

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В АНАЛИТИЧЕСКОМ ВИДЕ

© 2011 М. А. Ковалёв, Г. В. Бородкин, И. И. Хабло.

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Для представления диагностической модели гидравлической системы летательного аппарата предложено использовать матрицы её состава и структуры. Представлен один из возможных алгоритмов работы программы для ЭВМ по составлению диагностической модели.

*Диагностика, гидравлическая система, аналитическая модель, регулярная конфигурация, алгоритм.*

Гидравлические системы (ГС) современных летательных аппаратов (ЛА) – это сложные динамические системы, мощность которых достигает сотен и тысяч киловатт. Обеспечивая энергией до 35 функциональных подсистем управления, они включают в себя до 1000 агрегатов [1]. Отказы многих из функциональных подсистем могут создать предпосылки к катастрофам и авариям. Это определяет высокие требования, предъявляемые к надёжности ГС ЛА.

Одним из основных направлений повышения надёжности функционирования ГС является непрерывный контроль их технического состояния в процессе эксплуатации. Важнейшим этапом построения программы контроля ГС является разработка её диагностической модели, которая представляет собой формальное описание ГС и отражает основные изменения, происходящие в объекте диагностирования.

В качестве диагностических моделей ГС наиболее предпочтительно использовать аналитические модели, которые позволяют рассчитать значения диагностических признаков в любых точках систем, что даёт возможность строить близкие по точности к оптимальным алгоритмы диагностирования.

Аналитическая модель предполагает построение описания объекта исследования в виде некоторой векторной функции [2]

$$\mathbf{Z} = \psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_{нач}, t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{Z}$  – вектор выходных параметров объекта;  $\mathbf{X}$  – вектор внешних воздействий;  $\mathbf{Y}_{нач}$  – вектор начальных значений внутренних (структурных) параметров объекта,  $t$  – время. Такие модели, как правило, используются для представления отдельных компонентов ГС. Работа большинства гидроагрегатов описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, аналитическое решение которых затруднено. Поэтому на практике модель (1) для рабочего диапазона изменения векторов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}_{нач}$  стремятся либо линеаризовать, либо решить численными методами с применением электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

Решить задачу построения аналитической модели ГС можно в два этапа: 1) построение аналитических моделей всех отдельных компонентов ГС; 2) выделение в структуре ГС узлов и контуров и составление согласно законам Кирхгофа модели ГС в виде системы уравнений для рассматриваемого режима работы ГС [1].

Однако сложность структуры и большое количество режимов работы ГС современных ЛА существенно затрудняют осуществление второго этапа. Поэтому в настоящее время аналитические модели применяются лишь для описания отдельных агрегатов и не используются для описания ГС в целом.

Решить эту проблему можно путём автоматизации процесса реализации второго

этапа за счёт использования ЭВМ, учитывая, что использование численных методов решения уравнения (1) предполагает применение ЭВМ уже на первом этапе построения модели ГС. Однако реализация второго этапа предполагает проведение эвристического анализа структуры ГС, осуществить который посредством ЭВМ сложно. Следовательно, актуальной является задача построения такого способа представления ГС ЛА, которое бы позволило реализовать на ЭВМ этап анализа структуры и построения модели.

Будем считать, что для исследуемой ГС выбраны диагностические признаки и определены аналитические модели всех компонентов.

Тогда для построения аналитической модели ГС в целом целесообразно воспользоваться подходом [3, 4], который предполагает рассмотрение ГС ЛА как регулярной конфигурации, обладающей составом и структурой.

Состав конфигурации определяется неструктурированным множеством входящих в неё образующих - несоединённых компонентов ГС - и описывается квадратной матрицей состава  $M'$ . Каждая образующая имеет входы и выходы (связи), при помощи которых она может соединяться с другими образующими.

Элементы матрицы  $M'$  могут быть представлены универсальными операторами [3], описывающими аналитические модели (1) соответствующих компонентов ГС.

Структура конфигурации представляет собой множество соединений, существующих между всеми или некоторыми связями образующих, входящими в её состав. Она описывается квадратной матрицей соединений  $S$ , элементами которой являются символы, обозначающие наличие или отсутствие соединений между связями компонентов:  $\{1\}$ ,  $\{0\}$  или  $\{-1\}$ . Знак перед символом  $\{1\}$  характеризует направление передачи гидроэнергии через компонент. Размерность матриц соединений и состава будет определяться количеством компонентов ГС и их связей.

