

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-2-56-66

УДК 621

**В. А. ПОПКОВСКИЙ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## КОМПЛЕКСНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСОЛЬНОГО КРОНШТЕЙНА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### Аннотация

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов работоспособности консольного кронштейна с целью минимизации материалоемкости данного изделия.

### Ключевые слова:

компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, минимизация материалоемкости.

### Для цитирования:

Попковский, В. А. Комплексное имитационное моделирование работоспособности консольного кронштейна при осуществлении оптимизационного проектирования / В. А. Попковский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 56–66.

### Введение

Предметом оптимизационного проектирования выступал консольный

кронштейн, являющийся составной частью системы «Консольная опора электродвигателя» (рис. 1).

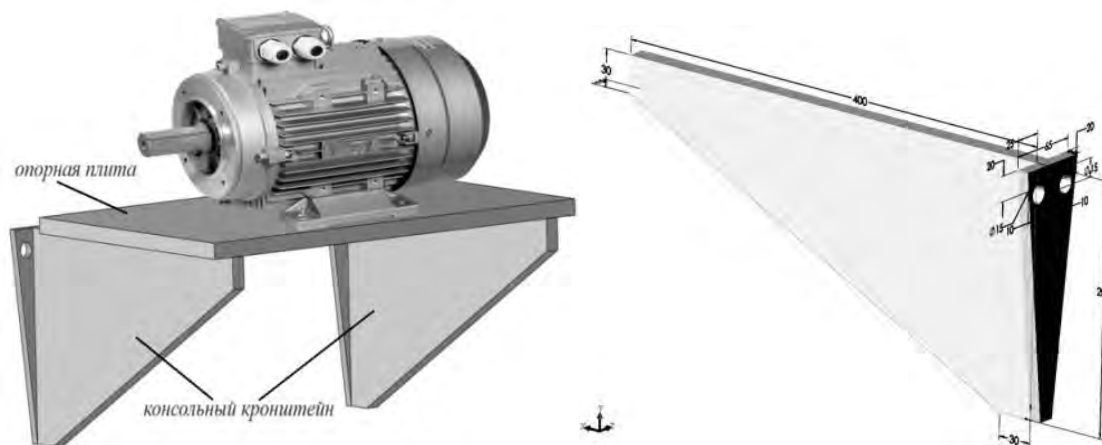


Рис. 1. Консольная опора электродвигателя

Имитационное моделирование работоспособности рассматриваемого объекта осуществлялось в компьютерной системе Solid Works, в рамках которой реализован алгоритм численного метода – метода конечных элементов, хоро-

шо зарекомендовавшего себя при решении сложных прикладных задач [1, 2].

При проведении компьютерного моделирования исходили из того, что закрепление консольного кронштейна осуществляется по контуру отверстий,

находящихся на задней стенке кронштейна. Кроме того, запрещаются перемещения перпендикулярно задней поверхности этого фрагмента (см. рис. 1).

Источником внешней нагрузки на консольную опору является вес электродвигателя (см. рис. 1) и закрепленного на валу оборудования. Кроме того, имеет место циклическое нагружение, возникающее в результате использования оборудования, при частоте вращения вала двигателя 5000 об/мин. В данном конкретном случае проектирования внешняя нагрузка принималась равномерно распределенной по верхней поверхности части опорной плиты, на которой расположен электродвигатель, и равной 1000 кг (с учетом возможного биения от наличия эксцентрика), при этом коэффициент асимметрии цикла нагружения составляет

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$$

как наиболее неблагоприятный с точки зрения усталостной прочности изделия.

Учитывая условия эксплуатации консольного кронштейна, а также поставленную задачу проектирования – определение оптимальных типоразмеров этого изделия с позиций минимизации материалоемкости, целесообразно произвести следующие виды имитационного моделирования:

1) статический анализ консольной опоры электродвигателя. На базе данного анализа разработать пути оптимизации конструкции консольного кронштейна;

2) оптимизацию конструктивных форм и типоразмеров консольного кронштейна;

3) учитывая, что в результате проведенной оптимизации жесткостные свойства консольного кронштейна и всей опоры электродвигателя в целом могут существенно измениться, необходимо провести анализ по определению собственных форм и частот колебаний.

Этот анализ позволяет убедиться в отсутствии резонансных явлений;

4) снижение жесткостных характеристик может также негативно сказаться на устойчивости рассматриваемого объекта, поэтому анализ на устойчивость вполне уместен;

5) поскольку в процессе эксплуатации изделия имеет место циклическое нагружение, необходимо также провести анализ по проверке усталостной прочности.

### ***Разработка твердотельной модели консольной опоры электродвигателя***

При разработке твердотельной модели консольной опоры электродвигателя были применены следующие допущения:

1) отверстия в опорной пластине для крепления электродвигателя удалены, поскольку их влияние несущественно с точки зрения напряженно-деформированного состояния изделия в целом;

2) сам электродвигатель заменен массивным телом (параллелепипедом), имеющим схожие массово-габаритные размеры;

3) материал деталей сборки – «Простая углеродистая сталь»;

4) консольные кронштейны и опорная плита жестко соединены друг с другом посредством сварки.

