

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

М. А. Фролов

Современное развитие специальной техники, к которой относят ракетно-космическую технику (РКТ), вооружение и военную технику, авиацию, двигателестроение, изделия для атомной энергетики и т.п., во многом зависит от технического уровня информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), качество и технико-экономические показатели которых определяются использованной в них датчиково-преобразующей аппаратурой (ДПА). В специальной технике ДПА эксплуатируется при воздействии большого количества дестабилизирующих факторов: ударов, вибраций, линейных ускорений, акустического шума, широкого диапазона воздействующих температур. При создании сложных комплексов в настоящее время широко используются датчики давления. Они применяются во многих ИИУС специальной техники.

Особенностью структурного построения ИИУС двигательных установок РКТ является их разделение на: измерительную, вычислительную и исполнительную части. Измерительная часть включает в себя параметрические датчики, средства неразрушающего контроля, многофункциональные измерительные модули (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема ИИУС двигательной установки

Вычислительная часть выполняет функции: архивирование результатов мониторинга, визуализация и обработка информации, выделение превышения параметров за установленные значения и выдачу аварийных сигналов, на основе которых могут вырабатываться решения дальнейшей работы двигательных установок с продлением ресурса, прекращение работы или ремонт. Исполнительная часть включает в себя двигательные установки и различные механизмы для предотвращения аварийных ситуаций и сигнальную аппаратуру. Также ИИУС содержит надежные средства связи, включая оптические, беспроводные с использованием ГЛОНАСС, с центральными пунктами управления и структурами верхнего уровня мониторинга. Наиболее ответственным

элементом ИИУС является измерительная часть, отвечающая за надежность и точность измеряемых системой показателей.

Используемые в измерительной части параметрические датчики – емкостные датчики давления (ЕДД) – выполняют следующие основные функциональные задачи:

- преобразование входного сигнала в сигнал требуемого вида с воспроизводимой функциональной связью между ними;
- преобразование полученного сигнала в форму, обеспечивающую помехозащищенную передачу к устройству обработки данных по каналу связи;
- избирательную регистрацию и предварительную обработку выходного сигнала;
- подавление существенных для решения данной задачи помех (возмущающих воздействий);
- реагирование на изменяющиеся условия в точках контроля;
- обеспечение и контроль собственного функционирования.

Согласно требованиям, предъявляемым к ИИУС двигательной установки, параметрические датчики давления с цифровым выходом должны обеспечивать формирование и передачу параметров измеряемого давления в виде цифрового последовательного кода по интерфейсу 1-Wire с основной и дополнительной погрешностями измерения абсолютного давления в широком диапазоне (0–34,3 МПа), не превышающими $\pm 0,15$ и $\pm 1,5$ % соответственно. ЕДД для ИИУС двигательной установки изделий РКТ должны отличаться повышенной надежностью с вероятностью безотказной работы (ВБР) в условиях воздействия внешних факторов не менее 0,995 в течение 10 лет (87 600 ч) в нормальных климатических условиях.

С целью повышения надежности ИИУС двигательной установки, а именно, ее измерительной части, был разработан по средствам математического и имитационного моделирования [1–4] и изготовлен на базе ОАО «НИИФИ» опытный образец ЕДД (рис. 2) с автоматизированной функцией управления процессами измерений и обработки информации по средствам разработанного программного обеспечения, в частности: 1) переключение режимов работы – для обеспечения возможности снятия градуировочной характеристики датчика и для настройки измерительного канала предусмотрен режим конфигурирования, посредством которого на компьютер передаются значения сигналов с АЦП датчика, датчика температуры и другие промежуточные результаты преобразования, необходимые для настройки градуировочной характеристики ЕДД, осуществляется запись данных в датчик для линеаризации градуировочной характеристики и температурной компенсации через ПК в цифровом виде по интерфейсу 1-Wire и предусмотрен штатный режим работы, обеспечивающий выдачу скомпенсированного кода по интерфейсу 1-Wire; 2) запоминание данных – запись градуировочной характеристики, значения температурных уходов датчика и кодов температур осуществляется в энергонезависимое Flash-ПЗУ датчика на этапе настройки и используется каждый раз микроконтроллером при работе для линеаризации и температурной компенсации выходной характеристики датчика; 3) извлечение данных из памяти – градуировочная характеристика, значения температурных уходов датчика, коды температур и коэффициенты функции влияния градуировочной характеристики, хранятся в Flash-ПЗУ микроконтроллера, кроме того, осуществляется извлечение адреса из ПЗУ, выполненного в виде отдельной микросхемы; 4) считывание и выдача коэффициентов функции влияния градуировочной характеристики осуществляются по внешней команде от потребителя.

