

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ

© 2020

- А. М. Гареев** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru)
- А. Г. Гимадиев** доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru)
- Д. М. Стадник** кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [sdm-63@bk.ru](mailto:sdm-63@bk.ru)
- И. А. Попельнюк** ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [iap@ssau.ru](mailto:iap@ssau.ru)

Для интеллектуальных систем диагностирования энергетических и технологических комплексов, основанных на измерении динамических параметров, необходимо обеспечивать соответствующую информативность применяемых средств измерения. Датчики и измерительная аппаратура должны обладать достаточной точностью, надёжностью, быстродействием и стабильностью характеристик. Типы датчиков для измерения динамических параметров выбираются в зависимости от структуры системы и рабочих сред. Это могут быть, например для электрогидромеханических систем указанных комплексов, датчики давления, расхода и температуры рабочих сред, перемещения подвижных элементов, вибраций корпусных деталей. Тип датчика, предусмотренного для применения в системе диагностирования, во многом определяется степенью динамичности протекающих в ней процессов. Необходимо, чтобы датчики удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям по быстродействию. Если датчики обладают малым быстродействием, чем необходимо по динамичности процессов в электрогидромеханической системе, то это может привести к динамической погрешности измерения и ошибке в диагнозе технического состояния. В технической литературе требование по быстродействию датчиков даётся указанием на то, что оно должно быть на порядок выше, чем динамика протекающих в системе процессов. Такой подход неприемлем при выборе типа датчиков для систем диагностирования с учётом динамики процессов. Во-первых, датчиков для измерения с таким требуемым параметром может не оказаться. Во-вторых, даже если имеется датчик с близким по быстродействию с динамикой процессов в системах параметром, необходимо заранее знать, к какой динамической погрешности это может привести и как это отразится на точности системы диагностирования. В работе получена аналитически обобщённая зависимость динамической погрешности измерения параметров в электрогидромеханических системах от относительного быстродействия датчиков, которая позволяет выбрать датчик с динамической погрешностью, не превышающей заданную величину. На примере гидравлической системы вертолёта МИ-8 показан расчёт динамической погрешности измерения.

*Электрогидромеханические системы; диагностирование; измерение параметров; динамическая погрешность; быстродействие датчика; расчёт погрешности измерения.*

---

**Цитирование:** Гареев А.М., Гимадиев А.Г., Стадник Д.М., Попельнюк И.А. Определение динамической погрешности измерения параметров электрогидромеханических систем с учётом быстродействия датчиков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 2. С. 85-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-85-98

## **Введение**

Динамическая погрешность измерительной аппаратуры, в частности датчиков, является одним из основных показателей при их выборе для систем диагностирования технических объектов по динамическим параметрам. Точность диагностирования напрямую зависит от динамической погрешности датчиков. Проблеме подбора оптимальных по своим характеристикам датчиков для систем контроля и диагностики энергетических и технологических комплексов посвящены работы отечественных и зарубежных учёных. Авторами подчёркивается важность глубокого и всестороннего анализа погрешностей датчиков, а также их динамических характеристик с учётом исследования их взаимного влияния с динамикой протекающих в исследуемых объектах процессов [1;2]. В работах [3;4] рассматриваются различные способы коррекции, учёта и снижения динамической погрешности средств измерения: методы восстановления входного сигнала датчика с помощью адаптивного управления параметрами измерительной системы, нейросетевого управления; метод экстраполяции отфильтрованных значений переменной. Однако в указанных работах приводится коррекция только по быстрдействию датчика в отрыве от динамики процессов в измеряемой системе. Кроме этого авторы при исследованиях не отталкиваются от динамической погрешности измерения параметров. В работе [5] рассматривается применение методов амплитудной и временной селекции для коррекции динамической погрешности и повышения помехоустойчивости измерительных преобразователей системы контроля частоты вращения ротора турбоагрегата стартового двигателя. В проведённых исследованиях нет общего подхода, который можно было бы применить для многих других параметров и типов датчиков.

Среди исследований зарубежных авторов известны публикации, в которых описываются требования к электрическим и физическим характеристикам, быстрдействию, точности, надёжности и стоимости сенсорных систем для упреждающего обслуживания технологических комплексов [6 – 8]. Большой интерес представляют работы, посвящённые различным способам подбора датчиков при формировании систем контроля и мониторинга энергетических и технологических комплексов, например, метод на основе теории серой кластеризации, алгоритм стохастического поиска и т.д. Однако в данных работах основной акцент при подборе датчиков делается на диагностическую ценность получаемой с них информации без учёта их совместного с динамикой процессов в исследуемой системе влияния на динамическую погрешность [9 – 11].

Динамическая погрешность измерения параметров в электрогидромеханических системах (ЭГМС) при диагностировании технического состояния может существенно влиять на точность определения неисправности. Поэтому важно заранее определить её величину, которая зависит в основном от степени быстрдействия датчиков относительно динамики процессов в диагностируемой или исследуемой системе. Анализ литературы показывает, что, несмотря на многообразие публикаций по данной тематике, отсутствуют конкретные рекомендации по выбору средств измерения с требуемым быстрдействием с учётом динамики протекающих в системе процессов и допустимой динамической погрешности. Априорные знания о величине динамических погрешностей используемых датчиков позволят повысить эффективность существующих методов снижения и коррекции такой погрешности и достоверность результатов диагностирования ЭГМС.

### Теоретическое исследование динамической погрешности измерения параметров электрогидромеханических систем

Рассмотрим метод оценки динамической погрешности измерения параметров ЭГМС в процессе формирования обучающей выборки или диагностирования с учётом динамики процессов. Предположим, что процессы в ЭГМС при всех возможных управляющих и возмущающих воздействиях протекают таким образом, что в них можно выделить участки с максимальными градиентами параметров, по которым производится диагностирование технического состояния. Это можно выполнить путём моделирования процессов в программных пакетах, например Matlab, Amesim, SimulationX. В результате моделирования процессов в ЭГМС можно определить максимальные градиенты изменения того или иного параметра  $R = \Delta P / \Delta \tau$ , где  $\Delta P$  – приращение параметра за время  $\Delta \tau$ .

