

outputs and inputs of different notation business processes]. Available at: [http://businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/connection\\_processes/connection\\_inputs\\_outputs/connection\\_different\\_notations](http://businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/connection_processes/connection_inputs_outputs/connection_different_notations) (accessed 18.02.2014).

12. *Svyazyvaniye protsessov dlya peredachi upravleniya* [Business processes linking for management transfer]. Available at: [http://businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/connection\\_processes/connection\\_transfer\\_control](http://businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/connection_processes/connection_transfer_control) (accessed 18.02.2014).

© Бикчентаев А. А., 2014

УДК 621.643.07

## МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА СБОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРУБОПРОВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ\*

И. О. Бобарика<sup>1</sup>, М. С. Яхненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный технический университет  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
E-mail: MegusMC@mail.ru

<sup>2</sup>Иркутский авиационный завод – филиал ОАО «Корпорация «ИРКУТ»  
Российская Федерация, 664020, г. Иркутск, ул. Новаторов, 3  
E-mail: holtfor@mail.ru

*Выполнена доработка методики проектирования конструкции трубопроводной системы с учётом экспериментальных данных тензометрирования. Выполнен анализ частотного отклика сборной конструкции трубопроводов гидрогазовых систем с определением их напряжённо-деформированного состояния для различных диапазонов частот возбуждающей силы с применением нелинейной контактной задачи метода конечных элементов. Представлены частотные отклики сборной конструкции трубопроводов напорной линии гидросистемы современного самолёта до и после модернизации по представленной методике; подтверждено снижение динамических напряжений конструкции в диапазоне рабочих частот. Работа продолжает исследование зависимости частот собственных колебаний и напряжённо-деформированного состояния трубопроводных систем от особенностей их конструкции.*

*Ключевые слова: трубопровод, частотный отклик, гидросистема, резонанс, демпфирование, динамическое напряжённо-деформированное состояние, контактная задача, метод конечных элементов.*

## TECHNIQUE SOLUTION OF THE PROBLEM OF THE PIPELINE PRECAST STRUCTURE FREQUENCY RESPONSE SEARCH WITH APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD

I. O. Bobarika<sup>1</sup>, M. S. Yakhnenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk state technical University  
83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
E-mail: MegusMC@mail.ru

<sup>2</sup>Irkutsk aircraft factory – subsidiary of JSC “Corporation “Irkut”  
3, Novatorov str., Irkutsk, 664020, Russian Federation  
E-mail: holtfor@mail.ru

*Modification of technique of structural design of pipeline system taking into account experimental data of a strain-gage testing has been completed. The various ranges of frequency response analysis of the dynamically loaded hydro-gas system's collapsible pipelines constructions with application of a finite element method nonlinear contact problem*

\* Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

has been done. Frequency responses of collapsible pipelines constructions hydraulic system pressure line of a modern airplane before and after modernization on the presented method are presented; decrease of structures dynamic stresses in the operating frequency range. This work continues research of dependence of frequencies of natural vibration and tensely deformed condition of pipeline systems from features of its detail of construction.

*Keywords:* the pipeline, frequency response, hydraulic system, resonance, damping, dynamic tensely deformed condition, contact problem, finite element method.

Изделия авиационной техники сегодня представляют собой сложный комплекс систем и оборудования, интегрированный в планер. В полете все элементы современного самолёта должны работать как одно целое, обеспечивая соответствие заявленным при его проектировании характеристикам. Однако учёт совместной работы элементов систем и планера при различных вариантах совместного нагружения является сложнейшей задачей, которая решается с применением итерационных подходов, с неоднократными доработками и модификациями тех или иных элементов и согласованием целого ряда параметров.

Трубопровод – сложнагруженная конструкция, исследование работы которой – комплексная задача, существующая на стыке исследования экспериментальных данных натурных испытаний, результатов традиционных численных решений и высокопроизводительных численных решений (рис. 1).

Традиционные методы, описанные в [1–5], являются громоздкими и сложноприменимыми в производстве. Аналитические же методы в большей степени позволяют рассматривать отдельные элементы сборных конструкций и представляют известную сложность, связанную с определением всех возмож-

ных типов нагрузок и действующих напряжений, что не позволяет рассматривать масштабные сборные конструкции, где велико взаимовлияние элементов друг на друга, особенно при динамическом нагружении. Экспериментальные же исследования представляются слишком дорогостоящими ввиду необходимости наличия соответствующего оборудования и программных средств для обработки потока данных эксперимента (например, при тензометрировании динамических испытаний) и используются в основном для подтверждения заявленных характеристик и при отработках конструкций. Численные же методы решения подобных задач представлены системами инженерного анализа, основанными на методе конечных элементов.

