

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЯЗКОСТИ
ТОПЛИВА НА СУДНЕ

В настоящее время на судах широко используются системы автоматического регулирования (САР) вязкости топлива, измеряющие точно коэффициенты динамической вязкости, что не дает представлений о свойствах и поведении тиксотропных жидкостей, к которым принадлежат тяжелые моторные топлива и масла. Кроме того, процессы в измерительных зондах используемых вискозиметров не подобны процессам в триботехнических узлах топливной аппаратуры [1, 2]. А некачественно приготовленная топливная смесь приводит к неисправностям элементов топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы.

Анализ существующих методов и конструкций вискозиметров в составе САР вязкости показал, что не все методы могут быть использованы при определении коэффициента динамической вязкости и определении реологических характеристик тяжелого топлива, являющегося тиксотропной жидкостью. Так, на судах в основном используются вискозиметры, работа которых основана на использовании методов измерения в капилляре, ротационном методе и методе соосных цилиндров [3, 4, 5]. Следует отметить, что постепенно предпочтение производители начинают отдавать методу соосных цилиндров по причине подобия процессов в измерительном зонде вискозиметра и в триботехнических узлах топливной аппаратуры.

В [6, 7] установлено, что характер реологических кривых, по которым определяется коэффициент динамической вязкости, одной и той же жидкости существенно отличается при исследованиях на ротационном вискозиметре и вискозиметре на соосных цилиндрах. Процессы в измерительном зонде соосного вискозиметра идентичны процессам, протекающим в узлах топливной аппаратуры.

На рис. 1 представлена зависимость частоты вращения нереверсивного пьезоэлектрического двигателя (ПЭД) в составе ротационного и соосного вискозиметров. В качестве образцов для испытаний были выбраны жидкости, коэффициент динамической вязкости которых соответствует тяжёлому топливу [7]. На основании чего и было принято решение о включении вискозиметра на соосных цилиндрах в состав САР вязкости топлива.

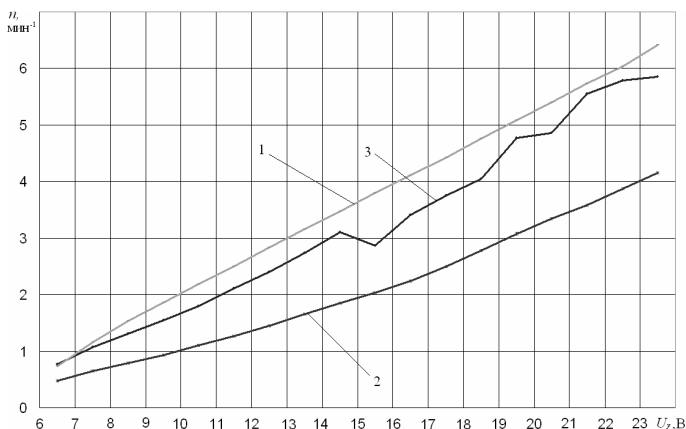


Рис. 1. Зависимость частоты вращения ПЭД от управляющего напряжения при исследовании масла вязкостью 159 сстокс: 1 - холостой ход; 2 - метод основных цилиндров; 3 - ротационный метод

В САР в качестве исполнительного механизма большое распространение получили гидравлические и пневматические исполнительные механизмы, которым наряду с преимуществами присущи и недостатки. Основной — это необходимость специальной среды (жидкость или воздух), что вызывает за собой трудности в обслуживании и замене элементов. Также возникают высокие требования и к сигналу (по очистке, содержания других жидкостей или примесей). Главным же недостатком в настоящее время является сложность сопряжения гидравлических и пневматических исполнительных механизмов с вычислительной техникой (микроконтроллером, компьютером), благодаря которому возможна реализация цифровых законов регулирования.

С быстрым развитием прецизионных технологий стали появляться исполнительные механизмы, позволяющие решать задачи значительно более высокого уровня сложности.