Каждый режим работы ГС характеризуется определённой регулярной конфигура-

цией [3,4]. Эти конфигурации отличаются между собой структурой. Матрицу соединений для  $i$ -го режима работы ГС ЛА обозначим как  $C_i$ , а матрицу соединений для свободного режима (режима, в котором ГС не выполняет работу) -  $C_0$ .

Тогда для полного описания конкретной ГС необходимо составить одну матрицу состава  $M'$  и совокупность матриц соединений  $C_i$ , где  $i=0, \dots, N$  ( $N$  - число режимов работы ГС без учёта свободного режима), а работу ГС можно представить как смену матриц соединений  $C_i$ .

С целью пояснения особенностей описания состава и структуры регулярной конфигурации ГС ЛА рассмотрим пример. Проанализируем простейшую ГС, структурная схема которой приведена на рис. 1 (стрелками обозначено направление движения потока рабочей жидкости). Для упрощения при анализе этой ГС будем считать, что отрезки трубопроводов, соединяющие компоненты ГС, не оказывают влияния на параметры рабочей жидкости. Однако при реальных расчётах трубопроводы необходимо учитывать, так как они изменяют параметры потока жидкости [1].

Для простейшей ГС в соответствии с этапом работы исполнительного устройства можно выделить три режима работы: свободный, выход штока и уборка штока. Тогда соответствующие им матрицы соединений обозначим как  $C_0$ ,  $C_1$  и  $C_2$ .

В случае, когда компонент обладает одной входной и одной выходной связями, которые необходимо учитывать при анализе работы ГС, для сокращения размерности в матрицах можно отобразить лишь сам компонент. В других ситуациях необходимо поступать так, как этого требует сохранение логики работы ГС и её компонентов с точки зрения передачи гидроэнергии. Так для рассматриваемого примера целесообразно разделить вход и выход в распределительном устройстве ( $PV_{вх}$  и  $PV_{вых}$ ), а также полости выхода штока и его уборки в исполнительном устройстве ( $IY_{н.в.}$  и  $IY_{н.у.}$ ).

Тогда матрица состава для простейшей ГС будет иметь следующий вид:

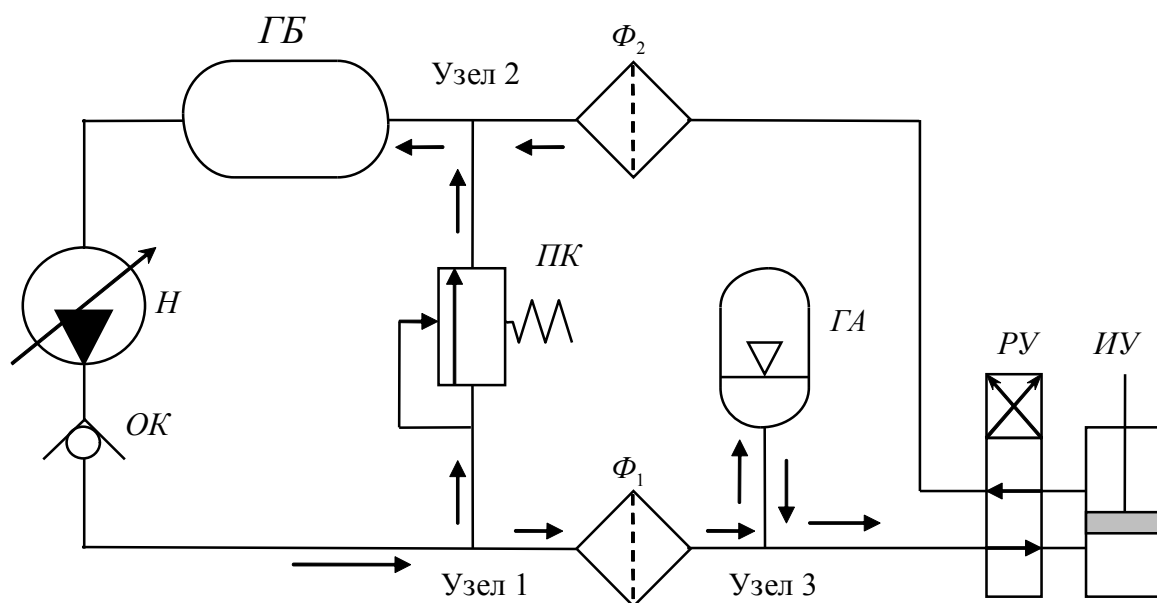


Рис. 1. Структурная схема простейшей гидросистемы:

