

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СИЛЬФОНА ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

У статті розглянуто динамічну деформацію сильфона вакуумного вимикача в залежності від середньої швидкості руху контактів. Доведено, що збільшення середньої швидкості з 1 до 1.45 м/с збільшує коефіцієнт динамічного навантаження з 1.18 до 1.5 одиниць.

В статье рассмотрена динамическая деформация сильфона вакуумного выключателя в зависимости от средней скорости движения контактов. Показано, что увеличение средней скорости с 1 до 1.45 м/с увеличивает коэффициент динамической нагрузки с 1.18 до 1.5 единиц.

Сильфон является неотъемлемой и наиболее ответственной частью контактной системы вакуумного выключателя. Одним из основных условий надежной и долговечной работы такого соединения является отсутствие пластических деформаций (напряжения в материале подчиняются закону Гука). Конструкция контактной системы с сильфоном была описана в [1], где показана зависимость напряжений от толщины материала стенки сильфона. Как следует из [1] увеличение толщины стенки сильфона приводит к увеличению внутренних напряжений. Но эти напряжения не являются максимальными. При операциях включения-отключения материал сильфона подвержен динамическим нагрузкам, которые могут быть значительно больше статических [2, 3]. На рис. 1 показана половина рассчитываемого сильфона и граничные условия.

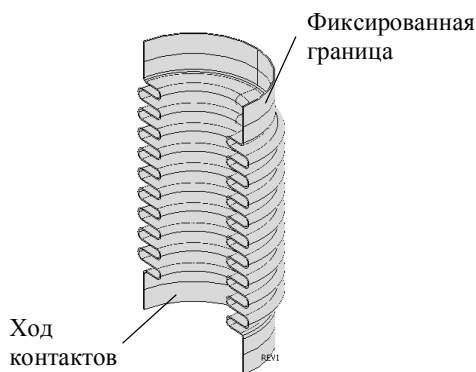


Рис. 1. Вид половины сильфона

Ход контактов является функцией времени и определяется соотношением:

$$S = \begin{cases} v(t) \cdot t, & \text{если } v(t) \cdot t < 8 \text{ мм} \\ 8 \text{ мм}, & \text{если } v(t) \cdot t \geq 8 \text{ мм} \end{cases}, \quad (1)$$

где S – путь; $v(t)$ – скорость; t – время.

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; толщина стенки – 0.1 мм.

Ввиду малости значений, влияние вибрации контактов при их замыкании на колебание сильфона не учитывалась.

При отсутствии объемных внутренних сил и отсутствии затухания дифференциальные уравнения, описывающие процесс динамики будут иметь вид [4, 5]:

$$-\rho \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} + (\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \text{div}(\bar{u}) + G \cdot \nabla^2 \cdot \bar{u} = 0, \quad (2)$$

где \bar{u} – деформации; λ, G – константы, зависящие от модуля упругости и коэффициента Пуассона; ρ – плотность.

Уравнение (2) должно быть дополнено нулевыми начальными условиями и поверхностными силами, учитывающими действие на оболочку атмосферного давления. Формула (2) записана для общего случая и может быть упрощена для конкретных задач.

Для более точной оценки процессов, происходящих в материале в динамических режимах, необходимо учитывать процессы, связанные с рассеянием энергии.

При циклическом деформировании материала или при возбуждении в материале свободных колебаний установлено, что материал поглощает часть энергии, которая переходит в тепловую энергию и рассеивается [2, 3, 5-7]. Независимо от природы энергетических потерь, характеристикой демпфирующих свойств упругой среды считается отношение рассеянной энергии за цикл к амплитудному значению потенциальной энергии упругой системы:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (3)$$

где ΔW – величина рассеянной энергии; W – потенциальная энергия упругой системы.

Рассмотрим одномерную модель свободных колебаний системы с затуханием:

$$m \cdot y'' + \xi \cdot y' + k \cdot y = 0, \quad (4)$$

где m – масса; ξ – коэффициент демпфирования; k – жесткость материала.

При заданном единичном начальном отклонении и нулевой начальной скорости и малом затухании решение уравнения будет:

$$y = e^{-\frac{\xi}{2 \cdot m} \cdot t} \cdot \cos\left(\sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\xi}{2 \cdot m}\right)^2} \cdot t\right), \quad (5)$$

где $\omega_0^2 = k/m$ – собственная круговая частота свободных колебаний системы.

