

МИНОБРНАУКИ РФ

ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина

Кафедра теоретической и прикладной механики

Исследование механических напряжений в корпусе измерительного трансформатора

Выполнил: студент гр. 4-33 Данилов С.Д.

Руководитель: *д.т.н., доц.* Смирнов С.Ф.

Цели работы:

- 1. Провести эксперименты для электроизолирующих материалов на сжатие.
- 2. С помощью экспериментальных данных рассчитать модуль упругости испытываемых материалов.
- 3. Выполнить расчет напряжений и перемещений в программном комплексе ANSYS.
- 4. По расчетам дать рекомендации по использованию соединительных нитей.

Проведение экспериментов и аналитический расчёт модуля упругости электроизолирующего материала.

С кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами ИГЭУ были получены 4 цилиндрических образца материалов: 1) СУРЭЛ (2,1% твердости). 2) АДВ(1:5). 3) ЭТАЛ-1471. Эпоксидная смола. 4) ПУ ВИЛАД. Образцы помещались в испытываемую машину «УТС 101-10» (Рис.1).



Рис.1 Внешний вид машины УТС 101-10

Испытания проводились по ГОСТ 4651-82 Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Были получены графики зависимости усилий от удлинения образцов (Рис.2-4).

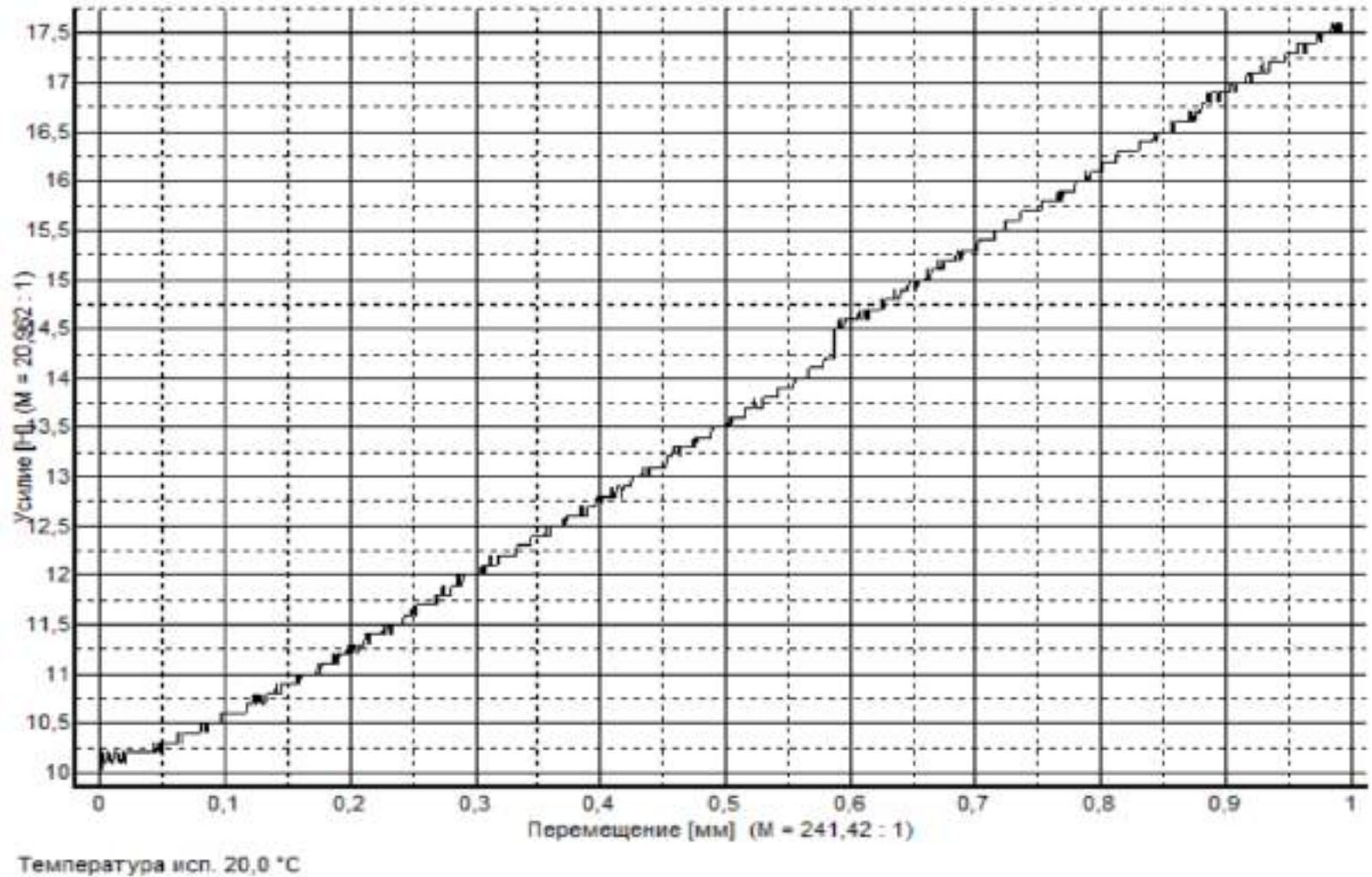


Рис.2 График зависимости усилий от удлинения для материала СУРЭЛ (2,1% твердости)