В результате использования указанных допущений, а также вышеприведенных исходных данных была создана твердотельная модель анализируемого объекта (рис. 2).

### ***Проведение статического анализа напряженно-деформированного состояния разрабатываемого объекта***

Для приведенной твердотельной модели в соответствии с исходными данными были заданы условия закрепления и нагружения, создана конечно-элементная модель и проведен статический анализ (рис. 3).

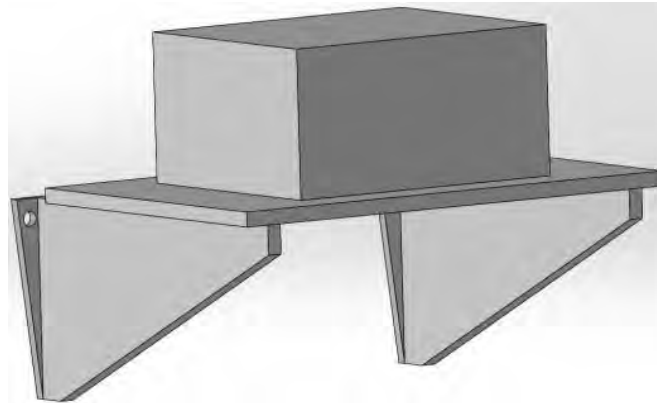


Рис. 2. Твердотельная модель разрабатываемого объекта

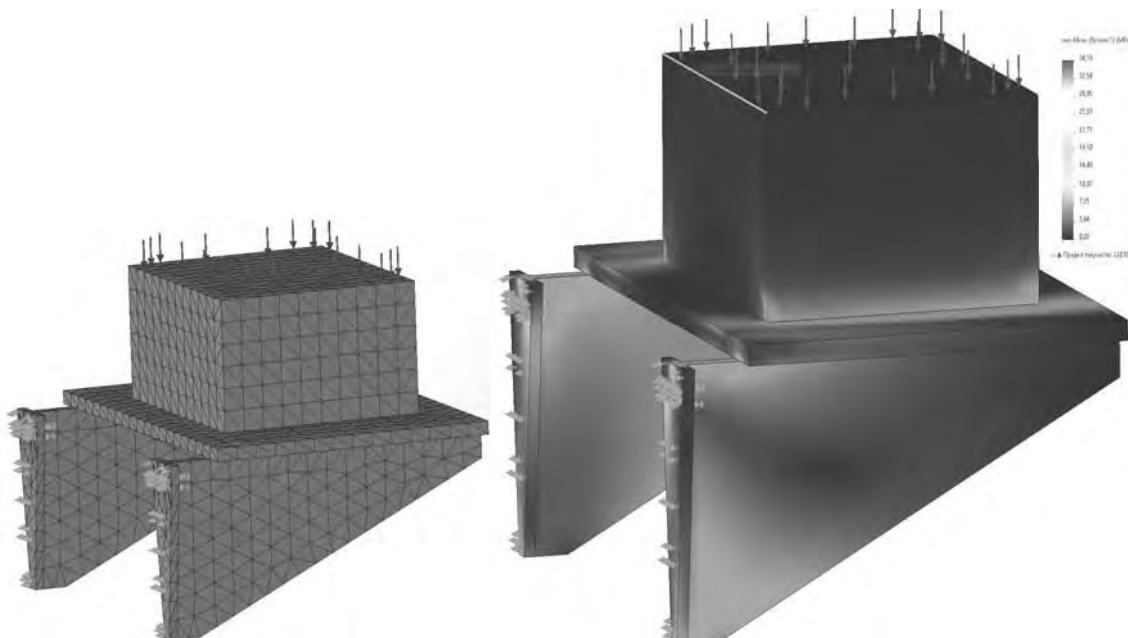


Рис. 3. Конечно-элементная модель консольной опоры с имитацией электродвигателя и распределение напряжений Von Mises по наружной поверхности изделия

Здесь следует отметить, что напряжения Von Mises – это интегральный показатель, который учитывает все шесть компонент напряжений.

Эпюра напряжений Von Mises позволяет в целом оценивать уровень нагруженности материала изделия во всех точках его объема. Как видно из эпюры (см. рис. 3), напряжения в исследуемом объекте не превышают значения 36,18 МПа при значении предела текучести материала  $\sigma_T = 220,59$  МПа.

Из этого обстоятельства можно сделать вывод о том, что консольный кронштейн является явно недогруженной деталью и нуждается в реконструкции.

***Разработка мероприятий по усовершенствованию конструктивно-технологических параметров изделия***

Поскольку целью данного проекта являлась минимизация массы консоль-

ных кронштейнов, используя инструментарий SolidWorks, были определены весовые характеристики рассматриваемого изделия на начальном этапе проектирования, в результате чего было установлено, что масса данного объекта составляет 6,277 кг.

