

УДК 519.711.3

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЙПАСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ УРОВНЕМЕРОМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мокроусов Д.А.¹, Демин Е.С.², Карпухин Э.В.¹, Демин С.Б.¹

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза

²ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза

Проведено исследование эффективности применения накладных магнитоотрицательных преобразователей уровня (НМПУ) со сложной геометрией акустического тракта в составе байпасной измерительной системы. Подобные системы предназначены для измерения уровня жидких сред, находящихся в закрытых резервуарах под давлением или имеющие химически активные свойства. Анализ проведен на основе метода математического моделирования с использованием теории автоматического управления и регулирования. Для этого приведена структурная схема исследуемой системы, состоящая из передаточных звеньев функциональных узлов, что позволило получить и проанализировать частотные и временные характеристики. Это дает возможность в ходе вычислительного эксперимента определять граничные значения параметров функциональных узлов системы, устанавливать негативное влияние отдельных внешних факторов на работу системы в целом и выработать подходы в повышении эффективности использования НМПУ в подобных измерительных системах.

Ключевые слова: байпасные системы, магнитоотрицательные уровнемеры, математическое моделирование

RESEARCH BYPASS MEASURING SYSTEM WITH MAGNETOSTRICTIVE CONVERTER OF A LEVEL BY METHOD MATHEMATICAL MODELING

Mokrousov D.A.¹, Demin E.S.², Karpuhin E.V.¹, Demin S.B.¹

¹Penza State Technological University, Penza, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

It is carried out research of efficiency of application plated magnetostrictive converters of a level (PMCL) with complex geometry of an acoustic path in structure of bypass measuring system. Similar systems are intended for measurement of a level of the liquid environments which are being closed tanks under pressure or having chemically active properties. The analysis is lead on the basis of a method of mathematical modeling with use of the theory of automatic control and regulation. For this purpose the block diagram of researched system consisting of transfer parts of functional units that has allowed to receive and analyse frequency and time characteristics is resulted. It enables during computing experiment to define boundary values of parameters of functional units of system, to establish negative influence of separate external factors on work of system as a whole, and to develop approaches in increase of efficiency of use PMCL in similar measuring systems.

Keywords: bypass system, magnetostrictive converters of a level mathematical modeling

Введение

В известных байпасных системах (БС) основным измерительным прибором выступает индикатор визуального отсчета, что не дает возможность с высокой точностью производить измерение уровня жидкой среды в закрытых резервуарах и автоматизировать этот процесс [1, 5]. Использование в подобных байпасных измерительных системах визуальной информации МПУ накладного типа на волнах кручения позволяет успешно решить данные проблемы достаточно простым путем без реконструкции типовой байпасной камеры системы (рис. 1).



Рисунок 1 – Байпасная измерительная система

Именно такой подход модернизации известных байпасных измерительных систем технологических объектов пищевых, химических и нефтеперерабатывающих производств предлагается использовать. Для его успешной реализации необходимо провести математическое исследование поведения НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта при работе в составе отмеченных систем. Подобные исследования удобно проводить на основе положений теории автоматического управления и регулирования [3].

Постановка задачи

Требуется провести исследование байпасной измерительной системы с НМПУ с использованием метода математического моделирования и теории автоматического управления и регулирования и оценить эффективность работы такой системы по частотным и временным характеристикам.

Результаты и их обсуждение

Структурная модель (схема) байпасной измерительной системы с НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта приведена на рисунке 2. Она содержит собственно байпасную систему измерения уровня, имеющую два идентичных канала забора (КЗ) и слива (КС), и НМПУ, включенный в цепь обратной связи системы. Каждый из каналов имеет перекачивающий центробежный насос с гидравлическим клапаном, управляемым от электронного усилителя мощности. По командам оператора или управляющей информационной системы центробежные насосы с клапанными элементами осуществляют перекачку рабочей жидкости в резервуаре технического объекта в заданных пределах уровня h_x . Его измерение и контроль осуществляется НМПУ.

