

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт энергетики и транспортных систем  
Кафедра «Техника высоких напряжений, электроизоляционная  
и кабельная техника»

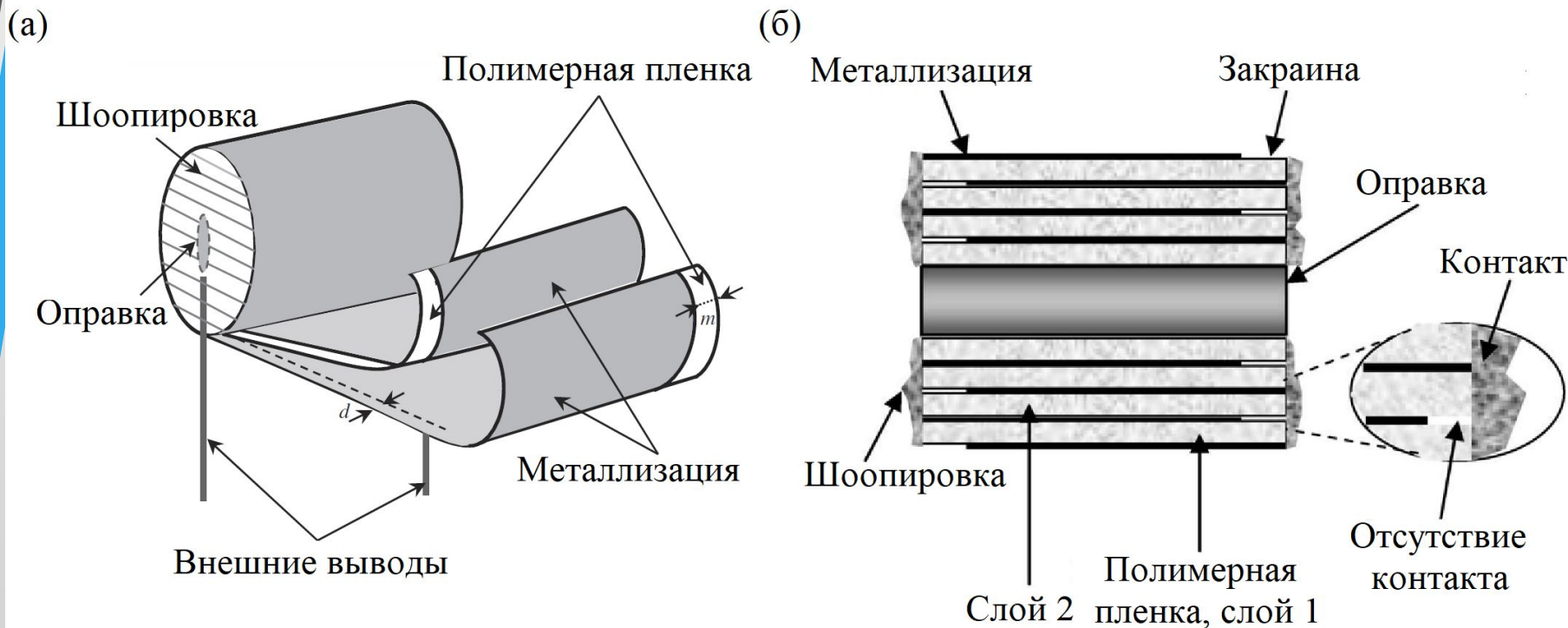
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТРА**

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ  
КОНДЕНСАТОРОВ В РЕЖИМАХ ВЫСОКОЙ  
ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ**

Выполнил студент  
гр.23241/32 Гливенко Д.Ю.

Руководители:  
асс., к.т.н. Иванов И.О.  
доцент, к.т.н. Емельянов О.А.