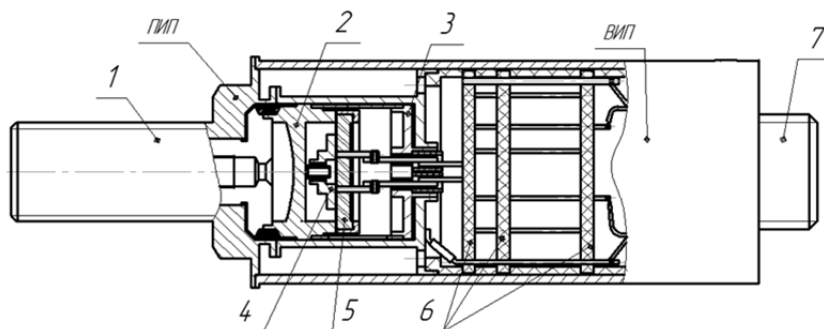


Рис. 2. Емкостный датчик давления: 1 – штуцер; 2 – мембрана; 3 – гермопереходник; 4 – подвижная обкладка конденсатора; 5 – неподвижная обкладка конденсатора; 6 – платы; 7 – вилка; ПИП – первичный измерительный преобразователь; ВИП – вторичный измерительный преобразователь

Механическая надежность ЕДД определяется механической прочностью конструкции [5–7], являющейся основной характеристикой, определяющей надежность и обеспечивающей возможность проведения сравнительного анализа вновь разрабатываемых вариантов конструктивного построения датчика и выбор наиболее оптимального варианта конструктивного исполнения.

Механическая прочность ЕДД с цифровым выходом (рис. 3) характеризуется коэффициентом запаса прочности и определяется механической прочностью элементов его конструкции [5]. Для определения требуемых значений механической прочности элементов конструкции по заданному значению вероятности неразрушения датчика целесообразно использовать метод структурно-функционального анализа на основе построения структурно-функциональной схемы.

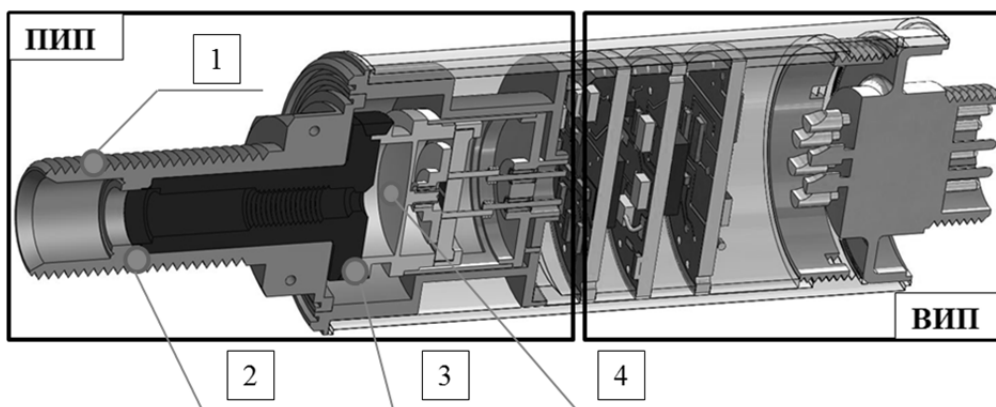


Рис. 3. Общий вид датчика с цифровым выходом: 1 – резьбовое штуцерное соединение датчика с гнездом присоединительного затвора; 2 – сварное соединение гайки с наконечником и штуцером (сварной шов); 3 – сварное соединение мембраны с штуцером (сварной шов); 4 – мембрана

Методика проведения расчета механической надежности заключается в последовательном расчете информационных показателей надежности конструкции:

- 1) проведение структурно-функционального анализа ППП и ВИП ЕДД – функциональное назначение, последствия отказа и условия работоспособности элементов конструкции;
- 2) расчет коэффициентов запаса несущей способности элементов K_i и прочностной расчет элементов конструкции;
- 3) расчет гауссовского уровня надежности каждого элемента γ_i ;
- 4) расчет вероятности неразрушения элементов конструкции P_i ;
- 5) расчет предела выносливости конструкции при циклическом нагружении $\sigma_{-lg(i)}$;
- 6) расчет предельного коэффициента нагруженности конструкции n_{pf} ;
- 7) расчет вероятности неразрушения элементов конструкции при циклическом нагружении P_i .

