

УДК 681.518; 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.55.4.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.55.4.010)

## Системный подход к исследованию параметров опор газотурбинных двигателей: многофизическая модель демпфирующей опоры

Н.В. Зубков✉

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

**Резюме.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности анализа динамических характеристик демпфирующих опор газотурбинных двигателей, поскольку существующие конечно-элементные модели обладают высокой вычислительной сложностью и не применимы для оперативного анализа, а упрощенные аналитические модели ориентированы на обобщенную оценку характеристик и имеют ограниченные возможности при исследовании нелинейных контактных и гидродинамических эффектов. В связи с этим данная статья направлена на разработку многофизической имитационной модели демпфирующей опоры газотурбинного двигателя, обеспечивающей достоверное исследование ее динамических и демпфирующих характеристик в составе виртуального испытательного комплекса. Ведущим методом исследования является системный подход, основанный на интеграции библиотек Simscape и Multibody среды MATLAB Simulink, позволяющий реализовать согласованное моделирование механических, контактных и гидродинамических процессов в подшипниковом узле и демпфирующем пакете, а также проводить параметрический анализ влияния конструктивных характеристик на динамический отклик системы. В статье разработана многофизическая модель демпфирующей опоры, реализующая взаимодействие тел качения, упруго-диссипативных элементов и гидродинамической среды, и выполнено исследование влияния числа лент и гофр демпфирующего пакета на силовые и частотные характеристики опоры. Полученные на базе разработанной модели результаты моделирования позволяют количественно оценивать влияние конструктивных параметров демпфирующих опор на вибрационную устойчивость ротора и могут быть использованы при проектировании, оптимизации и виртуальном прототипировании опорных узлов газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** виртуальный испытательный комплекс, газотурбинный двигатель, демпфирующие опоры, многофизическая модель, гидродинамическая модель.

**Для цитирования:** Зубков Н.В. Системный подход к исследованию параметров опор газотурбинных двигателей: многофизическая модель демпфирующей опоры. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2236> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.010

## A systematic approach to research parameters of gas turbine engine supports: a multiphysical model of a damping support

N.V. Zubkov✉

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,  
the Russian Federation*

**Abstract.** The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of analyzing the dynamic characteristics of damping bearings of gas turbine engines, since existing finite element models are computationally complex and are not applicable for operational analysis, and simplified analytical models are focused on a generalized assessment of characteristics and have limited capabilities in the

study of nonlinear contact and hydrodynamic effects. In this regard, this article is aimed at developing a multiphysical simulation model of a damping support of a gas turbine engine, providing a reliable study of its dynamic and damping characteristics as part of a virtual test complex. The leading research method is a systematic approach based on the integration of the Simscape libraries and the MATLAB Simulink Multibody environment, which allows for consistent modeling of mechanical, contact, and hydrodynamic processes in the bearing assembly and damping package, as well as parametric analysis of the effect of design characteristics on the dynamic response of the system. The article develops a multiphysical model of a damping support that implements the interaction of rolling elements, elastic-dissipative elements and a hydrodynamic medium, and studies the effect of the number of bands and corrugations of the damping package on the power and frequency characteristics of the support. The simulation results obtained on the basis of the developed model make it possible to quantify the effect of the design parameters of the damping bearings on the vibration stability of the rotor and can be used in the design, optimization and virtual prototyping of the support units of gas turbine engines.

**Keywords:** virtual test facility, gas turbine engine, damping supports, multiphysical model, hydrodynamic model.

**For citation:** Zubkov N.V. A systematic approach to research parameters of gas turbine engine supports: a multiphysical model of a damping support. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(4). (In Russ.). *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(4). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2236> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.010

## Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) характеризуются неуклонным ростом эксплуатационных требований со стороны авиационной, газоэнергетической и промышленной отраслей. Увеличение удельных мощностей, переход к более высоким частотам вращения и рабочим температурам, а также ужесточение нормативов по надежности и ресурсу напрямую предъявляют новые вызовы к методам исследования, моделирования и анализа лопаточных агрегатов, в том числе, опорных узлов роторов.

*Анализ поставленной задачи.* На сегодняшний день основная проблема заключается в существующем методологическом разрыве между высокоточными, но вычислительно дорогими моделями на базе метода конечных элементов (МКЭ), используемыми при проектировании, и необходимостью оперативного анализа поведения опор в реальных условиях эксплуатации и на испытательных стендах [1, 2]. МКЭ-модели, способные эффективно описывать сложные контактные взаимодействия в подшипниковых узлах, обладают слишком высокой вычислительной сложностью для применения в задачах анализа в реальном масштабе времени (real-time) [3, 4].

В то же время существующие упрощенные аналитические модели с линеаризованными характеристиками жесткости и демпфирования не позволяют достоверно воспроизводить переходные процессы [5, 6], нестационарные режимы и эффекты, обусловленные изменением условий работы узла (питание масляной системы, механические и температурные нагрузки) [7, 8].

В настоящей работе предлагается системный подход к исследованиям демпфирующих опор ГТД, основанный на интеграции библиотек Simscape [9, 10] и Multibody среды MATLAB Simulink<sup>1,2</sup>.

Основной задачей разработки информационно-измерительного комплекса является формирование физически обоснованной расчетной модели опорного узла, в которой поведение тел качения, сепаратора, колец и демпфирующего пакета описывается с учетом их упругих и диссипативных свойств, что в конечном итоге

<sup>1</sup> Борисов И.И., Колюбин С.А. *Имитационное моделирование мехатронных систем*. Санкт-Петербург: Университет ИТМО; 2020. 103 с.

