

## АДАПТИВНОЕ БЕСПОИСКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАСОСНЫМ КОМПЛЕКСОМ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

**А.Г. Лютов**, [lutov1@mail.ru](mailto:lutov1@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

**М.Б. Новоженин**, [novozhenin.maxim@yandex.ru](mailto:novozhenin.maxim@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

**Аннотация.** При работе автоматизированных насосных комплексов кроме сигнальных (координатных) возмущений имеют место параметрические возмущения, обусловленные нестационарностью параметров данного комплекса, в частности гидравлических сопротивлений сети, насоса, входного трубопровода, а также колебания параметров перекачиваемой жидкости. Традиционный подход к автоматическому регулированию выходных координат насосного комплекса сводится к построению систем с координатной обратной связью и, как правило, регулированию частоты вращения центробежного насоса, что для решения задач быстродействующего параметрического управления в условиях действия соответствующих возмущений является неэффективным. Использование автоматизированного управления каналом байпаса насосного комплекса позволяет обеспечить более адекватную обработку параметрических возмущений, таких как, в частности, вибрации и элементы гидроудара, а также возмущений, активизирующих различные нежелательные гидравлические процессы, например, кавитацию и помпаж. В статье рассмотрены вопросы построения адаптивной беспойсковой самонастраивающейся системы для решения задачи повышения эффективности обработки указанных выше параметрических возмущений. **Цель исследования:** исследование возможности автоматической обработки параметрических возмущений при управлении насосным комплексом по каналу байпаса путем построения адаптивной системы в классе беспойсковых самонастраивающихся систем управления с эталонной моделью. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы методы математического моделирования, в частности метод электроаналогии, методы теории автоматического управления с использованием аппарата передаточных функций, методы теории адаптивного управления, методы численного моделирования с применением программного комплекса SimInTech. **Результаты.** Осуществлен синтез алгоритма управления беспойсковой самонастраивающейся системы с эталонной моделью для решения задачи обработки параметрических возмущений в насосном комплексе с использованием канала байпаса. **Заключение.** Результаты исследования обосновывают возможность построения и использования адаптивной беспойсковой системы управления насосным комплексом для более эффективной автоматической обработки параметрических возмущений с целью компенсации и снижения их негативного действия.

**Ключевые слова:** насосный комплекс, байпас, параметрические возмущения, электроаналогия, математическая модель, эталонная модель, алгоритм самонастройки

**Для цитирования:** Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Адаптивное беспойсковое управление насосным комплексом в условиях нестационарности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 4. С. 37–46. DOI: 10.14529/ctcr230404

## ADAPTIVE SEARCH LESS CONTROL OF A PUMPING COMPLEX IN CONDITIONS OF NON-STATIONARITY

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

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

**Abstract.** At operation of the automated pump complexes except for signal (coordinate) disturbances, there are the parametric disturbances, caused by non-stationarity of parameters of the given complex, in particular hydraulic resistances of the network, pump, inlet pipeline, and also fluctuations of parameters of the pumped liquid. The traditional approach to the automatic control of the output coordinates of the pump complex is reduced to the construction of systems with coordinate feedback and, as a rule, the regulation of speed of the centrifugal pump, which is inefficient for solving the problems of fast parametric control in the conditions of the relevant perturbations. The use of automated control of the bypass channel of pumping complex allows to provide more adequate processing of parametric disturbances, such as, in particular, vibration and elements of water hammer, as well as disturbances activating various undesirable hydraulic processes, such as cavitation and surge. The article considers the issues of building an adaptive search-less self-adaptive system to solve the problem of increasing the efficiency of working off the above parametric disturbances. **Research objective:** Investigation of the possibility of automatic processing of parametric disturbances when controlling the pumping complex by the bypass channel by constructing an adaptive system in the class of searchless self-adaptive control systems with a reference model. **Materials and methods.** The methods of mathematical modelling, in particular, the method of electron analogy, methods of the theory of automatic control with use of the apparatus of transfer functions, methods of the theory of adaptive control, methods of numerical modelling with use of the program complex SimInTech have been used to conduct research. **Results.** The synthesis of the control algorithm of the search-free self-adaptive system with a reference model to solve the problem of parametric perturbations in the pumping complex using the bypass channel has been made. **Conclusion.** The results of the study substantiate the possibility of building and using the adaptive searchless control system of the pumping complex for more effective automatic processing of parametric disturbances in order to compensate and reduce their negative effects.

