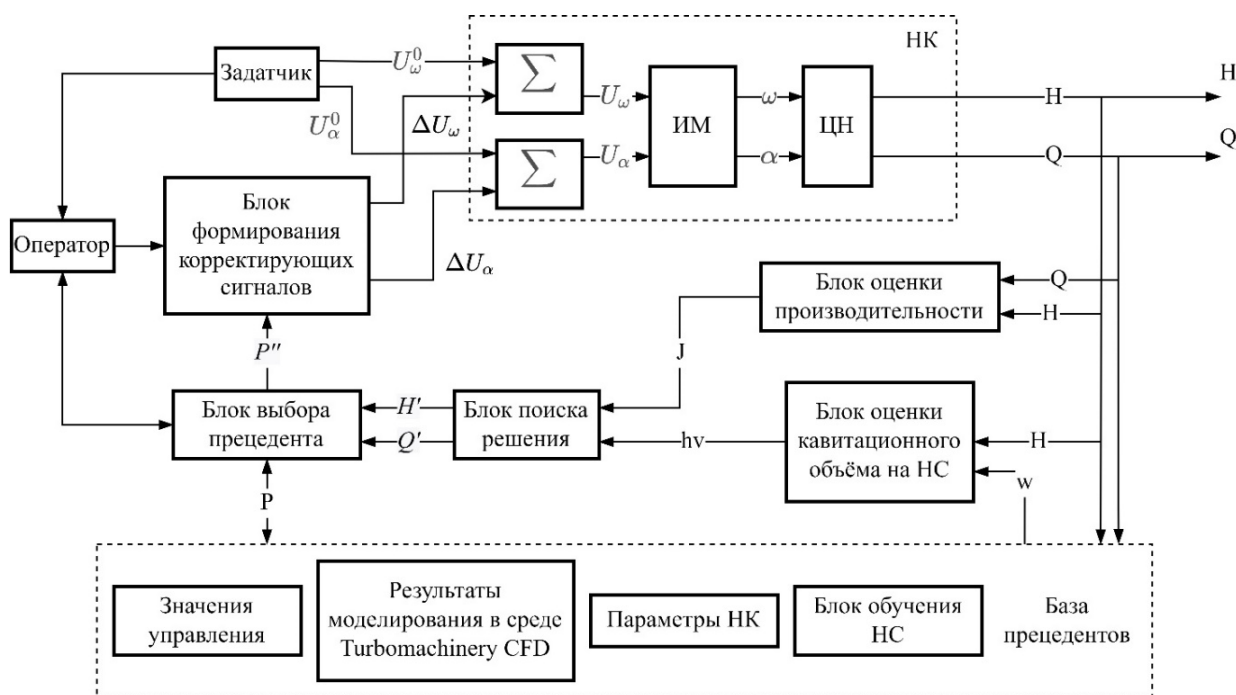


Рис. 3. Структурная схема системы автоматизированного управления НК с применением прецедентного подхода
Fig. 3. Block diagram of the pump system automated control system using the precedent approach

На рис. 3 имеются следующие обозначения: H – напор, развиваемый ЦН; Q – расход, развиваемый ЦН; ω – частота вращения ЦН; α – угол открытия задвижки на перепускном канале;

$h\nu$ – объем кавитации; J – значение критерия оценки отклонения производительности (критерий оценки производительности); P – прецедент; P'' – заключение о пригодности прецедента; w – веса настройки нейронной сети; H', Q' – теоретические значения напора и расхода ЦН в новой рабочей точке; U_ω^0, U_α^0 – управляющие воздействия по частоте вращения и углу открытия задвижки, формируемые задатчиком; $\Delta U_\omega, \Delta U_\alpha$ – корректирующие воздействия по частоте вращения и углу открытия задвижки на перепускном канале соответственно.

Математическое моделирование

Метод электроанalogии [11], который получил широкое распространение также и при моделировании гидравлических процессов в НК [12–14], целесообразно использовать для построения динамической модели процесса перекачивания жидкости с целью анализа возникновения колебательных процессов.