Интерпретацию максимального градиента изменения параметра в ЭГМС можно осуществить в результате представления системы в виде апериодического типового звена и моделирования процессов при подаче единичного ступенчатого управляющего воздействия  $X(t) = X_0 1(t)$  и регистрации параметра  $P(t)$ . Здесь  $X_0$  – величина ступени воздействия на систему,  $1(t)$  – единичная ступенчатая функция Хевисайда [12].

Передаточная функция ЭГМС, представленной в виде апериодического звена, запишется в виде

$$W_c(s) = \frac{\tilde{P}}{\tilde{X}} = X_0 \frac{k_c}{T_c s + 1},$$

где  $\tilde{X}$ ,  $\tilde{P}$  – изображения по Лапласу управляющего воздействия и измеряемого параметра;  $k_c$ ,  $T_c$  – коэффициент передачи и постоянная времени системы;  $s$  – оператор в преобразовании Лапласа.

Переходный процесс и скорость изменения измеряемого параметра в системе, представленной в таком виде, будут описываться выражениями [13]:

$$P(t) = X_0 k_c \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = X_0 k_c \left( \frac{1}{T_c} e^{-\frac{t}{T_c}} \right). \quad (2)$$

Максимум функции (2) будет соответствовать максимальному градиенту изменения параметра в системе

$$R_c = \left( \frac{dP(t)}{dt} \right)_{\max} = X_0 k_c / T_c. \quad (3)$$

Датчики измеряемых параметров в ЭГМС, как правило, описываются уравнением апериодического типового звена или его передаточной функцией. Процесс измерения

можно тогда интерпретировать передачей управляющего воздействия  $X_c(t)$  с ЭГМС к датчику в виде прохождения сигнала через последовательную цепь передаточных функций системы и датчика:

$$W_{co}(s) = \frac{\tilde{U}_\delta}{\tilde{X}_c} = X_0 \frac{k_c}{T_c s + 1} \cdot \frac{k_\delta}{T_\delta s + 1}, \quad (4)$$

где  $\tilde{U}_\delta$  – изображения по Лапласу сигнала на выходе датчика;  $k_\delta$ ,  $T_\delta$  – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика.

Равенство (4) в виде последовательного соединения двух передаточных функций апериодических звеньев образует апериодическое звено второго порядка. Реакция этого звена на единичную ступенчатую функцию  $X(t) = X_0 1(t)$  описывается уравнением вида [13]:

$$U_\delta(t) = X_0 k_{co} \left( 1 - \frac{T_c}{T_c - T_\delta} e^{-\frac{t}{T_c}} + \frac{T_\delta}{T_c - T_\delta} e^{-\frac{t}{T_\delta}} \right), \quad (5)$$

где  $k_{co} = k_c k_\delta$  – коэффициент передачи ЭГМС совместно с датчиком.

Скорость изменения параметра по показаниям датчика, установленного в ЭГМС, определяется как производная по времени от функции (5):

$$\frac{dU_\delta(t)}{dt} = X_0 k_{co} \left( \frac{1}{T_c - T_\delta} e^{-\frac{t}{T_c}} - \frac{1}{T_c - T_\delta} e^{-\frac{t}{T_\delta}} \right). \quad (6)$$

Из (6) следует, что градиент изменения параметра, определённого по показаниям датчика, установленного в ЭГМС, в общем случае зависит как от динамики или градиента процессов в системе (параметра  $T_c$ ), так и от градиента или быстродействия самого датчика (параметра  $T_\delta$ ).

Определим максимальный градиент в показаниях датчика, установленного в ЭГМС, в результате поиска максимума функции (6). Для этого определим производную от функции (6) и приравняем её к нулю:

$$\frac{1}{T_\delta} e^{-\frac{t}{T_\delta}} - \frac{1}{T_c} e^{-\frac{t}{T_c}} = 0. \quad (7)$$

Решив уравнение (7) относительно  $t = t^{(\max)}$ , при котором оно будет справедливо, получим выражение:

$$t^{(\max)} = -\frac{T_\delta T_c}{T_c - T_\delta} \ln \frac{T_\delta}{T_c}. \quad (8)$$

Максимум функции (6) или максимум градиента в показаниях датчика, установленного в ЭГМС, рассчитывается по формуле (6) с подстановкой  $t = t^{(\max)}$  и имеет вид

$$R_{cd} = (dU_o(t)/dt)_{\max} = X_0 k_{cd} \frac{1}{T_c} \frac{1}{1 - \bar{T}_o} \left( e^{-\frac{\bar{T}_o}{1 - \bar{T}_o} \ln \bar{T}_o} - e^{-\frac{1}{1 - \bar{T}_o} \ln \bar{T}_o} \right), \quad (9)$$

где  $\bar{T}_o = T_o/T_c$  – относительная постоянная времени датчика.

Определение динамической погрешности измерения параметра, связанной с недостаточным быстродействием датчика, будем осуществлять по  $R_c$  и  $R_{cd}$  в одинаковой их размерности. Поэтому в формуле (9) примем  $k_{cd} = k_c$ . Максимальную динамическую погрешность  $\Delta_m$  измерения параметра в ЭГМС будем рассчитывать как относительную разность максимальных градиентов изменения параметра в самой системе и по показаниям датчика:

$$\Delta_m = \frac{R_c - R_{cd}}{R_c} 100 \% = \left( 1 - \frac{R_{cd}}{R_c} \right) 100 \%. \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) выражения (3) для  $R_c$  и (6) для  $R_{cd}$  с учётом  $k_{cd} = k_c$  и преобразования, получим формулу для расчёта динамической погрешности измерения параметра ЭГМС:

$$\Delta_m = \left[ 1 - \frac{1}{1 - \bar{T}_o} \left( e^{-\frac{\bar{T}_o}{1 - \bar{T}_o} \ln \bar{T}_o} - e^{-\frac{1}{1 - \bar{T}_o} \ln \bar{T}_o} \right) \right] 100 \%. \quad (11)$$

В результате расчёта по формуле (11) построена графическая зависимость динамической погрешности измерения параметра  $\Delta_m$  в ЭГМС от относительной постоянной времени датчика  $\bar{T}_o$  (рис. 1).