Методы численного решения задачи определения динамического напряженно-деформированного состояния трубопроводных систем описаны в серии работ [6–15].

Основные тенденции развития методики [6] заключаются в более глубокой проработке и уточнении средств рассмотрения экспериментальных данных натурных испытаний, а также в более точном определении параметров надёжности системы через сравнение частот отклика и возбуждения сборных конструкций.

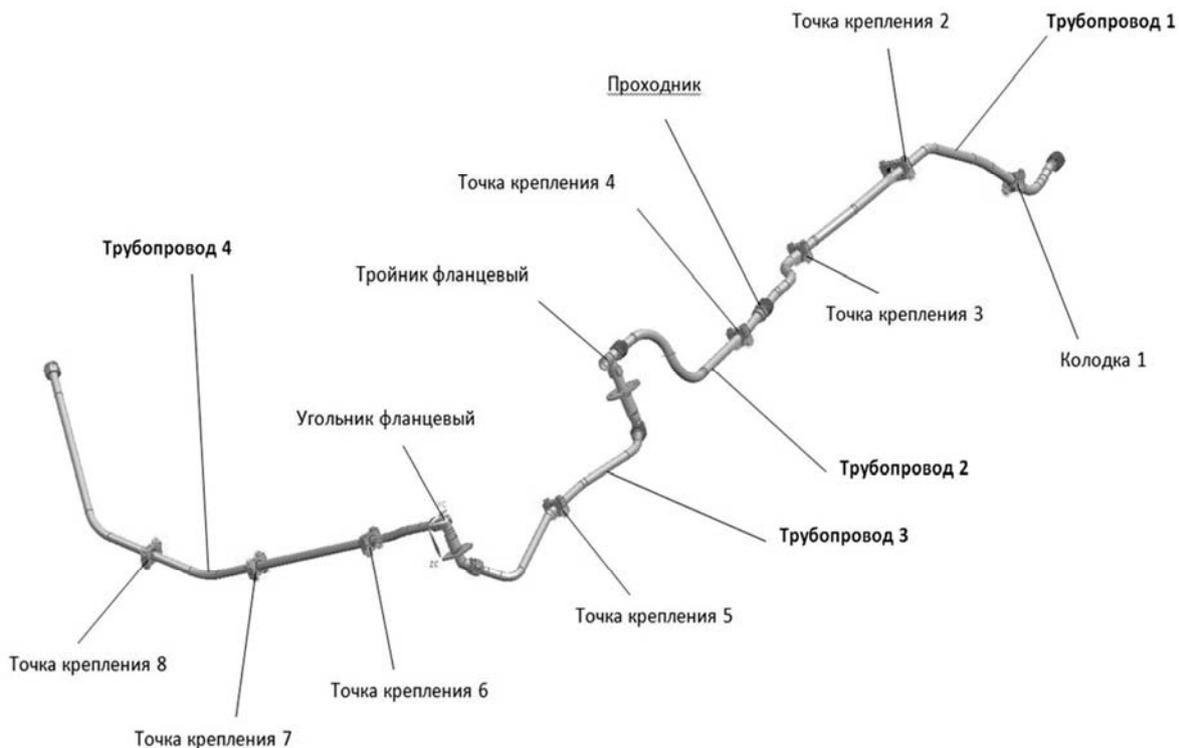


Рис. 1. Модель трубопроводной системы

Согласно методике [8], необходимо рассмотреть задачу определения частотного отклика конструкции трубопроводной системы для определения критических частот работы трубопровода. По результатам работы необходимо сравнить критические частоты с рабочими частотами системы и устранить совпадающие частоты путём изменения конфигурации модели трубопровода или точек его крепления к элементам каркаса планера. Однако обнаружено, что при анализе конечно-элементной модели сборной конструкции трубопровода по заданному диапазону частот (анализ Transient static) в системе инженерного анализа ANSYS возможно разрушение контактов модели, что обусловлено нелинейным увеличением энергии колебаний постоянной амплитуды с увеличением их частоты. Таким образом, необходимо определить функцию колебаний точек крепления трубопроводов, позволяющую исследовать вибрации трубопровода с постоянной энергией и переменной частотой.

Выполнен поиск функции перемещений в виде

$$f(t) = A(t) \times \sin \omega(t); \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $A(t)$  – закон изменения амплитуды колебаний по времени;  $\omega(t)$  – закон изменения частоты действия внешней силы.