# Конструкция металлопленочных конденсаторов (МПК)



$$W_{уд} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2} \cdot k \text{ — удельная запасаемая энергия конденсатора}$$

# Цели и задачи исследования

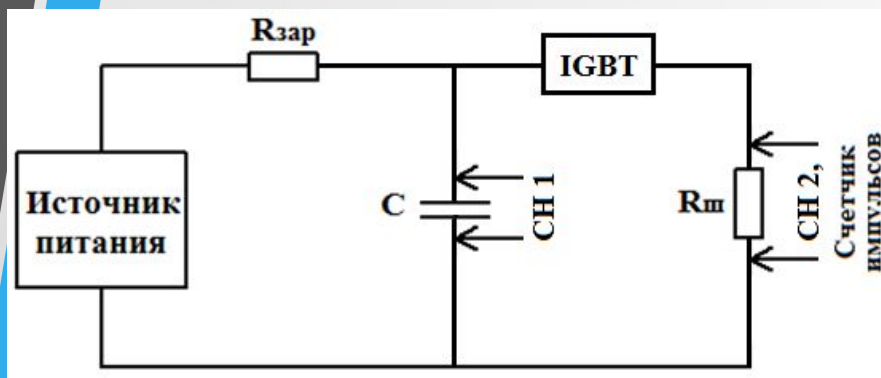
**Цель работы:** исследование влияния высоких токовых нагрузок на работоспособность МПК.

## **Задачи:**

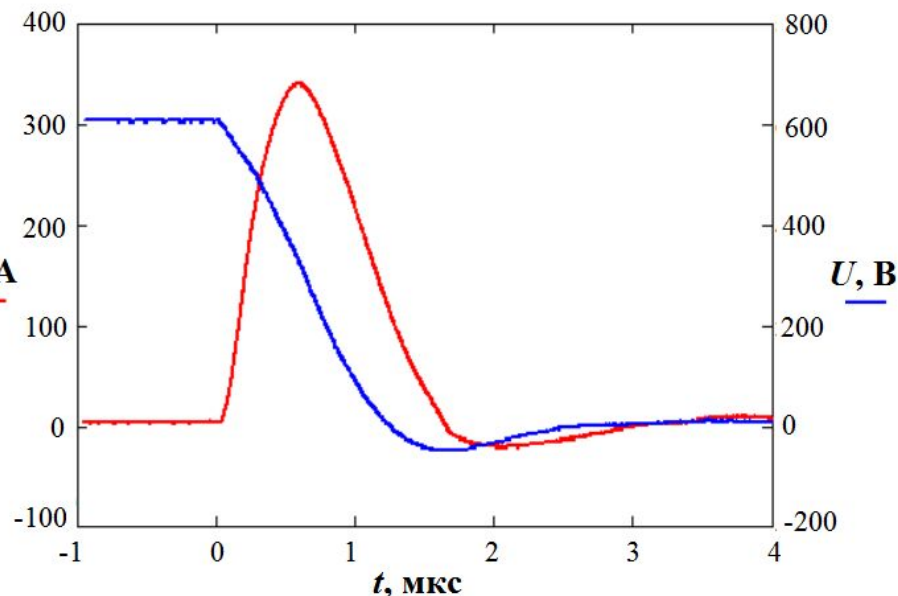
- 1) создать испытательную установку и разработать экспериментальную методику для исследования влияния высоких токовых нагрузок на работоспособность МПК;
- 2) теоретически и экспериментально исследовать процесс разрушения контактных узлов МПК;
- 3) выявить закономерности разрушения контактных узлов МПК.

# Электрическая схема экспериментальной установки (а) и форма тока $I(t)$ и напряжение $U(t)$ на конденсаторе (б)

(а)



(б)



$R_{зар} = 1$  кОм – зарядное сопротивление;  
 $R_{ш} = (0.5 - 1)$  Ом – токовый шунт;  
 $C$  – исследуемый конденсатор.

Предельно допускаемая  
амплитуда импульсного тока  
 $I_m = 1.5 - 66$  А.

