

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СИЛЬФОНА ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

У статті розглянуто статичну деформацію сильфона вакуумного вимикача під впливом атмосферного тиску в залежності від ходу контактів методом кінцевих елементів. Отримані залежності механічної напруги в матеріалі в залежності від його товщини в залежності від товщини стінки сильфону при заданому ході контактів.

В статье рассмотрена статическая деформация сильфона вакуумного выключателя под воздействием атмосферного давления в зависимости от хода контактов методом конечных элементов. Получены зависимости механического напряжения в материале в зависимости от толщины стенки сильфона при заданном ходе контактов.

Одним из основных узлов вакуумных выключателей средних напряжений является вакуумная дугогасительная камера, а одной из деталей такой камеры является вакуумный сильфон, отделяющий контактную поверхность от окружающей среды рис. 1.

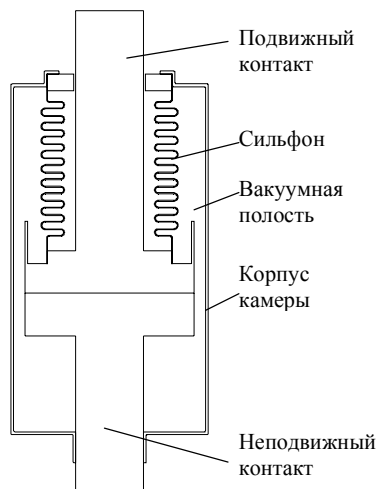


Рис. 1. Вакуумная дугогасительная камера

Сам сильфон (половина) и граничные условия показаны на рис. 2.

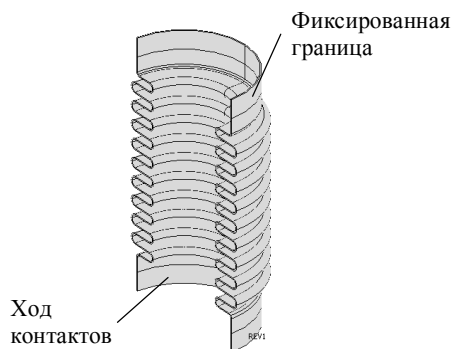


Рис. 2. Вид половины сильфона

Как следует из рис. 1, во время размыкания контактов материал сильфона подвержен механической деформации, вызывающей появление напряжений в материале. Кроме этого на внутреннюю поверхность сильфона воздействует атмосферное давление.

В данной статье исследуются статические деформации и распределения напряжений в материале в зависимости от толщины оболочки при заданном ходе контактов и геометрии сильфона. Данная проблема актуальна, так как при проектировании и модернизации конструкций вакуумных камер необходимо опре-

делить изменение формы и внутренние напряжения в сильфоне, которые влияют на надежность его работы.

Расчетам подобного рода посвящено большое количество работ, что говорит о сложности и актуальности проблемы [1-4]. Так в [1] рассматриваются общие вопросы проектирования с использованием многочисленных номограмм полученных на основании упрощенных моделей, а для того чтобы воспользоваться результатами других работ [2-4], необходимо, зачастую, проделать ту же работу, что и автор. Однако с появлением в последние годы программных комплексов (ANSYS, COMSOL и др.) имеется возможность проводить такие расчеты с высокой точностью за малое время.

При расчете деформаций сильфона были приняты следующие допущения: плотность материала и его толщина постоянны; зависимость между деформацией и силой линейна (материал подчиняется закону Гука). Согласно теории упругости [5, 6] с учетом принятых допущений система уравнений равновесия твердого тела в статике при отсутствии объемных внутренних сил запишется в виде:

$$(\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \text{div}(\vec{u}) + G \cdot \nabla^2 \vec{u} = 0, \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор перемещений.

Константы в (1) определяются через известные величины, такие как модуль Юнга – E и коэффициент Пуассона ν следующим образом:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (2)$$

Уравнение (1) с учетом (2) должно быть дополнено граничными условиями (рис.2) и действием атмосферного давления на внутреннюю поверхность сильфона.

Расчет был проведен для сильфона, изготовленного из высокопрочной нержавеющей стали с модулем упругости $200 \cdot 10^9$ Па и пределом текучести равном $1 \cdot 10^9$ Па.

Размеры сильфона: внутренний радиус – 11,8 мм; наружный радиус – 20 мм; радиус внутреннего скругления – 1 мм; радиус наружного скругления – 1,5 мм; ход контактов – 8 мм; число полных секций – 10.

На рис. 3 приведен расчет напряженного состояния сильфона при максимальном ходе контактов и толщине оболочки сильфона 0,1 мм.

Как следует из рис. 3, максимальные напряжения расположены на внутренней части оболочки (светлые области). Необходимо отметить, что трехмерный вид красив, но неинформативен. Поэтому основные расчеты проводились в цилиндрической системе координат и параметрическом режиме. На рис. 4 приведены результаты расчета зависимости максимальных напряжений в оболочке в зависимости от ее толщины для максимального значения хода контактов.