**Keywords:** pumping complex, bypass, parametric disturbances, electroanalogy, mathematical model, reference model, self-tuning algorithm

**For citation:** Lutov A.G., Novozhenin M.B. Adaptive search less control of a pumping complex in conditions of non-stationarity. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(4):37–46. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230404

### Введение

В процессе функционирования автоматизированных насосных комплексов (НК), предназначенных для реализации технологических процессов перекачивания жидкостей в различных отраслях промышленности, установках и устройствах, имеют место не только координатные (напор, расход), но и параметрические возмущения (нестационарные параметры), к которым, в частности, можно отнести изменения гидравлических сопротивлений сети, насоса, всасывающего (входного) трубопровода, а также колебания параметров перекачиваемой жидкости [1]. При определенных условиях данные параметрические возмущения приводят к появлению в НК локальных колебаний гидродинамического характера, способствующих возникновению или активизации таких нежелательных процессов, как, например, кавитация [2, 3]. Последняя служит источником разрушения рабочих органов, шумов, вибрации и пульсаций давления в системе и, как следствие, снижения производительности, уменьшения КПД, повышения износа и уменьшения срока службы НК [4].

В [5] представлены результаты исследования условий устойчивости и возникновения локальных колебательных процессов при автоматизированном прецедентном управлении НК на

основе центробежных насосов (ЦН) с учетом канала байпаса [6, 7]. НК с ЦН получили широкое распространение в связи с выигрышными массогабаритными показателями, высокой производительностью, способностью перекачивать загрязненные среды [8]. Показано, что способ регулирования методом байпасирования путем перепуска части жидкости во всасывающую линию насосов образует дополнительный канал управления НК, реализуемый с помощью регулируемой задвижки. Это увеличивает пространство возможных состояний НК как динамического объекта управления и, соответственно, расширяет возможности формирования потенциальных прецедентов при выборе рациональных (безкавитационных) режимов его работы [9].

При этом необходимо отметить следующее обстоятельство: если управление НК по каналу частоты вращения ЦН является координатным (сигнальным), то управление по каналу байпаса – это параметрическое управление, реализуемое путем изменения такого параметра, как сопротивление канала байпаса. Отсюда следует, что организация данного параметрического управления в автоматическом режиме требует использования соответствующих методов синтеза системы управления, в частности в классе адаптивных самонастраивающихся систем.

Одним из эффективных подходов к построению систем с нестационарными параметрами является реализация их в классе беспоисковых самонастраивающихся систем с эталонной моделью, получивших большое теоретическое развитие и широкое практическое применение для управления нестационарными объектами [10, 11].

Далее рассмотрено построение алгоритма адаптивного беспоискового параметрического управления НК в условиях нестационарности его упомянутых выше параметров с использованием одного из достаточно эффективных для этого подходов на базе градиентного метода синтеза структуры самонастраивающейся системы (СНС) с эталонной моделью [10, 11].

### Математическая модель насосного комплекса

В работе [5] представлена математическая модель НК с учетом канала байпаса, полученная на основе метода электроанalogии [12, 13]. Применение данного подхода дает возможность исследования различного рода динамических процессов в НК, анализа их устойчивости.

При этом для исследования динамических процессов в НК на основе методов теории автоматического управления применительно к линейным системам [14] использована линеаризация напорно-расходной характеристики (НРХ) в области ее рабочей точки с целью получения дифференциальных сопротивлений элементов НК:

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

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.

Предполагая, что в модели [5] в первом приближении учитываются только дифференциальные сопротивления элементов НК, данная исходная модель представлена на рис. 1.