В результате применения данного подхода была получена следующая модель НК (рис. 4).

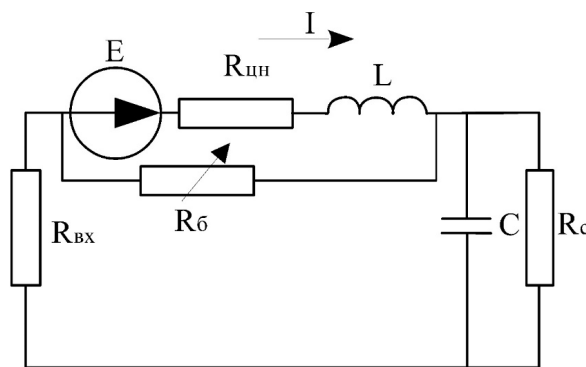


Рис. 4. Модель насосного комплекса,
построенная на основе метода электроанalogии
Fig. 4. Model of the pump complex,
built on the basis of the electric analogy method

На рис. 4: E – электрический эквивалент напора, развиваемого ЦН; I – электрический эквивалент расхода; $R_{\text{С}}, R_{\text{ЦН}}, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{Б}}$ – эквиваленты гидравлических дифференциальных сопротивлений сети, центробежного насоса, всасывающего (входного) трубопровода, байпаса с регулируемой задвижкой (соответственно); C – динамический элемент (электрическая емкость), отражающий упругие свойства жидкости и элементов конструкции насосного комплекса; L – динамический элемент (индуктивность), отражающий инерционность потока жидкости [12].

На основании 2-го закона Кирхгофа модель НК примет вид следующего уравнения электрической цепи в комплексной форме:

$$E(j\omega) = I(j\omega) \cdot \left(\frac{\left(R_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\text{С}}}{R_{\text{С}}Cj\omega + 1} \right) \cdot R_{\text{Б}}}{R_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\text{С}}}{R_{\text{С}}Cj\omega + 1} + R_{\text{Б}}} + R_{\text{ЦН}} + j\omega L \right). \quad (1)$$

Выполнив преобразование Лапласа к операторной форме записи ($p = j\omega$), после арифметических преобразований получим:

$$E(p) = I(p) \cdot \left(\frac{\left(R_{\text{ВХ}} (R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right) R_{\text{Б}} + (R_{\text{ЦН}} + Lp) \cdot \left((R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right)}{(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}}} \right). \quad (2)$$

Итоговый вид общей передаточной функции:

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}}}{(R_{\text{ВХ}} (R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}}) R_{\text{Б}} + (R_{\text{ЦН}} + Lp) \cdot \left((R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right)}. \quad (3)$$

Анализ устойчивости динамических процессов

Устойчивость динамической системы, описываемой в окрестностях рабочей точки НРХ передаточной функцией (3), определяется параметрами ее знаменателя – характеристического полинома:

$$p^2 [CLR_c (R_{вх} + R_б)] + p [C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) + L (R_{вх} + R_б + R_c)] + [R_б R_{вх} + R_б R_c + R_{цн} R_{вх} + R_{цн} R_б + RR_{цн} R_c]. \quad (4)$$

К системам второго порядка применим критерий необходимого и достаточного условия устойчивости – положительность всех коэффициентов характеристического уравнения [9]. Коэффициент при p^2 является безусловно положительным. Тогда для устойчивости системы необходима положительность остальных коэффициентов характеристического полинома.