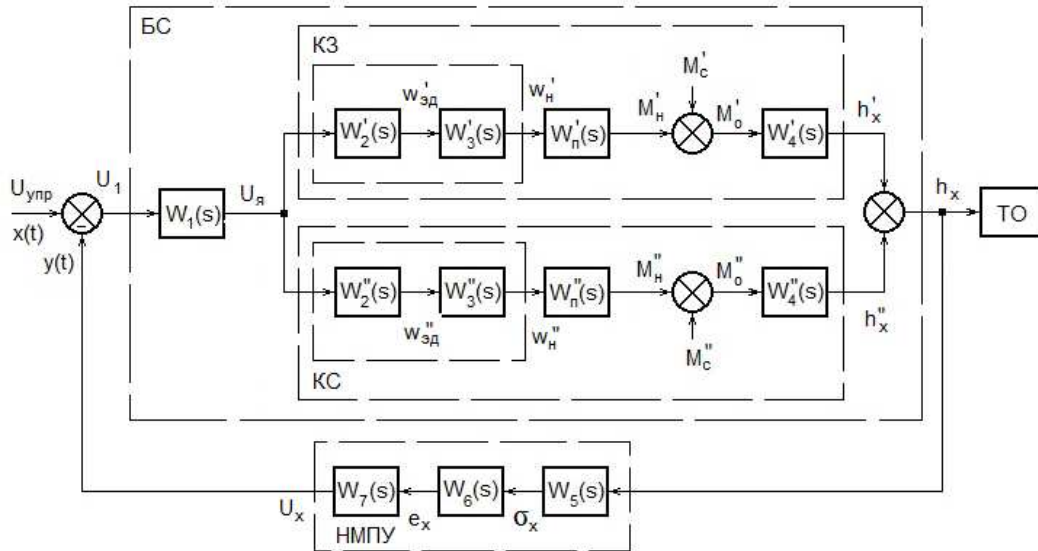


Рисунок 2 – Структурная схема байпасной измерительной системы с НМПУ

Усилительно-преобразующим элементом БС является управляемый усилитель мощности с коэффициентом $K_{\text{ум}}$, описываемый передаточной функцией вида

$$W_1(s) = \frac{U_{\text{я}}}{U_1} = K_{\text{ум}}; \quad (1)$$

где U_1 , $U_{\text{я}}$ – напряжения на входе и выходе звена, s – оператор Лапласа.

Перекачивающие центробежные насосы КЗ и КС имеют исполнительные электрические двигатели постоянного или переменного тока, например, электродвигатель постоянного тока (ЭДПТ), на валу которых закреплена крыльчатка. При идентичности параметров этих исполнительных устройств их можно описать следующими передаточными функциями:

$$W_2(s) = \frac{\omega_{\text{эд}}}{U_{\text{я}}} = \frac{K1}{1 + \tau_{\text{м}}s} \quad \text{и} \quad (2)$$

$$W_3(s) = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{эд}}} = \frac{K2}{\tau_{\text{н}}s}; \quad (3)$$

где $\omega_{\text{эд}}$, $\omega_{\text{н}}$ – частоты вращения якоря ЭДПТ и лопастей насоса, $K1$, $K2$ – коэффициенты передачи ЭДПТ и насоса, $\tau_{\text{м}}$, $\tau_{\text{н}}$ – их постоянные времени.

Коэффициент передачи ЭДПТ можно определить как [3]:

$$K1 = 1/C_{\text{э}} = I_{\text{я}}/M_{\text{н}}; \quad (4)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якоря ЭДПТ, $M_{\text{н}}$ – номинальный момент на его валу. Его постоянная времени равна [3]:

$$\tau_{\text{м}} = J_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} \left(\frac{I_{\text{я}}}{M_{\text{н}}} \right)^2; \quad (5)$$

где $J_{\text{н}}$ – номинальный момент инерции на валу ЭДПТ, $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмоток его якоря. Следовательно, передаточная функция этих двух звеньев центробежных насосов КЗ и КС запишется следующим образом с учетом (2)–(5):

$$W_{2,3}(s) = \frac{\omega_{\text{н}}}{U_{\text{я}}} = W_2(s) \cdot W_3(s) = \frac{K_1 \cdot K_2}{\tau_{\text{н}}(1 + \tau_{\text{м}})s}. \quad (6)$$