*Н – насос, ОК – обратный клапан, ГБ – гидробак,  $\Phi_1, \Phi_2$  – фильтры напорной и сливной магистрали, соответственно, РУ – распределительное устройство, ИУ – исполнительное устройство, ГА – гидроаккумулятор, ПК – предохранительный клапан*

$$M' = \text{diag}\{H, ОК, ПК, \Phi_1, ГА, РУ_{\text{вх}}, ИУ_{\text{н.в}}, ИУ_{\text{н.у}}, РУ_{\text{вых}}, \Phi_2, ГБ\}. \quad (2)$$

Процесс функционирования ГС можно представить как последовательную во времени смену матриц соединений. Такую смену можно описать при помощи переключаемых функций  $R$ .

Для простейшей ГС можно выделить четыре переключаемых функции:  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . При этом функции  $R_1, R_2$  и  $R_3$  в зависимости от режима работы могут принимать только два значения  $\{0\}$  или  $\{1\}$ :

$$R_1 = \begin{cases} 1, & p \geq p', \\ 0, & p < p', \end{cases}$$

$$R_2 = \begin{cases} 0, & \text{нет воздействия,} \\ 1, & \text{выход штока,} \\ 0, & \text{уборка штока,} \end{cases}$$

$$R_3 = \begin{cases} 0, & \text{нет воздействия,} \\ 0, & \text{выход штока,} \\ 1, & \text{уборка штока.} \end{cases}$$

Функция  $R_4$  описывает работу предохранительного клапана, который открывается при превышении давления  $p$  в линии нагнетания некоторого порогового значения  $p'$ , а функции  $R_2$  и  $R_3$  – работу распределительного устройства, которое в зависимости от управляющего воздействия обеспечивает подачу потока рабочей жидкости либо в полость выхода штока, либо в полость уборки штока исполнительного устройства. Функция  $R_4$  описывает работу исполнительного устройства и может принимать три значения в зависимости от режима работы:

$$R_4 = \begin{cases} 0, & \text{нет воздействия,} \\ 1, & \text{выход штока,} \\ -1, & \text{уборка штока.} \end{cases}$$

Тогда обобщённую матрицу соединений для простейшей ГС можно описать следующим выражением:

	<i>H</i>	<i>OK</i>	<i>ПК</i>	$\Phi_1$	<i>ГА</i>	<i>PV<sub>вх</sub></i>	<i>ИУ<sub>н.в</sub></i>	<i>ИУ<sub>н.у</sub></i>	<i>PV<sub>вых</sub></i>	$\Phi_2$	<i>ГБ</i>
<i>H</i>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
<i>OK</i>	-1	1	$R_1$	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>ПК</i>	0	- $R_1$	1	- $R_1$	0	0	0	0	0	$R_1$	$R_1$
$\Phi_1$	0	-1	- $R_1$	1	1	1	0	0	0	0	0
<i>ГА</i>	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0
<i>PV<sub>вх</sub></i>	0	0	0	-1	-1	1	$R_2$	$R_3$	0	0	0
<i>ИУ<sub>н.в</sub></i>	0	0	0	0	0	0	- $R_2$	1	$R_3$	0	0
<i>ИУ<sub>н.у</sub></i>	0	0	0	0	0	0	- $R_3$	- $R_4$	1	$R_2$	0
<i>PV<sub>вых</sub></i>	0	0	0	0	0	0	- $R_3$	- $R_2$	1	1	0
$\Phi_2$	0	0	$R_1$	0	0	0	0	0	-1	1	1
<i>ГБ</i>	1	0	- $R_1$	0	0	0	0	0	0	-1	1

(3)

Для получения матрицы соединений для конкретного режима работы ГС в матрицу *C'* необходимо подставить значения переключательных функций, соответствующих этому режиму. Например, если простейшая ГС работает в режиме выхода штока с превышением порогового значения давления в линии нагнетания, то в матрицу *C'* необходимо подставить  $R_1=1, R_2=1, R_3=0, R_4=1$ .