<sup>2</sup> Ждахин И.Л. *Моделирование механических систем в пакете MATLAB-Simulink*. Екатеринбург: УрФУ; 2016. 185 с.

позволит проводить комплексный анализ его динамического поведения с высокой степенью достоверности.

### Материалы и методы

*Объект исследования.* Демпфирующая опора газотурбинного двигателя (Рисунок 1) представляет собой узел конструкции, предназначенный для управления колебательными процессами ротора за счет контролируемого рассеивания вибрационной энергии. Она сочетает в себе элементы упругости и вязкого демпфирования, формируя регулируемую динамическую связь между валом и корпусом двигателя. Благодаря этому опора снижает амплитуды вибраций в широком диапазоне режимов работы, стабилизирует вращение ротора при неуравновешенности и предотвращает передачу колебаний на несущие конструкции.

Исследование данных типов опор направлено на анализ ее динамических характеристик, нелинейных эффектов взаимодействия с ротором и влияния параметров демпфирования на общую вибронегруженность ГТД.

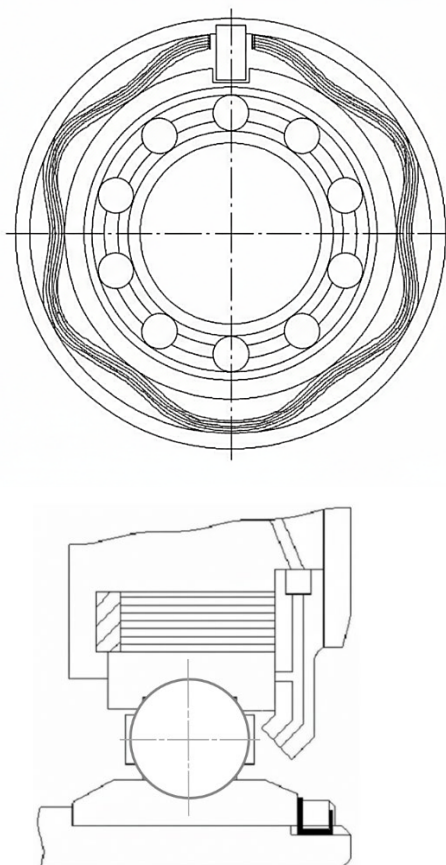


Рисунок 1 – Демпфирующая опора ГТД  
 Figure 1 – Damping support of a gas turbine engine

*Модель подшипникового узла.* Основу расчетной модели составляет пространственная механическая модель (Рисунок 2), отражающая конфигурацию и кинематические связи между основными элементами – внутренним кольцом (IR), наружным кольцом (OR), телами качения (шариками) и сепаратором (Cage).

Для воспроизведения сил контакта между телами качения и кольцами использованы специальные блоки (Ball Outer Race Force, Ball Inner Race Force),

реализующие контакт с учетом геометрии (Рисунок 3). Поведение сепаратора моделируется как отдельная кинематическая цепь, отражающая его вращательное движение, а также взаимодействие с телами качения и кольцами.

В Simscape реализована параллельная модель подшипника на базе стандартного блока Bearing, где задаются эквивалентные параметры жесткости, демпфирования и потерь (Рисунок 4). Связь двух моделей осуществляется через интерфейс Rotational Multibody, обеспечивающий идентичные условия нагружения и характер динамического отклика в обеих средах.

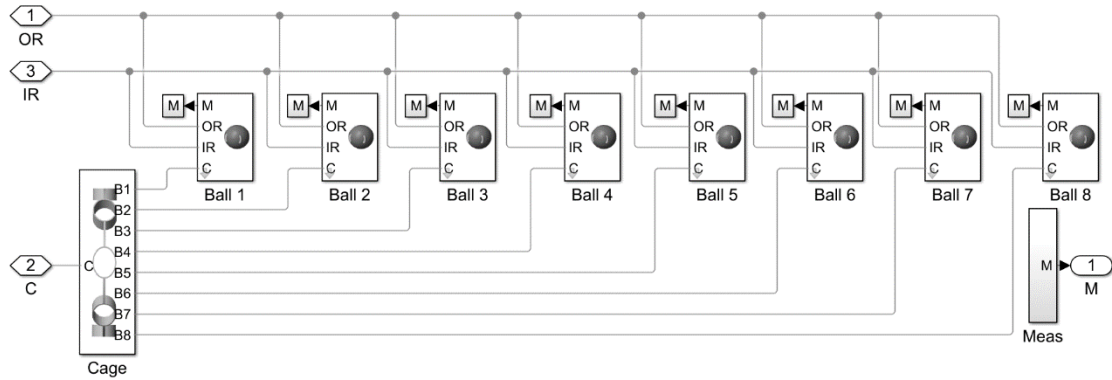


Рисунок 2 – Модель подшипникового узла в Multibody  
 Figure 2 – Bearing assembly model in Multibody

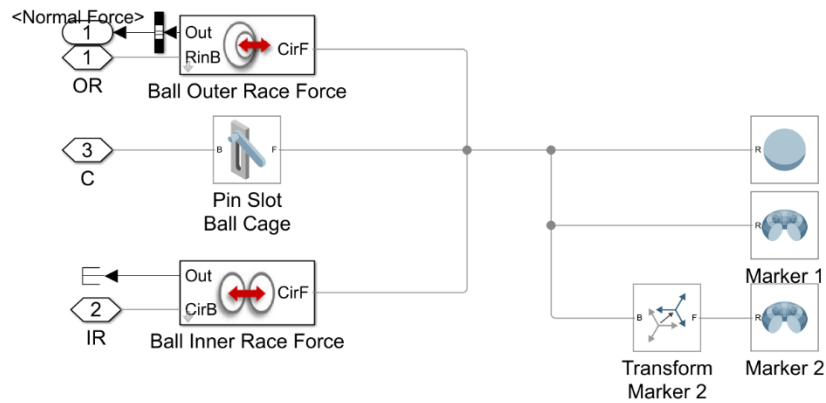


Рисунок 3 – Модель взаимодействия тел качения в Multibody  
 Figure 3 – Model of rolling element interaction in Multibody