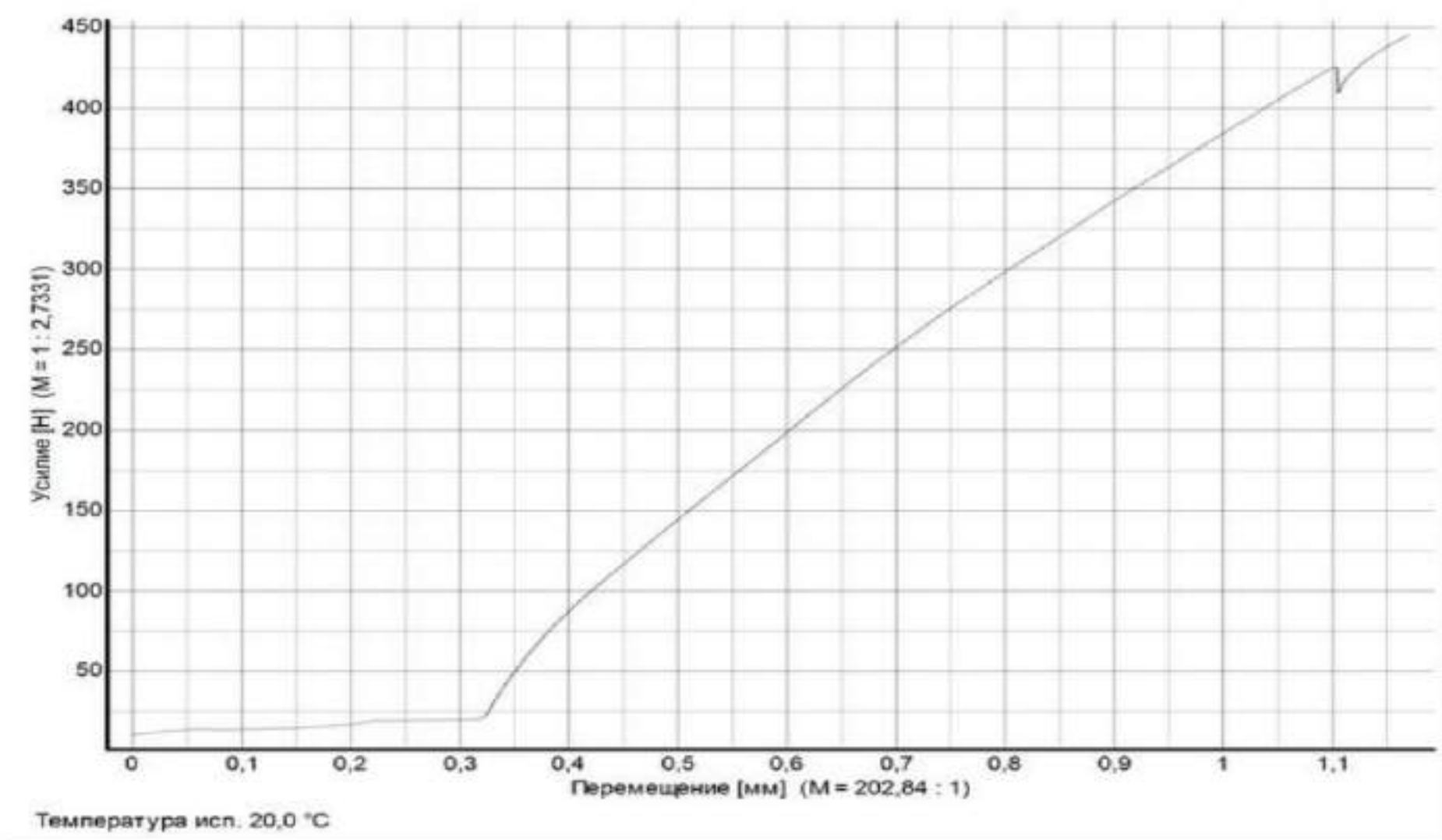


Рис.3 График зависимости усилий от удлинения для материала АДВ (1:5)

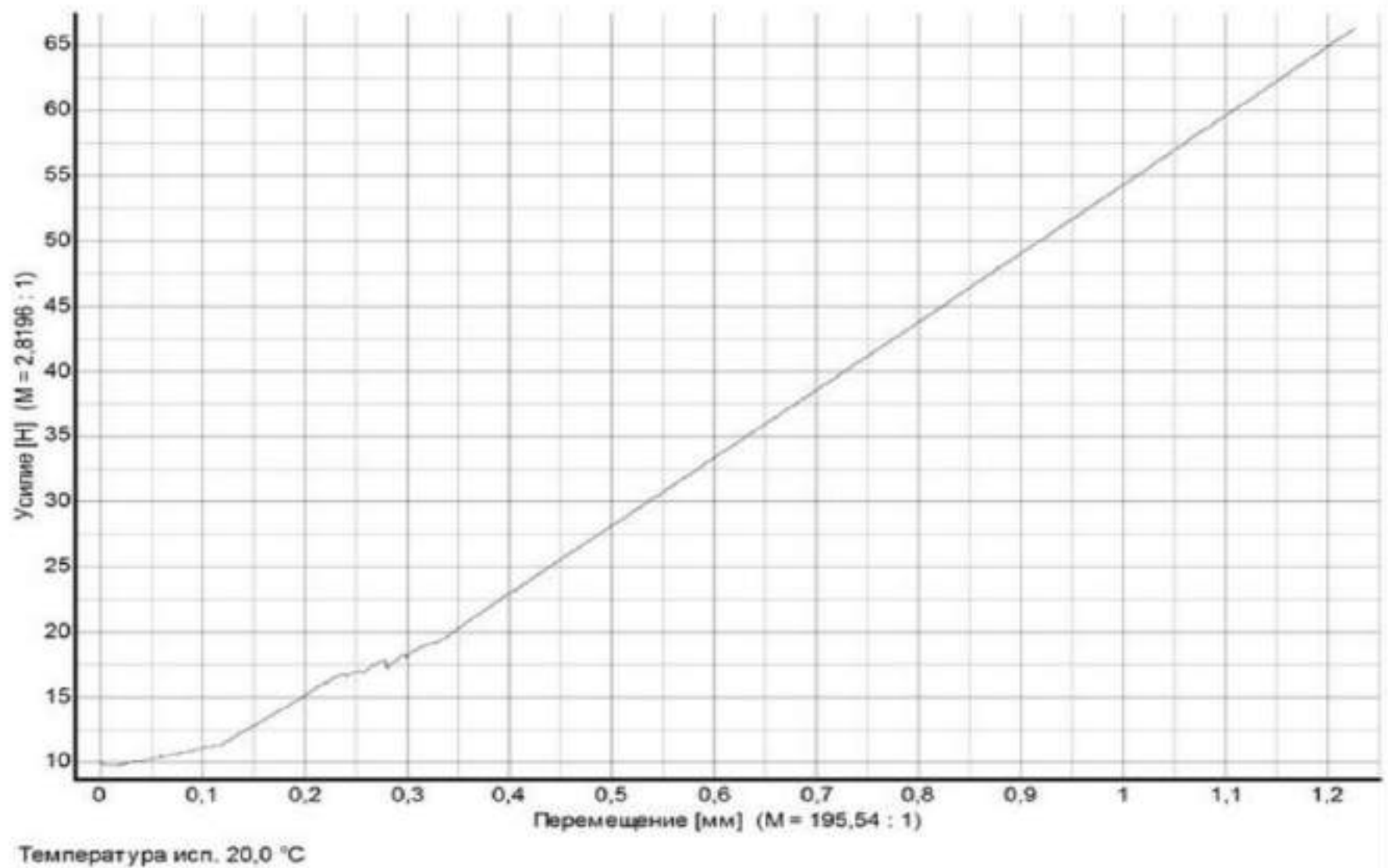


Рис.3 График зависимости усилий от удлинения для ПУ ВИЛАД

На каждом цилиндрическом образце были выполнены 4 измерения диаметра штангенциркулем ($\Delta=0,1$ мм) (табл. 1) и измерения высоты образцов.

Таблица 1 . Диаметры образцов

	СУРЭЛ(2,1% твердости)	АДВ(1:5)	ПУ ВИЛАД
D1	21,2	23,2	23,1
D2	21,6	23,4	22,9
D3	21,5	23,2	22,9
D4	21,4	23	23,2

Будем считать, что модуль упругости изменяется от участка к участку в зависимости от деформации. На каждом участке рассчитываем модуль упругости как однократное косвенное измерение, с учетом того, что диаметр образца рассчитывается как многократное прямое измерение.

Основные формулы данного метода вычисления модуля упругости:

Модуль упругости:

$$E = \frac{(F2 - F1) \cdot L}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (l2 - l1)} ;$$

Систематическая погрешность рассчитывается по формуле по Р 50.2.038-2004:

$$\theta(P) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot \theta_i^2} ;$$

где k-это коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, числом составляющих НСП и их соотношением между собой. В нашем случае доверительная вероятность P=0.95, тогда коэффициент k мало зависит от числа составляющих НСП и их соотношения, поэтому при этой доверительной вероятности коэффициент k принимают равным 1,1.

$$E = f(F2, F1, L, d, l2, l1);$$

$$b_1 = \frac{\partial f}{\partial F2}; b_2 = \frac{\partial f}{\partial F1}; b_3 = \frac{\partial f}{\partial L}; b_4 = \frac{\partial f}{\partial d}; b_5 = \frac{\partial f}{\partial l2}; b_6 = \frac{\partial f}{\partial l1}$$

Тогда погрешность систематическая рассчитывается по выражению:

$$\theta(P) = E \cdot 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta(F2)}{F2}\right)^2 + \left(\frac{\theta(F1)}{F1}\right)^2 + \left(\frac{\theta(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{\theta(d)}{K \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\theta(l2)}{l2-l1}\right)^2 + \left(\frac{\theta(l1)}{l2-l1}\right)^2};$$

Предел допускаемой погрешности измерения нагрузки и перемещения по ТС101.000.000-01 РЭ:

$$\frac{\theta(F2)}{F2} = \frac{\theta(F1)}{F1} = 0,01 \text{ [Н]}; \quad \theta(l2) = \theta(l1) = 0,05 \text{ [мм]}, \text{ при перемещениях от 0,1 до 50мм};$$

Так как концы образцов скошены, то считаем, что допускаемая погрешность длины образца равна:

$$\theta(L) = 2 \text{ [мм]}$$

Погрешность диаметра по МИ2083-90: $S_d = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (d_i - \bar{d})^2}$

Доверительная граница случайной погрешности: $\epsilon = t \cdot S_d$;

где t- это коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности и числа результатов измерения(n) находится по таблице из ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные.