В процессе перекачки рабочей жидкой среды технического объекта центробежные насосы КЗ и КС имеют электрические и механические сопротивления, интерпретируемые здесь как потери, значения которых необходимо учитывать. Значения потерь возрастают пропорционально коэффициентам вязкости (плотности) рабочей среды технического объекта. Влияние этих потерь можно описать следующей передаточной функцией [3]:

$$W_{\text{п}}(s) = \frac{M_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{1}{R_{\text{я}}} \cdot \frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{м}} \cdot T_{\text{я}} s^2 + T_{\text{м}} s + 1}; \quad (7)$$

где $K_{\text{п}} = R_{\text{я}} / C_{\text{м}}^2$ – коэффициент передачи, $C_{\text{м}} = (M_{\text{н}} - M_{\text{с}}) / I_{\text{я}}$ – постоянная сопротивления исполнительного звена, $M_{\text{с}}$ – его момент с учетом сухого и вязкого трения, $T_{\text{м}} = R_{\text{я}} \cdot J_{\text{п}} / C_{\text{м}}^2$ – электромагнитная постоянная центробежных насосов КЗ и КС с учетом допустимых нагрузок, $J_{\text{п}}$ – приведенный момент инерции их механической системы, учитывающий массы и размеры вращающихся механизмов, $T_{\text{я}}$ – постоянная времени якоря ЭДПТ центробежных насосов.

Следовательно, постоянную времени $T_{\text{м}}$ можно определить как:

$$T_{\text{м}} = R_{\text{я}} \left(\frac{I_{\text{я}}}{M_{\text{н}} - M_{\text{с}}} \right)^2 J_{\text{п}} = R_{\text{я}} \left(\frac{I_{\text{я}}}{M_{\text{о}}} \right)^2 J_{\text{п}}; \quad (8)$$

здесь $M_{\text{о}} = M_{\text{н}} - M_{\text{с}}$ – момент на валу насосов КЗ и КС.

При синхронной (асинхронной) работе центробежных насосов КЗ и КС открывается соответствующий гидравлический впускной или выпускной клапаны, работу которых в байпасной системе технического объекта можно описать следующей передаточной функцией:

$$W_4(s) = \frac{h_x}{M_{\text{н}}} = \frac{K_3}{T_{\text{к}} s}; \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент передачи, $T_{\text{к}}$ – постоянная времени срабатывания клапана.

Учитывая выражения (2) – (9), передаточные функции КЗ и КС байпасной системы, включенных параллельно, имеют вид:

$$\begin{aligned} W'_{2-4}(s) &= W'_2(s) \cdot W'_3(s) \cdot W'_{\text{п}}(s) \cdot W'_4(s) \text{ и} \\ W''_{2-4}(s) &= W''_2(s) \cdot W''_3(s) \cdot W''_{\text{п}}(s) \cdot W''_4(s). \end{aligned} \quad (10)$$

Принимая во внимание возможную идентичность параметров в пределах заданных значений их отклонения:

$$\begin{aligned} W_2(s) = W_2'(s) = W_2''(s), \quad W_3(s) = W_3'(s) = W_3''(s), \\ W_{\Pi}(s) = W_{\Pi}'(s) = W_{\Pi}''(s), \quad W_4(s) = W_4'(s) = W_4''(s); \end{aligned} \quad (11)$$

можно записать передаточную функцию исполнительных устройств КЗ и КС:

$$W_{2-4}(s) = W_{2-4}'(s) + W_{2-4}''(s) = 2W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_{\Pi}(s) \cdot W_4(s). \quad (12)$$

С учетом выражений (1)–(12) можно записать передаточную функцию БС, а именно:

$$W_p(s) = W_1(s) \cdot W_{2-4}(s) = 2W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_{\Pi}(s) \cdot W_4(s). \quad (13)$$