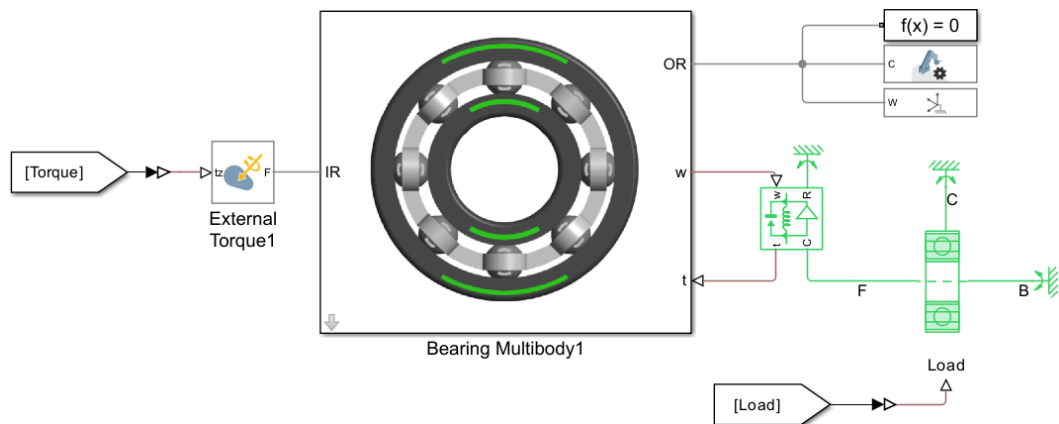


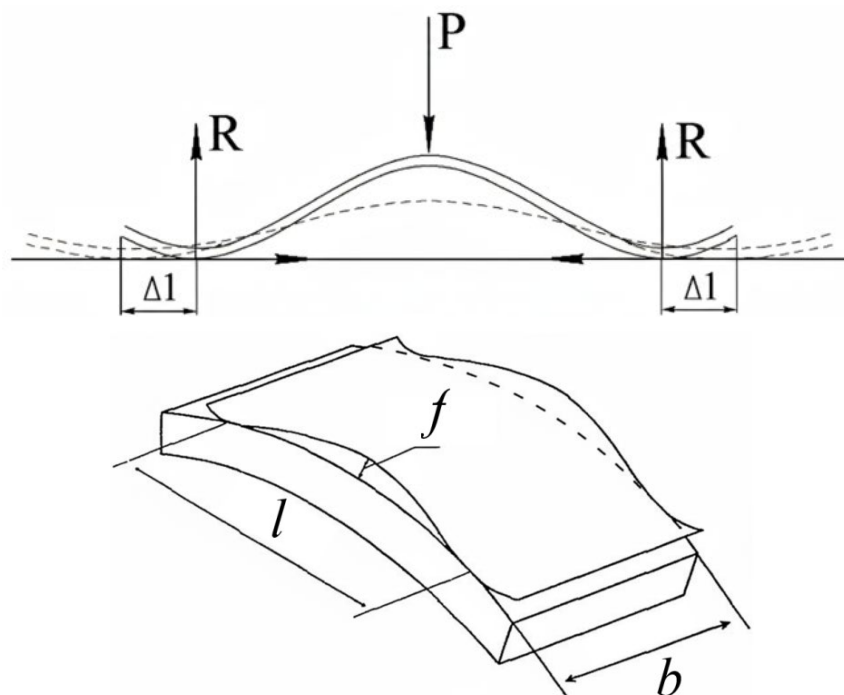
Рисунок 4 – Интегрированная модель подшипникового узла (Simscape + Multibody)  
 Figure 4 – Integrated model of the bearing assembly (Simscape + Multibody)

Такая интеграция позволяет согласовать численные решения, обеспечить возможность оценки расхождений в динамике и характеристиках узла при использовании разных уравнений состояния и математических аппаратов. Кроме того, это расширяет инструментарий управления и анализа сигналов за счет средств Simulink, дает возможность применять функционал Simscape для глубокого моделирования гидродинамических и тепловых эффектов, а также сравнивать получаемые результаты и валидацию моделей на разных уровнях физической детализации.

*Демпфирующий пакет.* Работа узла основана на следующем принципе. Под действием постоянных и переменных нагрузок ротор вызывает упругий прогиб гофрированного пакета. В зоне приложения усилия зазор в гофрах гидростатической опоры сокращается, тогда как на противоположной стороне – увеличивается. Из-за этого давление рабочей жидкости возрастает в одних камерах и уменьшается в других. Возникающий перепад приводит к появлению выравнивающей силы, которая компенсирует текущий эксцентриситет ротора и стремится вернуть его в исходное положение.

Каждая камера отделена от соседних лентами гофрированного пакета, тем самым исключается перетеканием масла в окружном направлении. Это конструктивное решение значительно уменьшает общий расход смазочного материала через опору.