$\theta_\epsilon = \pm \sum_{i=1}^m \theta_i$; $\theta_\epsilon = \pm 0,1\text{мм}$ (погрешность штангенциркуля);

Суммарное среднее квадратическое отклонение диаметра: $S_\epsilon = \sqrt{S_d^2 + \left(\frac{\theta_\epsilon}{\sqrt{3}}\right)^2}$

Коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП:

$$K = \frac{\varepsilon + \theta_{\varepsilon}}{S_d + \frac{\theta_{\varepsilon}}{\sqrt{3}}};$$

Доверительные границы погрешности:

$$\Delta d = K \cdot S_{\varepsilon};$$

Результат расчета:

$$\tilde{E} = E \pm \theta(P) = E \pm k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot \theta_i^2}$$

Применяя данные формулы к расчету модуля упругости материалов, получим:

$$E = 2,64 \pm 0,79 \text{ МПа}$$

$$26,2 \leq E \leq 234,2 \text{ МПа}$$

$$E = (15,1 \pm 1,5) \text{ МПа}$$

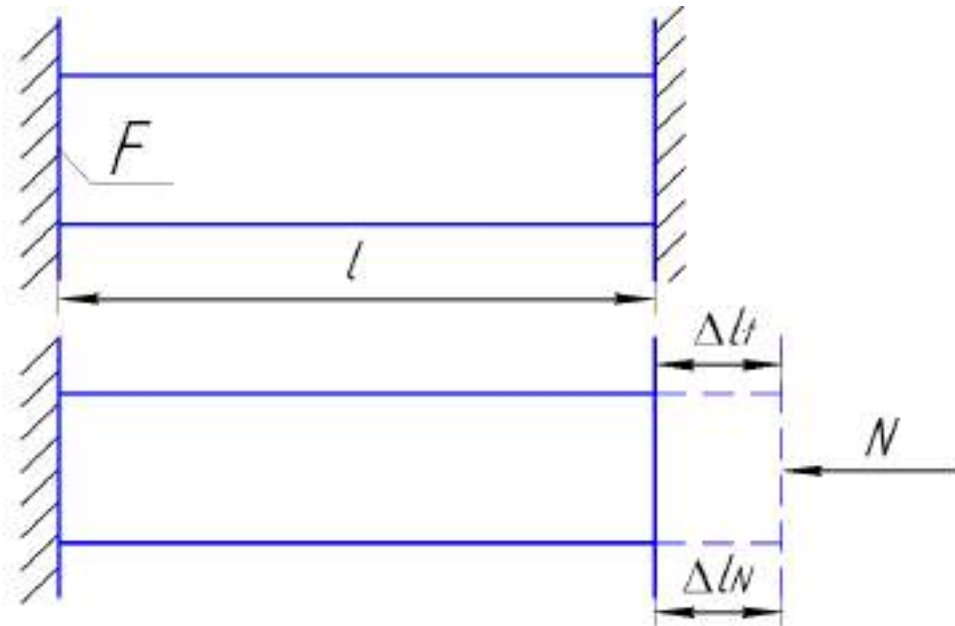
Модуль упругости материала СУРЭЛ

Модуль упругости материала АДВ

Модуль упругости материала ПУ ВИЛАД

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДАВЛЕНИЙ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Материал можно рассматривать как защемленный (статически неопределимая система) стержень



Отбросив одну из заделок, стержень

удлинится на величину: $\Delta l_t = (a_m - a_c) \Delta t L$

Под действием внутренней силы N , равной опорным реакциям, стержень должен сократиться на такую же величину. Так как длина образца между заделками не изменяется, то $\Delta l_t = \Delta l_N$

Из этого выражения получим: $(a_m - a_c) \Delta t L = \frac{NL}{E_m A}$,

где A – площадь дннца.

Следовательно, давление: $p_1 = E_m (\alpha_m - \alpha_c) \Delta t$

Рис.2 Расчетная схема электроизолирующего материала

Рассматриваем стержень из изоляции как сплошной цилиндр, находящийся под давлением p_2 вследствие его нагрева на Δt

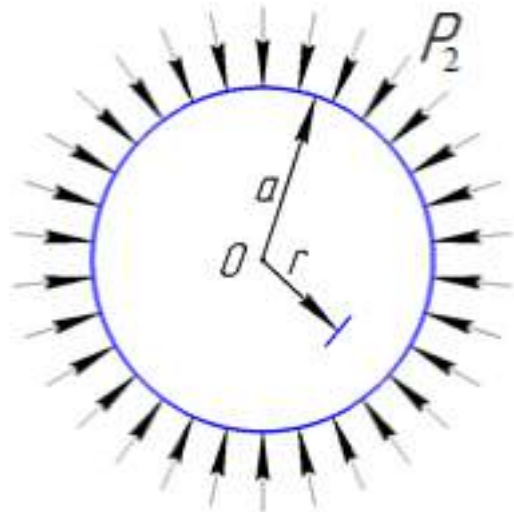


Рис.3 Схема цилиндрической части корпуса

Для сплошного цилиндра, нагруженного на боковой поверхности давлением p_2 радиальное перемещение:

$$U(r) = \frac{(1 - \nu_{\text{п}})p_2 \cdot r}{E_c} = (a_{\text{м}} - a_{\text{с}})\Delta t r$$

откуда следует:
$$p_2 = \frac{E_{\text{м}}(a_{\text{м}} - a_{\text{с}})\Delta t}{(1 - \nu_{\text{с}})} = \frac{p_1}{1 - \nu_{\text{с}}}$$

Проводим расчеты давлений, действующих на оболочку, при разных электроизолирующих материалах, результаты записываем в таблицу:

	СУРЭЛ	АДВ	ЭТАЛ	ПУ ВИЛАД
P1	0,012МПа	0,622МПа	0,0166МПа	0,0019МПа
P2	0,014МПа	0,73МПа	0,0195МПа	0,0022МПа

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

В программном комплексе ANSYS Workbench создана модель корпуса цифрового трансформатора тока и напряжений с температурной нагрузкой, от выделения «Джоулева тепла»

Для этого вводятся механические характеристики материала, строится геометрическая модель и задается температурная нагрузка (100C°) из условий эксплуатации «steady-state thermal».