Но создание таких систем взаимосвязано с качественным повышением требований к диапазону рабочих частот, точности приводов и, соответственно, исполнительных элементов. Поэтому предложено использовать реверсивный ПЭД [8, 9, 10] в качестве исполнительного механизма САР для управления краном пароподогревателя.

Для оценки влияния используемого метода измерения и используемого типа привода исполнительного механизма на динамику САР вязкости, за основу принята САР вязкости с пневматическим ПИ-регулятором [11].

Расчет оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора осуще-

ствлен тремя методами:

по аналитическим выражениям;

по номограммам;

методом вывода системы в режим автоколебаний.

Используя расчетные параметры настройки построены три переходных процесса, по которым определен наиболее удовлетворяющий предъявляемым требованиям к качеству с временем регулирования 205 с при настроечных параметрах: коэффициенте усиления регулятора $K_p = 0,72$ и времени интегрирования $T_n = 87,7$ с.

Модель САР вязкости топлива, в состав которой входят триботехнический узел, пьезоэлектрический неререверсивный двигатель с пассивным ротором и кривошипно-шатунный механизм, представлена на рис. 2. Триботехнический узел выполнен на основе распылителя форсунки с зазором 10 мкм, в который впрессован штуцер для подачи жидкости [12].

В качестве исполнительного механизма использован вентиль игольчатый запорный проходной, приводом которого является реверсивный ПЭД, жёстко насаженный на вал клапана и прикреплённый к его корпусу (рис. 3).

Однако, ввиду сложности модели и получения переходных процессов необходимы большие временные затраты. Поэтому была разработана упрощенная модель, в которой ПЭД приближённо описан передаточной функцией в виде апериодического звена первого порядка, на основании того, что ПЭД можно представить в виде сервомотора [13, 14] с временем сервомотора $T=0,001 \div 0,1$ с.

Для подтверждения возможности описания ПЭД апериодическим звеном первого порядка создан имитационный стенд САР, в котором в качестве исполнительного механизма использован ПЭД, а объектом регулирования является шарик, свободно катящийся по канавке. Положение шарика в канавке является регулируемым параметром. Данный параметр может быть заменен на любой другой. Например, уровень воды в пароводяном барабане, количество оборотов дизель генератора и т.д. А угол наклона канавки будет являться регулирующим воздействием. Вдоль канавки установлены восемь гальванических датчиков положения шарика, сигналы от которых подаются на порты учебного микропроцессорного стенда УМПК-80 (рис. 4).

После обработки информации при помощи стандартных программ для проверки положения шарика ("Опрос двоичного датчика" и "Ожидание события") УМПК-80 вырабатывает управляющий сигнал, который подаётся на ПЭД для изменения угла наклона канавки (регулирующее воздействие).

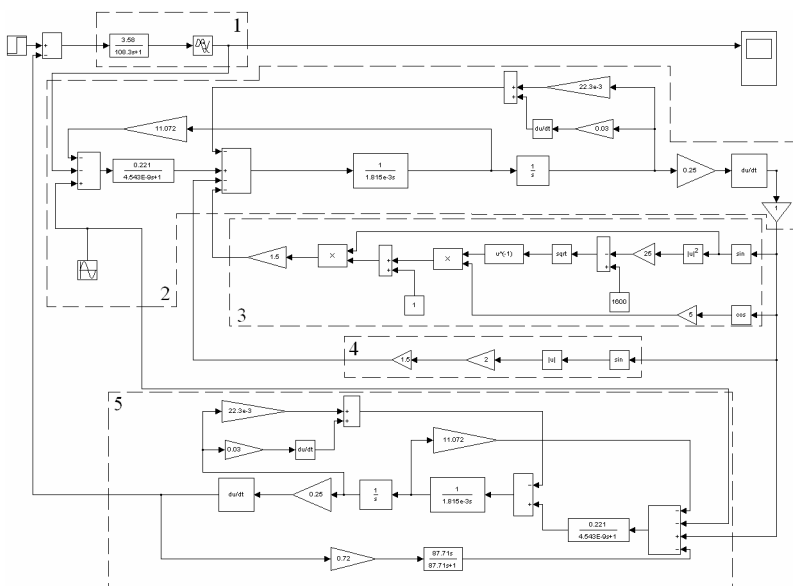


Рис. 2. Модель САР вязкости топлива: 1 - объект управления; 2 - ПЭД; 3 - блок учёта давления топлива и влияния кривошипно-шатунного механизма; 4 - блок учёта силы трения в измерительном зонде; 5 - ПИ-регулятор и исполнительный механизм с пьезопроводом