Условие устойчивости для среднего коэффициента:

$$C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) + L (R_{вх} + R_б + R_c) > 0. \quad (5)$$

Предполагая, что значение L , отражающее инерционность потока жидкости, достаточно мало, то вторым слагаемым в (5) можно пренебречь:

$$C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) > 0. \quad (6)$$

Кроме этого, если учесть, что $C > 0$, то условие (5) примет следующий вид:

$$R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б) > 0. \quad (7)$$

Значения напоров ЦН и сети определим по графикам НРХ [15]:

$$H_{цн} = H_0 - aQ^2; \quad H_c = bQ^2. \quad (8)$$

В этом случае значения дифференциальных сопротивлений ЦН и сети будут:

$$R_{цн} = \frac{dH}{dQ} = -2aQ; \quad R_c = \frac{dH}{dQ} = 2bQ, \quad (9)$$

а значения коэффициентов:

$$a = \frac{H_0 - H_{цн}}{Q^2}; \quad b = \frac{H_c}{Q^2}. \quad (10)$$

Учитывая то, что в рабочей точке $H_{цн} = H_c = H$, получим следующее неравенство:

$$H > H_0 - \frac{1}{2} \frac{R_б R_{вх}}{R_{вх} + R_б} Q. \quad (11)$$

При $R_б = \infty$ (байпас закрыт):

$$H > H_0 - \frac{R_{вх}}{2} Q. \quad (12)$$

Условие (11) определяет колебательную границу устойчивости и выделяет области НРХ различной степени колебательности гидравлических процессов НК в окрестности рабочей точки (рис. 5). Область, расположенная выше границы устойчивости, соответствует устойчивым процессам, ниже – неустойчивым («в малом»).

Положительность значений свободного члена характеристического уравнения (4) передаточной функции исследуемой системы обеспечивается условием

$$R_c R_б + R_c R_{цн} + R_б R_{цн} + R_{вх} R_б + R_{вх} R_{цн} > 0. \quad (13)$$

Полагая для удобства выкладок, что $R_б = k(R_c + R_{вх})$, где $0 < k < \infty$, получим неравенство

$$(1+k)R_{цн} + k(R_c + R_{вх}) > 0. \quad (14)$$

Используя, аналогично вышеизложенному, полученные ранее выражения (9), (10), и с учетом того, что $H_{цн} = H_c = H$, получим:

$$H > \frac{H_0}{2} - \frac{k}{1+k} \cdot \frac{R_{вх} Q}{4}. \quad (15)$$

Условие (15) определяет аperiodическую границу устойчивости и соответствующие области НРХ (рис. 6). Области, расположенные выше данных границ, будут областями устойчивости, и, соответственно, наоборот: области, расположенные ниже данных границ, будут областями неустойчивости.

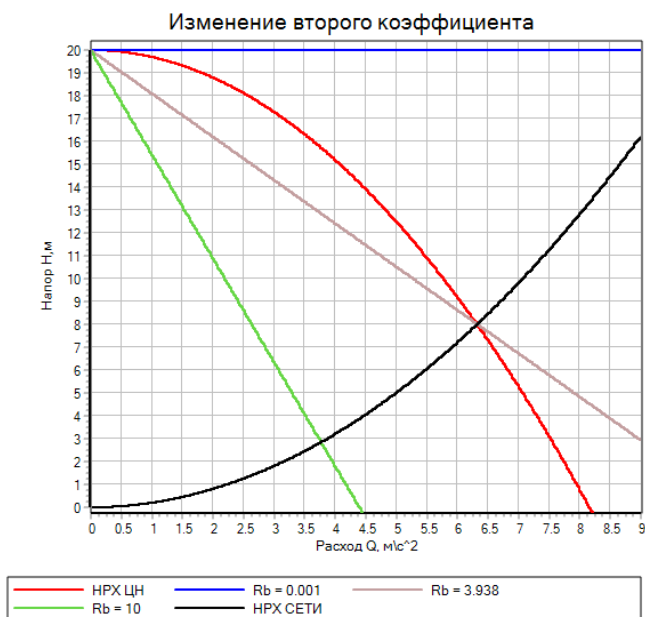


Рис. 5. Напорно-расходная характеристика центробежного насоса с колебательными границами устойчивости при различных значениях сопротивления байпаса R_b