На рис. 1:  $E$  – электрический эквивалент напора, развиваемого ЦН;  $I$  – электрический эквивалент расхода;  $R_c, R_{цн}, R_{вх}, R_б$  – эквиваленты дифференциальных гидравлических сопротивлений сети, центробежного насоса, всасывающего (входного) трубопровода, байпаса с регулируемой задвижкой (соответственно).

В соответствии со 2-м законом Кирхгофа уравнение для электрической цепи в комплексной форме будет иметь вид:

$$E(j\omega) = I(j\omega) \left[ R_{цн} + \frac{R_б \cdot (R_{вх} + R_c)}{R_б + R_{вх} + R_c} \right]. \quad (1)$$

После перехода к операторной форме записи ( $p = j\omega$ , где  $p$  – оператор Лапласа) модель НК можно представить в виде передаточной функции:

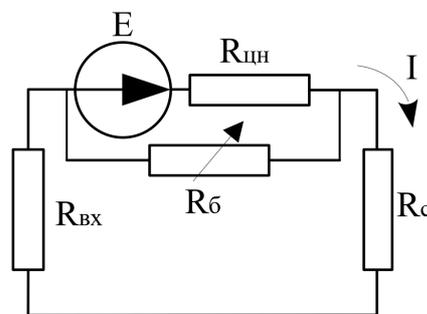


Рис. 1. Модель насосного комплекса, построенная на основе метода электроанalogии  
 Fig. 1. Model of the pumping complex based on the electroanalogy method

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{1}{R_{\text{цн}} + \frac{R_{\text{б}} \cdot (R_{\text{вх}} + R_{\text{с}})}{R_{\text{б}} + R_{\text{вх}} + R_{\text{с}}}} = \frac{1}{R_{\text{цн}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{вх}} + R_{\text{с}}} + \frac{1}{R_{\text{б}}}}}. \quad (2)$$

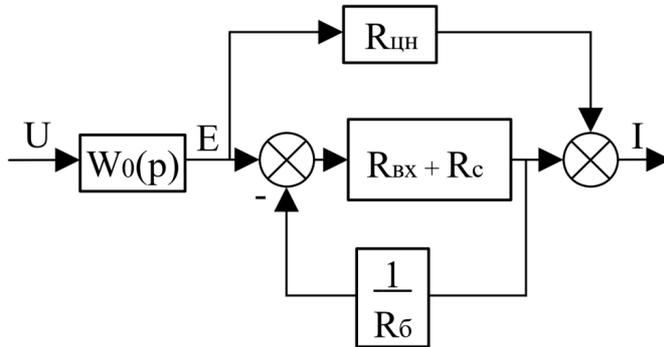


Рис. 2. Структурная схема системы управления НК  
Fig. 2. Block diagram of the control system PS

Соответствующая структурная схема системы управления представлена на рис. 2. Здесь передаточная функция  $W_0(p)$  отражает учет динамики привода ЦН, а также инерционность средств измерения выходной координаты системы и является по сути неизменяемой (в процессе управления) ее частью.

Компенсация изменений во времени дифференциальных сопротивлений  $R_{\text{с}}$ ,  $R_{\text{вх}}$ , а также  $R_{\text{цн}}$  возможна, согласно выражению для передаточной функции (2), путем перестройки значения сопротивления байпаса

$R_{\text{б}}$ , которое на практике осуществляется автоматизированной регулируемой задвижкой [15].

Для удобства дальнейших выкладок заменим значения сопротивлений на эквивалентные значения проводимости:

$$G_{\text{цн}} = \frac{1}{R_{\text{цн}}}; \quad G_{\text{о}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} + R_{\text{с}}}; \quad G_{\text{б}} = \frac{1}{R_{\text{б}}}.$$

В этом случае передаточная функция (2) примет вид

$$W(p) = \frac{1}{\frac{1}{G_{\text{цн}}} + \frac{1}{G_{\text{о}} + G_{\text{б}}}}. \quad (3)$$

Таким образом, компенсация возможной нестационарности параметров НК, в частности значения  $G_{\text{о}}$ , будет производиться путем перестройки значения проводимости байпаса  $G_{\text{б}}$ .