Известно [6, 7], что максимальное значение энергии пропорционально квадрату амплитуды. Тогда [7]:

$$\psi = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2}, \quad (6)$$

A_1 и A_2 – амплитуды колебаний через период.

С учетом (5), уравнение (6) запишется:

$$\psi = \frac{e^{-\frac{\xi}{m} \cdot t} - e^{-\frac{\xi}{m} \cdot (t+T)}}{e^{-\frac{\xi}{m} \cdot t}} = 1 - e^{-\frac{\xi}{m} \cdot T}, \quad (7)$$

где T – период колебаний.

Согласно [6]:

$$\psi = 2 \cdot \delta, \quad (8)$$

где δ – логарифмический декремент затухания.

Тогда

$$2 \cdot \delta = 1 - e^{-\frac{\xi}{m} \cdot T}. \quad (9)$$

В этом случае, зная значение декремента затухания и период (частоту) колебаний, можно определить коэффициент демпфирования.

Заменив в (9) $\xi = k \cdot \beta$ и учитывая, что $\omega_0^2 = k/m$, выражение (9) можно записать:

$$2 \cdot \delta = 1 - e^{-\omega_0^2 \cdot \beta \cdot T}, \quad (10)$$

где β – коэффициент, имеющий размерность времени и характеризующий уменьшение амплитуды колебаний за период.

Предположим, что

$$T \approx 1/f_0, \quad (11)$$

где f_0 – частота свободных колебаний.

Следовательно, определив δ и f_0 можно определить коэффициент β , учитывая затухание колебаний в системе.

В этой связи для определения напряжений в материале возникающих в динамических режимах, необходимо решить две задачи: определить собственную частоту свободных колебаний системы; определить динамические напряжения в материале с учетом рассеяния энергии.

В случае неизменности объема при деформации ($\text{div} \vec{u} = 0$), уравнение для определения собственных свободных частот записывается в виде:

$$\rho \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{u} + G \cdot \nabla^2 \vec{u} = 0, \quad (12)$$

где ρ – плотность материала; ω_0 – собственная круговая частота колебаний системы.

Откуда

$$f_0 = \sqrt{\omega_0^2} / (2 \cdot \pi).$$

В табл. 1 приведены основные моды (наиболее низкие частоты) для системы, показанной на рис. 1 в зависимости от толщины стенки сильфона.

Таблица 1

Основные моды					
d , мм	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
f_0 , Гц	99.8	137.7	174.4	211.3	248.5

Для определения логарифмического декремента затухания можно воспользоваться результатами, приведенными в [6]. Эта величина не является константой, а зависит от величины напряжений, вида напряжений, термообработки и т.д. Для жаропрочной нержавеющей стали логарифмический декремент изменяется при существующем виде деформаций, реального диапазона напряжений и температуры равной

100 °С в пределах (0.7-5) % и более. Так как за счет действия атмосферного давления напряжения в материале достаточно велики изначально и увеличиваются по мере деформации сильфона, можно значение логарифмического декремента принять равным 2.5 % [6].

В табл. 2 приведены значения коэффициента β рассчитанного по (10).

Таблица 2

Коэффициент затухания					
d , мм	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
$\beta \cdot 10^5$, с	1.3	0.94	0.74	0.61	0.52

Систему (2) с учетом затухания Релея можно смоделировать аналогично одномерному затуханию. Расчетные уравнения динамики системы (рис. 1) при неизменности объема системы можно записать:

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + \nabla \cdot (G \cdot \beta \cdot \nabla \cdot \vec{v} + G \cdot \nabla \cdot \vec{u}) = 0 \\ \vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \end{cases}. \quad (13)$$

По приведенной методике были проведены расчеты динамических напряжений в сильфоне с толщиной стенки 0.1 мм, как конструкции, имеющей наименьшие внутренние напряжения [1]. На рис.2 показан ход нижней части сильфона (см. рис. 1) в зависимости от времени.