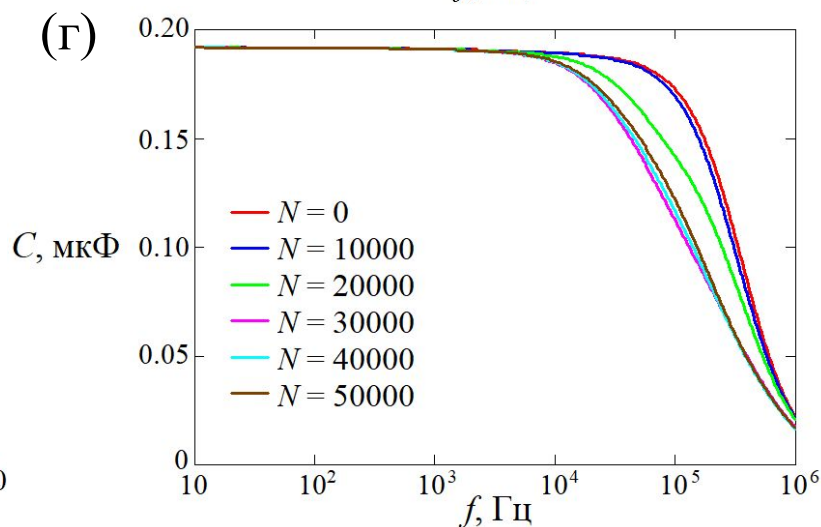
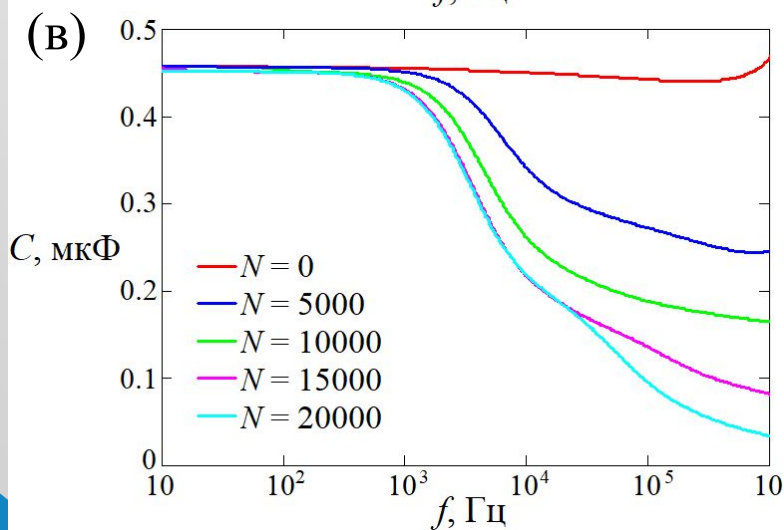
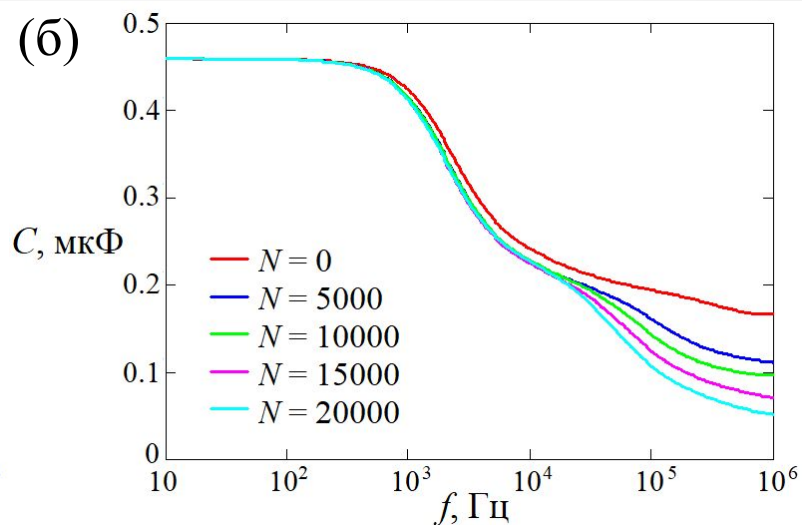
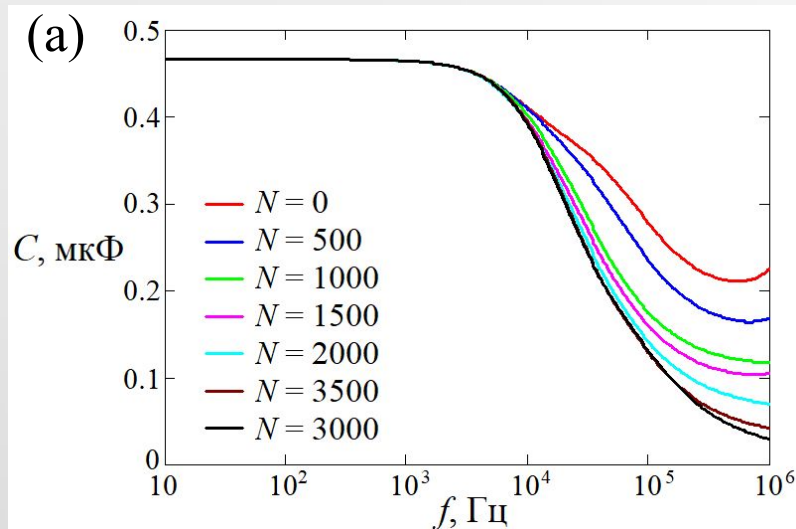
**Объекты исследования:**