### Синтез алгоритма самонастройки

Для построения алгоритма перестройки  $G_{\text{б}}$  воспользуемся градиентным методом синтеза структуры СНС с эталонной моделью [10, 11].

В качестве эталонной модели выберем звено, описываемое передаточной функцией:

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{I_{\text{м}}(p)}{U(p)} = W_0(p) \cdot \frac{1}{\frac{1}{G_{\text{цн}}^0} + \frac{1}{G_{\text{о}}^0 + G_{\text{б}}^0}}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{м}}$  – выходная координата модели;  $G_{\text{цн}}^0$ ,  $G_{\text{о}}^0$ ,  $G_{\text{б}}^0$  – некоторые базовые (желаемые) значения проводимостей  $G_{\text{цн}}$ ,  $G_{\text{о}}$ ,  $G_{\text{б}}$ .

Согласно методу градиента, алгоритм перестройки значения  $G_{\text{б}}$  должен обеспечивать такое изменение выбранного критерия качества работы системы  $J$ , которое было бы направлено в сторону его уменьшения, как функции  $G_{\text{б}}$ :

$$\frac{dG_{\text{б}}}{dt} = -\lambda \frac{\partial J}{\partial G_{\text{б}}}, \quad (5)$$

где  $J$  – показатель качества на основе меры рассогласования движений системы и модели, в качестве которой выберем функцию от ошибки  $\varepsilon = i(t) - i_{\text{м}}(t)$ :

$$J = \varepsilon^2 = (i(t) - i_{\text{м}}(t))^2. \quad (6)$$

Исходя из выражения (5), найдем:

$$\frac{\partial J}{\partial G_6} = \frac{\partial}{\partial G_6} \varepsilon^2 = 2\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial G_6}. \tag{7}$$

С учетом того, что  $i_m$ ,  $u$  и  $W_0(p)$  не зависят от  $G_6$ , получим следующее выражение:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial G_6} = \frac{\partial}{\partial G_6} (i - i_m) = \frac{\partial i}{\partial G_6} = \frac{\partial [W_0(p) \cdot W(p)]}{\partial G_6} \cdot u = W_0(p) \frac{\partial W(p)}{\partial G_6} \cdot u. \tag{8}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \frac{\partial W(p)}{\partial G_6} &= \frac{\partial}{\partial G_6} \left[ \frac{1}{\frac{1}{G_{цн}} + \frac{1}{G_0 + G_6}} \right] - \\ &- \left[ \frac{1}{\frac{1}{G_{цн}} + \frac{1}{G_0 + G_6}} \right]^2 \cdot (-) \left[ \frac{1}{G_0 + G_6} \right]^2 = W^2(p) \cdot \left[ \frac{1}{G_0 + G_6} \right]^2. \end{aligned} \tag{9}$$

Тогда выражение (8) примет вид:

$$\frac{dG_6}{dt} = -2\lambda\varepsilon W_0(p) W^2(p) \cdot \left[ \frac{1}{G_0 + G_6} \right]^2 \cdot u = -2\lambda\varepsilon W(p) \left[ \frac{1}{G_0 + G_6} \right]^2 \cdot i. \tag{10}$$

В соответствии с предположением, что в процессе функционирования СНС оператор системы должен поддерживаться близким к оператору модели, можно считать передаточную функцию

$$W(p) \approx W_M(p), \text{ а также, что } \left[ \frac{1}{G_0 + G_6} \right]^2 \approx \left[ \frac{1}{G_0^0 + G_6^0} \right]^2.$$

Тогда

$$\frac{dG_6}{dt} = -\lambda' \varepsilon W_M(p) \cdot x, \tag{11}$$

где  $\lambda' = 2\lambda \left[ \frac{1}{G_0^0 + G_6^0} \right]^2$ .