Дополнительно давление в полостях действует на каждый пролет гофрированного пакета как почти равномерная сжимающая нагрузка. Чем сильнее деформирован пролет, тем выше создаваемое давление. В результате улучшаются демпфирующие свойства устройства и повышается его способность гасить вибрации (Рисунок 5).



$P$  – внешнее воздействие (давление),  $R$  – реакция в контактных поверхностях,  
 $l$  – длина гофры,  $\Delta l$  – изменение длины гофры,  $f$  – высота гофры,  
 $b$  – ширина гофрированной ленты.

Рисунок 5 – Модель взаимодействия тел качения в Multibody  
 Figure 5 – Model of rolling element interaction in Multibody

Оценка рассеянной за цикл энергии и жесткость демпфирующего пакета равны:

$$\Delta W = 8 \frac{c_0 n}{2k+1} \cdot \delta \cdot \mu \cdot \left( \frac{1}{\pi} + \frac{n^2}{4} \cdot \frac{f}{D} \right),$$

$$c = \frac{c_0 n}{2k+1} \left[ \frac{1}{2} + 2 \cdot \mu \cdot \frac{\delta}{\tilde{y}} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{n^2}{4} \cdot \frac{f}{D} \right) \right],$$

$$\text{если } \delta - \tilde{y} > \frac{f}{2},$$

$$\Delta W = 8 \cdot \mu \cdot n \cdot (2k + 1) \cdot c_0 \delta \cdot \left( \frac{1}{\pi} + \frac{n^2}{4} \cdot \frac{f}{D} \right),$$

$$c = c_0 n \cdot (2k + 1) \left[ \frac{1}{2} + 2 \cdot \mu \cdot \frac{\delta}{\tilde{y}} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{n^2}{4} \cdot \frac{f}{D} \right) \right],$$

где  $D$  – средний диаметр демпфирующего пакета, мм;  $\delta$  – прижатие каждого пакета (изменение высоты гофра), мм;  $\mu$  – коэффициент трения;  $f$  – начальный прогиб (высота гофра), мм;  $c_0 = 2\pi^4 \frac{El}{t_3}$  – упругая жесткость гофра;  $t$  – шаг гофра, шт;  $n$  – количество гофр, шт;  $k$  – количество пластин ( $k$  – гладких и  $k + 1$  – гофрированных), шт.

*Модель демпфирующего пакета.* Модель демпфирующего пакета представлена совокупностью параллельно соединенных элементов, описывающих кинематические связи реальных гофрированных лент (Рисунок 6).

Для каждой ленты задаются параметры геометрического профиля (длины, сечения, радиуса изгиба), а также индивидуальные коэффициенты демпфирования и жесткости. Входные сигналы отражают динамическое воздействие – перемещения и силы, передаваемые от подшипникового узла через контакты с опорными кольцами. Модель учитывает индивидуальный отклик каждой ленты на приложенную нагрузку.

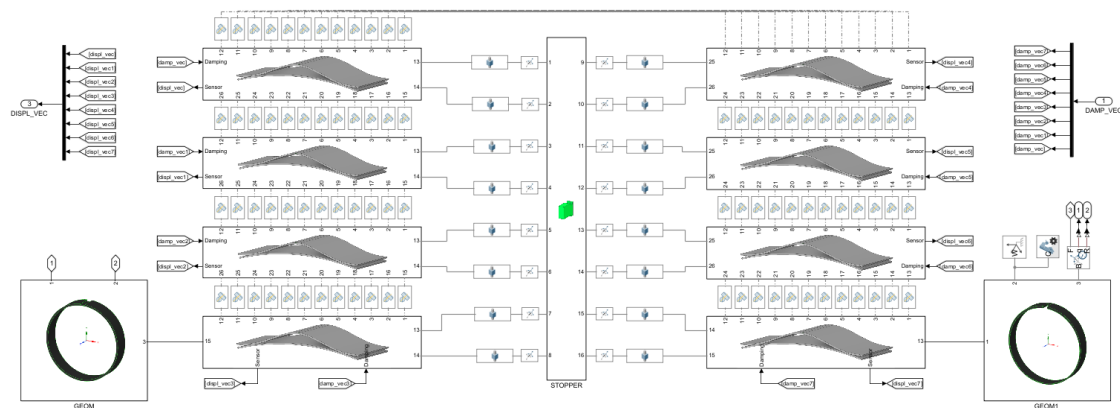


Рисунок 6 – Модель демпфирующего пакета в Multibody  
Figure 6 – Model of the damping package in Multibody

В модели реализована система измерения перемещений и сил реакций для каждой ленты в пакете. Модель допускает быструю перенастройку числа элементов, их характеристик и сценариев нагружения – для оптимизации конструкции или изучения граничных режимов.

В среде Simscape построена подробная физическая модель демпфирующего пакета, предназначенная для анализа совместной работы механических и гидродинамических подсистем при смятии гофрированных элементов (Рисунок 7).

Каждый гофр (сегмент демпфирующей ленты) представлен индивидуальным механическим звеном с упруго-диссипативными свойствами.