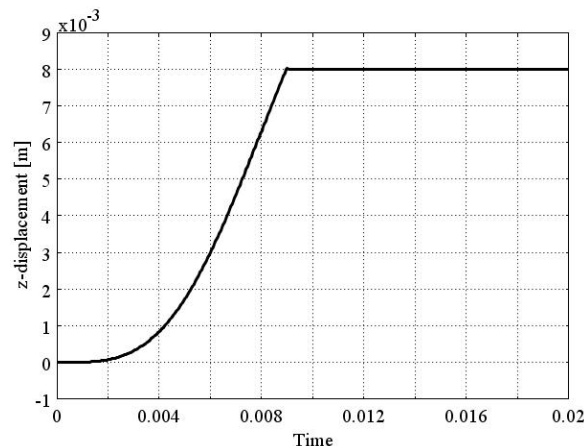


Рис. 2. Зависимость хода контактов от времени

Рассматривались три аналогичные зависимости со средними скоростями движения контактов:

1 – 1 м/с; 2 – 1.23 м/с; 3 – 1.45 м/с.

Наибольшие динамические напряжения возникают на малом радиусе внешней поверхности оболочки (рис. 3).

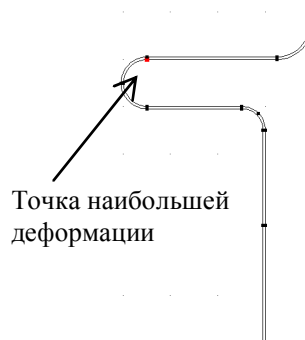


Рис. 3. Положение точки наибольшей деформации

На рис. 4-6 показаны значения динамических напряжений для разных скоростей хода контактов.

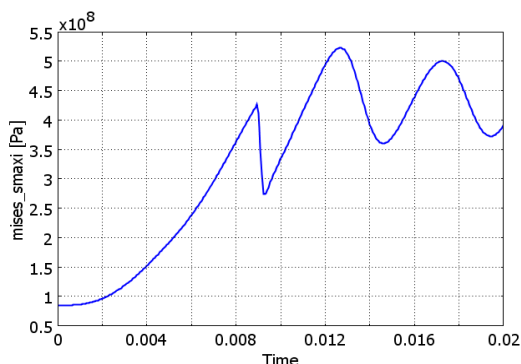


Рис. 4. Деформации при средней скорости 1 м/с

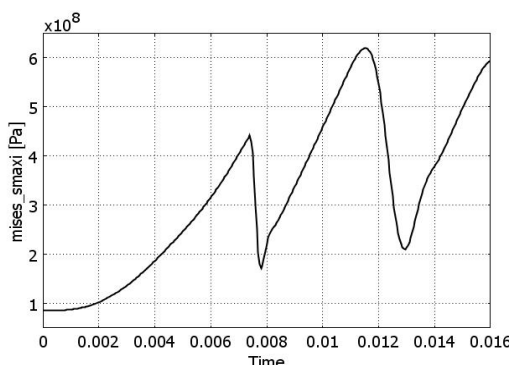


Рис. 5. Деформации при средней скорости 1.23 м/с

В статическом режиме напряжение в аналогичной точке равно $4.4 \cdot 10^8$ Па. Следовательно, коэффициент динамической нагрузки соответственно равен:

- 1,18 – скорость 1 м/с;
- 1,4 – скорость 1.23 м/с;
- 1,5 – скорость 1.45 м/с.

Как следует из (рис. 4-6) при увеличении скорости движения контактов увеличивается не только абсолютное значение напряжения, но и амплитуда колебаний напряжений, что отрицательно сказывается на долговечности устройства. Используя значение статических напряжений в аналогичной точке, можно получить значение коэффициента динамической нагрузки, которое показано на рис. 7, в зависимости от средней скорости движения контактов. Следовательно, скорость замыкания контактов существенно влияет на напряжения в материале, увеличивая усталостные напряжения.