Fig. 5. Pressure and flow characteristics of centrifugal pump with oscillatory stability limits at different values of bypass resistance R_b

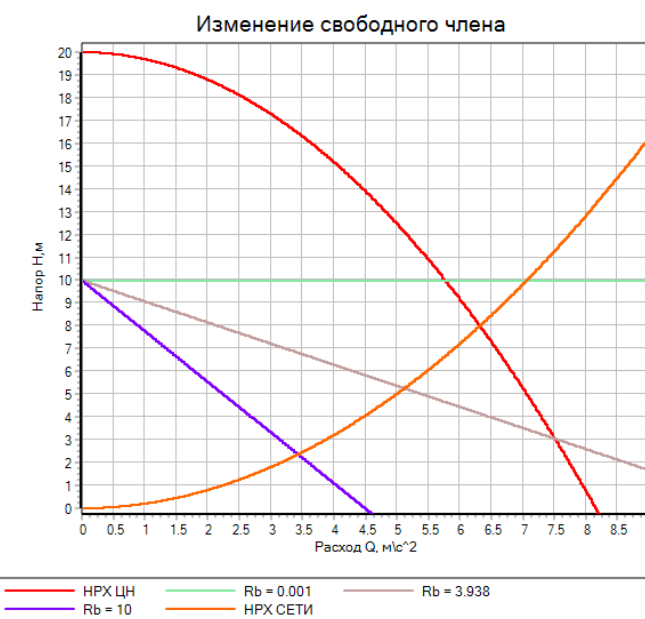


Рис. 6. НРХ центробежного насоса с аperiodическими границами устойчивости при различных значениях сопротивления байпаса R_b

Fig. 6. HP centrifugal pump with aperiodic stability limits at different values of bypass resistance R_b

Анализ степени колебательности динамических процессов

Приведем передаточную функцию (3) к обобщенному виду передаточной функции второго порядка с учетом полинома числителя и соответственно:

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{\frac{b_0}{a_0} \left(\frac{b_1}{b_0} p + 1 \right)}{\frac{a_2}{a_0} p^2 + \frac{a_1}{a_0} p + 1} = \frac{K (T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} b_0 &= R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}; \\ b_1 &= R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}}) \end{aligned} \quad (17)$$

– коэффициенты числителя передаточной функции;

$$\begin{aligned} a_0 &= R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}); \\ a_1 &= R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}}R_{\text{Г}} + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})) + L(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}); \\ a_2 &= R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}}) \end{aligned} \quad (18)$$

– коэффициенты знаменателя передаточной функции.

Учитывая преобразования

$$\begin{aligned} K &= \frac{b_0}{a_0}; \quad T_1 = \frac{b_1}{b_0}; \\ T_2^2 &= \frac{a_2}{a_0}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}; \\ 2\xi T_2 &= \frac{a_1}{a_0}; \quad \xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 \cdot a_2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

получим следующие значения параметров передаточной функции (16):

$$\begin{aligned} K &= \frac{R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}}{R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}; \\ T_1 &= \frac{R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}{R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}}; \\ T_2 &= \sqrt{\frac{R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}{R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}}; \\ \xi &= \frac{R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}}R_{\text{Г}} + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})) + L(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}{2\sqrt{(R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})) \cdot R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Как известно, условие $0 < \xi < 1$ соответствует области колебательных, а $1 \leq \xi$ – области аperiodических динамических процессов [9]. Данные условия с учетом полученного выражения для ξ из (20) позволяют при необходимости выделить на НРХ области, соответствующие разной степени колебательности гидравлических процессов в НК, а также области аperiodических процессов.

Отметим, что условием нахождения коэффициента демпфирования ξ в области действительных чисел является положительность подкоренного выражения для его определения (см. (20)).