К78-2, К73-11, К73-17;

$U_H = 63 - 630$  В;

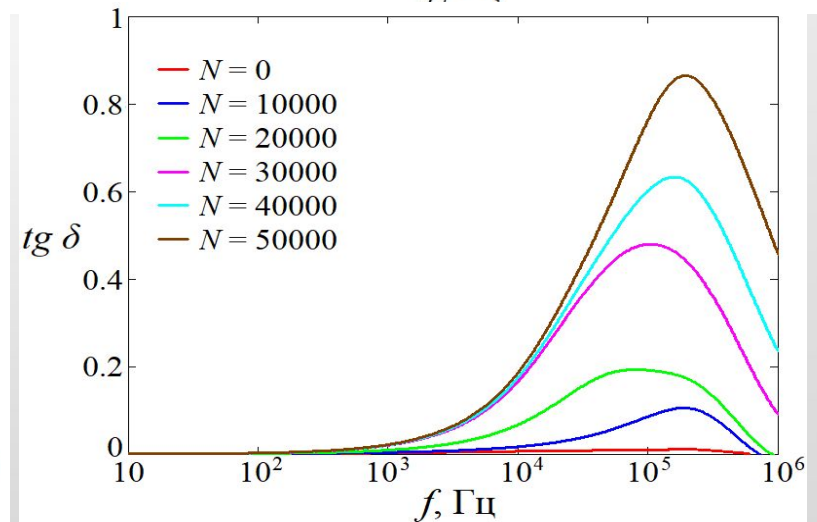
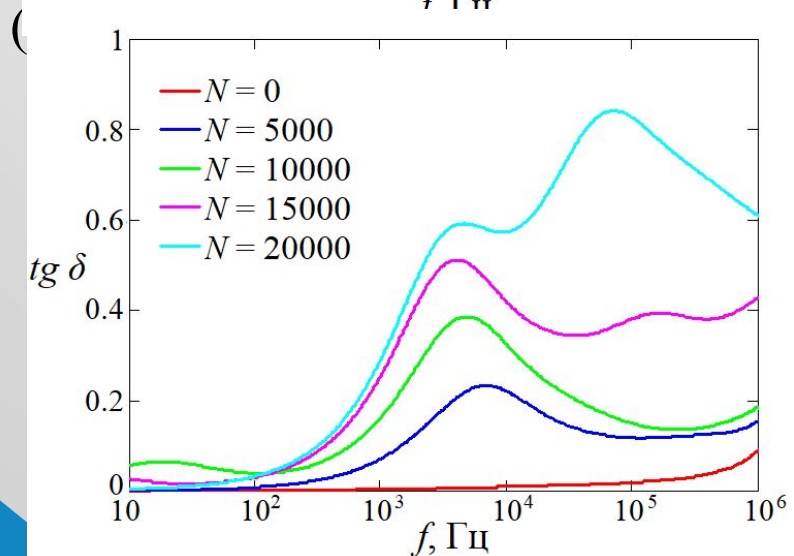