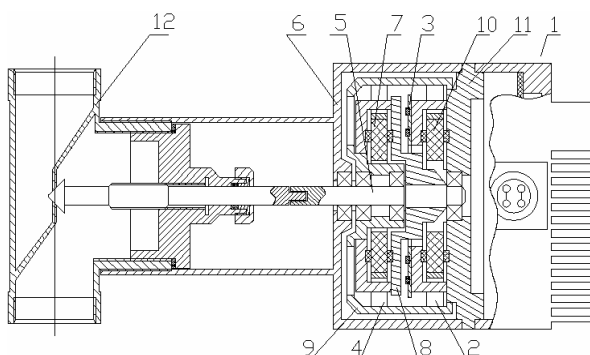


Рис. 3. Исполнительный механизм: 1 - защитная крышка блока питания; 2 - толкатели нижнего осциллятора; 3 - токосъемное устройство; 4 - толкатели верхнего осциллятора; 5 - вал; 6 - корпус; 7 - верхний осциллятор; 8 - подвижное основание; 9 - ротор; 10 - нижний осциллятор; 11 - основание; 12 - вентиль

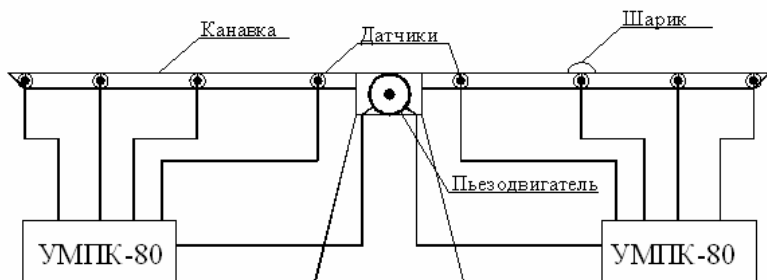


Рис. 4. Внешний вид конструкции имитационного стенда САР

После обработки информации при помощи стандартных программ для проверки положения шарика ("Опрос двоичного датчика" и "Ожидание события") УМПК-80 вырабатывает управляющий сигнал, который подаётся на ПЭД для изменения угла наклона канавки (регулирующее воздействие).

Функциональная схема САР представлена на рис. 5.

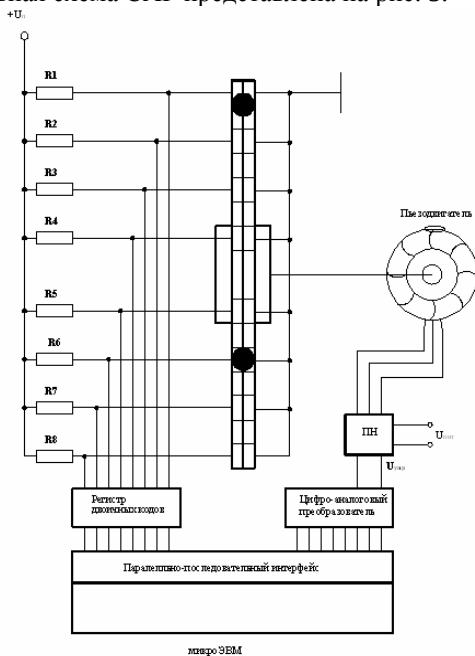


Рис. 5. Функциональная схема САР положения шарика: ПН – преобразователь напряжения

Работа установки заключается в следующем. В начале процесса шарик находится в самом крайнем положении, скорость его равна нулю. Под углом наклона канавки шарик начинает двигаться к следующей точке (датчику), после чего система опять изменяет угол наклона канавки на другой, изменяя время перемещения к следующей точке и т.д. Для определения времени, используемого для принятия решения, необходимо определить силы, действующие на шарик на наклонной плоскости. А уже по этим силам определим время для принятия решения и отработки исполнения в зависимости задания угла канавки от массы шарика.