Для измерения и контроля уровня h_x рабочей среды в резервуаре технического объекта, на его байпасной камере размещен НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта, как уже отмечалось ранее. В представленной структурной модели измерительной системы (см. рис. 2) НМПУ включен в цепь обратной связи. Математически звенья могут быть описаны колебательной, запаздывающей и пропорциональной передаточными функциями [3]:

$$W_5(s) = \frac{\sigma_x}{h_x} = \frac{K4}{T_{\Pi}^2 s^2 + 2\xi T_{\Pi} s + 1}; \quad (14)$$

$$W_6(s) = \frac{e_x}{\sigma_x} = \exp(-T_x s); \quad (15)$$

$$W_7(s) = \frac{U_x}{e_x} = K_{yc}; \quad (16)$$

где $K4$ – коэффициент передачи поплавкового элемента НМПУ, T_{Π} – постоянная времени байпасной камеры с поплавковым элементом и магнитом, ξ – постоянная демпфирования, $T_x = 2h_x/V_{кр}$ – временной интервал уровня h_x среды технического объекта, $V_{кр} = 0,6531 \cdot V_{пр}$ – скорость основной моды ультразвуковой волны кручения, $V_{пр}$ – фазовая скорость продольной ультразвуковой волны в среде звукопровода, K_{yc} – коэффициент усиления усилителя считывания НМПУ, σ_x , e_x , U_x – амплитудные значения акустической волны, индуцированного (считанного) и усиленного в K_{yc} – раз информационного сигнала уровня на аналоговом выходе НМПУ.

С учетом выражений (14)–(16) запишем передаточную функцию цепи обратной связи исследуемой системы:

$$W_{oc}(s) = W_5(s) \cdot W_6(s) \cdot W_7(s) = \frac{K4 \cdot K_{yc}}{T_{\Pi}^2 s^2 + T_{\Pi} s + 1} \cdot e^{-T_x s}. \quad (17)$$

Зная выражения передаточных функций разомкнутой системы (13) и цепи обратной связи (17), составим уравнение передаточной функции замкнутой системы [3]:

$$W(s) = \frac{W_p(s)}{1 - W_p(s) \cdot W_{oc}(s)} = \frac{2W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_{\pi}(s) \cdot W_4(s)}{1 - 2W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_{\pi}(s) \cdot W_4(s) \cdot W_5(s) \cdot W_6(s) \cdot W_7(s)}; \quad (18)$$

которая имеет общий коэффициент усиления:

$$K = K_{ym} \cdot K_{yc} \cdot K1 \cdot K2 \cdot K_{\pi} \cdot K3 \cdot K4; \quad (19)$$

с сигналом рассогласования $\varepsilon = U_{ypp} - U_x = U_1$ на сигнал записи (управления) [2]:

$$U_{ypp}(t) = U_0(t) \frac{1}{n} + \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} 2 \frac{1}{(2n-1)\pi} \sin(2n-1) \frac{2\pi}{\tau_{и}}; \quad (20)$$

здесь $U_0(t)$, $\tau_{и}$ – амплитуда и длительность сигнала, n – число гармоник.

Получив выражения передаточных функций для разомкнутой (13), замкнутой (18) системы и цепи ее обратной связи (17), проведем исследование эффективности ее работы с использованием НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта. Для этого используем частотные и временные критерии теории автоматического управления и регулирования [3].

Выполнив замену $s \rightarrow j\omega$ в выражениях (13), (18) передаточных функций разомкнутой и замкнутой байпасной системы технологического объекта, проведем исследование ее амплитудно-частотной характеристики (АЧХ):

а) разомкнутая БС:

$$W_p(j\omega) = |W_1(j\omega)| \cdot |W_{2,4}(j\omega)| = 2 \frac{K_0}{a_1 \cdot a_2}; \quad (21)$$

б) замкнутая БС:

$$W(j\omega) = \left| \frac{W_p(j\omega)}{1 - W_p(j\omega) \cdot W_{oc}(j\omega)} \right| = 2K_0 \left[a_1 \cdot a_2 \left(1 - \frac{2K_0 \cdot K_4 \cdot K_{yc}}{a_2 \cdot a_3} \right) \right]^{-1}; \quad (22)$$

здесь

$$K_0 = K_{ym} \cdot K_{\pi} \cdot K1 \cdot K2 \cdot K3, \quad a_1 = \sqrt{1 + \tau_m^2 \omega^2} \cdot \tau_{и} \omega^2, \\ a_2 = \sqrt{1 - 2T_m T_{я} \omega^2 + T_m^2 T_{я}^2 \omega^4 + T_m^2} \cdot T_{к}, \quad a_3 = \sqrt{1 - 2T_{\pi}^2 \omega^2 + T_{\pi}^2 \omega^2 + 4T_{\pi}^2 \xi^2 \omega^2}.$$