Структурная схема самонастраивающейся системы с контуром самонастройки, функционирующим в соответствии с аналитическим алгоритмом (11), представлена на рис. 3. Здесь динамическое звено  $\frac{1}{T_B p + 1}$  в контуре адаптации, соответствующее позиционному исполнительному устройству для перестройки  $G_6$ , учитывает его реальную инерционность, имеющую место при работе автоматизированной регулируемой задвижки байпаса.

**Численное моделирование**

С целью исследования работоспособности синтезированной СНС с эталонной моделью произведено ее численное моделирование в условиях действия параметрических возмущений различного харак-

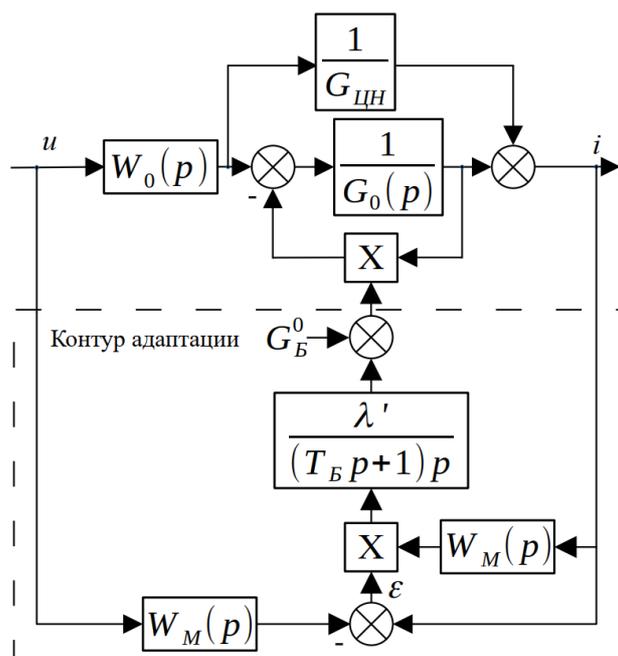


Рис. 3. Структурная схема СНС с эталонной моделью  
Fig. 3. Structural diagram of the SAS (self-adjusting system) with a reference model

тера. В качестве последних рассматривались изменения дифференциальных гидравлических сопротивлений сети  $R_c$  и входного трубопровода  $R_{вх}$  (или соответствующей величины проводимости  $G_o = \frac{1}{R_{вх} + R_c}$ ). Численный эксперимент осуществлялся с использованием программной среды SimInTech, соответствующая компьютерная модель ЧНС приведена на рис. 4. Там же расположена модель системы без адаптации для сравнительного анализа переходных процессов. Значения параметров элементов модели представлены в таблице.