Наклонная плоскость, по которой движется тело (в нашем случае это шарик), изображена на рис. 6.

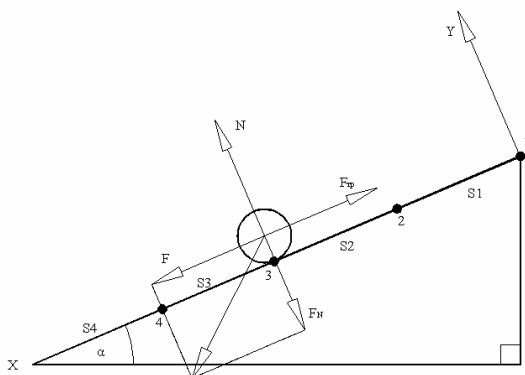


Рис. 6. Определение времени таймеров в зависимости от угла наклона

По прямой ОХ

$$ma = mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} , \quad (1)$$

где $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$.

По прямой ОУ

$$N - mg \cos \alpha = 0 . \quad (2)$$

Подставляя уравнение (1) в (2) получим

$$ma = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha ,$$

где $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$; μ - коэффициент трения качения, который для шарика равен 0,001.

Движение шарика на одной половинке канавки.

Воспользовавшись формулой для уравнения пути при равноускоренном движении, получим, участок пути от точки 1 к точке 2

$$S_1 = v_0 t_1 + \frac{a_1 t_1^2}{2},$$

где v_0 - начальная скорость, a_1 - ускорение, t_1 - время прохождения шарика от точки 1 до 2, то есть время, которое необходимо для перехода на подпрограмму ожидания события.

Точка 1 является крайним положением, и шарик не имеет начальной скорости в начальный момент времени. Тогда путь

$$S_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}. \quad (3)$$

Откуда

$$t_1 = \sqrt{\frac{2S_1}{a_1}}.$$

Так при S_1 равном 0,1 м и угле $\alpha_1=10^\circ$ ускорение a_1 шарика составит 1,52 м/с² и время $t_1=0,36$ с.

Движение шарика от точки 2 до точки 3.

Шарик проходит путь $S_2=0,05$ при $\alpha_3=5^\circ$. Начальная скорость шарика v_1 в этой точке, составит 0,55 м/с², а время t_2 составит 0,09 с.

Те же самые действия для пути $S_3=0,025$ м от точки 3 до точки 4. Примем начальную скорость равную $v_2=0,0675$ м/с² и $\alpha_3=2,5^\circ$. Время t_3 составит 0,22 с.

Опять, таким же способом рассчитываем время t_4 для пути $S_4=0,0125$ м от точки 4 до точки 5, и принимая начальную скорость $v_2=0,09$ м/с². Время t_4 составит 0,1 с.

Таким образом, изменяя время можно добиться различных режимов работы всей системы, включая даже несимметричное регулирование. Для этого необходимо заново рассчитать время прохождения шарика. То же самое необходимо сделать при замене шарика другим (другим диаметром или резиновым) при этом необходимо учесть новый коэффициент трения, который тоже влияет на время прохождения шарика. При срабатывании таймера временной импульс подается на соответствующие ключи пьезодвигателей прямого и реверсивного вращения.

Динамика системы обусловлена принадлежностью разработанной имитационной модели САР к экстремальным системам, так как во время ее функционирования происходит автоматический поиск и поддержание оптимального режима работы. В общем случае в процессе экстремального управления определяется экстремум статической характеристики нелинейного нестационарного инерционного объекта, на который действуют возмущения, которые изменяют положение экстремума в пространстве управляющих воздействий.