Также, принимая, что $H_{\text{ЦН}} = H_{\text{С}} = H$ в рабочей точке, выразим $R_{\text{С}}$ и $R_{\text{ЦН}}$ через коэффициенты напорно-расходной характеристики:

$$R_{\text{С}} = 2b\sqrt{\frac{H_0}{a+b}}; \quad (21)$$

$$R_{\text{ЦН}} = -2a\sqrt{\frac{H_0}{a+b}}. \quad (22)$$

Численное моделирование

Был выполнен численный эксперимент, расчетные параметры которого представлены в таблице, с использованием динамической модели в виде передаточной функции (16) для иллюстрации характера переходных процессов в НК в различных областях.

Параметры для расчетов динамической модели
Parameters for dynamic model calculations

Параметр	1-й эксперимент	2-й эксперимент	3-й эксперимент	4-й эксперимент
a	0,3			
b	0,2			
R_b	0,001	3,93873	3,94	10
L	0,0013			
C	0,1			
$R_{вх}$	100			

Результаты численного моделирования динамических процессов в окрестности рабочей точки НХР с использованием программного пакета SimInTech для различных областей колебательности представлены на рис. 7.

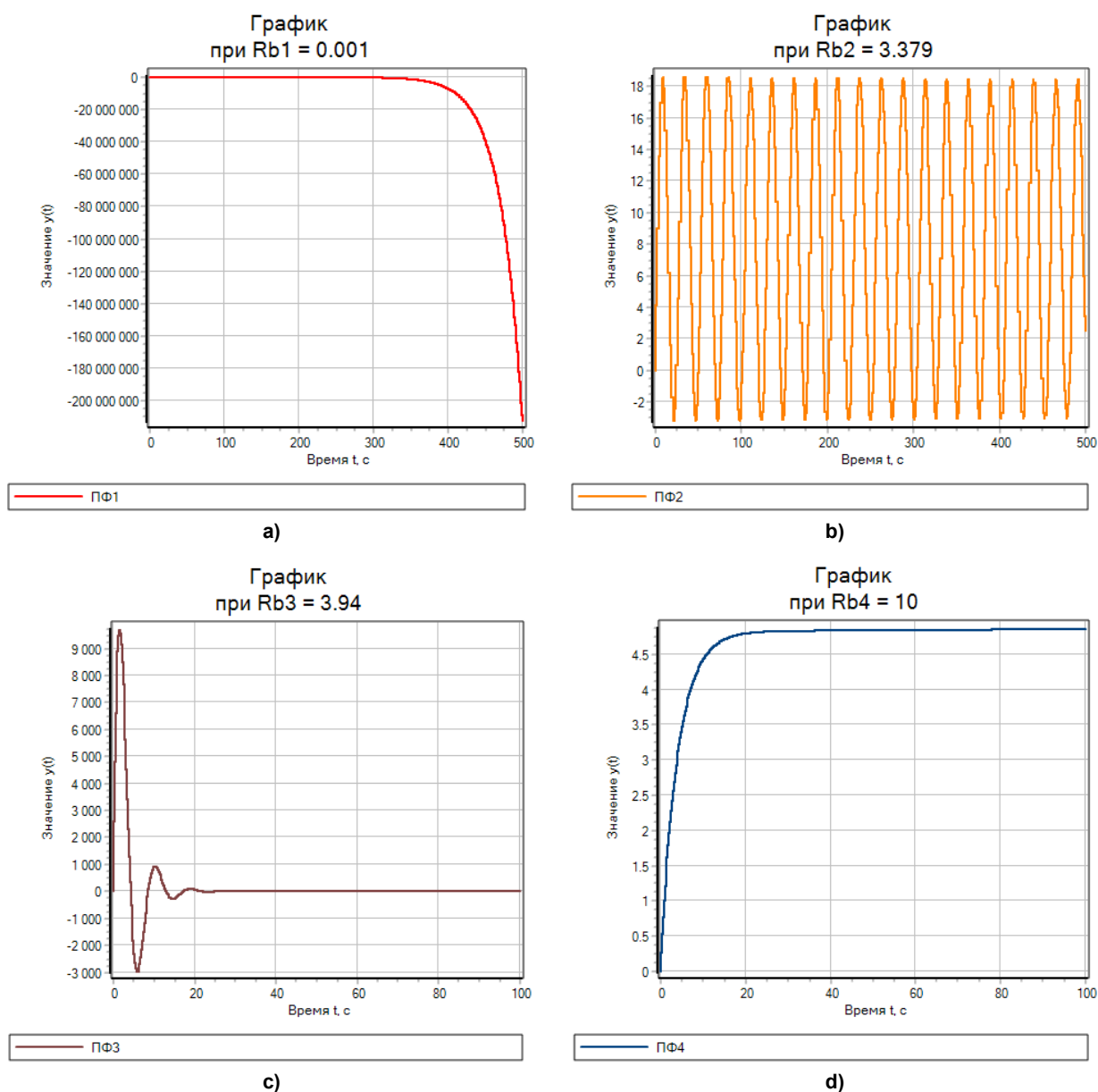


Рис. 7. Графики переходных процессов при различных условиях моделирования:
а – в области аperiodической неустойчивости; б, в – в области устойчивых колебательных процессов; д – аperiodических (монотонных) процессов
Fig. 7. Transient plots under different modeling conditions: а – in the field of aperiodic instability; б, в – in the field of stable oscillatory processes; д – aperiodic (monotonic) processes

Обсуждение результатов

Структура динамической модели, выстраиваемой по методу электроанalogии, определяется схемой включения ЦН в НК. Анализ полученной динамической модели дает возможность на НРХ НК разграничить области, характеризующиеся разной степенью устойчивости и колебательности динамических процессов в окрестности рабочей точки НРХ. Это предоставляет дополнительную информацию при выборе прецедентов при автоматизированном управлении НК.

Для численного моделирования динамических процессов необходима идентификация параметров модели, таких как L , C , $R_{вх}$, что может быть реализовано в том числе экспериментально-расчетным путем.

Уточнение упомянутых границ областей НРХ возможно с использованием доверительных интервалов, при этом границы соответствующих областей будут иметь форму секторов.

Заключение