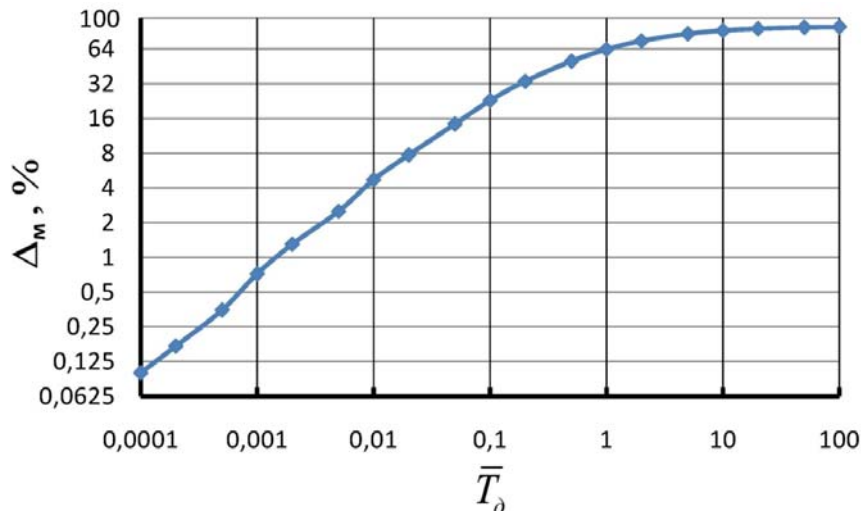


Рис. 1. Зависимость динамической погрешности измерения параметра ЭГМС от относительной постоянной времени (или быстродействия) датчика

Из рис. 1 следует, что чем больше относительная постоянная времени датчика, тем выше динамическая погрешность измерения параметра ЭГМС. Представленный график справедлив для любого типа датчиков и систем и имеет важное значение при выборе их быстродействия, если известен градиент изменения по времени параметра в ЭГМС.

Так, динамическая погрешность измерения температуры датчиком, например термопарой, с постоянной времени  $T_\delta = 0,5 \text{ с}$  при измерении температуры в ЭГМС с динамикой, соответствующей постоянной времени  $T_c = 20 \text{ с}$ , будет соответствовать относительной постоянной времени датчика  $\bar{T}_\delta = T_\delta / T_c = 0,5 / 20 = 0,025$  и, в соответствии с графиком на рис. 1 или по формуле (11), будет равна  $\Delta_m = 9 \%$ . Используя график, можно определить, например, требуемую постоянную времени датчика давления для измерения в ЭГМС с постоянной времени  $T_c = 1 \text{ с}$  при допустимой динамической погрешности в 5%. Для этого находим из графика величину  $\bar{T}_\delta \leq 0,01$ , соответствующую  $\Delta_m = 5 \%$ , и затем определяем требуемую постоянную времени датчика:  $T_\delta \leq \bar{T}_\delta T_c = 0,01 \text{ с}$ .

График на рис. 1 представлен для изменения  $\bar{T}_\delta$  в широком диапазоне. Поэтому, используя этот график, можно определить требуемую постоянную времени датчика, когда решается задача по демпфированию колебательных процессов на его входе. Пусть, например, требуется определить среднее значение параметра при измерении давления манометром. При определении постоянной времени манометра с демпфером на его входе, установленными в ЭГМС с постоянной времени 0,5 с, для подавления колебательного процесса в показаниях манометра с эффективностью 90% необходимо, чтобы относительная постоянная времени манометра с демпфером, в соответствии с графиком, была больше величины  $\bar{T}_\delta = T_\delta / T_c \geq 100$ . Тогда постоянная времени манометра с демпфером должна быть более  $T_\delta = \bar{T}_\delta T_c = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ с}$ . Если известна приведённая акустическая ёмкость полости манометра  $C_m$ , то требуемое гидравлическое сопротивление демпфера  $R_m$  на входе в манометр определится из равенства  $T_\delta = R_\delta C_m$ , то есть  $R_\delta = T_\delta / C_m$ .

### **Исследование динамической погрешности измерения параметров в энергообеспечивающей гидравлической системе вертолёта МИ-8**

В качестве примера решения поставленной задачи рассмотрим энергообеспечивающую гидравлическую систему (ГС) вертолёта МИ-8 (рис. 2).

Функционирование системы осуществляется следующим образом. Рабочая жидкость самотёком поступает из бака 3 в насос 2, который нагнетает её в систему. Далее жидкость через фильтр 6 поступает в автомат разгрузки 7. Фильтр 6 снабжён перепускным клапаном 5, срабатывающим при повышении перепада давления на нём. В состав автомата разгрузки входят обратный клапан 9, предохранительный клапан непрямого действия 8, командная 19, промежуточная 20 и исполнительная 21 золотниковые пары. Автомат разгрузки 7 необходим для обеспечения холостого режима работы насоса 2 при повышении давления в линии за ним выше настроечного давления, определяемого затяжкой пружины командной золотниковой пары 19. За автоматом разгрузки установлены два пневмогидравлических аккумулятора 10 и 17, которые устраняют пульсации давления жидкости в системе. Далее жидкость через фильтр 11 поступает на вход гидроусилителя 12.