Кроме того, как видно из рис. 3, объект, подлежащий усовершенствованию, – консольный кронштейн – является слабо нагруженной деталью, поэтому вполне очевидно, что без особого ущерба для жесткостных и прочностных показателей его конструкцию можно изменить следующим образом (рис. 4).

Для определения габаритных размеров полости в консольном кронштейне необходимо провести дополнительный анализ по параметрической оптимизации с целью минимизации его материалоемкости. При проведении параметрической оптимизации с целью экономии машинного времени и оперативной памяти ЭВМ консольный кронштейн рассматривался отдельно, а прикладываемая к нему нагрузка равнялась половине приложенной ко всей сборке (см. рис. 4).

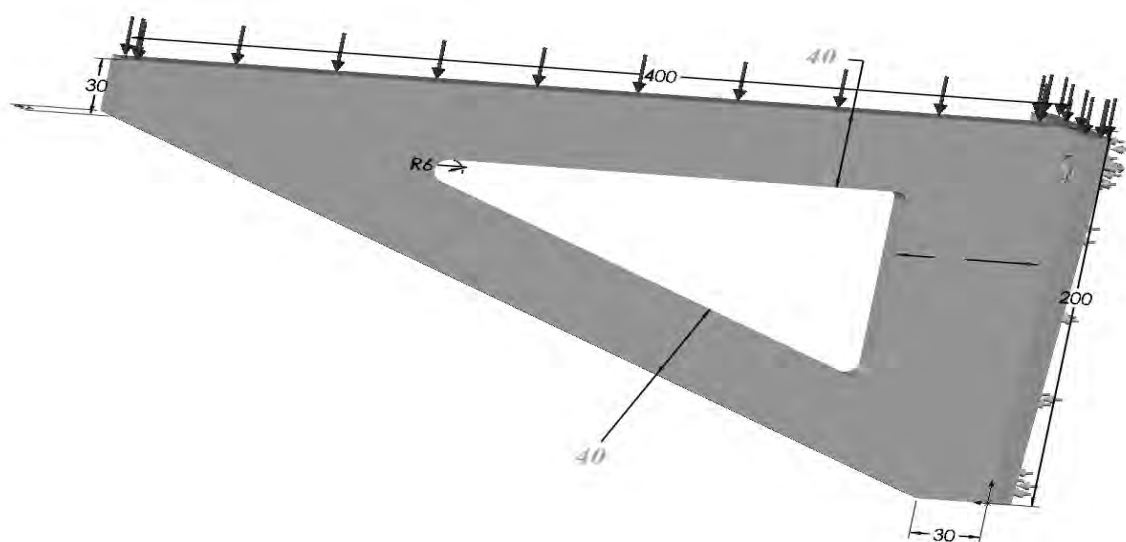


Рис. 4. Схема оптимизационных испытаний модифицированного консольного кронштейна

Варьируемыми параметрами для проведения оптимизационных испытаний были назначены выделенные размеры кронштейна (см. рис. 4). Эти размеры выбраны предварительно. Они в результате оптимизационной процедуры будут редактироваться. Данные размеры характеризуют расстояния между параллельными линиями наружного контура кронштейна и линиями внутренней полости.

Проведение оптимизационных мероприятий осуществлялось на основании использования следующих показателей – целевой функцией являлось

определение минимума материалоемкости консольного кронштейна, напряжения, возникающие в оптимизированном изделии, не должны превышать 60 МПа. Выполненная процедура оптимизации включала в себя 98 сценариев различных вариантов размеров кронштейна. В результате были установлены оптимальные размеры кронштейна (рис. 5).

Вес оптимизированного кронштейна составил 4,089 кг, что на 34,9 % меньше, чем сплошного.

Дальнейший имитационный анализ в среде Solid Works Simulation будет осуществлен для определения собст-

венных частот и форм колебаний, устойчивости элементов конструкции и

выявления характеристик усталостной прочности изделия.