Результаты моделирования АЧХ разомкнутой (рис. 3) и замкнутой (рис. 4) байпасной системы с НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта, полученные при значениях $K = 500 \text{ мм/В}$, $T_m = 0,036 \text{ с}$, $T_{я} = 0,01 \text{ с}$, $\tau_m = 0,01 \text{ с}$, $\tau_{и} = 0,01 \text{ с}$,

$T_k = 0,05$ с, $T_{\Pi} = 0,001-0,01$ с, $\varepsilon=0,01$, показывают, что введение в цепь обратной связи БС НМПУ ведет к уменьшению коэффициента усиления K системы, возрастанию плавности регулирования и смещению резонансных свойств в область более высоких частот.

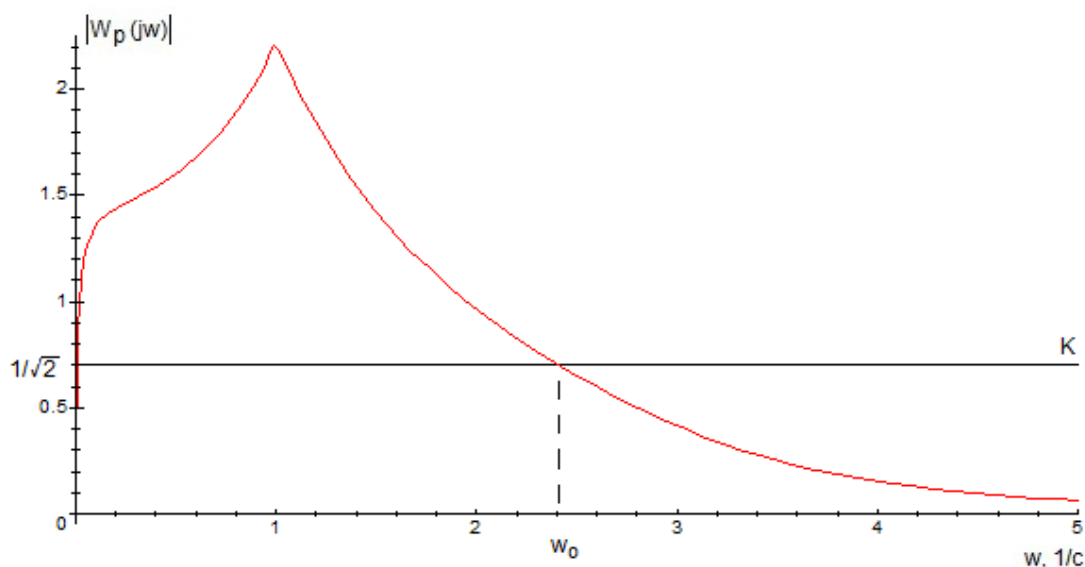


Рисунок 3 – АЧХ разомкнутой БС

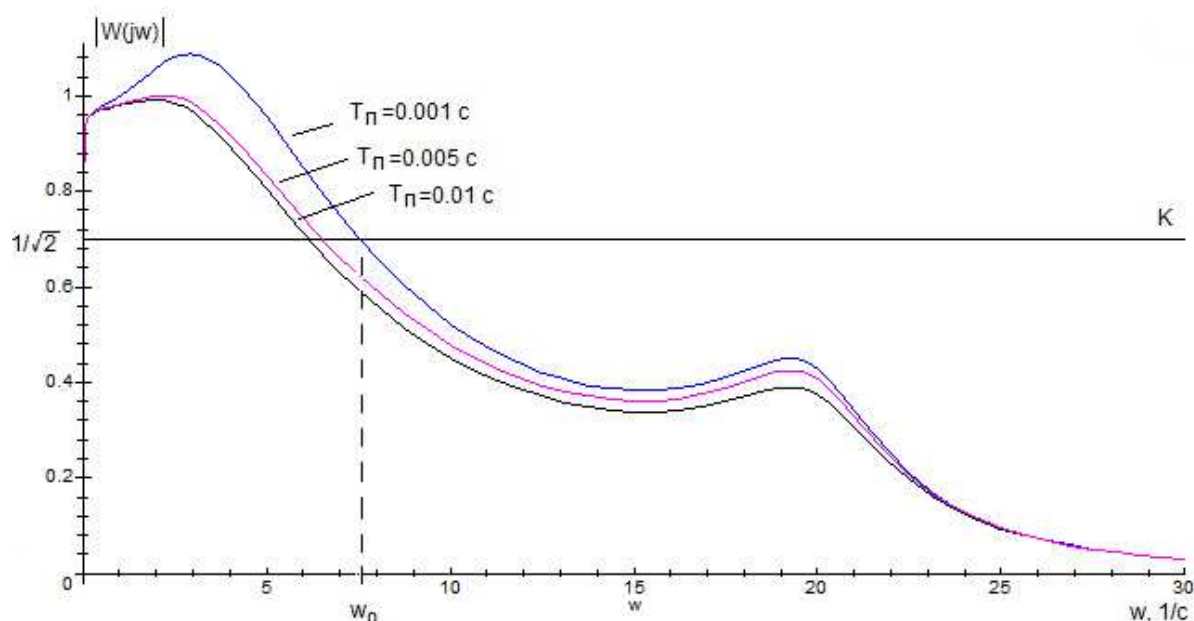


Рисунок 4 – АЧХ замкнутой БС с НМПУ

На диапазоне измерения уровня $h_x = 0,1-0,2$ м АЧХ БС с НМПУ данного типа на частоте среза $\omega_0 = (6-8)$ Гц не имеет неравномерностей и не подвержена самовозбуждению, т.е. является устойчивой. С ростом постоянной времени T_{Π} НМПУ возрастает инерционность БС с некоторым смещением резонансной частоты ω_0 в область более низких частот ω_0 (см. рис. 4).

Проведем исследование работы байпасной измерительной системы с НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта во временной области [3]. По качеству переходного процесса системы можно установить эффективность ее работы.