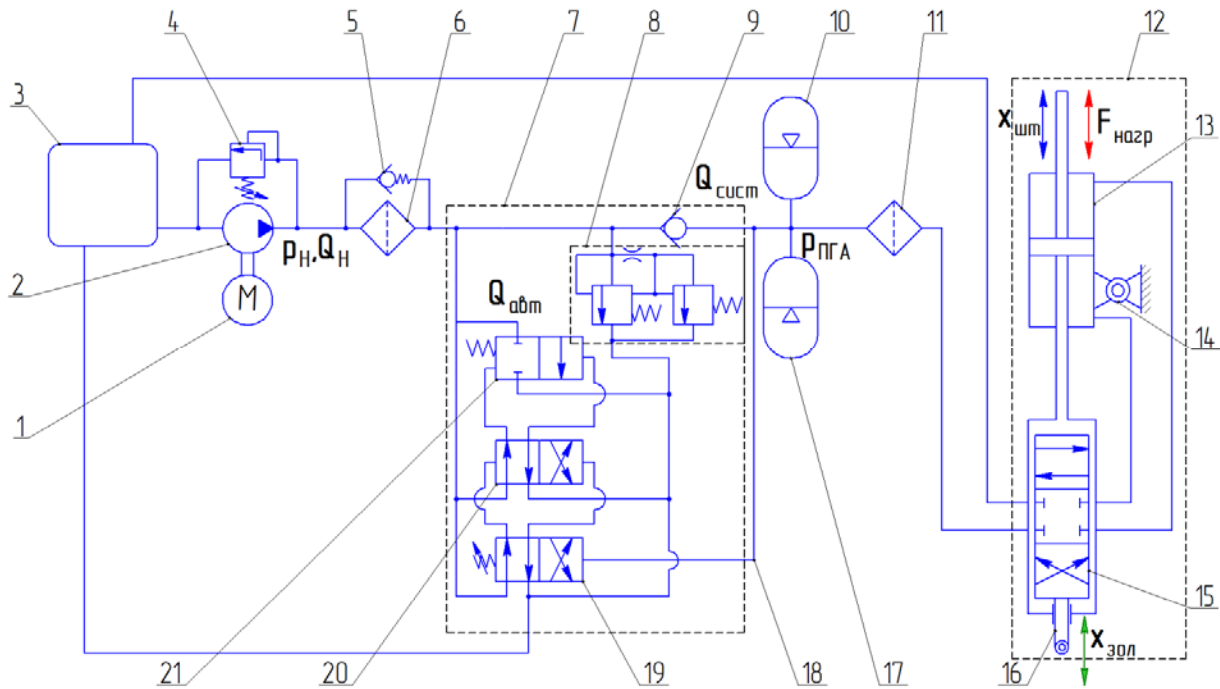


Рис. 2. Принципиальная схема энергообеспечивающей гидравлической системы вертолёта Ми-8: 1 – привод; 2 – насос; 3 – бак; 4 – предохранительный клапан прямого действия; 5 – перепускной клапан; 6, 11 – фильтр; 7 – автомат разгрузки насоса; 8 – предохранительный клапан непрямого действия; 9 – обратный клапан; 10, 17 – пневмогидравлический аккумулятор (ПГА); 12 – гидроусилитель (ГУ); 13 – гидроцилиндр гидроусилителя; 14 – опора; 15 – золотник гидроусилителя; 16 – механический толкатель; 18 – линия подвода давления от ПГА; 19 – командный золотник; 20 – промежуточный золотник; 21 – исполнительный золотник

В состав автомата разгрузки шестерённого насоса включены три золотниковые пары, функционирование которых обеспечивает поддержание давления в системе в установленном диапазоне, определяемом настройкой пружины командного золотника. При срабатывании автомата разгрузки и соединении насосной станции напрямую со сливом через исполнительную золотниковую пару питание гидроусилителя происходит от пневмогидравлических аккумуляторов.

Гидроусилитель 12 представляет собой следящее устройство, обеспечивающее снижение нагрузки на орган управления, подключаемый к распределительному золотнику ручного управления 15. Слив из гидроусилителя осуществляется через трубопроводы в бак. Шток цилиндра гидроусилителя преодолевает усилия, связанные с действием подъёмной силы винта вертолёта. В качестве имитатора действия данной нагрузки в натуральных и виртуальных испытаниях в качестве базового элемента может быть использована пружина с жёсткостью, обеспечивающей требуемые усилия на штоке при его движении. Для имитации более сложных зависимостей нагрузки от положения и скорости штока может использоваться пневмоуправляемый цилиндр.

Для исследования динамических процессов в гидравлической системе разработана её имитационная модель в программе SimulationX (рис. 3).

Разработанная модель учитывает пружинно-массовые характеристики подвижных элементов автомата разгрузки и гидроусилителя (их динамику), а также влияние внутренних каналов и полостей в указанных устройствах на динамические процессы в системе.