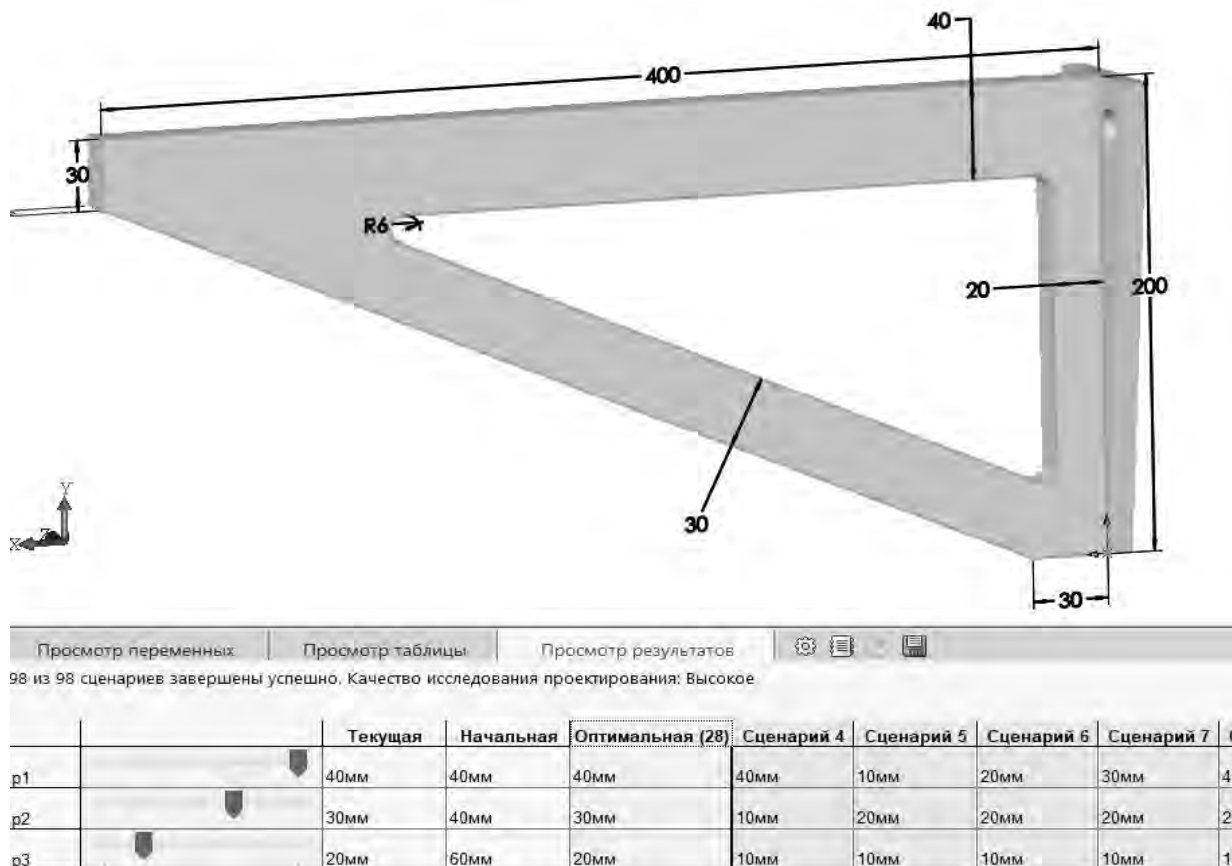


Рис. 5. Оптимизированные размеры консольного кронштейна

### Определение собственных частот и форм колебаний объекта исследований

Рассматриваемое изделие состоит из двух кронштейнов, опорной плиты, расположенной на поверхности кронштейнов, а также электродвигателя, эксплуатирующегося с частотой  $n = 5000$  об/мин вала. При наличии неуравновешенных масс, зафиксированных на валу данного электродвигателя, он может производить воздействие в виде возмущающей силы, циклически изменяющейся во времени. Это воздействие может оказывать негативное влияние на усталостную прочность изделия. Кроме того, при совпадении собственных частот конструкции с частотой вращения вала возможно возникновение

резонансных явлений, в результате которых резко возрастают амплитуда колебаний системы и действующие напряжения. Данные напряжения могут привести к преждевременному выходу оборудования из строя.

При проведении частотного анализа в SolidWorks Simulation необходимо запустить новое исследование – «Частота».

Следует отметить, что наибольший вклад в потенциальную энергию упругого деформирования вносят формы колебаний с наиболее низкими частотами. Этим формам соответствуют большие амплитуды, а следовательно, и большие напряжения и деформации. Поэтому в практике конечно-элементного анализа, как правило, ограничиваются тремя-пятью наиболее низкими

частотами.

В результате выполнения данного расчета была сформирована база дан-

ных по определению четырех частот и форм колебаний (рис. 6).



Рис. 6. Первая собственная частота и форма колебаний консольной опоры электродвигателя

Полученные первые четыре собственные частоты колебаний консольной опоры (выделена на рисунке рамкой) вместе с электродвигателем составляют 136,9; 167,27; 257,59 и 302,29 Гц соответственно, что существенно выше, чем частота 83,33 Гц от воздействия неуравновешенных масс электродвигателя. Это обстоятельство исключает вероятность возникновения резонансных явлений в анализируемой системе.

#### **Проверка консольной опоры электродвигателя на устойчивость**

В результате коррекции конструкции консольного кронштейна по данным параметрической оптимизации жесткостные характеристики его претерпели существенное изменение. Такой фрагмент его, как нижний раскос, испытывает значительные сжимающие нагрузки, поэтому в дополнение к уже

проведенным анализам необходимо еще выполнить имитационное моделирование на устойчивость.

Явление потери устойчивости свойственно фрагментам конструкций, у которых один либо два габаритных размера существенно меньше третьего. К таким объектам относятся, например, пластинки, оболочки, стойки, раскосы ферм и т. д.