Матрица соединений читается построчно. Например, первая строка матрицы (3) читается следующим образом: насос соединён с обратным клапаном и гидробаком, причём поток жидкости проходит через насос в направлении от гидробака к обратному клапану; вторая строка: обратный клапан соединён с насосом и фильтром  $\Phi_1$ , а поток жидкости протекает через обратный клапан в направлении от насоса к фильтру  $\Phi_1$  и т. д. Следовательно, матрица соединений в неявном виде представляет уравнения, которые могут быть получены для ГС согласно обобщённым законам Кирхгофа, а её анализ позволяет выделить в структуре ГС узлы и контуры.

Анализ матрицы (3) показывает, что в структуре ГС узловыми являются элементы, которым соответствует вторая, третья, четвёртая, шестая, десятая и одиннадцатая строки (то есть получается шесть узлов).

Однако из анализа схемы на рис. 1 следует, что система содержит три узла. Такое несоответствие возникает из-за неучитывания в матрице (3) отрезков трубопроводов. Поэтому для данного случая необходимо наложить дополнительное условие: в качестве узловых принимаются компоненты, которые

расположены перед узлом по ходу течения жидкости.

В этом случае узловыми будут являться элементы второй, четвёртой и десятой строк (обратный клапан *OK*, фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ). Для каждого из узлов можно составить уравнение в соответствии с первым обобщённым законом Кирхгоффа. Они будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} Q_{OK} - Q_{ПК} - Q_{\Phi_1} = 0, \\ Q_{\Phi_1} + Q_{ГА} - Q_{PV_{вх}} = 0, \\ Q_{\Phi_2} + Q_{ПК} - Q_{ГБ} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

где  $Q_i$  - расход жидкости через соответствующий элемент ГС.

Последнее уравнение в системе (4) необходимо исключить, так как оно тождественно первому в силу того, что  $Q_{\Phi_1} = Q_{\Phi_2}$ , а  $Q_{ГБ} = Q_{OK}$ .

Для нахождения контуров в простейшей ГС необходимо проследить наличие соединения элементов между собой, а также, переходя от строки к строке матрицы, проследить путь течения жидкости от источника гидроэнергии к потребителю и обратно, пока не образуется замкнутый контур. Однако, если в какой-либо строке происходит разветвление потока (появляется узел), то возникнет вероятность появления большего количества контуров. Тогда в рассматриваемой строке необходимо выбрать направление (компонент), для которого отыскание контура продолжается, а на остальные направления наложить прерывания. Возврат к направлениям, на которые наложены прерывания, происходит после обработки выбранного ранее пути нахождения замкнутого контура. Позиции, на которые были наложены прерывания, будут обработаны по тому же принципу, что и основной путь.

Используя этот принцип для анализа матрицы соединений (3), в гидросистеме, структурная схема которой представлена на рис. 1, в режиме выхода штока можно выде-

лить два замкнутых контура. Тогда систему контурных уравнений в соответствии со вторым обобщённым законом Кирхгофа можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} P_H = P_{OK} + P_{\phi_1} + P_{GA} + P_{PY_{BX}} + P_{IY_{П.В.}} + \\ \quad + P_{IY_{П.У.}} + P_{PY_{ВЫХ}} + P_{\phi_2} + P_{ГБ}, \\ P_H = P_{OK} + P_{ПК} + P_{ГБ}; \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_i$  - падение давления рабочей жидкости на соответствующем элементе ГС.

Объединив системы (4) и (5), получаем аналитическую модель простейшей ГС для режима выхода штока.

Процесс построения узловых и контурных уравнений ГС можно реализовать на ЭВМ. Для этого необходимо разработать алгоритм и написать программу на любом из известных языков программирования.

Один из возможных вариантов алгоритма работы программы для ЭВМ по составлению диагностической модели ГС представлен на рис. 2.