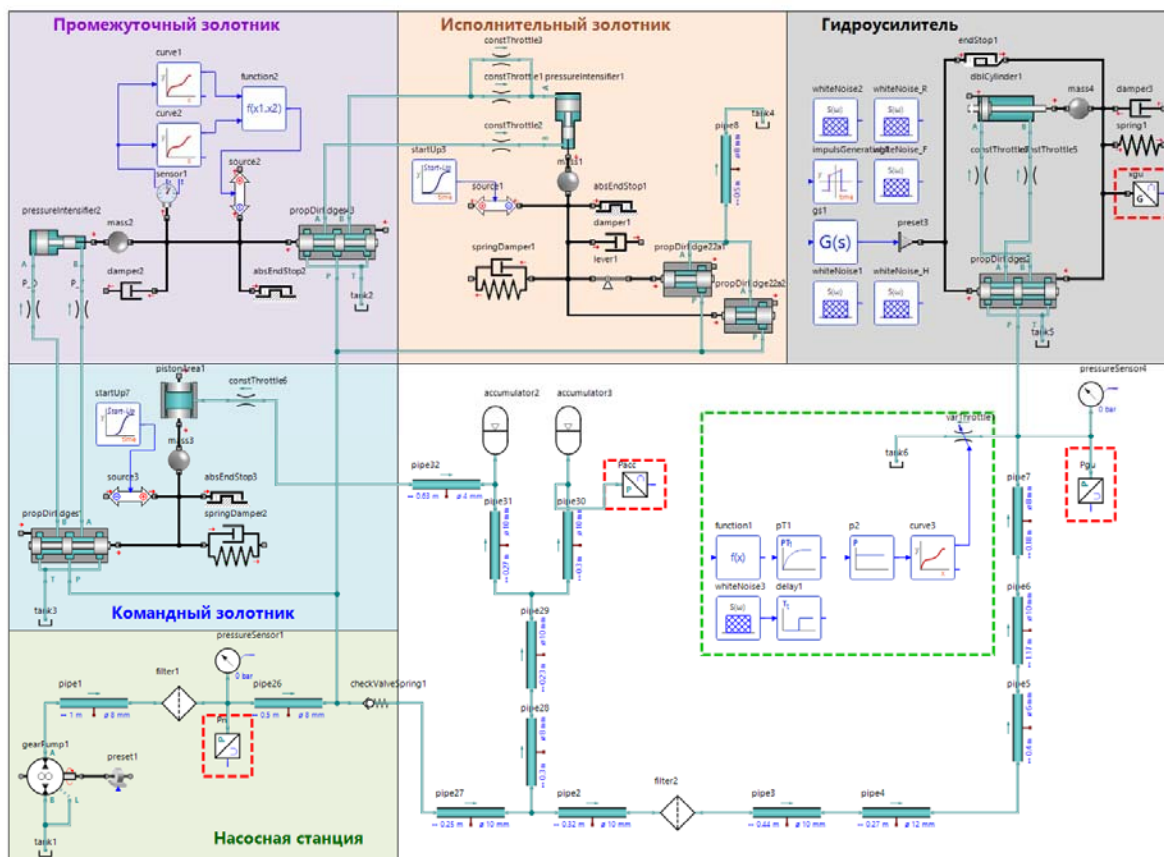


Рис. 3. Внешний вид имитационной модели гидравлической системы управления вертолёт Ми-8 в программе SimulationX

Известны и другие имитационные модели рассматриваемой ГС, разработанные авторами в программном пакете Matlab/Simscapе. Сравнительный анализ SimulationX и Matlab/Simscapе в отношении многообразия моделей элементов библиотек гидравлики, пневматики, механики и электрики, а также гибкости их настройки позволяет отдать предпочтение первой программе. Наличие библиотеки для моделирования и анализа неисправностей систем в SimulationX (SRA) позволяет рассматривать данную программу в качестве основной в дальнейших исследованиях задач надёжности и диагностики.

На рис. 4 – 6 приведены результаты расчёта, полученные при перемещении золотника ГУ. Сигнал управляющего воздействия представляет собой ступенчатое изменение положений золотника с шагом 10 с по случайному закону с нормальным распределением в диапазоне значений от 10 до 60 мм (рис. 4). При этом постоянная времени перехода с одного значения на другое задаётся также по случайному закону с нормальным распределением в диапазоне значений от 0,3 до 0,8 с.

В качестве нагрузки используется пружина с жёсткостью 214286 Н/м, обеспечивающая при полном выдвигении штока ГУ усилие 15 кН.