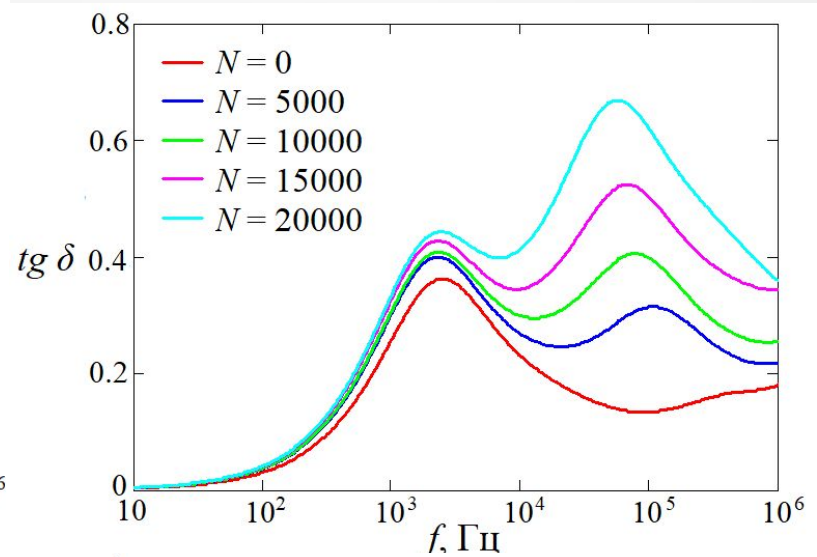
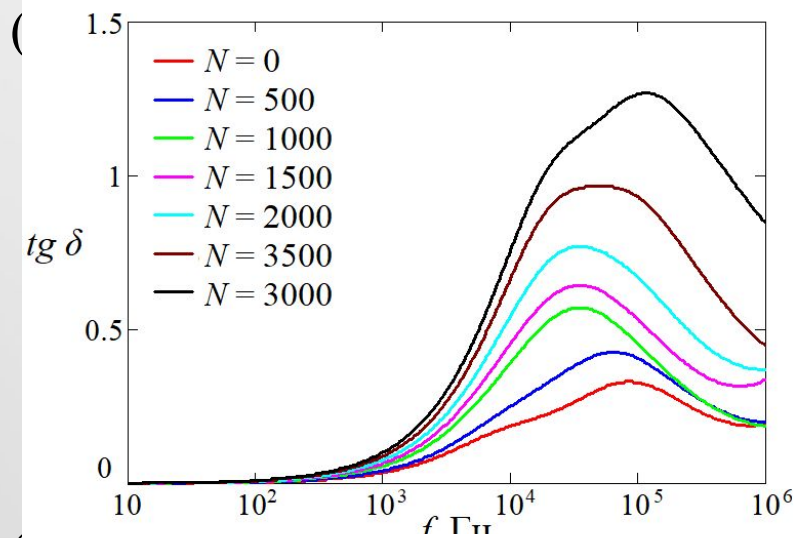
$C_H = 0.1 - 2.2$  мкФ.