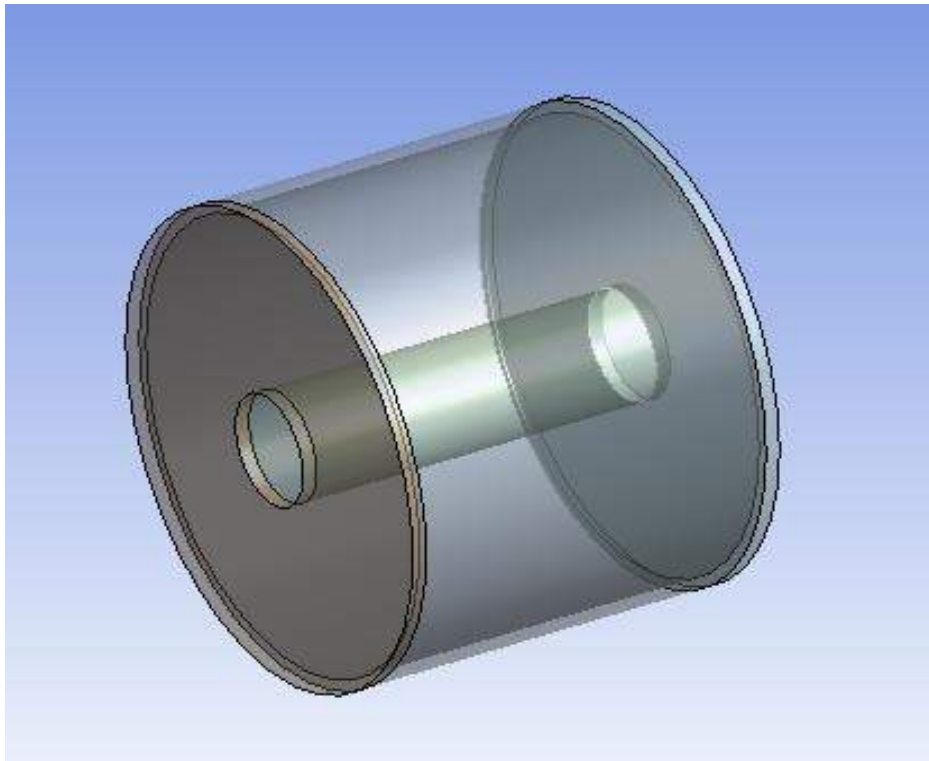


Рис.4 Геометрическая модель корпуса

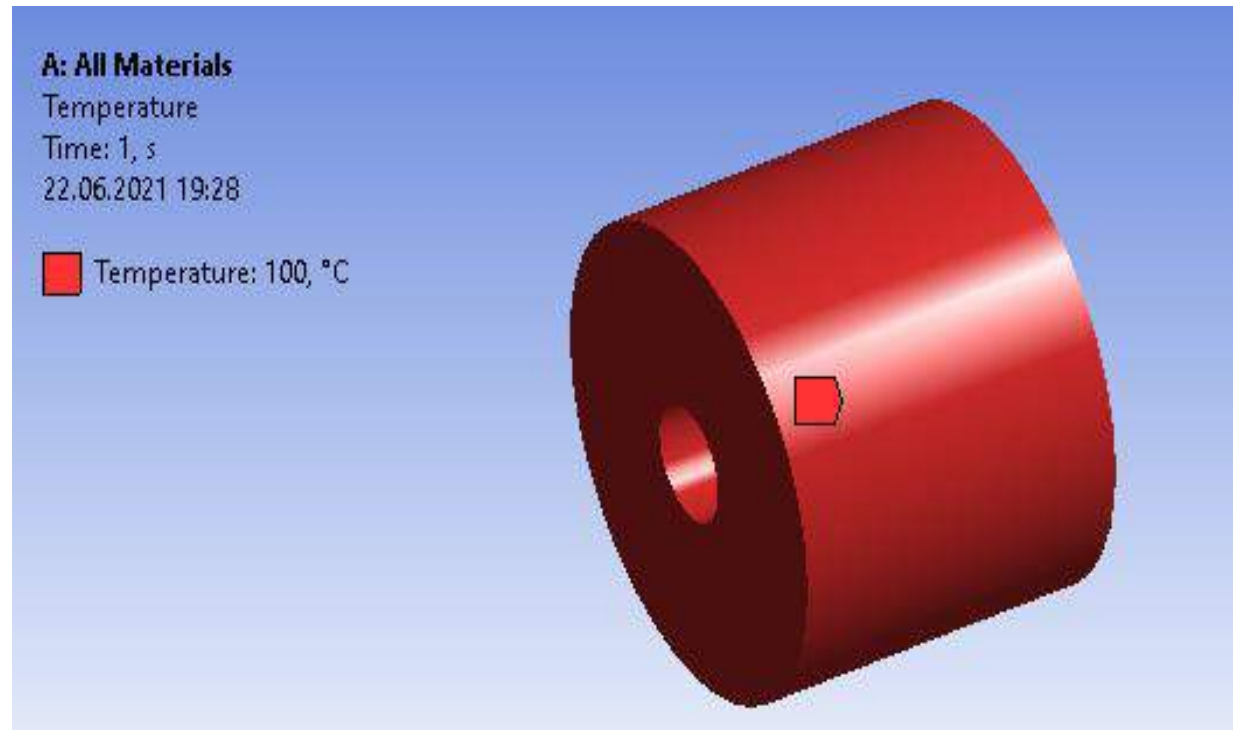


Рис.5 Температурная нагрузка, заданная на электроизолирующий материал

После данных операций в секции «Model» создаем конечно элементную сетку методом «Sweep». Этот метод позволяет строить расчетную сетку на основе призматических элементов: гексаэдр и пентаэдр одного слоя вдоль некоторой оси. Может быть использован только для определенного класса геометрических моделей (тела вращения/протягивания).

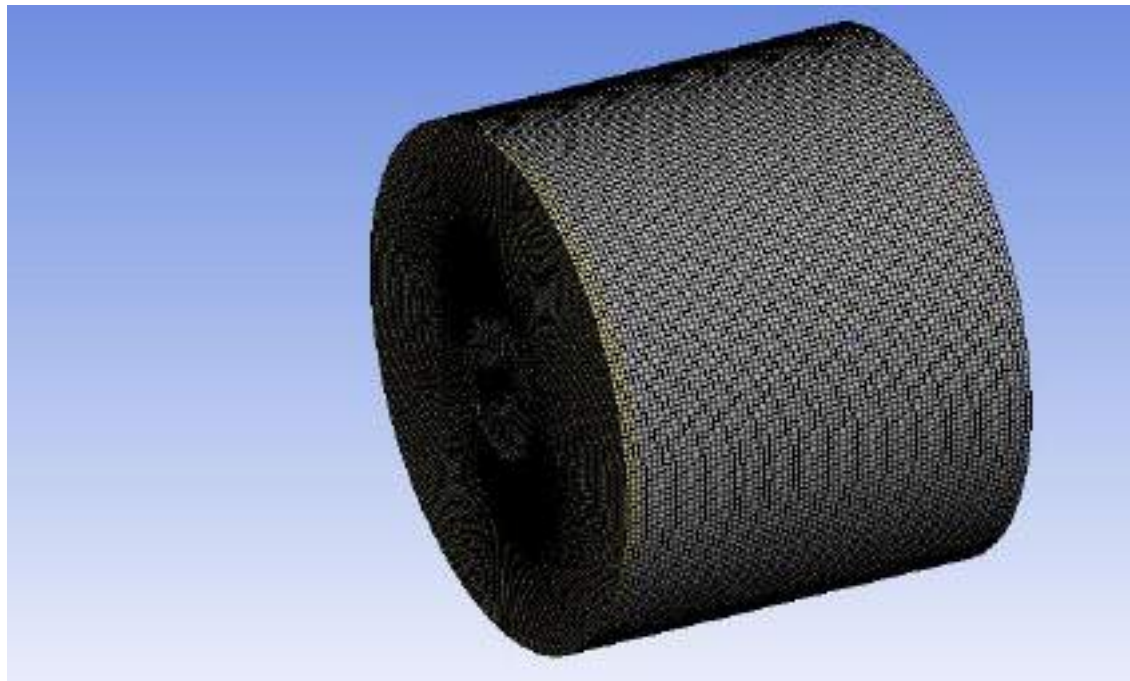


Рис.6. Конечно элементная сетка(общий вид)