При этом амплитуда функции (1) уменьшается со временем, а частота возрастает.

Модель сборной конструкции, подвергая динамическому анализу, может быть рассчитана при условии сохранения целостности контактов во время действия любых возникающих в процессе приложения исходной нагрузки сил. Опытным путём установлено, что максимальные амплитуды колебаний системы не вызывают нарушения контактных связей при амплитуде колебаний, равной 2 мм.

Эффекта разрушения контактов в модели сборной конструкции можно избежать путём применения закона постоянства энергии колебательной системы при автоколебаниях:

$$\frac{m \times \omega^2 \times A^2}{2} = \text{const},$$

где  $m$  – масса системы, кг;  $\omega$  – частота колебаний системы;  $A$  – амплитуда колебаний системы.

В любой момент времени  $t$

$$\frac{m \times \omega_0^2 \times A_0^2}{2} = \frac{m \times \omega^2(t) \times A^2(t)}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, амплитуда зависит от частотного диапазона исследования:

$$A(t) = \frac{A_0 \times \omega_0}{\omega(t)}, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – начальное значение частоты (условно принятое равным 1);  $A_0$  – условное начальное значение амплитуды колебаний конструкции, не приводящее к разрушению контактов в модели.

Частота по условиям задачи поиска частотного отклика зависит от времени по линейному закону

$$\omega = k \cdot x + b. \quad (4)$$

Раскрывая уравнение (3) с учетом (4), подставляя граничные условия, получаем

$$A(t) = \frac{K}{t}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от принятых начальных значений амплитуды, частоты и шага по времени.

Для рассматриваемого расчётного случая значение  $K = 0,109$  соответствует оптимальным с точки зрения задания переменных нагрузок в конечно-элементной модели трубопровода значениям начального времени  $t_0$  и начального значения амплитуды  $\omega(t_0)$  (исходные параметры для этих значений:  $t_0 = 0,1$  с,  $A_0 = 2$  мм).

Из условия известных значений начальной и конечной частот вращения авиадвигателя как источника возбуждения колебаний  $n(t_1) \rightarrow 0$  и  $n(t_2) = 700$  об/мин, получено:

$$\omega(t) = \frac{700}{60} \times t \times 2 \times \pi. \quad (6)$$

Согласно приведенной методике, функция (1) с учетом вышеуказанных условий имеет вид (рис. 2)

$$f(t) = \frac{0,109 \times \sin(73,303 \times t)}{t}. \quad (7)$$

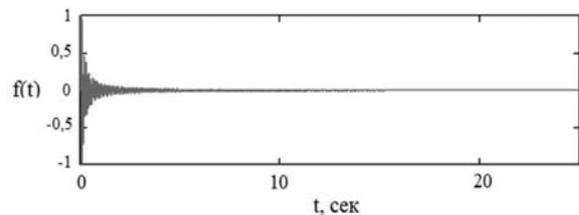


Рис. 2. График функции  $f(t)$  с постоянной энергией колебаний в системе при увеличении частоты с заданными параметрами частотно-временных характеристик

Функция (7) позволяет задавать перемещения точек опор трубопровода, анализировать сборные конструкции при постоянном значении энергии систем без разрушения её контактных взаимодействий и применима для инженерных анализов в стандартных КЭ-пакетах.

Частотный отклик, полученный в результате анализа модели по представленной методике, отображен на рис. 3.

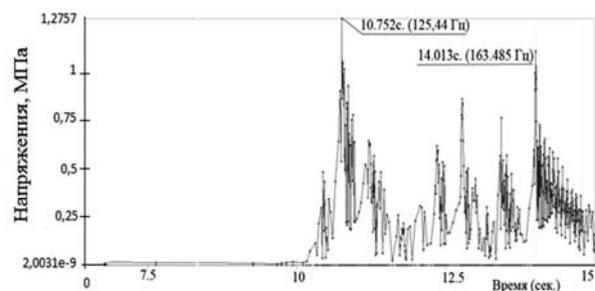


Рис. 3. Частотный отклик модели трубопровода до модернизации

Таким образом, однозначно определён первый резонансный пик всей конструкции при частоте 125,44 Гц, что находится в диапазоне рабочих частот. Следовательно, модернизацию необходимо выполнить таким образом, чтобы исключить возможность появления резонансных пиков в диапазоне рабочих частот.