При проведении испытания на устойчивость в SolidWorks Simulation необходимо запустить новое исследование – «Потеря устойчивости».

В результате проведения этого имитационного моделирования было определено значение коэффициента запаса устойчивости  $n_y$  (в SolidWorks Simulation этот параметр назван «Коэффициент нагрузки»). Как видно, в рассматриваемом примере (рис. 7) коэффициент запаса устойчивости  $n_y = 84,401$ .

Как видно из данных, приведенных на рис. 7, коэффициент запаса для

данной формы потери устойчивости значительно превышает единичное значение и, следовательно, требование по устойчивости исследуемого объекта

удовлетворяется. Для остальных форм потери устойчивости этот коэффициент еще больше.

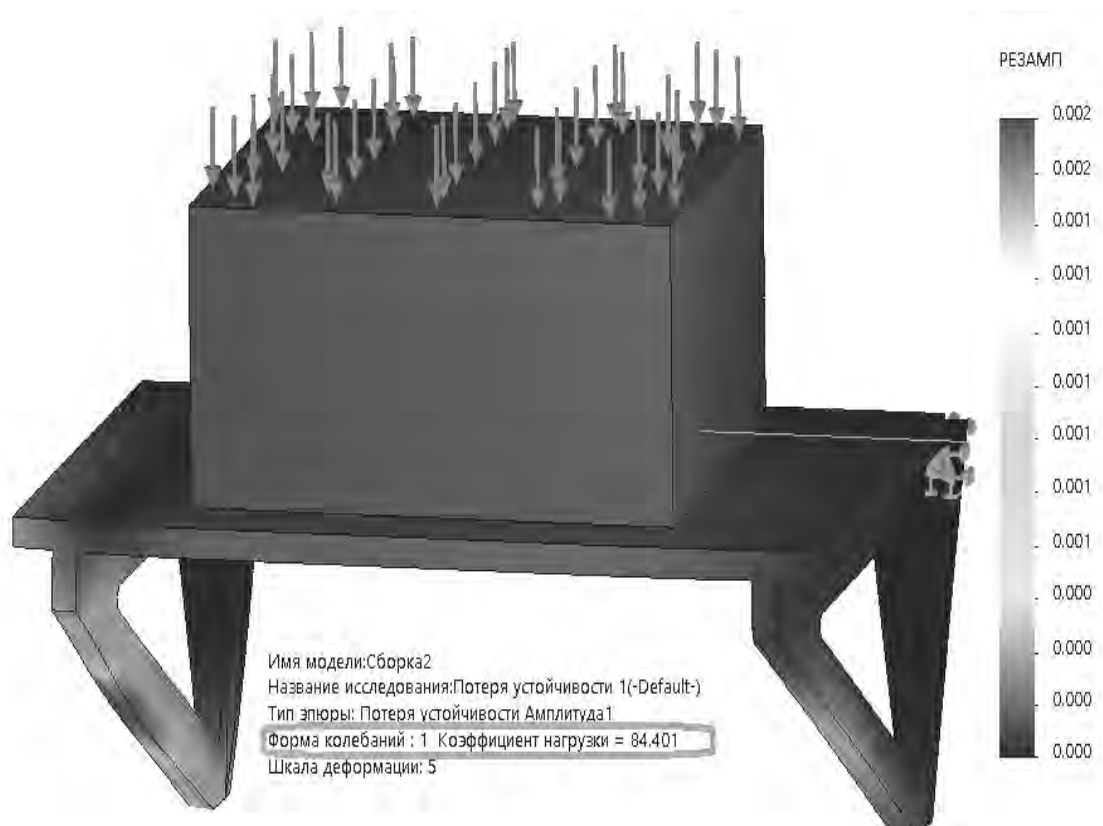


Рис. 7. Форма потери устойчивости и числовые значения эпюры первой формы (колебаний/амплитуд «РЕЗАМП»)

### **Анализ усталостной прочности консольной опоры электродвигателя**

В исходных данных к проектированию консольной опоры электродвигателя отмечалось, что в процессе эксплуатации изделия присутствует циклическое нагружение с коэффициентом асимметрии цикла  $r = -1$ .

Опыт эксплуатации различных конструкций показал, что изделия, испытывающие циклическое нагружение, могут разрушаться через определенный промежуток времени даже при напряжениях, значительно меньших предела прочности, без заметных остаточных деформаций. Это явление получило название «Усталость материала».

После запуска исследования Simu-

lation «Усталость» и активации раздела дерева исследований (Property Manager) «Нагрузка» необходимо заполнить во всплывающем меню исходные данные (рис. 8).

Как видно из рис. 8, рассматриваемое изделие предполагается эксплуатировать при базовом числе циклов  $N = 10000000$  и коэффициенте асимметрии цикла  $r = -1$  с присоединением к усталостным испытаниям *Статического анализа 1*.