Проведя анализ имитационной и математической моделей ЕДД были определены функциональное назначение элементов конструкции 1, 2, 3, 4 (рис. 4) и последствия отказа, виды нагрузок, их предельные значения, условия работоспособности каждого элемента в условиях эксплуатации ИИУС, а также критерии работоспособности датчика после воздействия перегрузок в виде предела прочности сварного шва $[\sigma_{сш}]$, мембраны $[\sigma_m]$, резьбы на срез $[\tau_{ср}]$ и смятие $[\sigma_{см}]$. Основным критерием отказа считалась потеря работоспособности вследствие разгерметизации внутренней полости чувствительного элемента и попадания в нее компонентов контролируемой среды.

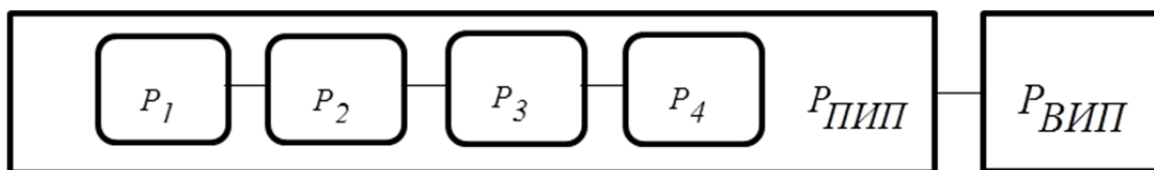


Рис. 4. СФС надежности ЕДД: $P_{ппп}$ – вероятность безотказной работы чувствительного элемента; $P_{вип}$ – вероятность безотказной работы преобразователя «емкость – код»; $P_{1,2,3,4}$ – вероятность безотказной работы 1, 2, 3, 4 элемента соответственно

Для расчета механической надежности ЕДД была составлена структурно-функциональная схема, все элементы которой соединены последовательно, так как отказ (разрушение) любого из элементов 1, 2, 3, 4 приводит к отказу всей измерительной цепи (см. рис. 4).

На основании структурно-функциональной схемы и анализа была сформирована матрица отказов (табл. 1), позволяющая оценивать степень нагруженности и функциональной значимости каждого элемента.

Таблица 1

Матрица отказов ПИП

Элемент датчика	Вид нагрузки		Условие сохранения работоспособности	Коэффициент запаса прочности, K_i	Гауссовский уровень надежности, γ_i	Вероятность неразрушения P_i
	предел измерения, МПа	допустимое давление перегрузки $P_{\max}$, МПа				
1. Резьбовое штуцерное соединение датчика с гнездом присоединительного затвора	Усилие затяжки $Q_{\text{зн}}$,		$\tau_{\text{ср}} < [\tau_{\text{ср}}]$ $\sigma_{\text{см}} < [\sigma_{\text{см}}]$	$K_1 = 7,37$ $K_2 = 4,73$	$\gamma_1 = 5,76$ $\gamma_2 = 5,25$	$P_1 = 1,0$
	34,3	49,4				
	Момент затяжки					
	34,3	40				
2. Сварной шов гайки с наконечником и штуцером	Усилие от $P_{\max}$ $Q_{\text{с.ш.}}$		$\sigma_{\text{сш}} < [\sigma_{\text{сш}}]$	$K_3 = 1394$	$\gamma_2 = 6,66$	$P_2 = 1,0$
	34,3	45,2				
3. Сварной шов мембраны с штуцером	Усилие от $P_{\max}$ $Q_{\text{с.ш.}}$, МПа		$\sigma_{\text{сш}} < [\sigma_{\text{сш}}]$	$K_4 = 757$	$\gamma_3 = 6,65$	$P_3 = 1,0$
	34,3	120,6				
4. Мембрана	Усилие от $P_{\max}$ $Q_{\text{с.ш.}}$, МПа		$\sigma_{\text{м}} < [\sigma_{\text{м}}]$	$K_5 = 4,27$	$\gamma_4 = 5,1$	$P_4 = 1,0$
	34,3	40				