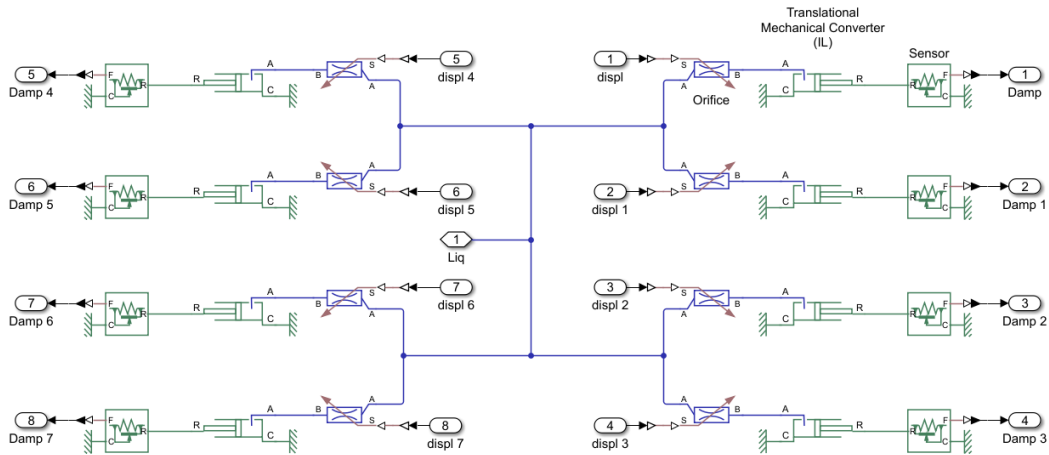


Рисунок 7 – Физическая модель кольца демпфирующего пакета в Simscape  
 Figure 7 – Physical model of the damping package ring in Simscape

В схеме реализованы гидравлические блоки (Orifice), которые моделируют потери энергии, возникающие при перемещении жидкости в зазорах и каналах демпфирующего слоя. Связь между механическим и гидродинамическим доменом обеспечивается через преобразователь перемещения (Translational Mechanical Converter), который преобразовывает давление/скорость на гидравлической ветви в механическое движение.

Для каждого сегмента предусмотрены сенсоры перемещения и усилия, позволяющие регистрировать степень смятия, величину демпфирования и характер отклика под нагрузкой.

Все сегменты демпфирующего кольца объединены в единую структуру с центральным гидравлическим каналом, что позволяет моделировать коллективное и индивидуальное поведение элементов при различных сценариях нагружения.

*Виртуальный испытательный комплекс.* Реализуемый на базе многофизической модели подшипникового узла с демпфирующим пакетом виртуальный испытательный комплекс в Simulink (Рисунок 8) ориентирован на выполнение расчетных исследований в режиме real-time, что обеспечивает возможность интерактивного изменения параметров в ходе эксперимента и анализа переходных процессов.

Панель управления включает визуальные элементы для оперативного изменения амплитудных и силовых параметров, переключения между типами нагрузок и симуляции работы испытательного оборудования.

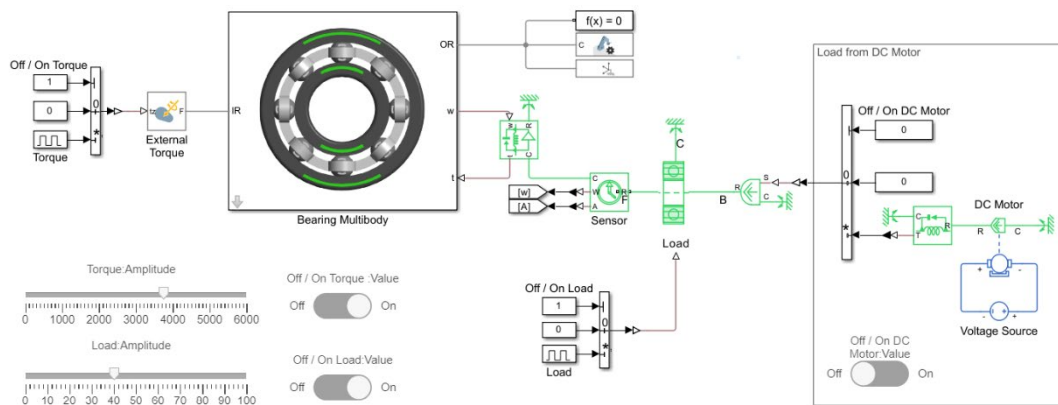


Рисунок 8 – Модель виртуального испытательного комплекса в Simulink  
 Figure 8 – Model of the virtual test bench in Simulink

Модель поддерживает динамическое переключение между режимами «идеального» и реального приводного воздействия (DC Motor).

Входные воздействия реализуются через генераторы управления моментом (Torque) и нагрузкой (Load), которые регулируются слайдерами и переключателями, позволяющими задавать амплитуду, форму и ON/OFF состояние силового воздействия в реальном времени.

Гидродинамическая модель виртуального стенда (Рисунок 9) реализует комплексную схему управления и анализа подачи смазочного материала (масла) в демпфирующий узел подшипниковой опоры, построенную в среде Simscape.

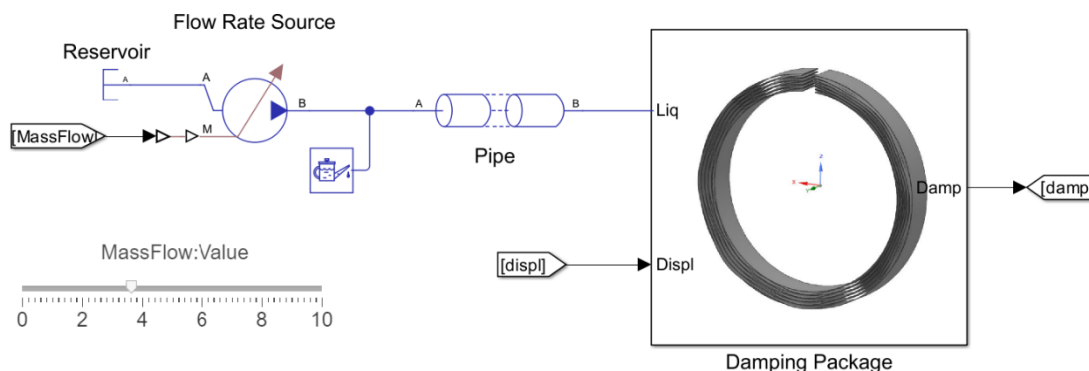


Рисунок 9 – Гидродинамическая модель виртуального испытательного комплекса в Simscape  
 Figure 9 – Hydrodynamic model of the virtual test bench in Simscape

Система позволяет в реальном времени варьировать массовый поток жидкости, отслеживать его динамику и исследовать влияние расхода на характеристики демпфирования.