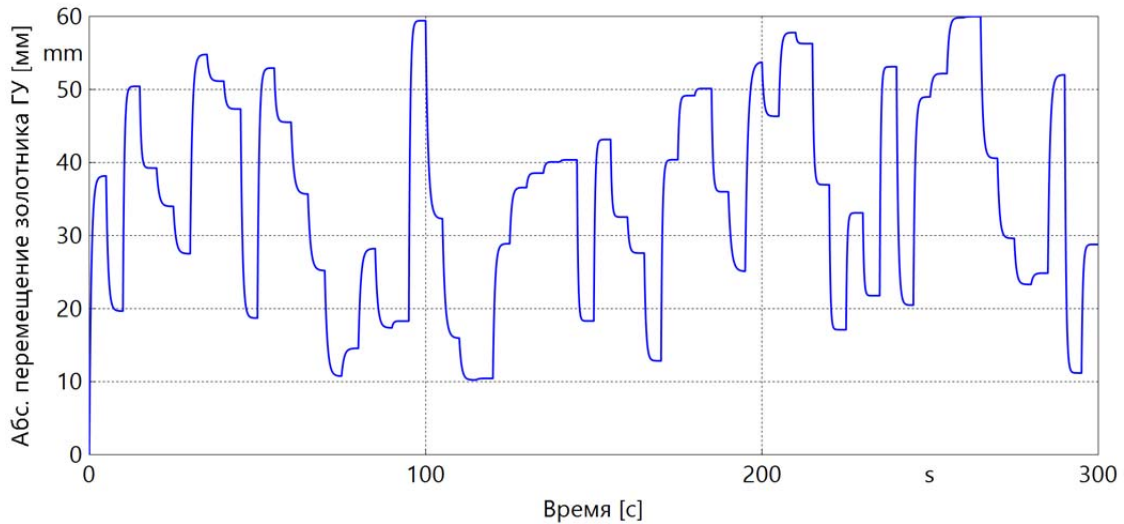


Рис. 4. Управляющее воздействие на золотник ГУ

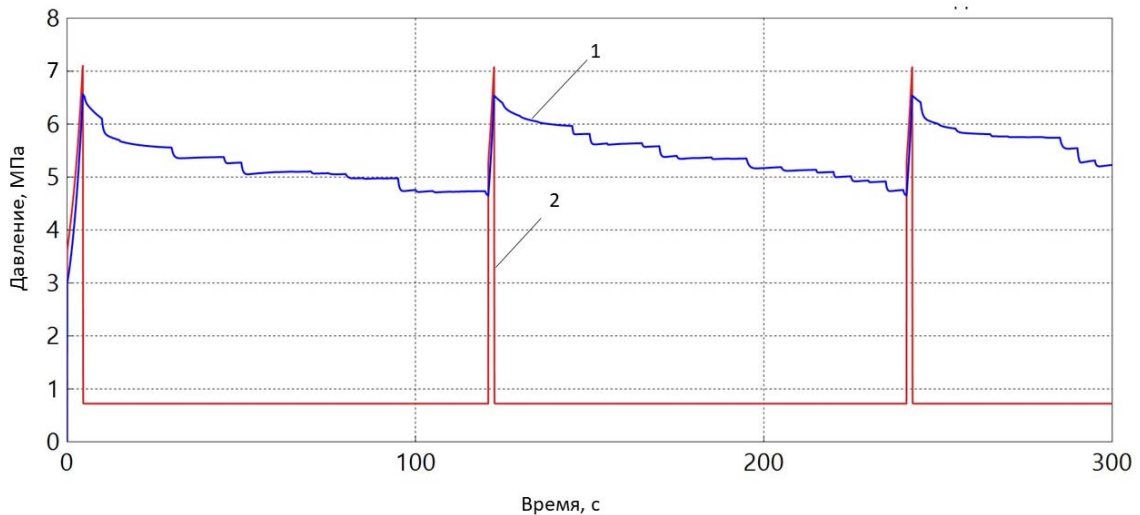


Рис. 5. Изменение давления рабочей жидкости в гидравлической системе с автоматом разгрузки при управляющем воздействии на золотник ГУ:  
1 – в линии ПГА; 2 – на выходе из насоса

На рис. 5 можно отметить ступенчатое падение давления в линии ПГА, что обусловлено изменением скорости движения золотника и штока ГУ.

Характерной особенностью протекающих процессов в рассматриваемой системе является «динамичность» их изменения. Например, при срабатывании автомата разгрузки (соединении напорной линии насоса со сливной) происходит резкое падение давления в напорной линии и, наоборот, резкое возрастание давления при отключении автомата разгрузки. В связи с этим возникает необходимость в правильном подходе при выборе измерительной аппаратуры, в частности датчиков для измерения основных параметров системы (давления, расхода, перемещения, температуры).

Полученные выше результаты расчёта представляют собой «идеальные» характеристики с точки зрения передачи информации к потребителю. На рис. 6 представлен увеличенный фрагмент переходного процесса возрастания и падения давления в напорной гидролинии в результате срабатываний автомата разгрузки.

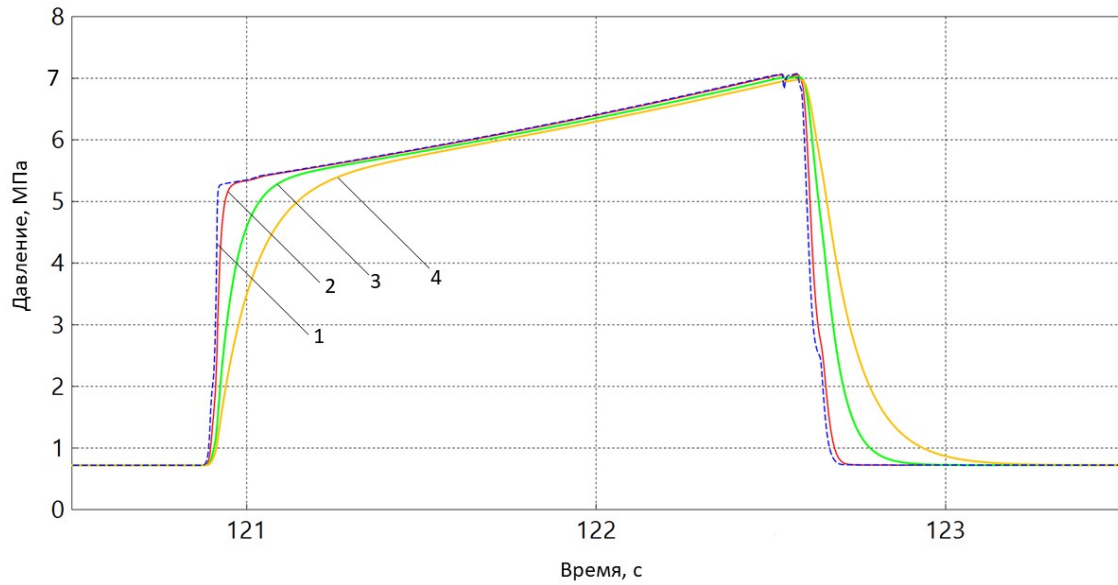


Рис. 6. Влияние постоянной времени датчика на измеренные значения давления рабочей жидкости в гидравлической системе с автоматом разгрузки при управляющем воздействии на золотник ГУ:  
 1 – без датчика; 2 – с датчиком, обладающим постоянной времени  $T_0 = 0,01$  с;  
 3 – с датчиком, обладающим постоянной времени  $T_0 = 0,05$  с;  
 4 – с датчиком, обладающим постоянной времени  $T_0 = 0,1$  с

На рис. 7 приведено сравнение градиентов сигналов давления, полученных с учётом датчика (постоянная датчика равна 0,01 с, соответствует кривой 2 на рис. 6) и для идеального случая (без учёта датчика).