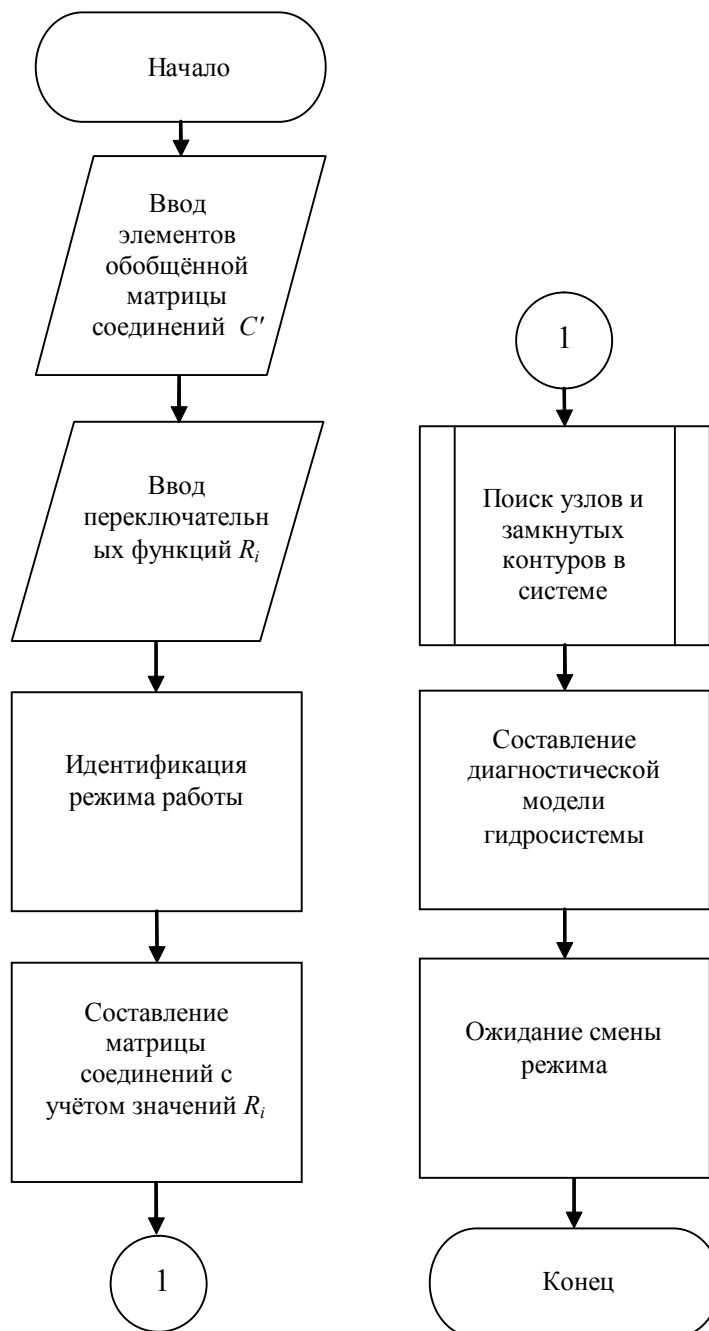


Рис. 2. Алгоритм работы программы по составлению диагностической модели ГС

На начальном этапе работы программы вводятся все элементы матрицы соединений, а также совокупность числовых значений для каждой из переключательных функций, характеризующих значение этих функций во всех режимах работы. Элементы матрицы соединений и переключательных функций определяются на этапе проектирования ГС.

На этапе идентификации режима работы ГС (все режимы пронумерованы) вместо символьных обозначений переключательных функций в матрицу соединений подставляются конкретные числовые значения. Далее программа анализирует каждую строку матрицы на предмет нахождения узлов и замкнутых контуров в системе путём выявления необходимого количества элементов  $\{1\}$  и  $\{-1\}$ . Элемент признаётся узловым, если в соответствующей ему строке матрицы соединений находится четыре и более элементов  $\{1\}$  или  $\{-1\}$ . Это означает, что на его входе (выходе) поток жидкости разделяется или объединяется. Контур признаётся замкнутым, если при переходе от строки к строке матрицы прослеживается путь течения жидкости от источника гидроэнергии к потребителю и обратно.