### Результаты и обсуждение

*Результаты расчётно-экспериментального моделирования.* В разделе представлены результаты расчётно-экспериментального моделирования подшипникового узла опоры газотурбинного двигателя, выполненного на основе разработанной системной модели.

Целью моделирования является исследование влияния конструктивных параметров демпфирующего элемента на динамическое поведение опоры, включая силовые характеристики, уровень диссипации энергии, эквивалентное демпфирование, а также отклик системы в частотной области.

В качестве варьируемых параметров рассматриваются геометрические характеристики гофрированного пакета, такие как число лент и число гофр.

Результаты моделирования (Рисунок 10) показали, что увеличение числа лент приводит к росту эквивалентной жесткости и уровня внутренних потерь в пакете, что выражается в увеличении силовой реакции, рассеянной энергии за цикл деформации и эквивалентного демпфирования. При этом основное влияние числа лент проявляется в снижении резонансных амплитуд вибрационного отклика, тогда как частотное положение резонанса изменяется незначительно.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что варьирование числа лент позволяет эффективно управлять несущей способностью и базовым уровнем демпфирования опоры без существенного изменения ее динамической настройки по частоте. Это подтверждает корректность и чувствительность разработанной модели к изменениям геометрических параметров демпфирующего пакета.

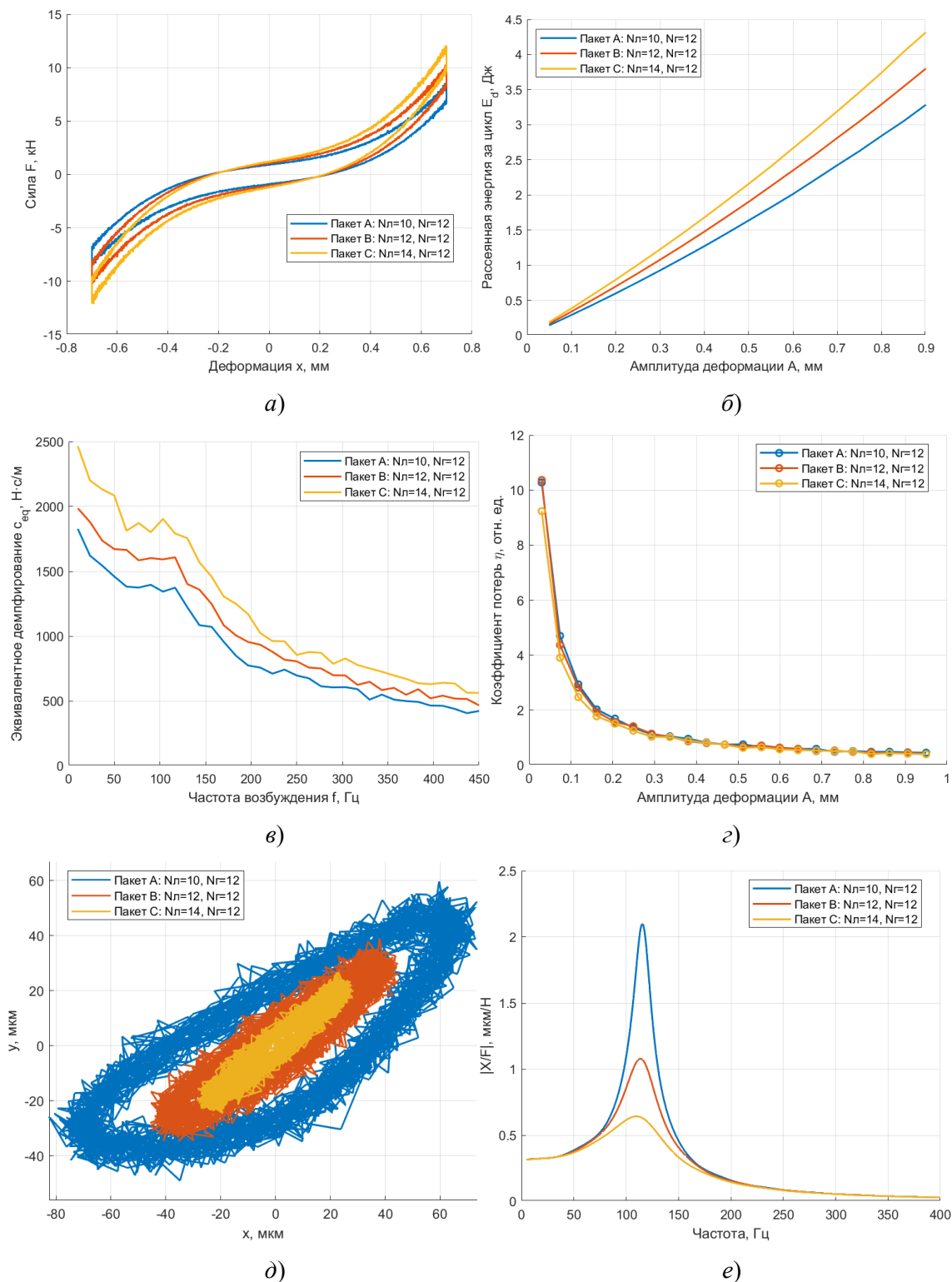


Рисунок 10 – Результаты определения характеристик демпфирующего пакета с различным количеством вогфрированных лент: *a* – нелинейные силовые характеристики; *б* – рассеянная за рабочий цикл энергия; *в* – эквивалентное демпфирование; *г* – коэффициент потерь; *д* – орбиты прецессий; *е* – АЧХ