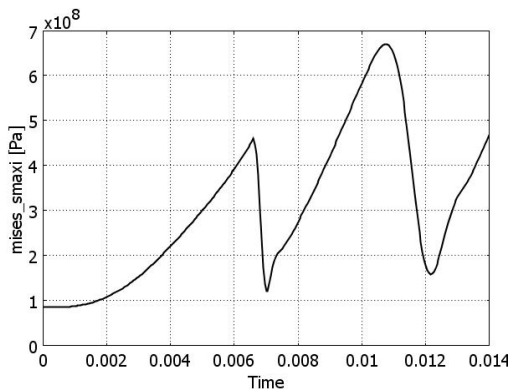


Рис. 6. Деформации при средней скорости 1.45 м/с

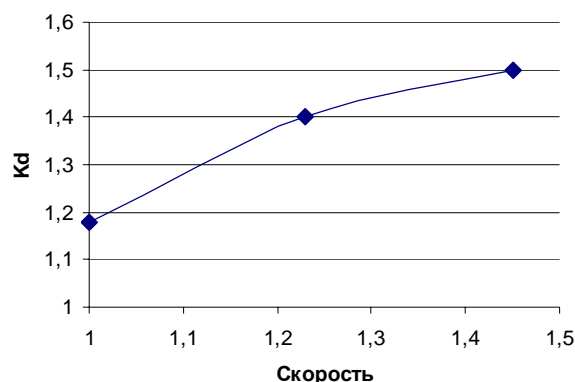


Рис. 7. Коэффициент динамической нагрузки

Полученные данные могут быть использованы для определения усталостной выносливости сильфона, которая осуществлялась по результатам расчета циклических напряжений по Мизесу в наиболее опасных сечениях по [7, 8]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} \cdot \sigma_{+1}}{(1 - R_\sigma) \cdot \sigma_{+1} + (1 + R_\sigma) \cdot \sigma_{-1}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{-1} = 0.4 \cdot \sigma_B$ – предел выносливости при симметричном цикле; $\sigma_{+1} = \sigma_T$ – предел выносливости при статической нагрузке; $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ – коэффициент асимметрии цикла.

Для материала сильфона были взяты следующие значения: $\sigma_B = 1.7 \cdot 10^9$ Па; $\sigma_T = 1 \cdot 10^9$ Па.

Коэффициент асимметрии цикла вычислялся на основании (рис. 4-6). В табл.3 приведены значения усталостной выносливости в зависимости от средней скорости движения контактов.

Таблица 3
Усталостная выносливость в функции средней скорости движения контактов

V, м/с	1	1.23	1.45
[σ], Па	$9.2 \cdot 10^8$	$8.7 \cdot 10^8$	$8.5 \cdot 10^8$

Как следует из табл. 3, для долговечной работы сильфона условие

$$\sigma_{\max} < \sigma_T$$

должно быть заменено на условие

$$\sigma_{\max} < [\sigma]. \quad (15)$$

Как следует из табл. 3 и рис. 4-6, для сильфона с толщиной стенки 0.1 мм условие (15) выполняется до максимальной средней скорости движения контактов с некоторым запасом равным приблизительно 1.2 для скорости 1.45 м/с. Результаты расчета для сильфона с толщиной стенки 0.1 мм можно с некоторой степенью приближения распространить на конструкцию с иной толщиной.

В табл. 4 приведены данные по статическим напряжениям в материале сильфона в зависимости от толщины его стенки [1].

Таблица 4
Статические напряжения в зависимости от толщины стенки сильфона

d, мм	0.15	0.2	0.25	0.3
$\sigma \cdot 10^{-8}$, Па	5.6	6.6	7.8	9.3

Результаты расчета для других толщин стенки приведены в табл. 5, где показаны максимальные напряжения в материале в зависимости от коэффициента динамической нагрузки.

Таблица 5

Результаты расчета допустимых напряжений

d , мм	0,15	0,2	0,25	0,3	K_d	$[\sigma] \cdot 10^{-8}$, Па
$\sigma_{\max} \cdot 10^{-8}$, Па	6.6	7.8	9.2	11	1.18	9.2
	7.8	9.2	11	13	1.4	8.7
	8.4	9.7	12	14	1.5	8.5

Исходя из данных табл. 5 можно сделать вывод о том, что для определенных значений толщины стенки и средней скорости движения контактов соотношение (15) не выполняется.

На рис. 8 показаны временные зависимости напряжений в материале сиффона в наиболее нагруженных точках. На рис. 9 показана временная зависимость перемещения аналогичных точек.