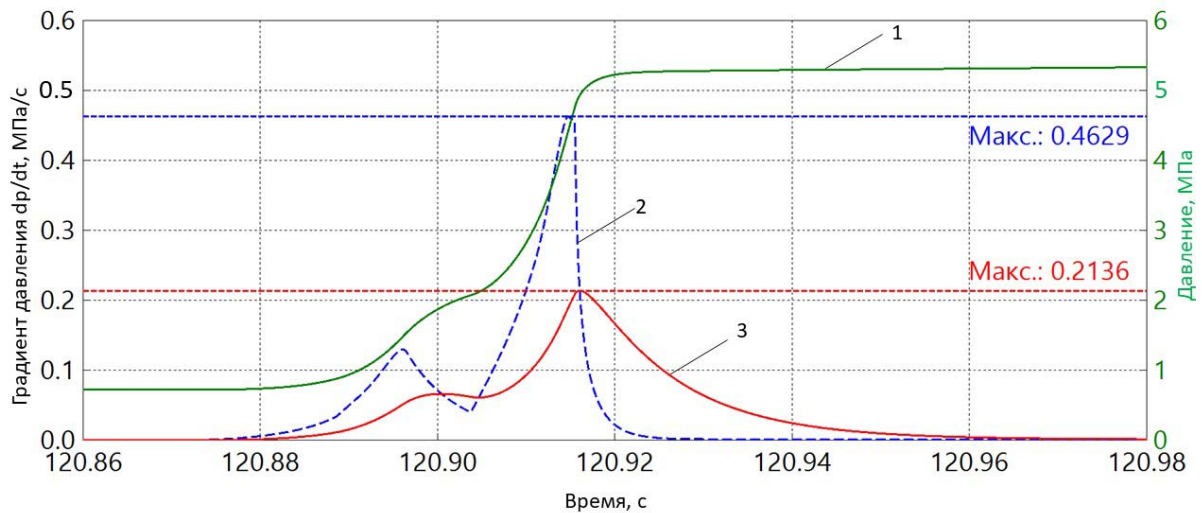


Рис. 7. Градиенты давлений без учёта датчика и с учётом датчика (с постоянной времени 10 мс):  
 1 – давление без учёта датчика; 2 – градиент давления без учёта датчика;  
 3 – градиент давления с учётом датчика ( $T = 10$  мс)

Постоянная переходного процесса изменения давления (кривая 1 на рис. 7) составляет 17 мс. В результате относительная постоянная времени датчика будет равна  $\bar{T}_d = T_d/T_c = 0,010/0,017 \approx 0,59$ . При этом динамическая погрешность, рассчитанная для полученных результатов согласно выражению (10), составляет:  $\Delta_m = (0,463 - 0,214)/0,463 \cdot 100\% = 54\%$ .

Таким образом, при относительной постоянной времени датчика 0,59 динамическая погрешность измерения давления составит 54 %. Полученный результат коррелирует с графической зависимостью на рис. 1, построенной в результате теоретических исследований, что подтверждает корректность разработанной методики.

Такая большая динамическая погрешность измерения, конечно, неприемлема для системы диагностирования, так как она приведёт к большой ошибке при диагностировании ЭГМС на основе методов машинного обучения по динамическим параметрам. Из приведённого на рис. 1 графика можно определить требуемое быстродействие датчика или постоянную его времени. Например, если задать динамическую погрешность измерения давления не более 5%, то относительная постоянная времени датчика будет равна  $\bar{T}_d = 0,01$  и при постоянной времени ЭГМС  $T_c = 17$  мс постоянная времени датчика давления должна быть не более  $T_d = 0,17$  мс.

### Заключение

По изложенной методике можно рассчитать в первом приближении динамическую погрешность измерения любого параметра, если известна постоянная времени датчика и максимальный градиент изменения параметра в системе. Путём обратного пересчёта можно определить требуемое быстродействие датчика, если задана допустимая погрешность измерения параметра и динамика процессов в системе. Расчётами энергообеспечивающей гидравлической системы вертолёта Ми-8 подтверждено соответствие динамической погрешности теоретической зависимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства экономического развития и инвестиций Самарской области в рамках подпрограммы «Развитие инновационного территориального аэрокосмического кластера Самарской области» на 2015 – 2030 годы государственной программы Самарской области «Создание благоприятных условий для инвестиционной и инновационной деятельности в Самарской области» на 2014 – 2030 годы (Договор № 62-2 от 10 сентября 2019 года).

### Библиографический список

1. Гориш А.В., Дмитриенко А.Г., Пивкин А.Г. Проблемы создания датчиковой аппаратуры для измерения, контроля, управления и диагностики физических параметров // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». 2013. Т. 2. С. 48-53.
2. Абраменко Т.В., Гориш А.В., Кириллов А.Б. Общие принципы конструирования датчиковой аппаратуры для измерения различных физических параметров // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». 2002. Т. 1. С. 202-204.
3. Yurasova E.V., Bizyaev M.N., Volosnikov A.S. General approaches to dynamic measurements error correction based on the sensor model // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16, № 1. С. 64-80. DOI: 10.14529/ctcr160106

4. Кузнецов Ф.И. Минимизация динамических погрешностей в датчиковых системах мониторинга и управления в реальном масштабе времени // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 4 (153). С. 63-69.

5. Ляшенко А.В. Информационно-измерительная система контроля частоты вращения ротора турбоагрегата стартового двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 1 (15). С. 37-42.

6. Liansheng L., Datong L., Zhang Y., Peng Y. Effective sensor selection and data anomaly detection for condition monitoring of aircraft engines // Sensors. 2016. V. 16, Iss. 5. DOI: 10.3390/s16050623

7. Yang S., Qiu J., Liu G. Sensor optimization selection model based on testability constraint // Chinese Journal of Aeronautics. 2012. V. 25, Iss. 2. P. 262-268. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60386-5

8. Cheng S., Azarian M.H., Pecht M.G. Sensor systems for prognostics and health management // Sensors. 2010. V. 10, Iss. 6. P. 5774-5797. DOI: 10.3390/s100605774

9. Guan F., Cui W.-W., Li L.-F., Wu J. A comprehensive evaluation method of sensor selection for PHM based on grey clustering // Sensors. 2020. V. 20, Iss. 6. DOI: 10.3390/s20061710

10. Jung D., Dong Y., Frisk E., Krysander M., Biswas G. Sensor selection for fault diagnosis in uncertain systems // International Journal of Control. 2020. V. 93, Iss. 3. P. 629-639. DOI: 10.1080/00207179.2018.1484171

11. Nesci A., De Martin A., Jacazio G., Sorli M. Detection and prognosis of propagating faults in flight control actuators for helicopters // Aerospace. 2020. V. 7, Iss. 3. DOI: 10.3390/aerospace7030020

12. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 312 с.