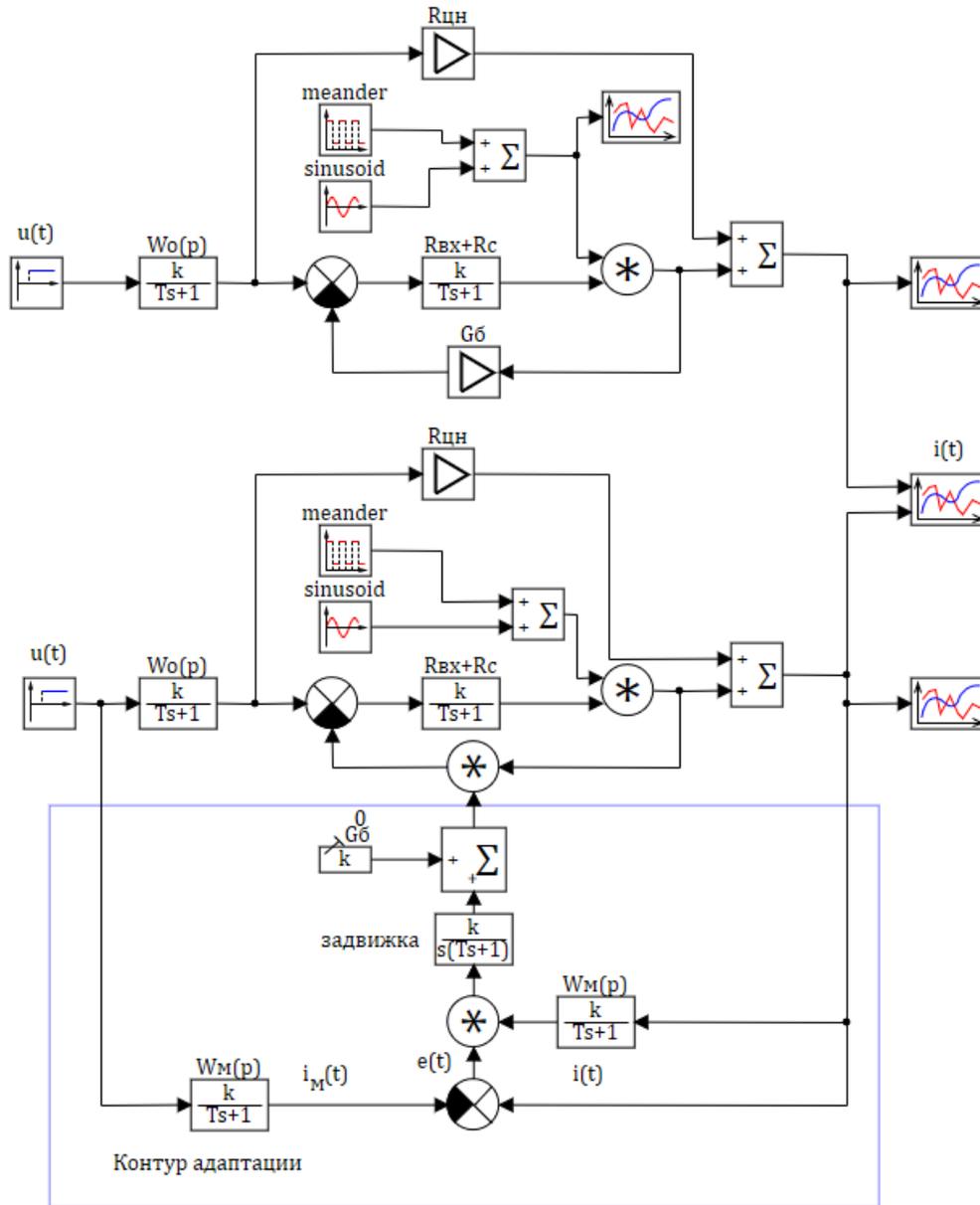


Рис. 4. Компьютерная SimInTech-модель ЧНС  
Fig. 4. Computer SimInTech model of the SAS

Значения параметров элементов модели  
Model element parameter values

Параметр	$G_o$	$G_o^0$	$G_{цн}$	$G_{цн}^0$	$G_6$	$G_6^0$	$T_0$	$T_6$
Значение	1	1	-0,33	-0,33	1	1	0,1	0,02

Результаты численного моделирования динамических процессов в СНС в окрестности рабочей точки НХР НК при параметрических возмущениях в виде изменений  $G_0$  периодического (синусоидального) и ступенчатого приведены на рис. 5.