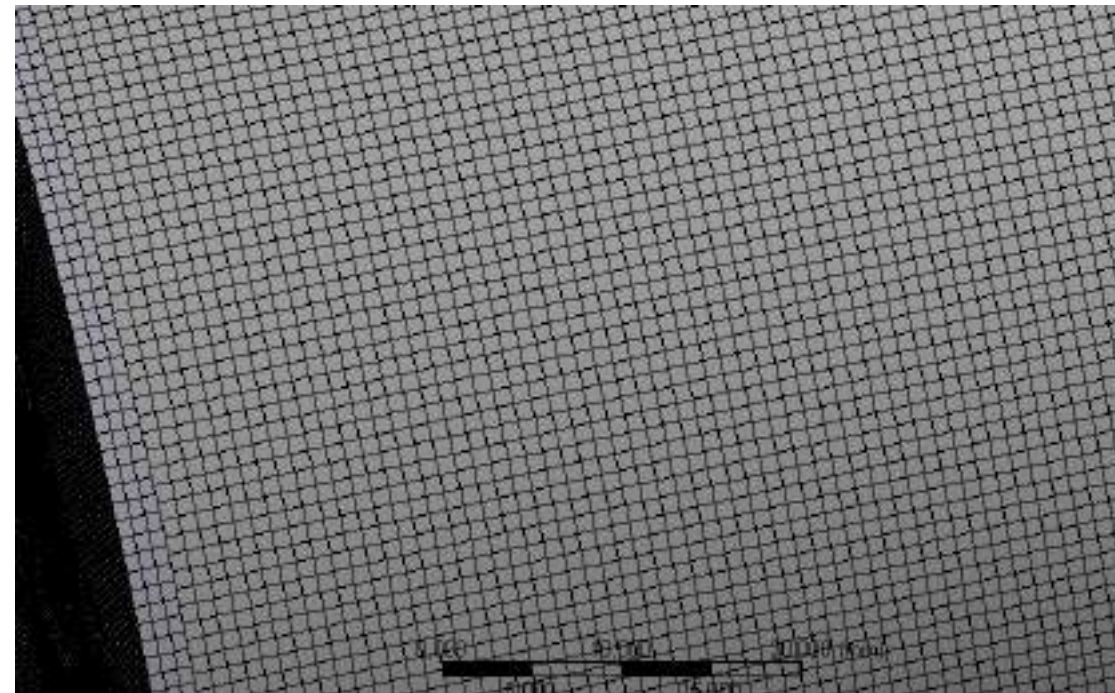


Рис.7. Конечно элементная сетка(в приближении)

Проводим верификацию сетки. Чтобы проверить созданную сетку на правильность (достоверность) нужно подобрать минимальное количество элементов сетки, при котором результаты будут мало отличаться друг от друга. Для этого построим график зависимости количества элементов от максимального напряжения.

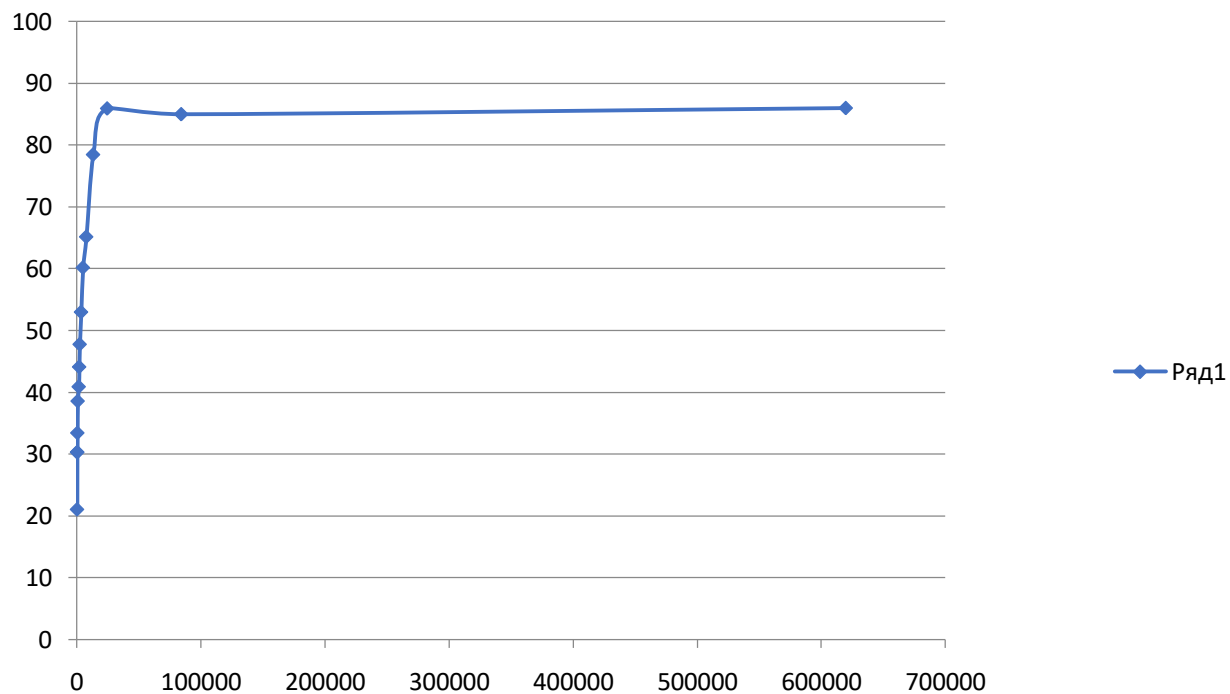


Рис.8 График верификации

Стабильные показания напряжений начинаются в интервале от 13061-619512 элементов. Исходя из этих данных была выбрана сетка, которая имеет 13061 элемент, при данной сетке размер элемента равен 4мм.

В «Static Structural» рассматривается жесткое защемление конструкции по контуру сопряжения крышек с цилиндром.