13. Андрушин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Управление и инноватика в теплоэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 392 с.

### **CALCULATING THE DYNAMIC ERROR IN MEASUREMENT OF ELECTROHYDROMECHANICAL SYSTEM PARAMETERS, TAKING INTO ACCOUNT THE OPERATING SPEED OF SENSORS**

© 2020

- A. M. Gareyev** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Maintenance;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru)
- A. G. Gimadiev** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic System;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru)
- D. M. Stadnik** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Plant Automatic System;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[sdm-63@bk.ru](mailto:sdm-63@bk.ru)
- I. A. Popelnyuk** Assistant Lecturer of the Department of Aircraft Maintenance;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[iap@ssau.ru](mailto:iap@ssau.ru)

It is necessary to ensure appropriate information content of the measuring instruments used for intelligent diagnosing systems of energy and technological complexes based on the measurement of dynamic parameters. Sensors and measuring equipment should possess sufficient accuracy, reliability, speed and consistency of performance. Types of sensors for measuring dynamic parameters are selected depending on the system's structure. They can be, for example, sensors for the

electrohydraulic systems of these complexes, pressure sensors, as well as sensors of flow and temperature of the working media, displacement of moving elements and vibration of the base members. The type of sensor intended for use in the diagnostic system is largely determined by the dynamics of the processes taking place in it. It is necessary that the sensors satisfy their performance requirements. If the sensors have lower speed than is necessary for the process dynamics in the electrohydraulic system, it can lead to dynamic measurement error and an error in the diagnostics of technical condition. In technical literature, the requirement for the sensor speed is indicated by the fact that it should be an order of magnitude higher than the dynamics of the processes occurring in the system. This approach is not acceptable for choosing the type of sensors for diagnostic systems, taking into account the process dynamics. Firstly, sensors for measuring with this required parameter may not be available. Secondly, even if there is a sensor with a parameter close in speed to the dynamics of the system processes, it is necessary to know in advance what dynamic error it can lead to and how it will affect the accuracy of the diagnostic system. An analytically generalized dependence of the dynamic measurement error of electrohydraulic system parameters on the relative sensor speed is obtained in this paper. This dependence allows you to choose a sensor with a dynamic error that does not exceed a given value. The calculation of the dynamic measurement error is shown using the MI-8 helicopter hydraulic system as an example.

*Electrohydraulic systems; diagnostics; parameter measurement; dynamic error; sensor speed; calculation of measurement error.*

*Citation:* Gareyev A.M., Gimadiev A.G., Stadnik D.M., Popelnyuk I.A. Calculating the dynamic error in measurement of electrohydraulic system parameters, taking into account the operating speed of sensors. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 2. P. 85-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-85-98

## References

1. Gorish A.V., Dmitrienko A.G., Pivkin A.G. Problems of creating sensor equipment for measuring, monitoring, controlling and diagnosing physical parameters. *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2013. V. 2. P. 48-53. (In Russ.)
2. Abramenko T.V., Gorish A.V., Kirilov A.B. General principles for the construction of sensor equipment for measuring various physical parameters. *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2002. V. 1. P. 202-204. (In Russ.)
3. Yurasova E.V., Bizyaev M.N., Volosnikov A.S. General approaches to dynamic measurements error correction based on the sensor model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2016. V. 16, no. 1. P. 64-80. (In Russ.). DOI: 10.14529/ctcr160106
4. Kuznetsov F.I. Minimising dynamic errors in the sensor systems of monitoring and control in real time. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014. No. 4 (153). P. 63-69. (In Russ.)
5. Lyashenko A.V. Information-measuring system for rotor speed of rotation control of turbo generator booster engine. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2016. No. 1 (15). P. 37-42. (In Russ.)
6. Liansheng L., Datong L., Zhang Y., Peng Y. Effective sensor selection and data anomaly detection for condition monitoring of aircraft engines. *Sensors*. 2016. V. 16, Iss. 5. DOI: 10.3390/s16050623
7. Yang S., Qiu J., Liu G. Sensor optimization selection model based on testability constraint. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2012. V. 25, Iss. 2. P. 262-268. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60386-5
8. Cheng S., Azarian M.H., Pecht M.G. Sensor systems for prognostics and health management. *Sensors*. 2010. V. 10, Iss. 6. P. 5774-5797. DOI: 10.3390/s100605774
9. Guan F., Cui W.-W., Li L.-F., Wu J. A comprehensive evaluation method of sensor selection for PHM based on grey clustering. *Sensors*. 2020. V. 20, Iss. 6. DOI: 10.3390/s20061710

10. Jung D., Dong Y., Frisk E., Krysander M., Biswas G. Sensor selection for fault diagnosis in uncertain systems. *International Journal of Control*. 2020. V. 93, Iss. 3. P. 629-639. DOI: 10.1080/00207179.2018.1484171

11. Nesci A., De Martin A., Jacazio G., Sorli M. Detection and prognosis of propagating faults in flight control actuators for helicopters. *Aerospace*. 2020. V. 7, Iss. 3. DOI: 10.3390/aerospace7030020

12. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy* [Theory of automatic control. V. 1. Linear systems]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2016. 312 p.

13. Andryushin A.V., Sabanin V.R., Smirnov N.I. *Upravlenie i innovatika v teploenergetike* [Control and innovation in heat power engineering]. Moscow: Izdatel'skiy Dom MEI Publ., 2011. 392 p.