# Зависимости емкости конденсаторов от частоты после $N$ циклов заряд-разряд



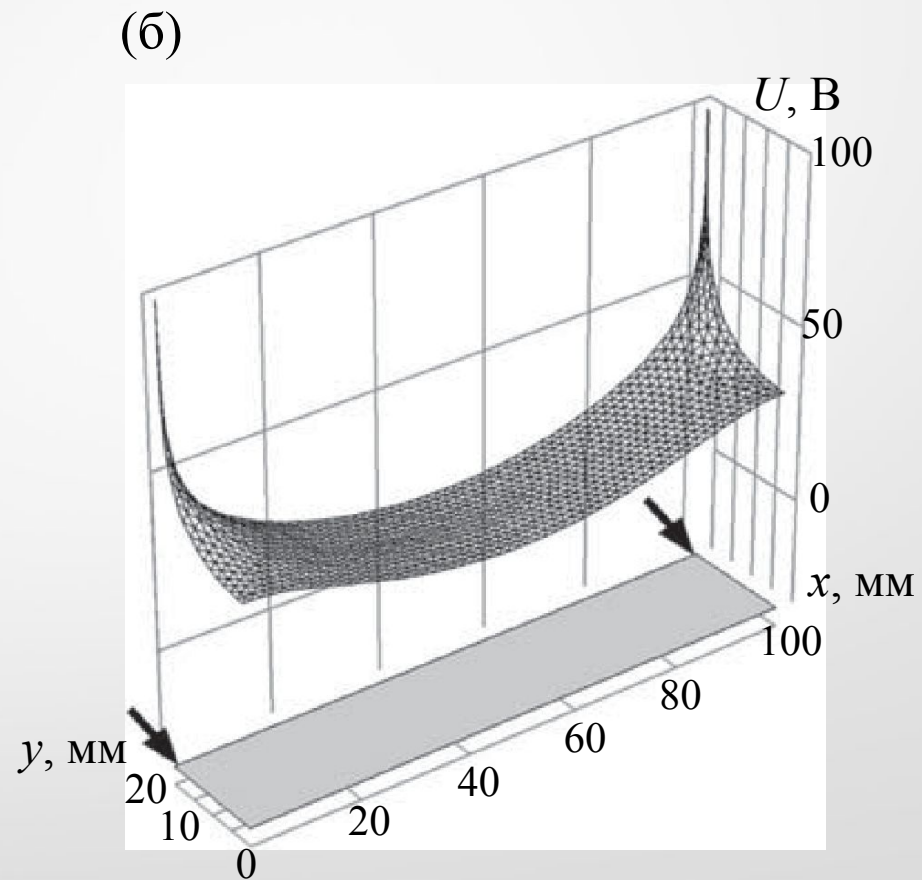
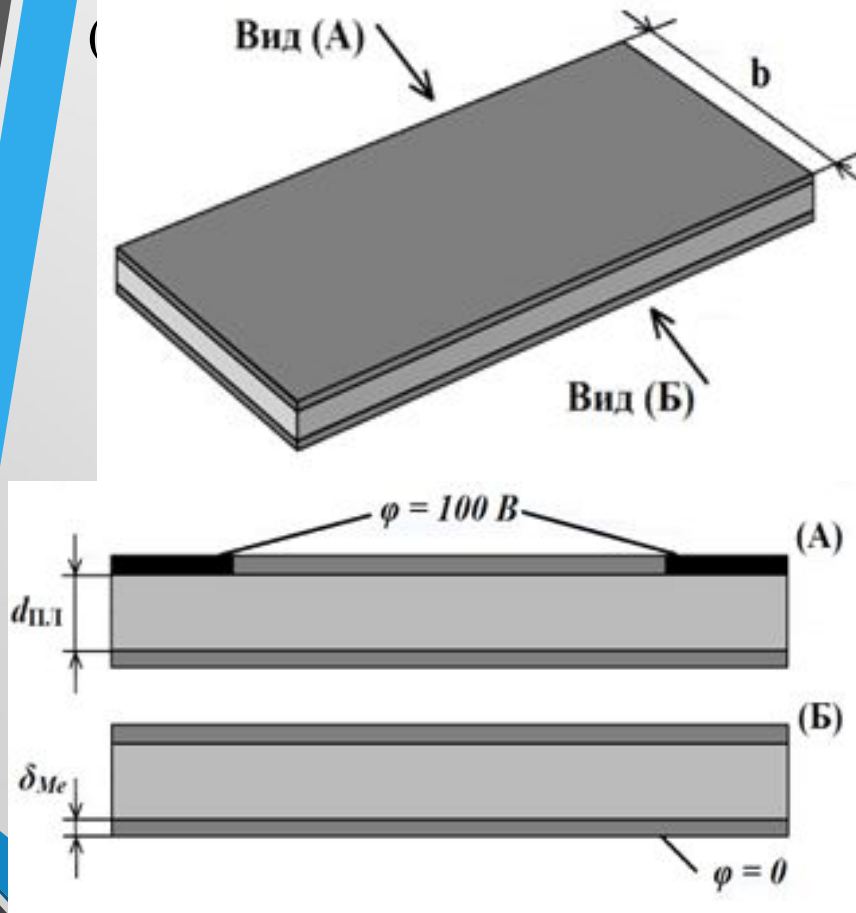
К73-11  $U_H = 630$  В  $C_H = 0.47$  мкФ