Полученные в процессе исследования результаты позволяют определить условия, при которых в НК на основе ЦН, оснащенных каналом байпаса, возникают колебательные процессы, способствующие возникновению или активизации нежелательных гидродинамических процессов. При этом данные условия находятся в зависимости от параметров НК – статических и динамических.

Для построения динамической модели НК использован метод электроанalogии. Это позволило провести анализ устойчивости и степени колебательности процесса перекачивания жидкости с использованием методов теории автоматического управления. Соответствующие аналитические зависимости и неравенства определили границы областей на НРХ с определенной степенью устойчивости, а также колебательности динамических процессов в НК.

Проведенные исследования осуществлены применительно к схеме включения ЦН в НК с использованием канала байпаса, что развивает методологию построения систем автоматизированного управления НК с применением прецедентного подхода, учетом характеристик динамических процессов с целью уменьшения или полного устранения различных нестационарных гидравлических процессов, в том числе кавитации.

Список литературы

1. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Огородов В.А. Анализ условий возникновения колебательных процессов в системах топливоподачи авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 4–10.
2. Антонов В.В., Конев К.А., Куликов Г.Г. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 14–25. DOI: 10.14529/ctcr210302
3. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
4. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Хуснутдинов Д.З. Метод диагностики насосного комплекса на основе моделирования режимов работы в условиях возникновения кавитации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15, № 1. С. 160–164.
5. 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. С. 468–474. DOI: 10.17587/mau.22.468-474
6. Истомина Д.А., Столбов В.Ю., Платон Д.Н. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 1. С. 133–143. DOI: 10.14529/ctcr200113
7. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
8. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Огородов В.А. Исследование условий возникновения колебательных процессов при автоматизированном управлении насосными комплексами на основе прецедентов // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25, № 4. С. 101–110. DOI: 10.54708/19926502_2021_25494101

9. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 424 с.
10. Люттов А.Г., Новоженин М.Б. Автоматизированная система диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 3. С. 114–123.
11. Люттов А.Г., Новоженин М.Б. Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 1. С. 113–120.
12. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view // 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME). 2018. P. 1–8.
13. Чикуров Н.Г. Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2. С. 156–165.
14. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Характеристики физической модели насосного комплекса с учетом кавитационных процессов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. № 4 (20). С. 57–62.
15. Новоженин М.Б., Люттов А.Г., Озеров М.Ю. Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т.18, № 1. С. 110–116. DOI: 10.14529/ctcr180113

References

1. Lyutov A.G., Novozhenin M.B., Ogorodov V.A. Analysis of conditions of oscillation onset in aircraft fuel supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*. 2022;(1):4–10. (In Russ.)
2. Antonov V.V., Konev K.A., Kulikov G.G. Transformation of the decision support system model for standard situations using intellectual and analytical methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(3):14–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210302
3. Karelin V.Ya. *Kavitatsionnyye yavleniya v tsentrobeznykh i osevykh nasosakh* [Cavitation Phenomena in Centrifugal and Axial Pumps]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1975. 336 p. (In Russ.)
4. Lutov A.G., Novozhenin M.B., Husnutdinov D.Z. The diagnostic method of pumping complex simulation-based modes of operation in terms of cavitation. *Petroleum engineering = Neftegazovoe delo*. 2017;15(1):160–164. (In Russ.)
5. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Methodology of automated monitoring and control of pump complex operation modes in conditions of cavitation occurrence. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronica, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2021;22(9):468–474. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.22.468-474
6. Istomin D.A., Stolbov V.Yu., Platon D.N. Expert system for assessment of technical condition of electric centrifugal pump assemblies based on productive presentation of knowledge and fuzzy logic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(1):133–143. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200113
7. Leznov B.S. *Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive in Pumping and Blowing Plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2006. 360 p. (In Russ.)
8. Lutov A.G., Novozhenin M.B., Ogorodov V.A. Research of the conditions for the occurrence of vibratory processes in the automated control of pumping complexes based on precedents. *Vestnik UGATU*. 2021;25(4):101–110. (In Russ.) DOI: 10.54708/19926502_2021_25494101
9. Pevzner L.D. *Teoriya sistem upravleniya: uchebnoye posobiye* [Theory of Control Systems: Textbook]. 2nd ed., rev. and additional. St. Petersburg: Lan'; 2013. 424 p. (In Russ.)
10. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Automated diagnostic and control system works of the pump complex under non-stationary processes. *Vestnik UGATU*. 2018;22(3):114–123. (In Russ.)
11. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Modeling and diagnostics of non-stationary regimes automated pumping complexes. *Vestnik UGATU*. 2018;22(1):113–120. (In Russ.)

12. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view. In: *18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME)*; 2018. P. 1–8.

13. Chikurov N.G. Synthesis of mathematical models of technical systems by electroanalogical method. *Vestnik UGATU*. 2009;12(2):156–165. (In Russ.)

14. Serduk A.A., Korenkova T.V. Characteristics of the physical model of the pumping complex with cavitation processes. *Elektromehanichni i Energozberigajuchi Sistemi*. 2012;20(4):57–62. (In Russ.)

15. Novozhenin M.B., Lyutov A.G., Ozerov M.Yu. Experimental study of operating modes of the automated pump complex under non-stationary processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(1):110–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180113

Информация об авторах

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; lutov1@mail.ru.

Новоженин Максим Борисович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Шевцов Илья Константинович, ассистент кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; ilyxa-s007@rambler.ru.

Information about the authors

Alexey G. Lutov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; lutov1@mail.ru.

Maxim B. Novozhenin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Ilya K. Shevtsov, Assistant of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; ilyxa-s007@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 11.09.2022

The article was submitted 11.09.2022