К экстремальным системам предъявляются требования устойчивости (совпадение процесса поиска в зоне экстремума), точности (обеспечение заданного отклонения показателя качества от экстремального значения в установившемся режиме) и быстродействия (минимального времени поиска экстремумов). Кроме этого, динамика экстремальных систем характеризуется еще и такими специфическими показателями как: затраты на рыскания, период рыскания, зона поисков на входе и выходе объекта, время выхода в точку экстремума.

Для уменьшения затрат на рыскания следует уменьшить амплитуду поискового сигнала. Возможность уменьшения амплитуды определяется уровнем преград, потому что поисковый сигнал должен четко выделяться на их фоне. Если проанализировать спектр преград на выходе системы, можно выделить участок спектра с наименьшими амплитудами преград. Это дает возможность выбрать частоту и амплитуду поискового сигнала так, чтобы обеспечить минимальные потери на рыскание при достаточно надежной работе системы.

Рассмотренные показатели динамики отвечают идеальному случаю, когда все элементы системы считаются безинерционными, а статическая характеристика объекта - стационарной, то есть такой, которая не изменяется на протяжении времени.

Влияние инерционности объекта (в нашем случае шарик) на процесс поисков экстремума на примере системы, функциональная схема которого приведена на рис. 7.

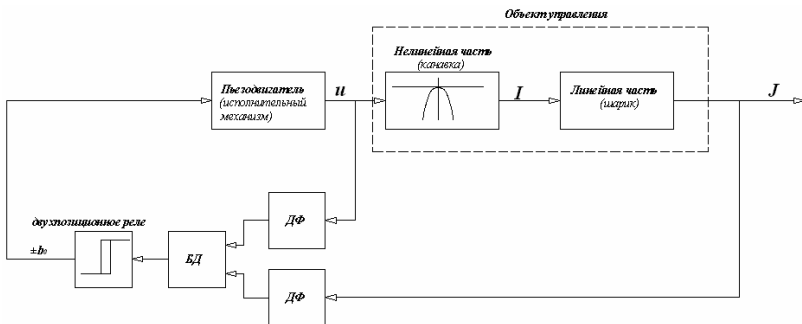


Рис. 7. Функциональная схема экстремальной системы поисков экстремума

Допустим, что объект можно показать в виде двух звеньев - безинерционной нелинейной с экстремальной характеристикой и инерционной линейной. Тогда уравнения отдельных звеньев системы будут следующими.

Линейная часть объекта:

$$T_1 \frac{dJ}{dt} + J = k_1 I ,$$

где T_1 - постоянная времени объекта (шарика).

Нелинейная часть объекта:

$$I = -k_2 u^2 .$$

Исполнительный механизм (ПЭД) можно приближённо описать интегрирующим звеном:

$$\frac{du}{dt} = k_3 b .$$

Экстремальный регулятор:

$$b = F(J, u) = \begin{cases} +b_0, \text{ при } \frac{dJ}{du} > c; \\ -b_0, \text{ при } \frac{dJ}{du} < -c, \end{cases}$$

где c - зона нечувствительности экстремального регулятора.

Подставив значения I в уравнение линейной части объекта получим

$$T_1 \frac{dJ}{dt} + J = k_1 k_2 u^2 .$$

Заменяя в этом уравнении производную du/dt её значением для исполнительного механизма, получим

$$k_3 T_1 b \frac{dJ}{du} + J = -k_1 k_2 u^2 . \quad (4)$$

Учитывая, что $b = \pm b_0$, представим уравнение (4) в виде:

$$\frac{dJ}{du} \pm \alpha J = \pm \beta u^2 ,$$

где

$$\alpha = \frac{1}{k_3 T_1 b_0} ; \quad \beta = \frac{k_1 k_2}{k_3 T_1 b_0} .$$

Решение этого уравнения $J = f(u)$ образует фазовую траекторию объекта в плоскости координат u, J . Для безинерционного объекта $J = k_1 I$, поэтому фазовая траектория при $k_1 = 1$ совпадает со статической характеристикой объекта. Для инерционного объекта

$$J = C e^{-\alpha u} - \frac{\beta}{\alpha} u^2 + \frac{2\beta}{\alpha^2} - \frac{2\beta}{\alpha^3} ,$$