Выполненный анализ частотных откликов модели с модернизированными кронштейнами подтвердил способность конструкции эффективно демпфировать динамические колебания. Отсутствие ярко выраженных пиков динамических напряжений и снижение общего фона напряжений при колебаниях системы с частотой, при которой в исходной конструкции прослеживались ярко выраженные пики напряжений, наглядно представлены на рис. 4.

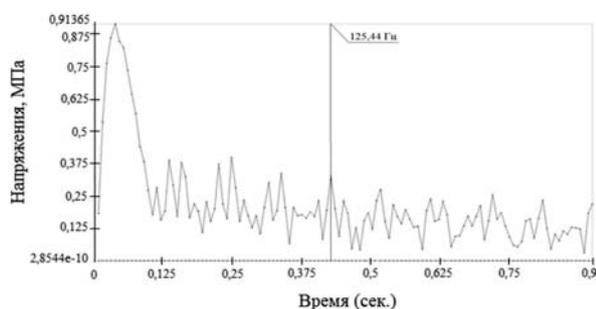


Рис. 4. Частотный отклик модели после модернизации

Таким образом, уточнена методика определения частотного отклика протяженных сборных конструкций.

Применение описанной методики позволит избежать итеративного поиска зависимости возбуждающей силы от времени и впоследствии эффективнее определять параметры любых решателей в стандартных КЭ-пакетах, применяемых для динамического анализа протяженных сборных конструкций с применением нелинейной контактной задачи теории конечных элементов.

#### Библиографические ссылки

1. Башта Т. М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. М. : Оборонгиз, 1961. 97 с.
2. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1990. 447 с.
3. Сапожников В. М., Лагосюк Г. С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов. М. : Машиностроение, 1973. 248 с.
4. Тарасов Ю. Л., Перов С. Н., Логинов С. Л. Решение проблемы обеспечения и надежности ресурса трубопроводных систем при их проектировании // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2003. № 19. С. 122–128.
5. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций / под ред. Э. И. Григолюк. М. : Наука. 1975. 704 с.
6. Пыхалов А. А., Милов А. Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. 192 с.
7. Яхненко М. С. Анализ сходимости численного решения метода конечных элементов для задачи динамического нагружения трубопроводов // Вестник ИрГТУ. Иркутск, 2011. № 5 (52). С. 100–103.
8. Яхненко М. С. Проектирование конструкции трубопроводной системы с учётом экспериментальных данных тензометрирования [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ» / Моск. авиац. ин-т. 2011. № 44. С. 44–30. URL: <http://www.mai.ru/publications/index2.php>.
9. Яхненко М. С., Гушин С. В., Полонский А. П. Анализ работы трубопроводных коммуникаций летательных аппаратов с учётом монтажных неточностей // Проблемы земной цивилизации : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Анохина, Н. М. Пожитного. Иркутск, 2008. Вып. 21. С. 196–199.
10. Яхненко М. С., Пыхалов А. А. Исследование зависимости частот собственных колебаний и напряженно-деформированного состояния трубопроводных систем от особенностей их конструкции // Проблемы земной цивилизации : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Анохина, Н. М. Пожитного. Иркутск, 2008. Вып. 21. С. 258–259.
11. Яхненко М. С., Пыхалов А. А. Исследование зависимости частот собственных колебаний и напряженно-деформированного состояния трубопроводных систем от особенностей их конструкции // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы 15 Междунар. симп. им. А. Г. Горшкова (2009, г. Ярополец). М. : МАИ, 2009. Т. 1. С. 167–168.
12. Яхненко М. С., Пыхалов А. А. Исследование динамики работы трубопровода напорной трассы гидросистемы современного истребителя // материалы 13 Междунар. науч. конф., посвящённой 50-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. Красноярск, 2009. С. 46–47.
13. Яхненко М. С., Пыхалов А. А., Столерман А. И. Разработка методики сравнительного анализа динамики и прочности различных сборных конструкций трубопроводных систем летательных аппаратов с применением нелинейной контактной задачи метода конечных элементов // Исследования и перспективные разработки в машиностроении : материалы первой науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Комсомольск-на-Амуре, 2010. С. 86–89.
14. Яхненко М. С., Пыхалов А. А. Анализ динамических характеристик трубопровода при его работе под давлением // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы 16 Междунар. симп. им. А. Г. Горшкова (2010, г. Ярополец). М. : МАИ, 2010. Т. 1. С. 143–145.
15. Яхненко М. С., Пыхалов А. А. Анализ динамики и прочности сборных конструкций трубопроводных систем летательных аппаратов с применением нелинейной контактной задачи метода конечных элементов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы 17-й Междунар. симп. им. А. Г. Горшкова (2011, г. Ярополец). М. : МАИ, 2011. С. 163–164.