Выполним следующие преобразования полученных ранее выражений (21), (22), сделав замену параметра $\omega = 2\pi/T$, где T – период сигнала. В результате имеем следующие выражения переходных функций для каждого звена исследуемой системы:

$$h_1(t) = K_{\text{ym}} \cdot T_{\text{yпр}}(t); \quad (23)$$

$$h_2(t) = K1 [1 - \exp(t/\tau_m)] \cdot U_{\text{yпр}}(t); \quad (24)$$

$$h_3(t) = K2 \cdot t \cdot U_{\text{yпр}}(t); \quad (25)$$

$$h_{\text{п}}(t) = \frac{K_{\text{п}}}{R_{\text{я}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{м}}}\right) \cdot \cos\left(\frac{t}{T_{\text{м}}}\right) + \sin\left(\frac{t}{T_{\text{м}}}\right) \right] \cdot U_{\text{yпр}}(t); \quad (26)$$

$$h_4(t) = K3 \cdot t \cdot U_{\text{yпр}}(t); \quad (27)$$

$$h_5(t) = K4 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon t}{T_{\text{п}}}\right) \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{T_{\text{п}}} t\right) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{T_{\text{п}}} t\right) \right] U_{\text{yпр}}(t); \quad (28)$$

$$h_6(t) = U_{\text{yпр}}(t - T_x); \quad (29)$$

$$h_7(t) = K_{\text{yc}} \cdot U_{\text{yпр}}(t); \quad (30)$$

Следовательно, переходные характеристики разомкнутой цепи обратной связи и замкнутой системы описываются следующими уравнениями:

$$h_{\text{р}}(t) = 2 \cdot h_1(t) \cdot h_2(t) \cdot h_3(t) \cdot h_{\text{п}}(t) \cdot h_4(t); \quad (31)$$

$$h_{\text{oc}}(t) = h_5(t) \cdot h_6(t) \cdot h_7(t); \quad (32)$$

$$h(t) = h_{\text{р}}(t) / [1 - h_{\text{р}}(t) \cdot h_{\text{oc}}(t)]. \quad (33)$$