Циклическая часть программы по поиску контуров системы продолжается до тех пор, пока ЭВМ не обработает все прерывания и не отыщет все замкнутые контуры системы.

Когда все узлы и контуры системы найдены, для неё с использованием обобщённых законов Кирхгоффа формируется диагностическая модель.

Далее программа переходит в режим ожидания до момента, пока не будет идентифицирован другой режим. Это приведёт к тому, что для переключательных функций будут введены новые значения, для которых программа повторно составит диагностическую модель.

Таким образом, разработанный метод позволяет получить диагностическую модель ГС посредством ЭВМ в реальном масштабе времени. Использование полученного метода построения облегчает процесс анализа сложных ГС, обладающих большим количеством режимов работы.

#### Библиографический список

1. Матвеев, А. М. Проектирование гидравлических систем летательных аппаратов [Текст] / А. М. Матвеев, И. И. Зверев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
2. Башта, Т. М. Надежность гидравлических систем воздушных судов [Текст] / Т. М. Башта, В. Д. Бабанская, Ю. С. Головкин [и др.]. – М.: Транспорт, 1986. – 279 с.
3. Гренандер, У. Лекции по теории образов. Том 1. Синтез образов [Текст] / У. Гренандер. – М.: Мир, 1979. – 382 с.
4. Ковалев, М. А. Метод автоматизации процесса моделирования гидросистем воздушных судов / М. А. Ковалев // Известия вузов. Авиационная техника. - 2009. - № 3. - С. 62-66.
5. Ковалев, М. А. Тензорное представление структуры и работы гидросистем воздушных судов / М. А. Ковалев // Известия вузов. Авиационная техника. - 2009. - № 4. - С. 64-67.

## METHOD OF CONSTRUCTING DIAGNOSTIC MODELS OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEMS IN AN ANALYTIC FORM

© 2011 M. A. Kovalev, G. V. Borodkin, I. I. Khablo

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

To present the hydraulic system of aircraft the use of composition and structure matrices is proposed. The analysis of these matrices makes it possible to distinguish loops and closed circuits in the structure of the hydraulic system, which gives a chance to make its diagnostic model in the form of a system of equations. One of the possible algorithms for making a computer program for constructing such a diagnostic model is presented in the paper.

*Hydraulic system diagnostics, analytic diagnostic models of hydraulic systems, regular configuration, composition and structure matrices, algorithm for computer program.*

**Информация об авторах**

**Ковалёв Михаил Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, начальник военной кафедры, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kovalev@ssau.ru. Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

**Бородкин Глеб Владимирович**, инженер по контрольно – измерительным приборам и автоматике, ОАО «Самарский резервуарный завод». E-mail: gleb-borodkin1985@yandex.ru. Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

**Хабло Иван Игоревич**, начальник учебной части – заместитель начальника военной кафедры, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ivankhablo@gmail.com. Область научных интересов: системы функциональной диагностики технического состояния жидкостных систем авиационной техники, функциональная диагностика гидравлических систем по параметрам частиц износа, контроль уровня загрязнения жидкостей при помощи датчиков встроенного контроля.

**Kovalev Mikhail Anatolyevitch**, doctor of technical sciences, associate professor, chief of the military faculty, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kovalev@ssau.ru. Area of research: functional diagnostic systems of the technical condition of aircraft fluid systems, functional hydraulic system diagnostics by the parameters of wear particles, fluid contamination level monitoring using an integrated monitoring sensor.

**Borodkin Gleb Vladimirovitch**, post-graduate student of the military faculty, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: gleb-borodkin1985@yandex.ru. Area of research: functional diagnostic systems of the technical condition of aircraft fluid systems, functional hydraulic system diagnostics by the parameters of wear particles, fluid contamination level monitoring using an integrated monitoring sensor.

**Khablo Ivan Igoryevitch**, responsible for the instructional side, deputy chief of the military faculty, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: ivankhablo@gmail.com. Area of research: functional diagnostic systems of the technical condition of aircraft fluid systems, functional hydraulic system diagnostics by the parameters of wear particles, fluid contamination level monitoring using an integrated monitoring sensor.