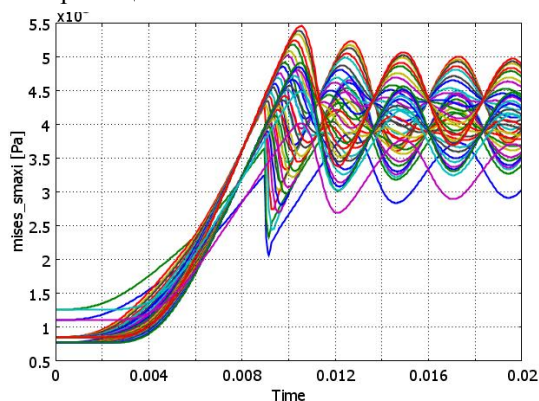


Рис. 8. Временная зависимость напряжений

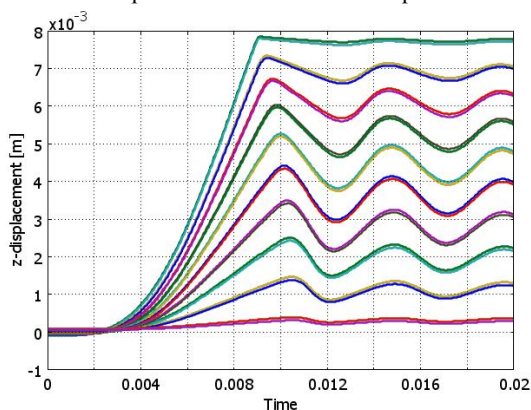


Рис. 9. Значения перемещений точек внутреннего радиуса

ВЫВОДЫ

Напряжения, возникающие в материале, в значительной мере зависят от характера, скорости движения и хода контактной системы. При некоторых соотношениях толщины материала и средней скорости движения контактов напряжения в материале не только не удовлетворяют условиям по усталостным напряжениям, но и могут превышать предел текучести материала, что недопустимо. Следовательно, для выполнения условий ТУ по коммутационной износостойкости необходим определенный выбор параметров сиффона, которые эту износостойкость в значительной мере и обеспечивает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байда Е.И. Расчет статической деформации сиффона вакуумных выключателей среднего напряжения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – № 6. – С. 15-16.
2. Сиффоны. Расчет и проектирование. Под ред. Л.Е. Андреевой. – М.: Машиностроение, 1975. – 156 с.
3. Снитко Н.К. Строительная механика: Учебник для вузов. – 3 е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1980. – 431 с.
4. Френкель Я.И. Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Шапиро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1979. – 560 с.
6. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства материалов. Справочник / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. – Киев.: Наукова думка, 1971. – 375 с.
7. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. Главная редакция физ.-мат. литературы. – М.: Наука, 1972. – 544 с.
8. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов. – 15-е изд. – М.: Наука, 1976. – 607с.

Bibliography (transliterated): 1. Bajda E.I. Raschet staticheskoj deformacii sil'fona vakuumnyh vyklyuchatelej srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2011. - № 6. - S. 15-16. 2. Sil'fony. Raschet i proektirovanie. Pod red. L.E. Andreevoj. - M.: Mashinostroenie, 1975. - 156 s. 3. Snitko N.K. Stroitel'naya mehanika: Uchebnik dlya vuzov. - 3 e izd., pererab. - M.: Vyssh. shk., 1980. - 431s. 4. Frenkel' Ya.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. - Leningrad: Tipografiya "Krasnyj pechatnik", 1939. - 386 s. 5. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti: Per. s angl. / Pod red. Shapiro G.S. - M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiz.-mat. literatury, 1979. - 560 s. 6. Pisarenko G.S. Vibropogloschayushchie svoystva materialov. Spravochnik / Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. - Kiev.: Naukova dumka, 1971. - 375 s. 7. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov. Glavnaya redakciya fiz.-mat. literatury. - M.; Nauka, 1972. - 544 s. 8. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov. - 15-e izd. - M.; Nauka, 1976. - 607s.

Поступила 07.11.2011

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

Bayda E.I.
Calculation of dynamic deformation of medium-voltage vacuum circuit-breaker bellows.

The paper analyzes dynamic deformation of vacuum circuit-breaker bellows versus average speed of the breaker contacts. The average speed step-up from 1 mps up to 1.45 mps is shown to increase coefficient of dynamic load from 1.18 to 1.5 points.

Key words – medium-voltage vacuum circuit-breaker, bellows, dynamic deformation.