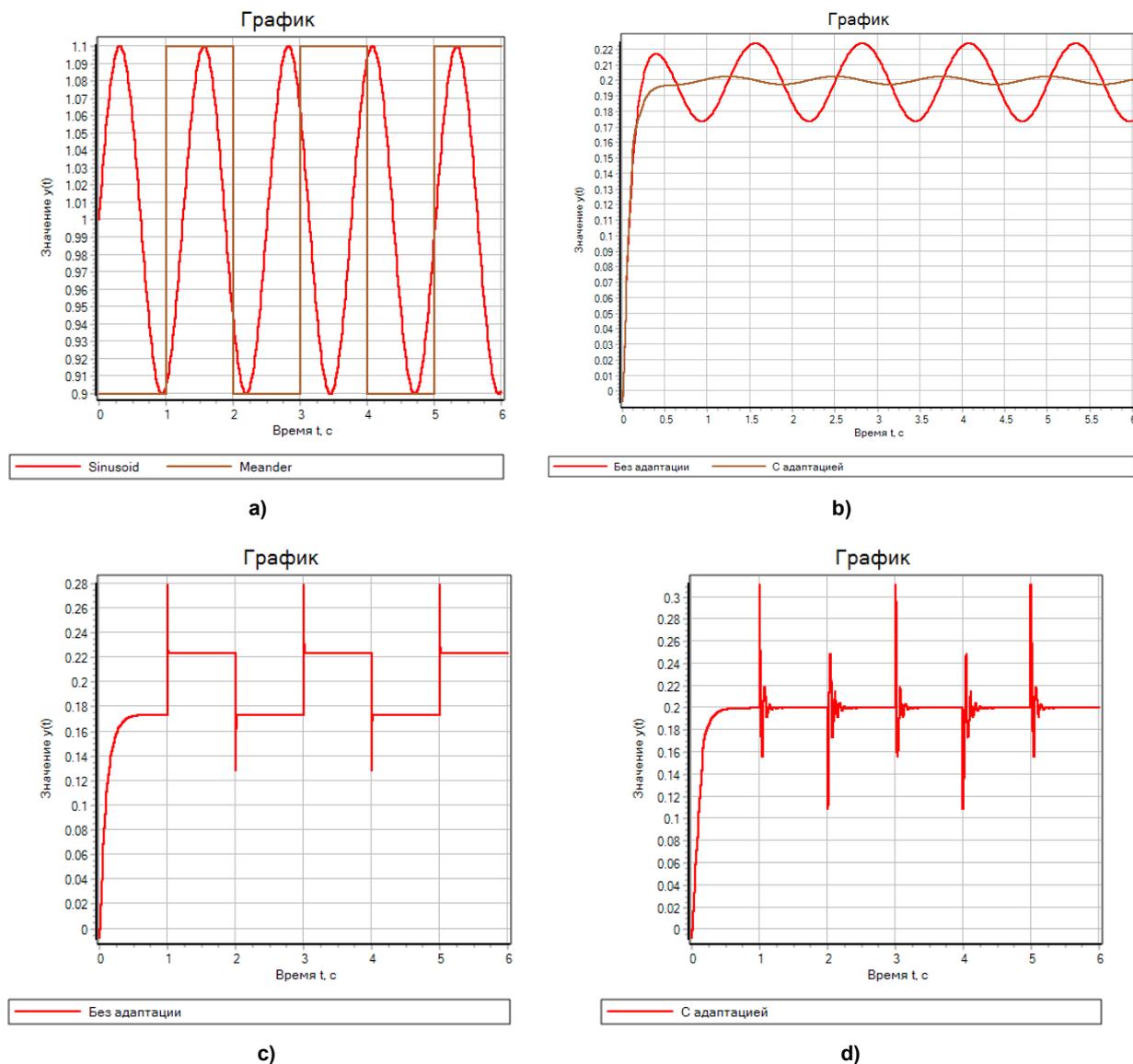


Рис. 5. Графики переходных процессов в СНС при отработке параметрических возмущений  
 Fig. 5. Graphs of transients in the SAS during the processing of parametric perturbations

На рис. 5а приведены графики изменений проводимости  $G_0 = \frac{1}{R_{вх} + R_c}$ , соответствующие параметрическим возмущениям синусоидального и периодического ступенчатого (меандр) характера соответственно. На рис. 5б представлены графики, иллюстрирующие отработку системой параметрических синусоидальных возмущений при отключенном и включенном контуре адаптации. Аналогично на рис. 5с и 5д приведены графики при действии на систему параметрических периодических ступенчатых возмущений также при отключенном и включенном контуре адаптации.

**Обсуждение результатов**

Для построения математической динамической модели НК использован метод электроаналогии, который позволил затем перейти к аппарату передаточных функций и исходному структурному представлению системы управления (см. рис. 2).