Для усталостного анализа изделия также необходимы данные об усталостных испытаниях образцов (рис. 9), изготовленных из материала изделия, т. е. сведения о кривой Веллера (SN-кривой).

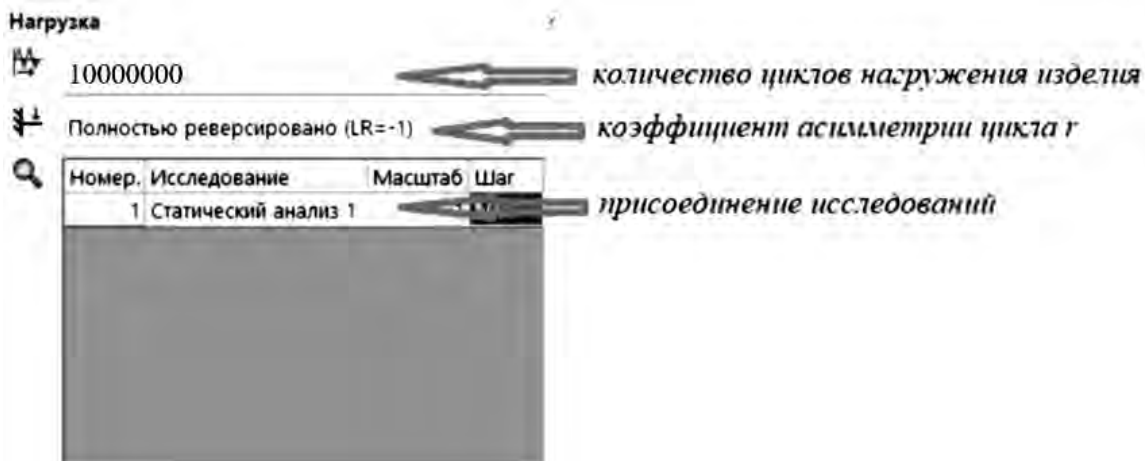


Рис. 8. Необходимая информация для проведения усталостных исследований

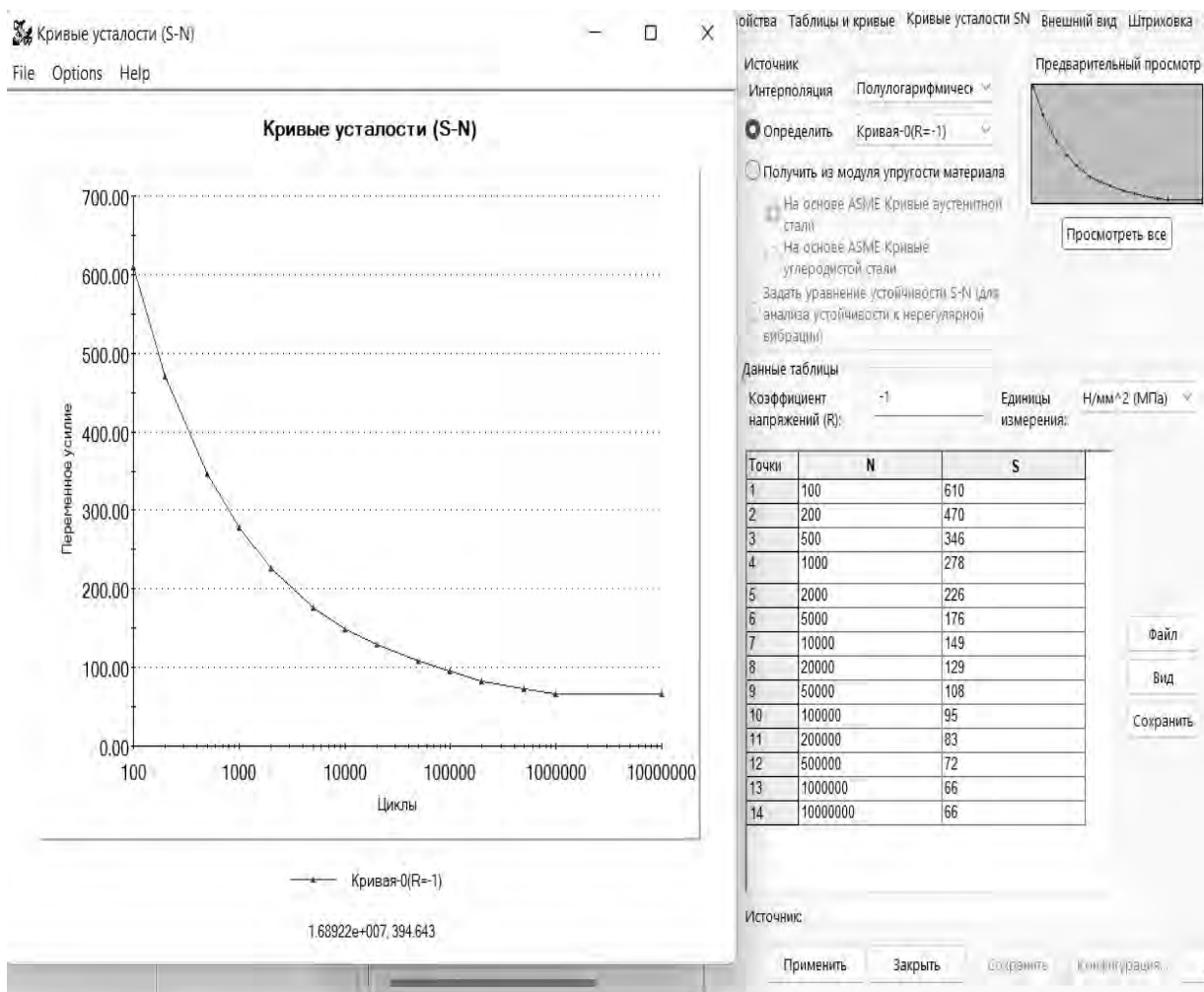


Рис. 9. Формирование SN-кривой (кривой Веллера)



После выполнения завершающего расчета была сформирована база результатов, содержащая информацию, приведенную на рис. 10.

На рис. 11 приведена эпюра запасов прочности различных зон анализируемого изделия за рассматриваемое число циклов нагружения.