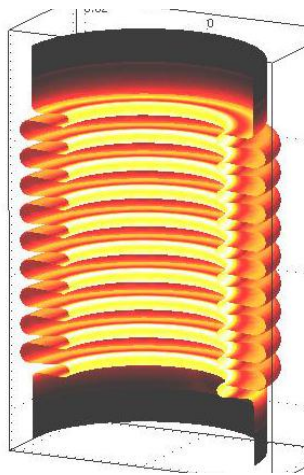


Рис. 3. Распределение максимальных напряжений в оболочке

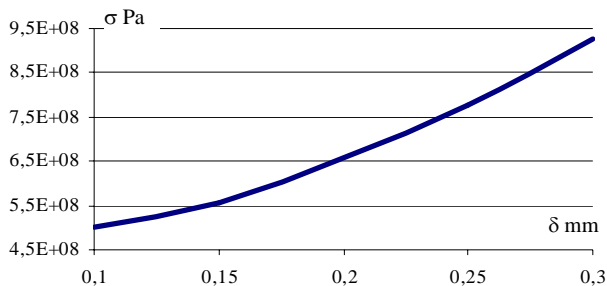


Рис. 4. Напряжения в оболочке сиффона при максимальном значении хода контактов

Как следует из рис. 4, увеличение толщины стенки сиффона приводит к увеличению усилий, причем, эта зависимость получается нелинейной.

Основным условием долговечной работы сиффона являются отсутствие пластических деформаций в материале и отсутствие контакта между секциями. Первое условие может быть выполнено соответствующим выбором материала, а второе условие – на основании рекомендации о том, что ход не должен превышать 20 % от общей длины сиффона [1]. На рис. 5 показана деформация нижней части сиффона толщиной 0,1 мм. Из рис. 5 видно изменение формы сиффона, но контакт между смежными секциями при статической нагрузке сиффона отсутствует.

Нелинейный характер зависимости (рис. 4) можно объяснить влиянием атмосферного давления на напряжения в материале сиффона. На рис. 6 показаны напряжения в материале при воздействии на него атмосферного давления при нулевом ходе контактов. Так как система линейна (деформации в пределах упругих), то разность между графиками рис. 4 и рис. 6 будет определять напряжения, связанные с ходом контактов. Такая зависимость почти линейна.

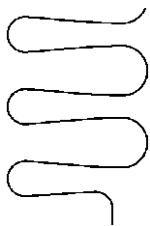


Рис. 5. Деформация сиффона при максимальном значении хода

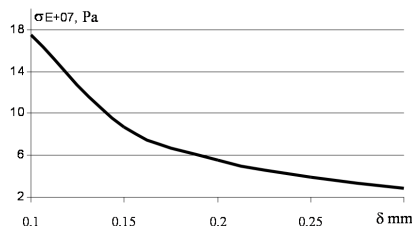


Рис. 6. Напряжения в материале вызванные атмосферным давлением

Как следует из графика (рис. 6), максимальные напряжения в материале, вызванные сжатием оболочки во много раз (2,9-32) больше напряжений, вызываемых действием атмосферного давления.

ВЫВОДЫ

Напряжения в материале достигают значительных величин, и определяется как толщиной материала, так и ходом контактов. Для принятия решения о пригодности конструкции необходимы динамические расчеты, так как контакты выключателя движутся по определенному закону и после их остановки в сиффоне могут происходить колебательные процессы, увеличивающие напряжения в металле. Необходимы также расчеты, учитывающие влияние температуры контактов на распределение напряжений в материале сиффона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиффоны. Расчет и проектирование. Под ред. Л.Е. Андреевой. М., "Машиностроение", 1975. – 156 с.
2. Якушев В.Л. Нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек. М.: Наука, 2004.
3. Ильичев В.А. Исследование влияния формы сиффонов на долговечность: диссертация. канд. техн. наук: 05.02.02 Ленинград, 1981. – 188 с.
4. Полубояринова И.А. Математические модели, методы и алгоритмы проектирования оболочек сиффонного типа специального назначения: диссертация канд. техн. наук: 05.13.12 Санкт-Петербург, 2003. – 166 с.
5. Френкель Я.И. Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ./ Под редакцией Шапиро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sil'fony. Raschet i proektirovanie. Pod red. L.E. Andreevoj. M., "Mashinostroenie", 1975. - 156 s. 2. Yakushev V.L. Nelinejnye deformacii i ustojchivost' tonkih obolochek. M.: Nauka, 2004. 3. Il'ichev V.A. Issledovanie vliyaniya formy sil'fonov na dolgovechnost': dissertaciya. kand. tehn. nauk: 05.02.02 Leningrad, 1981. - 188 s. 4. Poluboyarinova I.A. Matematicheskie modeli, metody i algoritmy proektirovaniya obolochek sil'fonnogo tipa special'nogo naznacheniya: dissertaciya kand. tehn. nauk: 05.13.12 Sankt-Peterburg, 2003. - 166 s. 5. Frenkel' Ya.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. - Leningrad: Tipografiya "Krasnyj pechatnik", 1939. - 386 s. 6. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti: Per. s angl./ Pod redakciej Shapiro G.S. - M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. - 560 s.

Поступила 04.09.2011

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические аппараты"
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21
тел. (057) 707-69-76, e-mail: baida@kpi.kharkov.ua

Bayda E.I.

Calculation of static deformation of medium-voltage vacuum circuit-breaker bellows.

The article deals with FEM determination of vacuum circuit-breaker bellows static deformation under influence of atmospheric pressure as function of the contacts travel. Dependences of the material stress on the bellows wall thickness for a given contacts travel are obtained.

Key words – medium-voltage vacuum circuit-breaker, bellows, static deformation, FEM determination.