# Зависимости емкости конденсаторов от частоты после $N$ циклов заряд-разряд



K73-11  $U_H = 630$  В  $C_H = 0.47$  мкФ

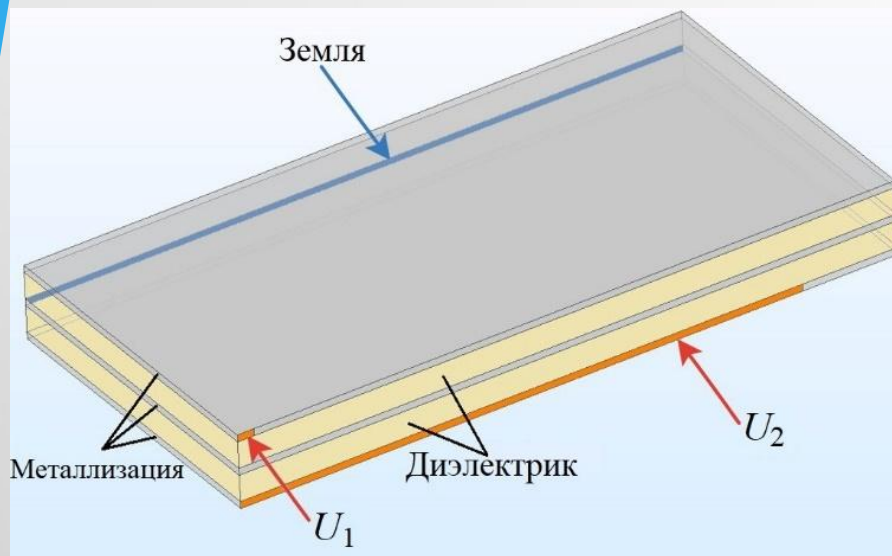
# Геометрическая модель численного моделирования (а) и распределение потенциала по поверхности электрода при неравномерном подводе тока (б)



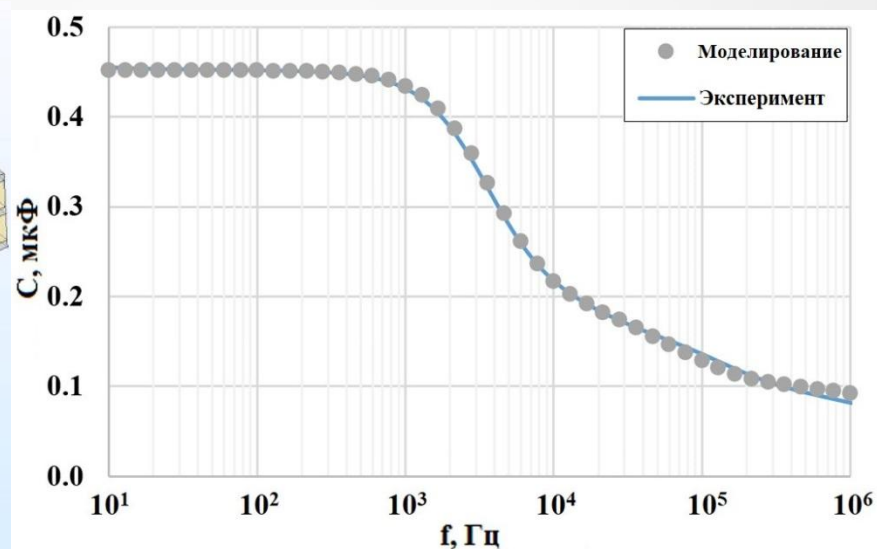
$$d_{\text{пл}} = 12 \text{ мкм} \quad \delta_{\text{Me}} = 30 \text{ нм} \quad b = 2 \text{ см}$$

# Геометрическая модель и сравнение численного моделирования с результатами эксперимента

(а)



(б)



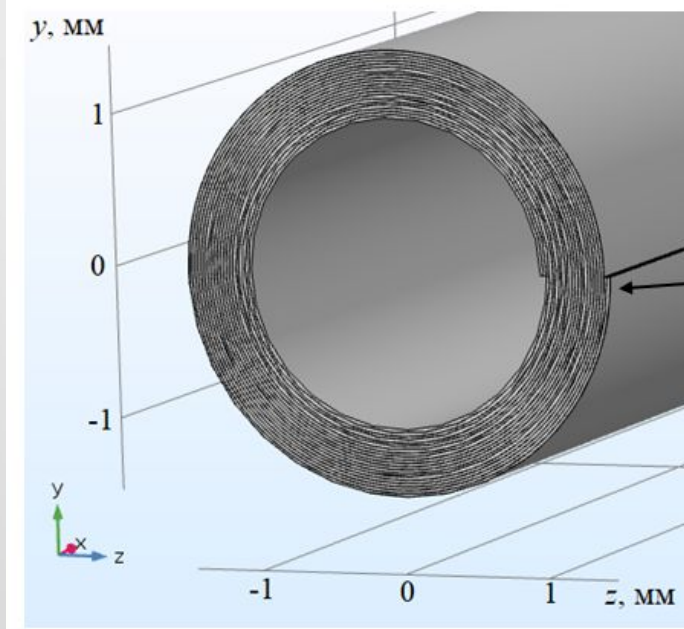
$$C(\omega) = \frac{\text{Im}(\dot{Y}(\omega))}{\omega}$$