Их анализ показывает отсутствие колебательных процессов на ступенчатое воздействие $U_{\text{yпр}}(t)$ со временем успокоения $t_{\text{усп}} = (0,06 - 1,0)$ с при значениях $T_{\text{п}} = (0,001 - 0,01)$ с НМПУ на волнах кручения со сложной геометрией акустического тракта, как показано на рисунке 5. Например, с ростом значений $T_{\text{п}}$ увеличивается время $t_{\text{усп}}$ успокоения системы, что является естественным, поскольку возрастает время трансляции УЗВ кручения через среду U -образного звукопровода по мере увеличения уровня h_x жидкой среды в резервуаре объекта.

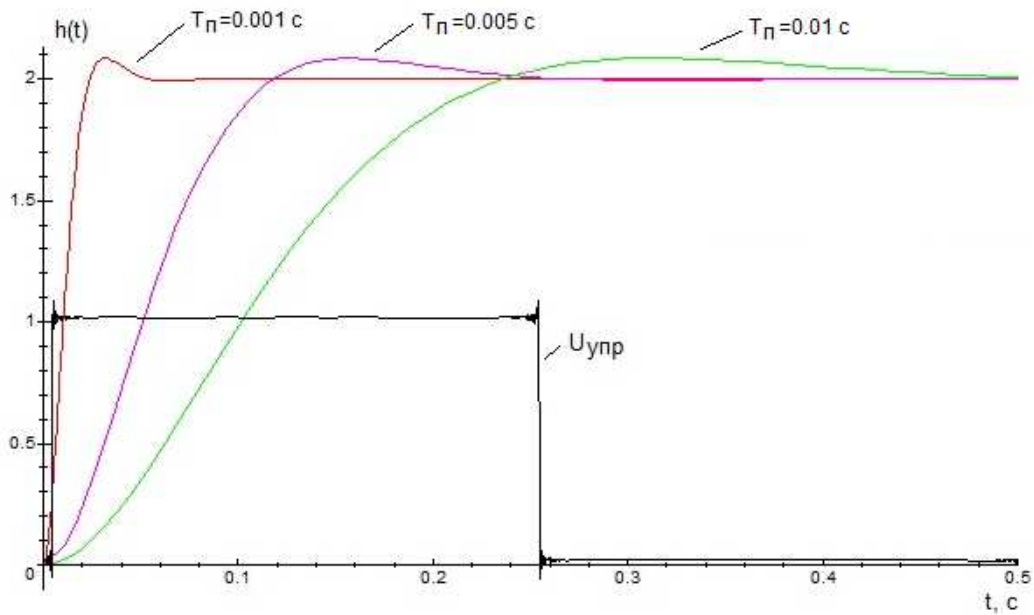


Рисунок 5 – Влияние параметра T_n на форму передаточной характеристики БС с НМПУ

Отсутствие колебаний в системе, которые могут вызвать резонансные явления, доказывает ее устойчивость, позволяя не проводить дополнительные исследования.

Выводы

Таким образом, повышение эффективности работы НМПУ на волнах кручения достигается за счет уменьшения времени переходных процессов в байпасной измерительной системе, а также за счет удвоенного повышения разрешающей способности измерительного прибора при его относительно высокой точности [2, 4]. Это дает основание утверждать о целесообразности использования НМПУ данного типа в байпасных системах измерения и контроля агрессивных жидких сред, а также сред, находящихся под давлением.

Список литературы

1. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. Пер. с англ. Под ред. Е.И. Сычева. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
2. Демин С.Б. Магнитострикционные системы для автоматизации технологического оборудования. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2002.– 182 с.
3. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1967.– 648 с.
4. Касаткин А.С. Эффективность автоматизированных систем контроля. – М.: Энергия, 1975. – 88 с.
5. Кулаков М.В. Технические измерения для химических производств. – М.: Альянс, 2008. – 424 с.

Рецензенты:

Султанов Б.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационная безопасность систем и технологий» Пензенского государственного университета, г. Пенза.

Сальников И.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Вычислительные машины и системы» Пензенского государственного технологического университета, г. Пенза.