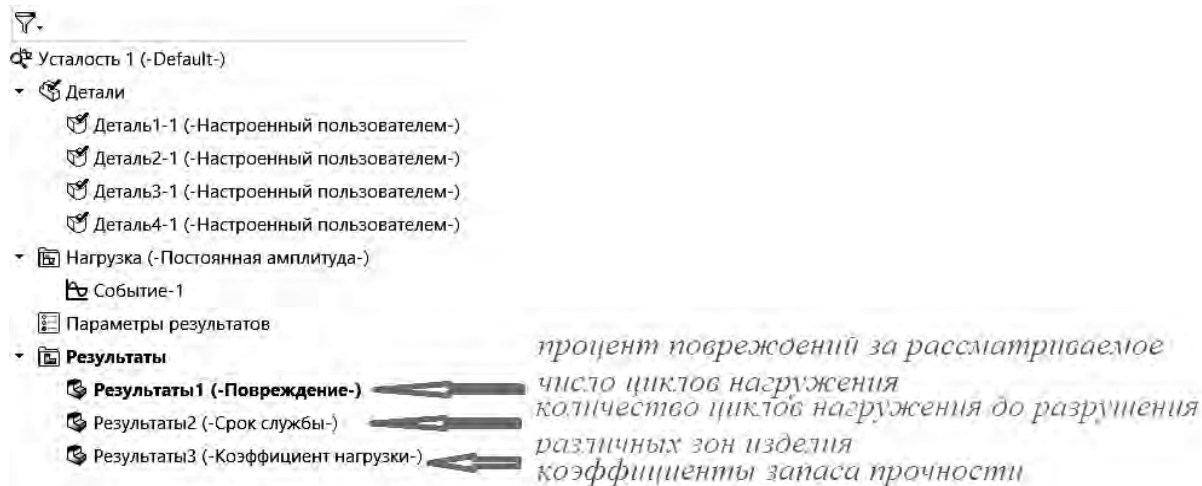


Рис. 10. Вид дерева исследований после проведения анализа на усталость

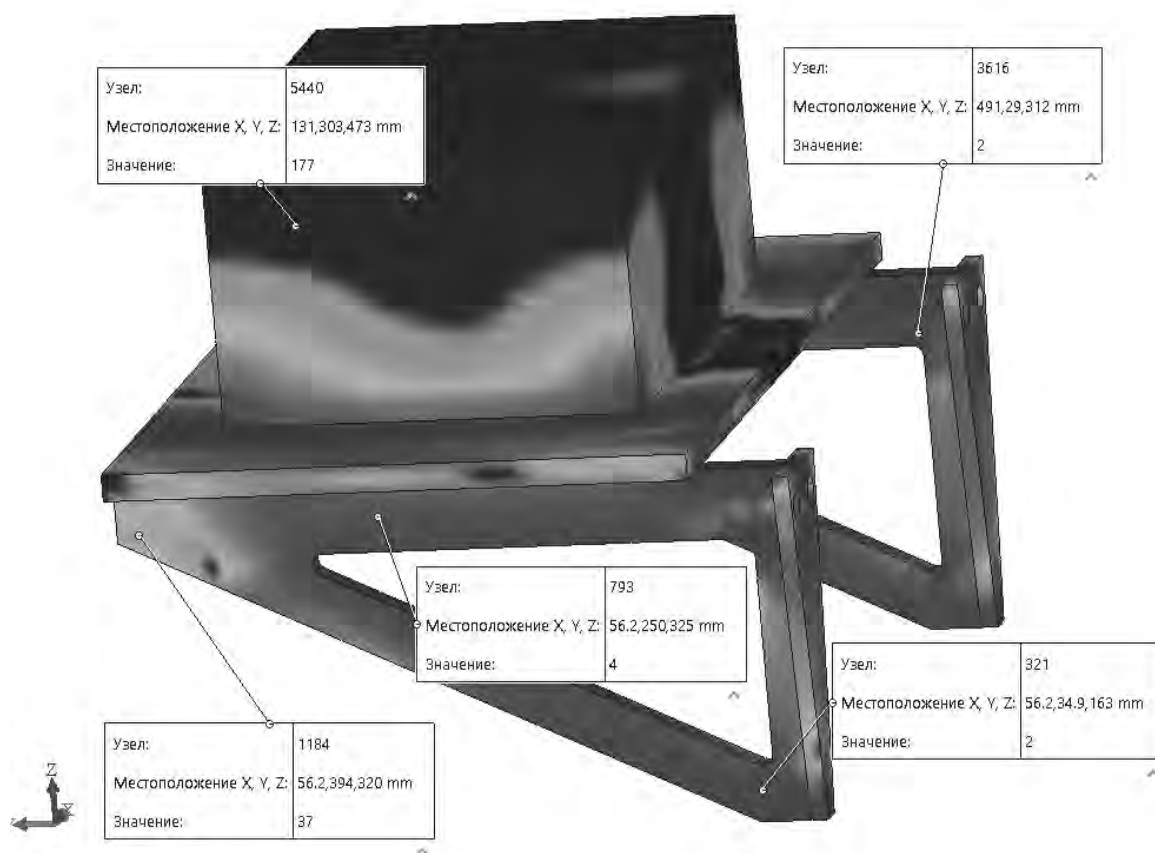


Рис. 11. Эпюра запасов прочности различных зон анализируемого изделия за рассматриваемое число циклов нагружения

Как видно из рис. 11, усталостная прочность в отмеченных зонах обеспечивается.

### Выводы

По результатам проведенного комплексного имитационного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Подготовлены исходные данные к проведению компьютерного моделирования и последующего инженерного анализа консольной опоры электродвигателя в среде SolidWorks Simulation.

2. Разработаны 3D-модели деталей и сборки консольной опоры электродвигателя.

3. Создана конечно-элементная модель и проведен анализ напряженно-деформированного состояния анализируемого объекта.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что напряжения в консольном кронштейне не превышают значения 36,18 МПа при значении предела текучести материала  $\sigma_T = 220,59$  МПа. Из этого обстоятельства можно сделать вывод о том, что консольный кронштейн является явно недогруженной деталью и нуждается в реконструкции.

5. С целью минимизации материалоемкости консольного кронштейна при обеспечении требований прочности и жесткости изделия были подготовлены необходимые исходные данные для параметрической оптимизации данного объекта.

6. Проведенная параметрическая оптимизация консольного кронштейна позволила снизить его материалоемкость на 34,9 %.

7. Последующий поверочный

анализ реконструированного изделия показал, что требования жесткости и прочности соблюдаются.

8. Поскольку конструктивные типоразмеры консольного кронштейна претерпели существенные изменения, вполне уместно последующее имитационное моделирование данного объекта с целью определения собственных частот и форм колебаний, устойчивости элементов конструкции и выявления характеристик усталостной прочности изделия.