На основании прочностных расчетов элементов датчика были получены коэффициенты запаса несущей способности элементов конструкции, по значениям которых определены значения гауссовского уровня надежности каждого элемента γ_i по формуле [8, 9] $\gamma_i = (K_i - 1)/K_i \cdot V_R$, где K_i – коэффициент запаса прочности элементов конструкции ЕДД 1, 2, 3, 4; V_R – коэффициент вариации ($V_R = 0,15$).

Для каждого значения γ_i были найдены соответствующие значения нормированной функции Лапласа $\Phi_0(\gamma_i)$, определены значения вероятностей неразрушения P_i элементов конструкции 1, 2, 3, 4 по формуле $P_i = 0,5 + \Phi_0(\gamma_i)$, при $\gamma_i > 5$, P_i принимается равным 1. Определение вероятности неразрушения ПИП ЕДД за время непрерывной работы определялось по формуле [8, 9]:

$$P_{\text{ПИП}}(t_{\text{пр}}) = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (1)$$

При циклическом воздействии на ПИП статического давления перегрузки в условиях эксплуатации учитывалось, что происходит снижение предела выносливости 1, 2, 3, 4 элементов датчика, которое определялось [8, 9]:

$$\sigma_{-\lg(i)} = \sigma_{-\lg(i-1)} \cdot \left[1 - \frac{n_i}{N_i} \cdot K \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{-\lg(i-1)}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где $\sigma_{-\lg(i)}$ и $\sigma_{-\lg(i-1)}$ – пределы выносливости поврежденного материала элемента после действия i -й и $(i-1)$ -й ступеней нагружения соответственно; N_i – количество циклов, соответствующее σ_i (i -е значение нагрузок) по кривой усталости поврежденного материала, получившееся после приложения $(i-1)$ ступени нагружения; K – коэффициент чувствительности материала к цикличе-

скому изменению нагрузки (принимается равным 1,8); n_i – количество циклов повторения i -й нагрузки при многократном применении датчика.

При каждом определении $\sigma_{lg(i)}$ было проверено условие неразрушения элемента конструкции под действием нагрузки $\leq \sigma_i$ и условие неразрушения для нагрузок, находящихся в интервале $0,5\sigma_{lg} \leq \sigma_i \leq \sigma_{lg}$, так как нагрузки, значение которых меньше $0,5\sigma_{lg}$, практически не оказывают повреждающего действия [8, 9]:

$$\frac{n_i}{N_i} < 1 \text{ при } \frac{\sigma_i}{\sigma_{lg(i-1)}} > 1; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{W-\theta} \frac{n_i}{N_i} \leq 1, \quad (4)$$

где W – количество нагрузок в период применения ($i = 1, 2, \dots, W$); θ – количество ступеней нагружения, нагрузки которых превышают предел выносливости элемента конструкции ЕДД.

Условия (3) и (4) $n_i \geq N_i$ позволили оценить, при каком количестве циклов повторений i -й нагрузки элемент 1, 2, 3, 4 разрушится.

Для проверки условия неразрушения по предельным коэффициентам нагруженности механической надежности были определены предельный расчетный коэффициент нагруженности n_p в зависимости от выражения [8, 9] $K \cdot N_{сум}/N_0$, коэффициент вариации нагрузки vs (определяемый по графику отношения среднего квадратичного отклонения нагрузки σ_s к математическому ожиданию m_s) и фактический предельный коэффициент нагруженности $n_{pf} = \sigma_{max}/\sigma_{lg(i)}$ (σ_{max} – максимальное значение нагрузок) из условия, что при $n_{pf} \geq n_p$ элемент разрушится.