где C - постоянная интегрирования, которая определяется из начальных условий при $t=0$, $J=J_0$, $u=u_0$,

$$C = \left(J_0 + \frac{\beta}{\alpha} u_{02} - \frac{2\beta}{\alpha^2} u_0 + \frac{2\beta}{\alpha^3} \right) e^{au_0}.$$

Подставив экспериментально найденные значения коэффициентов $T_1=1,55$ с, $J=0,2$ м, $u=62,8$ угл. с., $k_1=0,65$, $k_2=0,1$, $k_3=333,3$ в полученные уравнения, получим фазовую траекторию системы, показанную на рис. 8.

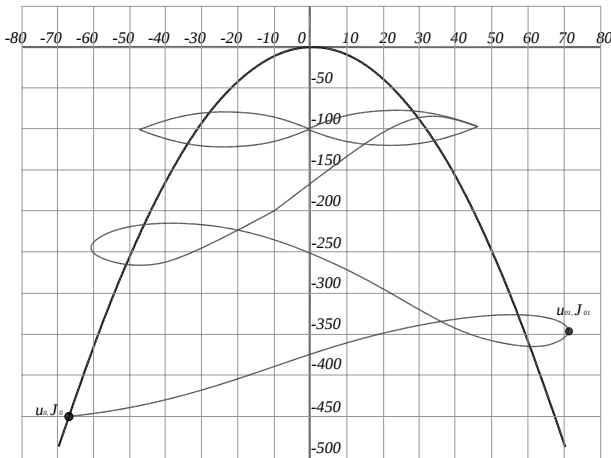


Рис. 8. Фазовая траектория САР

При проведении эксперимента получено подтверждение предположений о возможности описания ПЭД апериодическим звеном первого порядка, что послужило основанием для его замены в модели САР вязкости топлива, показанной на рис. 9.

В результате моделирования получены переходные процессы (рис. 10).

В табл. представлены показатели качества для четырёх вариантов определения настроечных параметров.

Таким образом, показатели качества переходных процессов новой спроектированной системы по сравнению с аналитическим способом улучшились: динамическая ошибка и время регулирования уменьшились на 5 и 6 % соответственно.

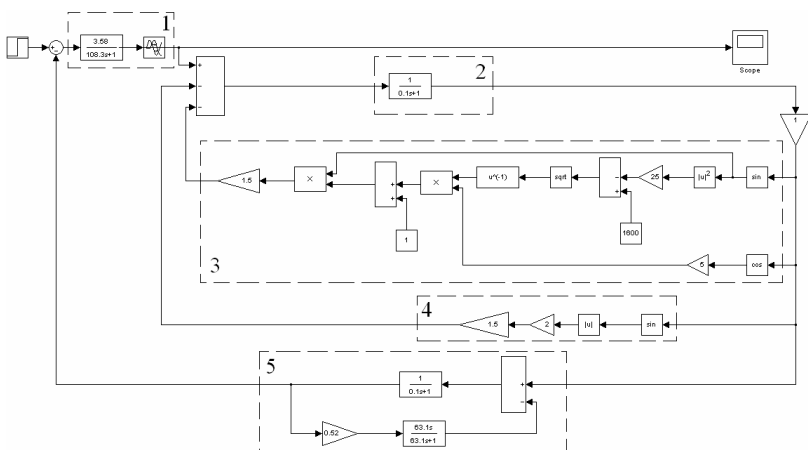


Рис. 9. Упрощённая модель САР вязкости топлива: 1 - объект управления; 2 - ПЭД; 3 - блок учёта давления топлива и влияния кривошипно-шатунного механизма; 4 - блок учёта силы трения в измерительном зонде; 5 - ПИ-регулятор с исполнительным механизмом на ПЭД