Figure 10 – Results of determining the characteristics of the damping package with different numbers of corrugated strips: *a* – nonlinear power characteristics; *b* – energy dissipated during the working cycle; *c* – equivalent damping; *d* – loss factor; *e* – precession orbits; *f* – frequency response

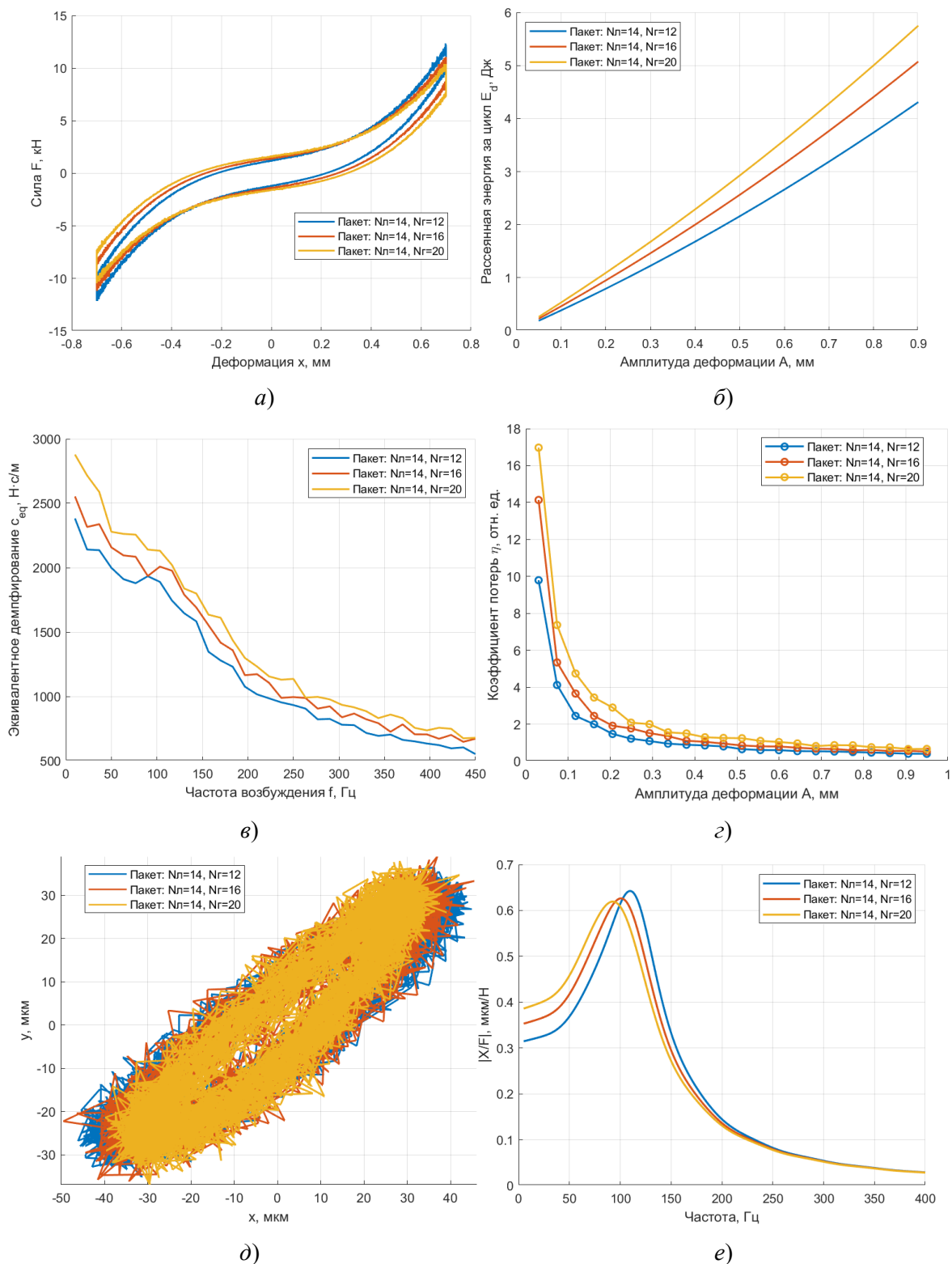


Рисунок 11 – Результаты определения характеристик демпфирующего пакета с различным количеством гофр: *a* – нелинейные силовые характеристики; *b* – рассеянная за рабочий цикл энергия; *c* – эквивалентное демпфирование; *d* – коэффициент потерь; *e* – орбиты прецессий; *f* – АЧХ

Figure 11 – Results of determining the characteristics of the damping package with different numbers of corrugations: *a* – nonlinear power characteristics; *b* – energy dissipated during the working cycle; *c* – equivalent damping; *d* – loss factor; *e* – precession orbits; *f* – frequency response

В результате исследования оценки влияния количества гофр в пакете (Рисунок 11) определено, что увеличение числа гофр сопровождается снижением эквивалентной жесткости пакета и одновременно существенным ростом его демпфирующих свойств.