Определение вероятности неразрушения ВИП ЕДД за время непрерывной работы осуществлялось также на основе матрицы надежности ВИП (составляющейся аналогично табл. 1) по формуле [8, 9]:

$$P_{ВИП}(t_{пр}) = e^{-t_{пр} \cdot K_a \sum_{i=1}^m N_i \lambda_6(\lambda_{6сг}) \prod_{i=1}^n K_i}, \quad (5)$$

где $P(t_{пр})$ – ВБР за время непрерывной работы $t_{пр}$; K_a – коэффициент качества производства аппаратуры; N_i – число изделий i -го типа; m – число типов изделий; $\lambda_{6сг}$ – базовая интенсивность отказов группы ЭРИ; K_i – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов.

Вероятность безотказной работы ЕДД для ИИУС определялась исходя из СФС ЕДД и вырежений (1) и (5) по формуле

$$P(t_{пр}) = P_{ПИП}(t_{пр}) \cdot P_{ВИП}(t_{пр}) = e^{-t_{пр} K_a \sum_{i=1}^m N_i \lambda_6(\lambda_{6сг}) \prod_{i=1}^n K_i} \cdot \prod_{i=1}^n P_i, \quad P = \prod_{Q=1}^e P_Q. \quad (6)$$

Вероятность неразрушения ЕДД при циклическом нагружении подтверждена расчетом на прочность и результатами испытаний. На рис. 5 представлена блок схема алгоритма расчета механической надежности ЕДД ИИУС двигательной установки.

Используя алгоритм расчета надежности, был разработан способ повышения надежности, который позволил обеспечить ВБР ЕДД порядка 0,995 и заключается в изменении (корректировке) на основе полученных результатов ВБР параметров малонадежных элементов конструкции (например, утолщения мембраны, изменения материала элемента, изменения или увеличения области сварного шва, введение температурных отводов в конструкцию элемента) и проверке измененных элементов согласно разработанной методике расчета надежности.

В результате исследований на основании методики и алгоритма расчета механической надежности ЕДД с учетом циклического нагружения был разработан способ повышения надежности, позволивший повысить ВБР ЕДД с цифровым выходом до 0,995. Изготовленная на базе ОАО НИФИИ разработанная конструкция ЕДД внедрена в ИИУС двигательной установки изделий ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина».