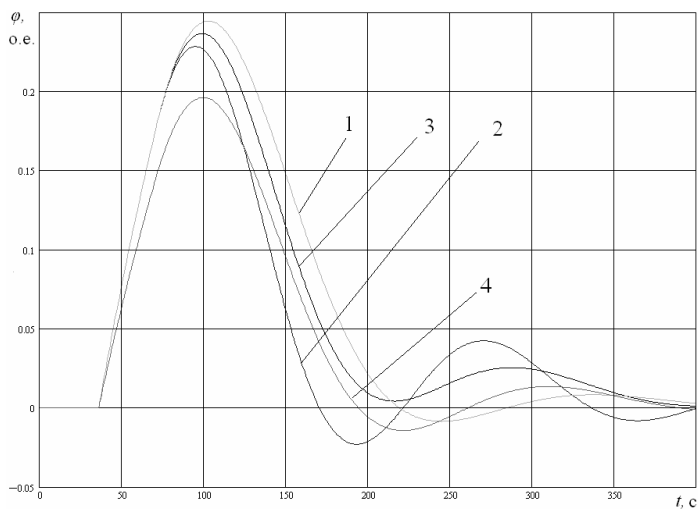


Рис. 10. Переходные процессы САР: 1 - коэффициенты определены аналитическим способом; 2 - коэффициенты определены выводом системы в режим автоколебаний; 3 - коэффициенты определены по номограммам; 4 - коэффициенты в новой спроектированной системе

Настроечные параметры и показатели качества

№ переходного процесса	Настроечные параметры		Показатели качества		
	коэффициент усиления K_p	время интегрирования $T_{\text{и}}$, с	динамическая ошибка ϕ , о.е.	степень затухания ψ , %	время регулирования t_p , с
1	0,72	87,7	0,24	97	205
2	0,75	102,5	0,23	82	316
3	0,89	95,2	0,23	89	333
4	0,52	63,1	0,19	94	183

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский В.В., Багдасарян Л.Б. Определение реологических характеристик топлив и масел, используемых в СЭУ // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2005. - Вып. 14. - С. 31 - 35.

2. Никольский В.В. Оценка реологических свойств тиксотропных жидкостей реометрами с пьезоприводом // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2005. - Вып. 10. - С. 61 - 64.

3. Овчинников П.Ф. Виброреология. - Киев: Наук. думка, 1983. - 272 с.

4. Никольский В.В. Анализ применения пьезоэлектрических вискозиметров // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: наук. - техн. журнал - 2003. - №2. - С. 64 - 66.

5. Cambridge Viscometers: Accurate, Reliable and Proven Fluid Viscosity Measurement Technology [Электронный ресурс] / - www.cambridgeapplied.com.

6. Алтоиз Б.А., Ханмамедов С.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. - 2003. - Вып. 9. - С. 80 - 86.

7. Никольский В.В. Основи створення пристроїв п'єзоактивної механіки для систем керування двигунами внутрішнього згоряння: Автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.13.05 / ОНПУ. - Одеса, 2005. - 36 с.

8. Коваль В.С., Лавриненко В.В., Левицкий О.В. - П'єзоелектричний двигун. Патент України № 20182, 1997.

9. Коваль В.С., Лавриненко В.В., Левицкий О.В. - Пьезоэлектрический двигатель. Патент России № 1820820, 1997.

10. Коваль В.С., Лавріненко В.В., Тишко О.О., Хорунжий В.М.- П'єзоелектричний двигун та спосіб його виготовлення. Патент України № 69663А, 2004.

11. Горбунів В.Ф., Журенко М.А. Статика и динамика автоматических систем регулирования температуры и вязкости топлива: учеб. пособие. - М.: В/О Мортехинформреклама, 1986. - 24 с.

12. Нікольський В.В. Деклараційний патент України на корисну модель, МКІ 7 G01N11/10 Віскозиметр. - №u200500629. Опубл. 15.07.2005. - Бюл. №7.

13. Давлеталиев Д.А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.13.05. - Л.: Политехнический институт им. Калинина, 1985. - 226 с.

14. Потемкин А.Э., Никольский В.В., Сандлер А.К. Микропроцессорная техника: учеб. пособие. - Одесса: ОНМА, 2004. - 92 с.