Это выражается в увеличении рассеянной энергии за цикл, росте коэффициента потерь и эквивалентного демпфирования, а также в уменьшении размеров орбит прецессии и амплитуд резонансного отклика. В отличие от изменения числа лент, варьирование числа гофр приводит также к смещению резонансной частоты в область более низких значений.

Таким образом, число гофр является более чувствительным параметром с точки зрения формирования демпфирующих свойств опоры и подавления вибраций. А использование разработанной модели позволяет проводить параметрические исследования без необходимости изготовления физических прототипов на каждом этапе проектирования, что существенно снижает трудоемкость и временные затраты на анализ. Модель обеспечивает возможность быстрого получения количественных оценок динамических характеристик при изменении конструктивных параметров, а также выявления закономерностей влияния геометрии демпфирующего пакета на вибрационную устойчивость опоры.

### Заключение

В рамках данной работы реализован подход к многофизическому моделированию демпфирующих опор ГТД, основанный на интеграции библиотек Simscape и Multibody программного пакета MATLAB Simulink. Предложенная имитационная модель опорного узла охватывает основные физические аспекты его работы: упругие, диссипативные и гидродинамические процессы, а также служит инструментальной базой для дальнейших исследований, разработки диагностических методик, тестирования новых технических решений, виртуального прототипирования и оценки эффективности опор в различных условиях эксплуатации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Фалалеев С.В. Тенденции исследования гидродинамического демпфирования в опорах роторов ГТД. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2017;(2):63–68.  
Falaleev S.V. Trends in research of hydrodynamic damping in rotor supports of gas turbine engines. *Russian Aeronautics*. 2017;60(2):229–235. <https://doi.org/10.3103/S1068799817020118>
2. Сорокин Ф.Д., Хао Ч. Анализ контактного взаимодействия цилиндрического ролика с кольцами подшипника на основании конечно-элементного моделирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018;(11):4–13. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-4-13>  
Sorokin F.D., Hao Zh. An Analysis of Contact Interaction of the Cylinder Roller with the Bearing Races Using the Finite Element Method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018;(11):4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-4-13>
3. Худяков К.В., Долгополов Д.Д. Исследование возможностей систем автоматизированного проектирования для прочностных расчетов деталей подшипников качения. *Современные наукоемкие технологии*. 2023;(8):71–76. <https://doi.org/10.17513/snt.39733>

- Khudyakov K.V., Dolgoplov D.D. Research of the capabilities of CAE systems for strength calculations of rolling bearings parts. *Modern High Technologies*. 2023;(8):71–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.39733>
4. Шмелев А.В., Котов С.Ю., Беляев Г.Я. Численное исследование напряженно-деформированного состояния деталей подшипников качения. *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого*. 2017;(1):27–33.
  5. Барманов И.С. Перспективные направления исследований динамических характеристик упругодемпферных опор роторов ГТД. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2014;(2):29–32.  
Barmanov I.S. Promising lines in investigating the dynamic characteristics of GTE rotor elastodamping supports. *Russian Aeronautics*. 2014;57(2):148–153. <https://doi.org/10.3103/S1068799814020068>
  6. Леонтьев М.К., Кутаков М.Н. Выбор моделей гидродинамических демпферов в задачах роторной динамики газотурбинных двигателей. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2017;16(3):81–93. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-81-93>  
Leontiev M.K., Kutakov M.N. Selecting a squeeze film damper model for solving problems of gas turbine engine rotor dynamics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017;16(3):81–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-81-93>
  7. Задорожная Е.А., Лисина Р.Ф., Прокопьев К.В. Обзор методов оценки коэффициентов жесткости и демпфирования опор скольжения. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение»*. 2025;25(2):22–39. <https://doi.org/10.14529/engin250203>  
Zadorozhnaya E.A., Lisina R.F., Prokop'ev K.V. Approaches of estimating the stiffness and damping coefficients of journal bearings. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering Industry"*. 2025;25(2):22–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/engin250203>
  8. Беляев А.Н., Шевченко С.А. Особенности упрощенного конечно-элементного моделирования подшипниковых опор. *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2020;23(4):46–51. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-4-46-51>  
Belyaev A.N., Shevchenko S.A. Features of Simplified Roller Bearings Simulation Using Finite Element Method. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2020;23(4):46–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-4-46-51>
  9. Корнаев А.В., Корнаев Н.В., Савин Л.А., Корнаева Е.П. Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings. *International Journal of Rotating Machinery*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9196701>
  10. Корнаев А.В., Корнаев Н.В., Корнаева Е.П., Савин Л.А. Построение траекторий движения ротора с применением нейросетевого программного модуля. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017;(3):20–28.  
Kornaev A.V., Kornaev N.V., Kornaeva E.P., Savin L.A. Formation of rotor motion path using neuronet programming module. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2017;(3):20–28. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Зубков Николай Валерьевич**, аспирант **Nikolay V. Zubkov**, Postgraduate at the кафедры «Авиационные приборы и устройства», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация, Department of Aviation Instruments and Devices, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, the Russian Federation.  
*e-mail:* [slava.soko2016@yandex.ru](mailto:slava.soko2016@yandex.ru)  
ORCID: [0009-0001-9722-5032](https://orcid.org/0009-0001-9722-5032)

*Статья поступила в редакцию 18.02.2026; одобрена после рецензирования 07.04.2026; принята к публикации 14.04.2026.*

*The article was submitted 18.02.2026; approved after reviewing 07.04.2026; accepted for publication 14.04.2026.*