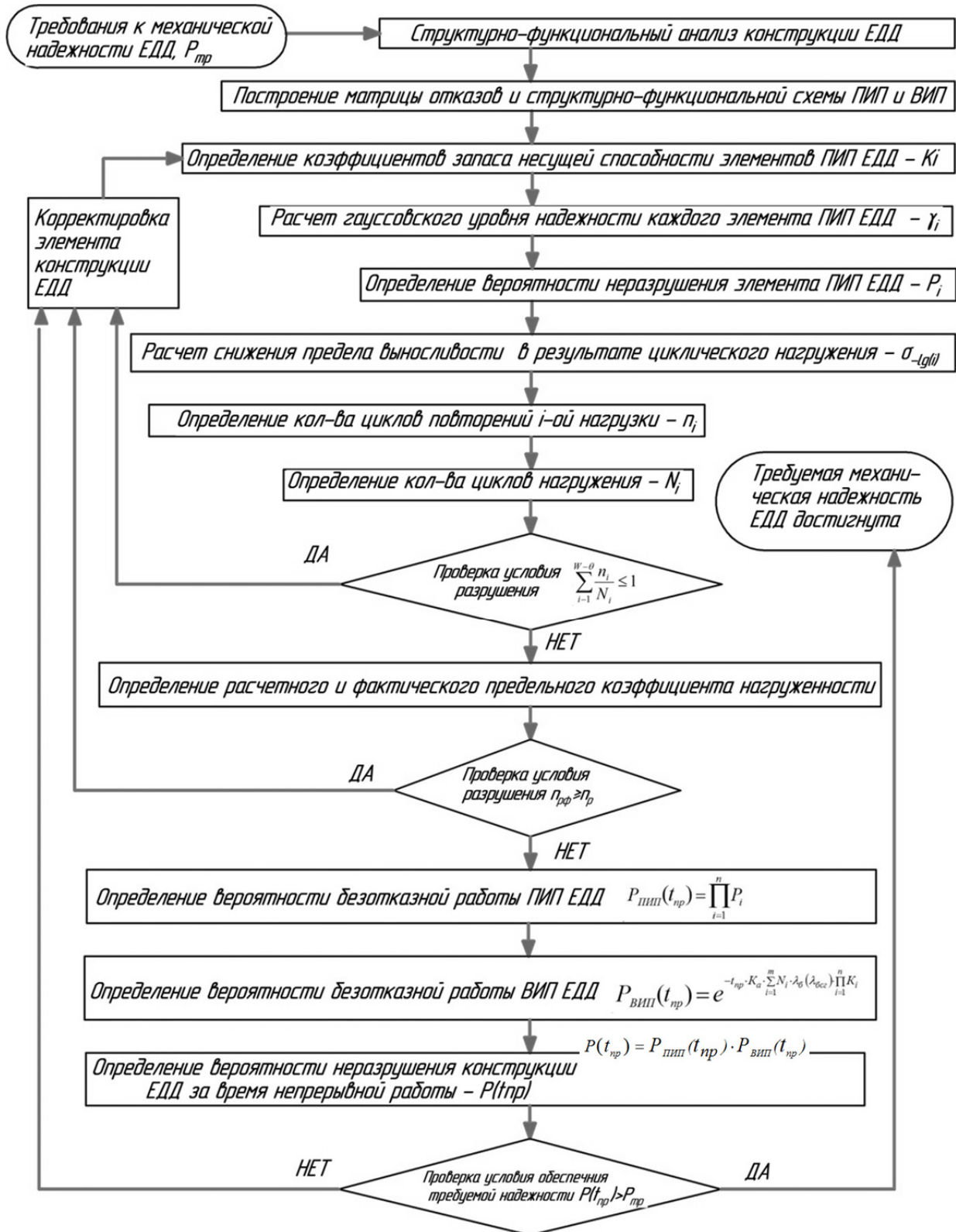


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета механической надежности ЕДД для ИИУС двигательной установки

Разработанная конструкция ЕДД позволила повысить механическую надежность ИИУС двигательной установки в 1,04 раза, снизить массу двигательной установки на 3 кг за счет снижения массы ЕДД с 0,25 кг до 0,1 кг, а также увеличить точность измерения давления за счет снижения основной погрешности измерения до $\pm 0,15\%$ ($\pm 0,5\%$ у аналога) и дополнительной погрешности до $\pm 1,5\%$ ($\pm 2,5\%$ у аналога).

Список литературы

1. Фролов, М. А. Математическая модель емкостного датчика абсолютного давления / М. А. Фролов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – С. 213–216.
2. Фролов, М. А. Расчет чувствительного элемента датчика абсолютного давления методом конечных элементов / М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 32–33.
3. Дивеев, А. И. Синтез оптимального закона управления потоками транспорта в сети автодорог на основе генетического алгоритма / А. И. Дивеев, Н. А. Северцев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 3. – С. 87.
4. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 340.
5. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 196 с.
6. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецов, А. М. Самокутяев // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 268–270.
7. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
8. Пономарев С. П. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. П. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 240 с.
9. Левин, И. Я. Справочник конструктора точных приборов / И. Я. Левин. – М. : Машиностроение, 1967. – 315 с.

Фролов Михаил Алексеевич

аспирант, начальник НИО-303,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
8-8412-56-10-53, 8-927-647-9723
E-mail: frolov10061987@gmail.com

Аннотация. Представлены методика и алгоритм расчета механической надежности емкостного датчика давления для информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки. Полученные результаты позволили обеспечить заявленные метрологические характеристики и повысить надежность емкостного датчика давления информационно-измерительной управляющей системы.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, емкостной датчик давления, двигательная установка, надежность, вероятность безотказной работы, методика, алгоритм.

Frolov Mikhail Alekseevich

postgraduate student,
head of scientific research laboratory,
Research Institute of Physical Measurement
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Abstract. The technique and algorithm of calculation of mechanical reliability of capacitive pressure capacitor sensors for information measurement control system of propulsion system are shown. The results has allowed to provide the declared metrological characteristics and to increase reliability of developed capacitive pressure sensors of information measurement control system.

Key words: information measurement control system, capacitive pressure sensors, propulsion system, reliability, probability of non-failure operation, technique, algorithm.

УДК 681.518.3.019.3

Фролов, М. А.

Повышение надежности информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки / М. А. Фролов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 47–53.