## References

1. Bashta T. M. *Raschety i konstruksii samoletnykh gidravlicheskih ustroystv* [Calculations and design of aircraft hydraulic systems]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961, 97 p.
2. Bolotin V. V. *Resurs mashin i konstruksiy* [Resource of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 447 p.
3. Sapozhnikov V. M., Lagosjuk G. S. *Prochnost' i ispytaniya truboprovodov gidrosistem samoletov i vertoletov* [Durability testing of pipelines and hydraulic systems of aircraft and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 248 p.
4. Tarasov Ju. L., Perov S. N., Loginov S. L. [Addressing the security and reliability of the resource pipeline systems in their design]. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. Nauki*. 2003, no. 19, p. 122–128. (In Russ.)
5. Timoshenko S. P. *Prochnost' i kolebaniya elementov konstruksiy* [Strength and vibrations of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 704 p.
6. Pykhalov A. A., Milov A. E. *Kontaktная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин* [Contact problem of static and dynamic analysis modular rotors of turbomachines]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2007, 192 p.
7. Yakhnenko M. S. [Analysis of the convergence of the numerical solutions of finite element method for the problem of dynamic loading pipelines]. *Vestnik IrGTU*. 2011, vol. 52, no. 5, p. 100–103. (In Russ.)
8. Yakhnenko M. S. [Design and construction of the pipeline system, taking into account the experimental strain measurement data]. *Trudy MAI*, 2011, no. 44. (In Russ.) Available at: <http://www.mai.ru/publications/index2.php>.
9. Yakhnenko M. S., Gushchin S. V., Polonskiy A. P. *Materialy konf. "Problemy zemnoy tsivilizatsii"* [Proceedings of the conf. "Problems of world civilization"]. Irkutsk, 2008, no. 21, p. 196–199. (In Russ.)
10. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A. *Materialy konf. "Problemy zemnoy tsivilizatsii"* [Proceedings of the conf. "Problems of world civilization"]. Irkutsk, 2008, no. 21, p. 258–259. (In Russ.)
11. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A. *Materialy 15 mezhdunar. simp. "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksiy i sploshnykh sred" im. A.G. Gorshkova* [Proc. of the 15th international Symposium. "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuum them. A. G. Gorshkov"]. Moscow, MAI Publ., 2009, Vol. 1, p. 167–168. (In Russ.)
12. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A. *Materialy 13 mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoy 50-letiyu Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Materials of the 13th international scientific conference, dedicated to the 50th anniversary of the Siberian state aerospace University]. Krasnoyarsk, 2009, p. 46–47. (In Russ.)
13. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A., Stolerman A. I. *Materialy pervoy nauch.-praktich. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov "Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v mashinostroenii"* [Proceedings of the first scientific-practical Conference young scientists and specialists "Research and advanced development in mechanical engineering"]. Komsomol'sk-na-Amure, 2010, p. 86–89. (In Russ.)
14. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A. *Materialy 16 mezhdunar. simp. "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksiy i sploshnykh sred" im. A. G. Gorshkova* [Materials of the 16th international Symposium. "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuum them. A. G. Gorshkov"]. Moscow, MAI Publ., 2010, Vol. 1, p. 143–145. (In Russ.)
15. Yakhnenko M. S., Pykhalov A. A. *Materialy 17 mezhdunar. simp. "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksiy i sploshnykh sred" im. A. G. Gorshkova* [Materials of the 17th international Symposium. "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuum them. A. G. Gorshkov"]. Moscow, MAI Publ., 2011, p. 163–164. (In Russ.)

© Бобарика И. О., Яхненко М. С., 2014

УДК 519.248

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРОВЕДЕНИЕМ АВАРИЙНЫХ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ВОССТАНОВЛЕНИЙ

И. И. Вайнштейн<sup>1</sup>, Г. Е. Михальченко<sup>1</sup>, Ю. В. Вайнштейн<sup>1</sup>, К. В. Сафонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, кор. УЛК  
E-mail: [ikit.sfu-kras.ru](mailto:ikit.sfu-kras.ru)

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [safonovkv@rambler.ru](mailto:safonovkv@rambler.ru)

*Рассмотрена стратегия эксплуатации технических систем с несовпадающими функциями распределения наработок элементов до отказа после аварийных и профилактических восстановлений, которая обобщает известную в математической теории надежности стратегию строго периодических восстановлений. Получены*