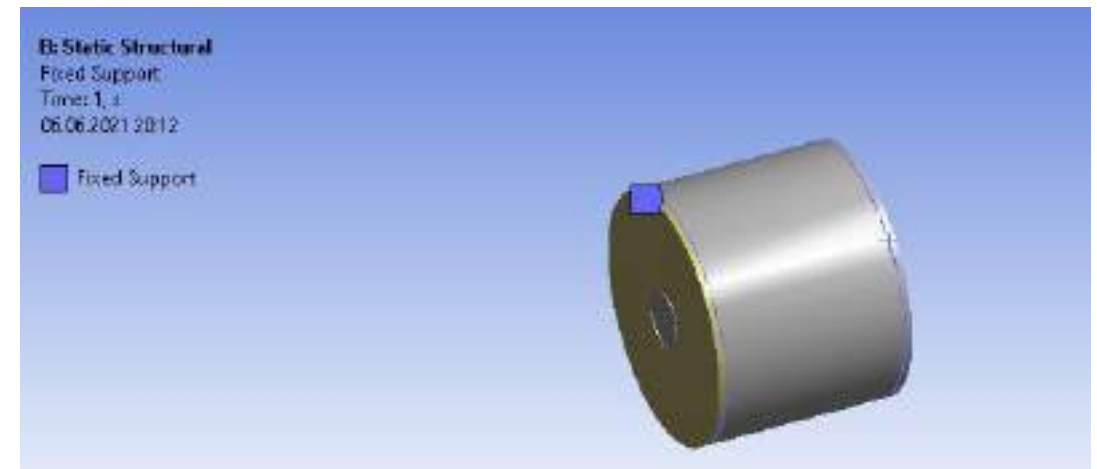


Рис.9 Закрепление конструкции

Проводим расчеты напряжений и перемещений при различных электроизолирующих материалах:

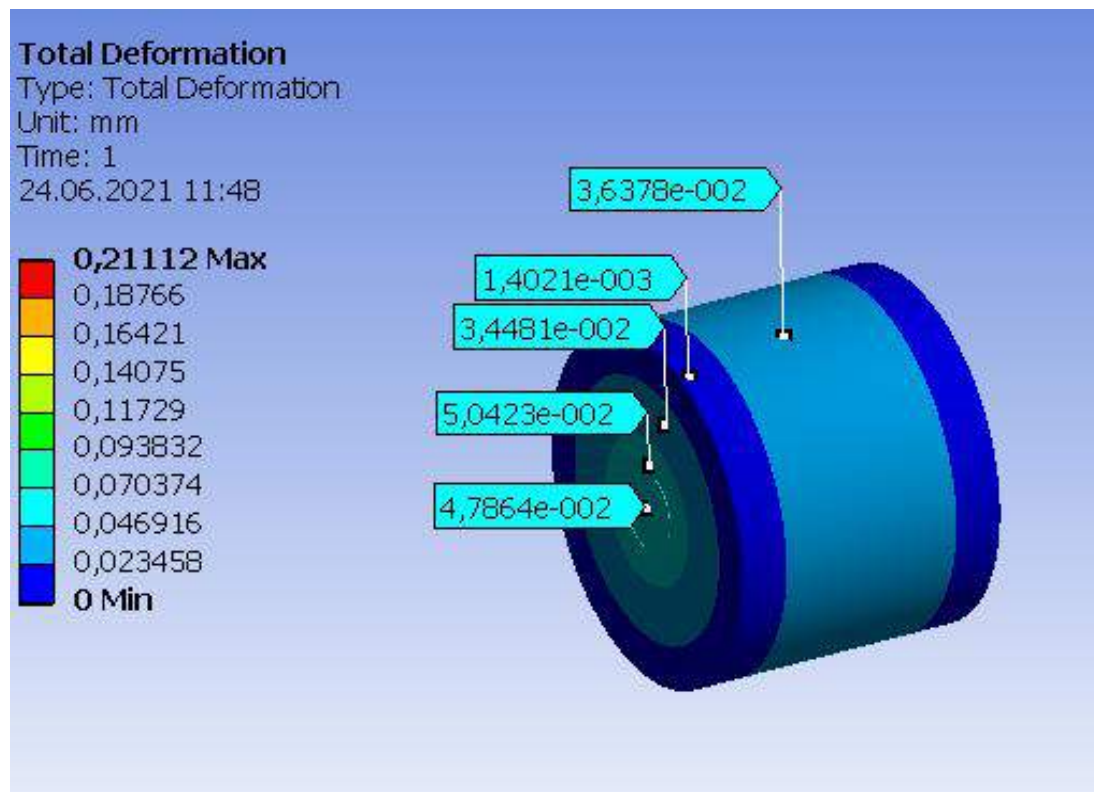


Рис.10 Эпюра перемещения при материале СУРЭЛ.

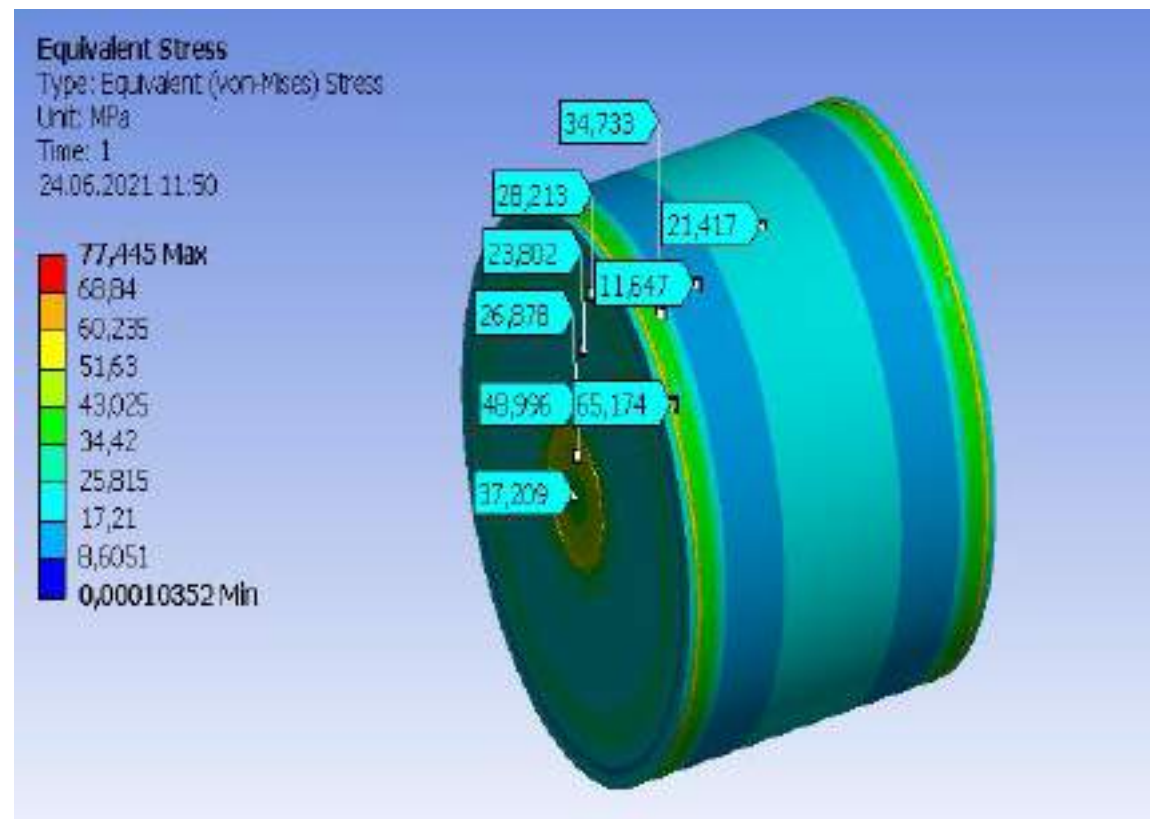


Рис.11 Эпюра напряжений при материале СУРЭЛ.