9. В результате проведения частотного анализа и определения четырех собственных форм колебаний было установлено, что первые собственные частоты колебаний консольной опоры вместе с электродвигателем составляют 136,9; 167,27; 257,59 и 302,29 Гц соответственно. Это существенно выше, чем частота 83,33 Гц от воздействия неуравновешенных масс электродвигателя. Данное обстоятельство исключает вероятность возникновения резонансных явлений в анализируемой системе.

10. Проведенное компьютерное моделирование спроектированной конструкции консольной опоры электродвигателя на устойчивость показало, что коэффициент запаса устойчивости составляет  $n_y = 84,401$  и, следовательно, удовлетворяет требованиям по устойчивости объекта.

11. По результатам имитационного моделирования были определены эпюры распределения таких параметров усталостного анализа, как «Процент повреждений за рассматриваемое число циклов нагружения», «Количество циклов нагружения до разрушения различных зон изделия», «Коэффициент запаса прочности».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.: ил.
2. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров [и др.]. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 28 февраля 2024 года

Контакты:

viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович).

**V. A. POPKOVSKY**

## **COMPREHENSIVE SIMULATION MODELING OF CANTILEVER BRACKET OPERATING CAPACITY DURING DESIGN OPTIMIZATION**

### **Abstract**

The results of computer modeling of the operating capacity of a cantilever bracket by using the finite element method in the design process are presented in order to minimize the material intensity of this product.

### **Keywords:**

computer modeling, finite element method, stress-strain state, minimization of material intensity.

### **For citation:**

Popkovsky, V. A. Comprehensive simulation modeling of cantilever bracket operating capacity during design optimization / V. A. Popkovsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 2 (83). – P. 56–66.