Синтезированный далее алгоритм управления беспоисковой СНС с эталонной моделью основан на градиентном методе синтеза структуры СНС (см. рис. 3) и использовании автоматически регулируемого канала байпаса НК.

Необходимо отметить, что быстродействие процессов регулирования по каналу байпаса изначально принципиально выше, чем быстродействие по каналу частоты вращения ЦН, так как их инерционность различается как минимум на порядок и более. Поэтому скорость отработки рассматриваемых параметрических возмущений в первом случае будет, безусловно, значительно больше.

Полученные в результате численных экспериментов с использованием компьютерной модели (см. рис. 4) графики переходных процессов в системе (см. рис. 5) свидетельствуют о работоспособности синтезированной СНС, высоком качестве отработки в ней как плавных периодических, так и ступенчатых (в том числе периодических) параметрических возмущений.

При этом устойчивость процессов самонастройки в построенной адаптивной системе может быть обеспечена выбором подходящего коэффициента передачи  $\lambda$  при численном моделировании процессов в СНС.

### Заключение

Осуществлен синтез алгоритма управления беспоисковой самонастраивающейся системы с эталонной моделью для решения задачи отработки параметрических возмущений в насосном комплексе с использованием автоматически регулируемого канала байпаса.

Результаты анализа численных экспериментов подтверждают возможность построения и реализации адаптивной системы управления насосным комплексом для более эффективной (быстродействующей) автоматической отработки параметрических возмущений, обусловленных, в частности, изменениями гидравлических сопротивлений сети, насоса, входного трубопровода, а также колебаниями параметров перекачиваемой жидкости.

Применение адаптивного управления с использованием регулируемого канала байпаса позволит повысить эффективность координатно-параметрического управления НК в целом, особенно в условиях нестационарных гидравлических процессов: вибраций, элементов гидроудара, помпажа, кавитации.

### Список литературы

1. 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
2. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
3. Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 1. С. 113–120.
4. Истомин 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
5. 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
6. 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.
7. 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;21(3):14–25. DOI: 10.14529/ctcr210302

8. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
9. Люттов 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
10. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков. М.: Машиностроение, 1972. 260 с.
11. Козлов Ю.М., Юсупов Р.М. Беспоисковые самонастраивающиеся системы. М.: Наука, 1969. 456 с.
12. Чикуров Н.Г. Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий. Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2. С. 156–165.
13. 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.
14. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 424 с.
15. 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.

#### References

1. 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
2. Karelin V.Ya. *Kavitatsionnye yavleniya v tsentrobezhnykh i osevykh nasosakh* [Cavitation Phenomena in Centrifugal and Axial Pumps]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1975. 336 p. (In Russ.)
3. 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.)
4. 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
5. 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
6. Lyutov A.G., Novozhenin M.B., Ogorodov V.A. Analysis of conditions of oscillation onset in aircraft fuel supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2022;1:4–10. (In Russ.)
7. 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
8. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive in Pumping and Blowing Plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2006. 360 p. (In Russ.)
9. 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 = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2021;22(9):468–474. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.22.468-474
10. Petrov B.N., Rutkovskiy V.Yu., Krutova I.N., Zemlyakov S.D. *Printsipy postroeniya i proektirovaniya samonastraivayushchikhsya sistem upravleniya* [Principles of construction and design of self-adjusting control systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1972. 260 p. (In Russ.)
11. Kozlov Yu.M., Yusupov R.M. *Bespoiskovyie samonastraivayushchiesya sistemy* [Searchless self-adjusting systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1969. 456 p. (In Russ.)

12. Chikurov N.G. Synthesis of mathematical models of technical systems by electroanalogue method. *Vestnik UGATU*. 2009;12(2):156–165. (In Russ.)
13. 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.
14. Pevzner L.D. *Teoriya sistem upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of Control Systems: Textbook]. 2nd ed., rev. and additional. St. Petersburg: Lan'; 2013. 424 p. (In Russ.)
15. 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.)

#### ***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.

#### ***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.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 01.05.2023**

**The article was submitted 01.05.2023**