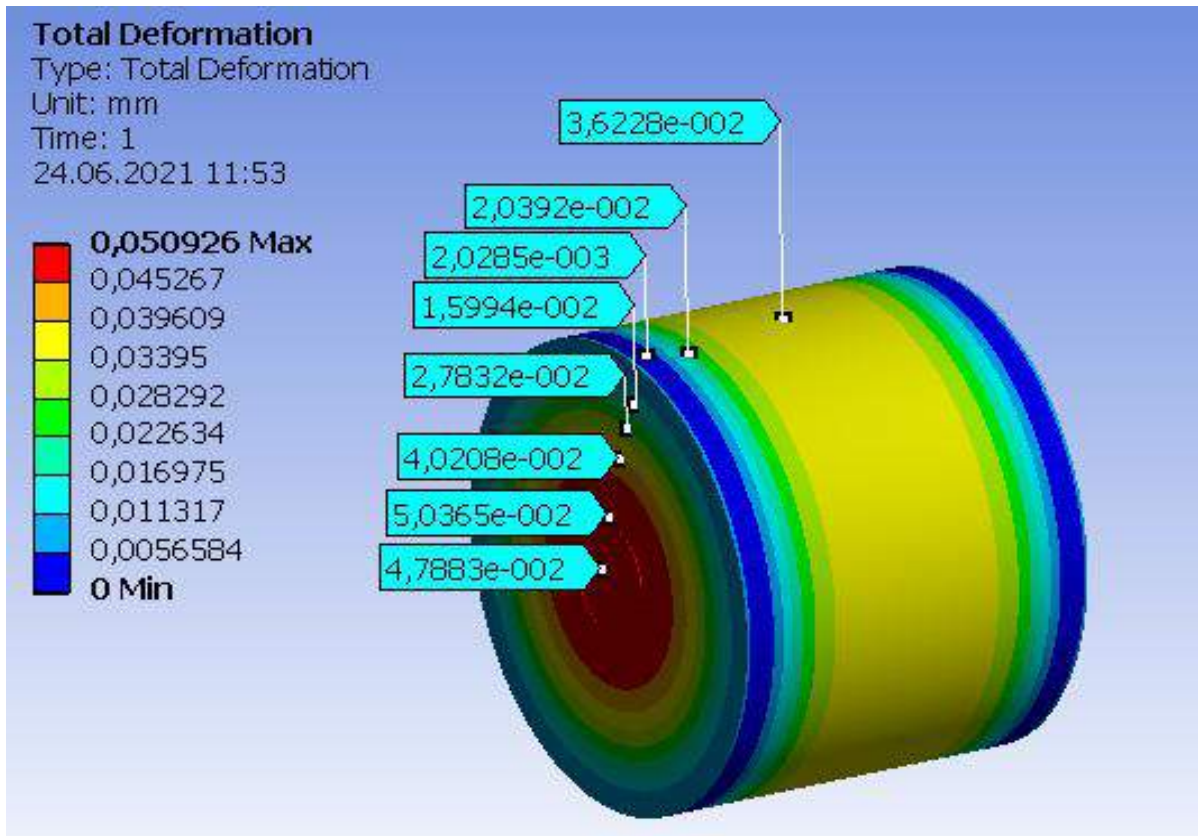


Рис.12 Эпюра напряжений при материале АДВ.

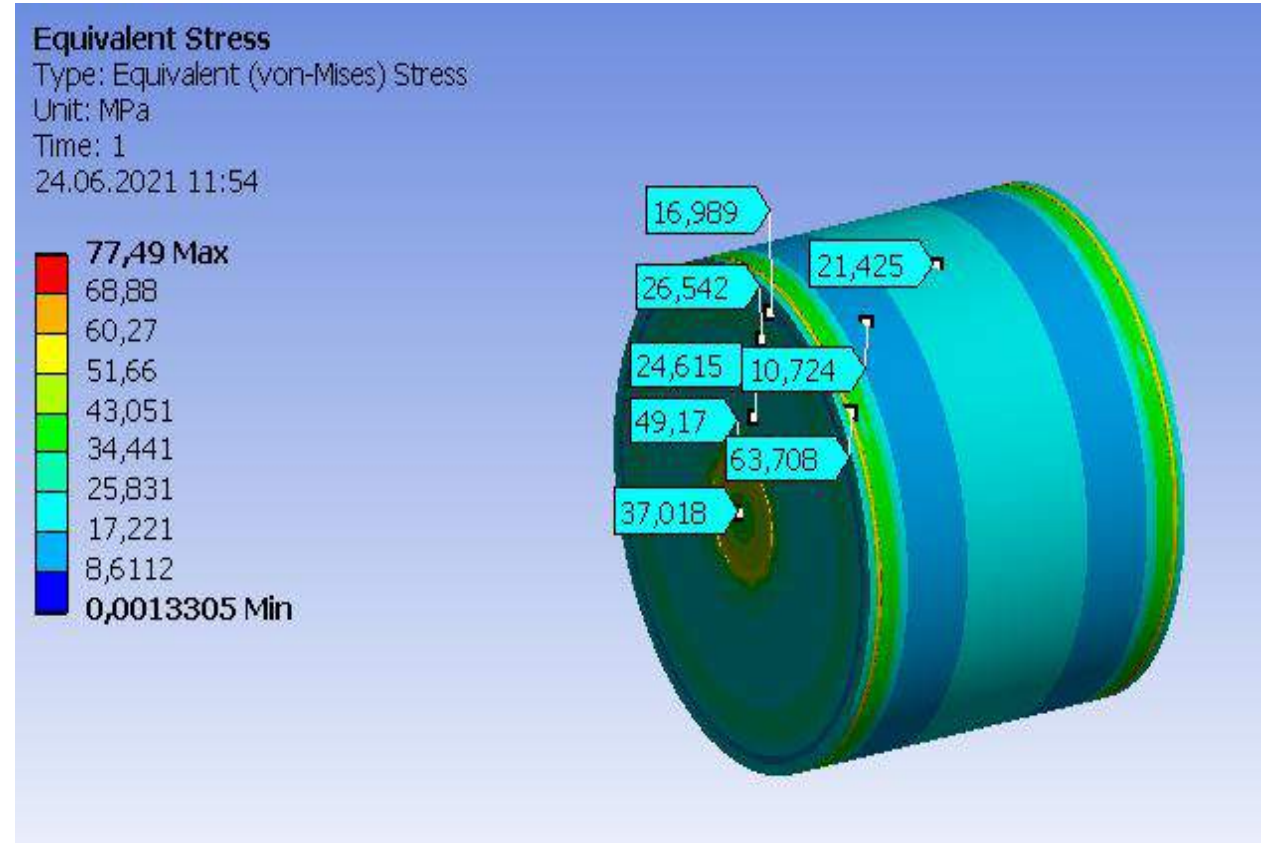


Рис.13 Эпюра перемещения при материале АДВ.

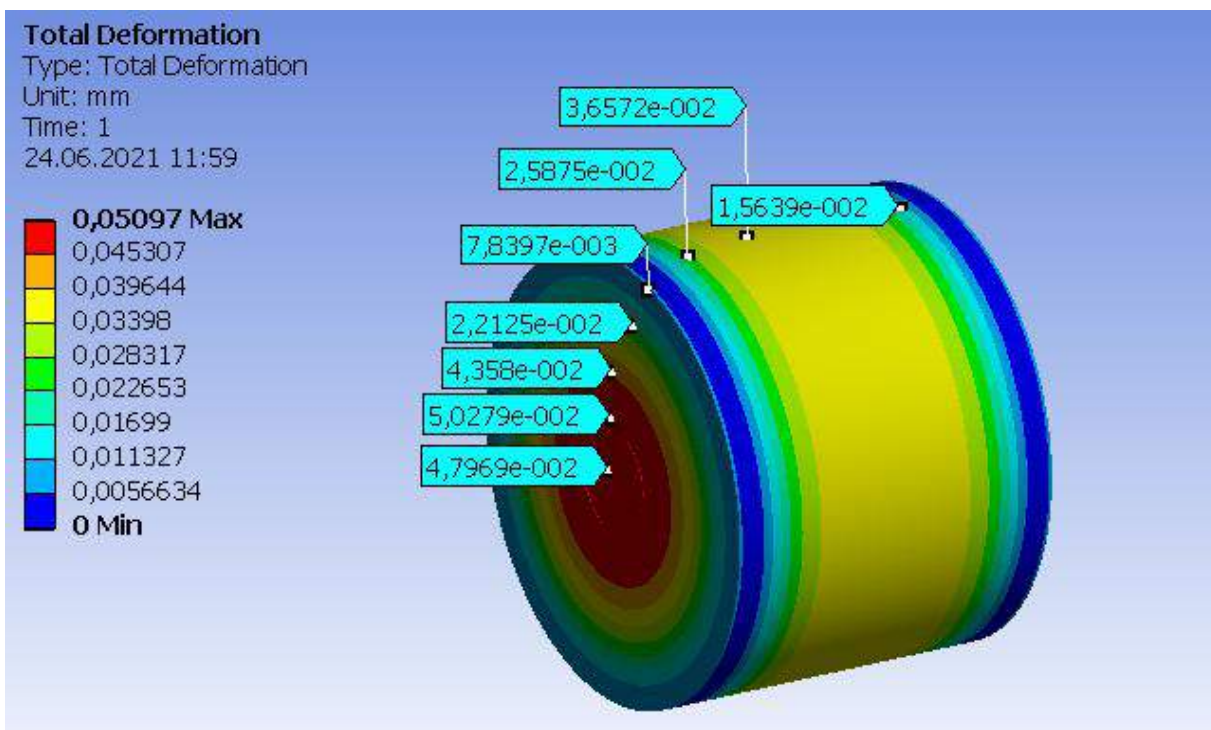


Рис.14 Эпюра перемещения при материале ПУ ВИЛАД.

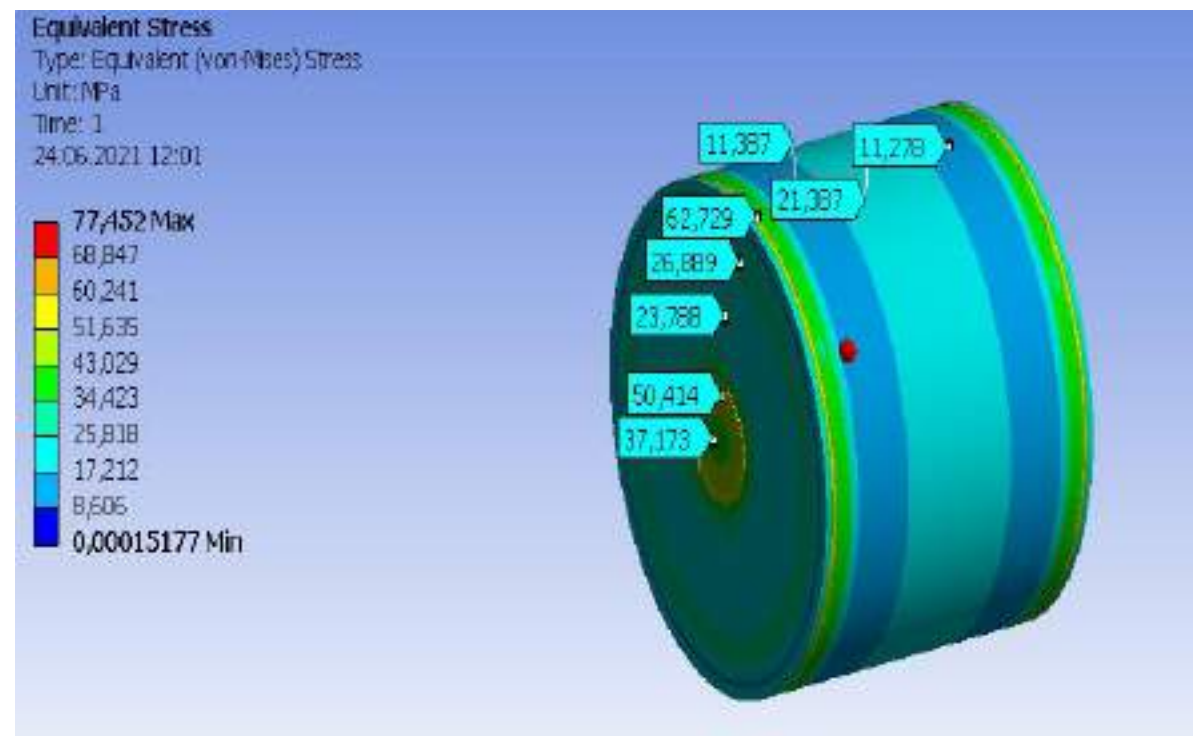


Рис.15 Эпюра напряжений при материале ПУ ВИЛАД.

Из полученных расчетных значений напряжений по модели трансформатора следует, что максимальное напряжение составляет 62,73 МПа, что намного меньше расчетных сопротивлений стеклотекстолита, поэтому прочность корпуса обеспечивается.

Следовательно, разрушение соединения стенки (днища) с корпусом цилиндра происходит не по материалу стеклотекстолита, а по клеевому соединению. Для обеспечения прочности соединения было рассмотрено их соединение с помощью капроновых (полиамидных) ниток.

Было проведено определение продольной силы в цилиндре по безмоментной теории оболочек для электроизолирующего материала ПУ ВИЛАД при действии радиального давления $p_1 = 0,0019$ МПа из условия равновесия полусечения.

Продольная сила в оболочке составляет $N_1 = \pi \cdot R^2 \cdot p_1$, продольная сила,

приходящаяся на метр длины $N_x = \frac{N_1}{2} \cdot \pi \cdot R$, откуда получаем:

$$N_x = \frac{p_1 R}{2}, \quad \text{где } R \text{ – радиус оболочки, м.}$$

Решающий вклад на разрушение соединения стенки с корпусом оказывает осевое давление p_1 , усилие от которого $N = p_1 \pi R^2 = 1209$ Н. Для обеспечения прочного соединения стенки с цилиндрическим корпусом необходимо подобрать количество связей (ниток). Для равномерного соединения по периметру стенки можно использовать полиамидные нити 29x2x2 с нагрузкой на разрыв мокрой нити $F_p = 5 \text{ кгс} = 49$ Н для неблагоприятных условий. Допустимую нагрузку F_{adm} с вероятностью 0,95 можно определить из формулы $F_{adm} = F_p (1 - 1,64 C)$, где C – коэффициент вариации нагрузки. Для капроновых (полиамидных) ниток $C = 0,08$ и $F_{adm} = 42,6$ Н. Следовательно, для обеспечения прочности соединения стенки с корпусом цилиндра минимальное количество нитей $n_{min} = (N / F_{adm}) = 29$

ВЫВОД

Расчеты показали, что напряжения в корпусе трансформатора не превышают прочностных характеристик стеклотекстолита при толщине стенок и цилиндрической части корпуса равной 2 мм. Для обеспечения целостности корпуса трансформатора при нагреве электроизолирующего материала во время эксплуатации предложено усилить узел сопряжения стенки с корпусом путем введения дополнительных связей в виде капроновых нитей и предложен расчет минимального количества этих связей. Полученные данные можно использовать при расчете на прочность корпусов различных трансформаторов тока и напряжений аналогичной конструкции.