15000 циклов заряд-разряд



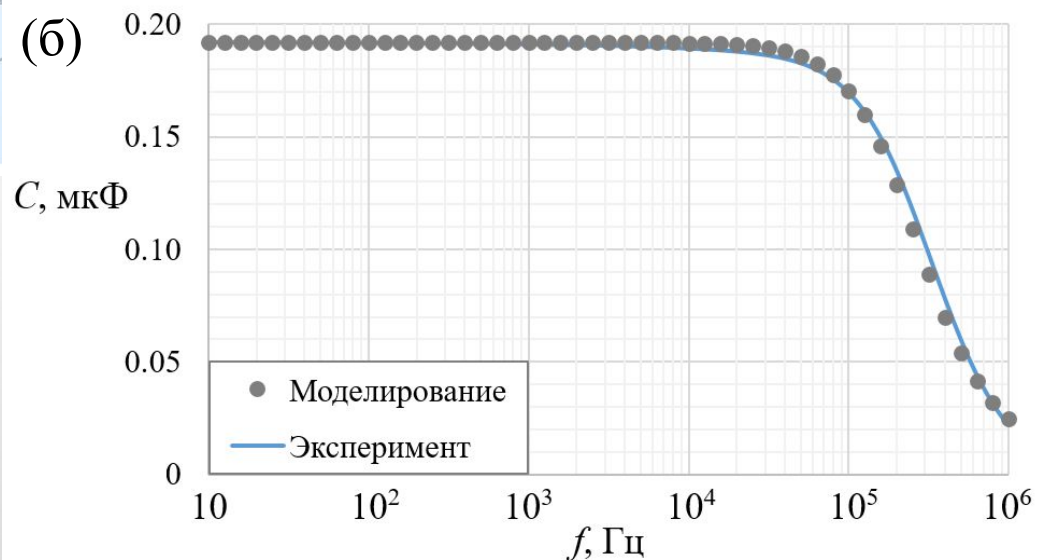
# Геометрическая модель и сравнение численного моделирования с результатами эксперимента

(а)



$$b = \frac{\delta_{\text{МЭ}} + d}{\pi}$$

(б)

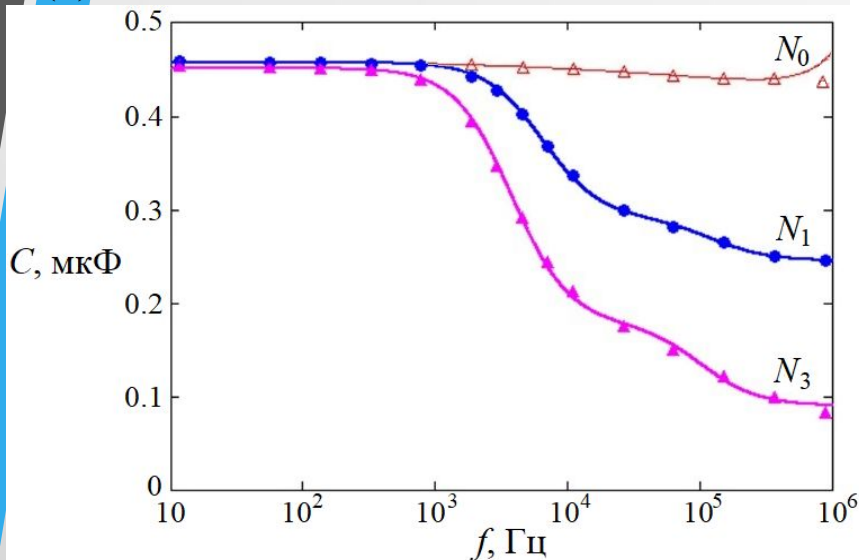


$$\begin{cases} (a + b \cdot s) \cdot \sin(s) \\ (a + b \cdot s) \cdot \cos(s) \end{cases}$$

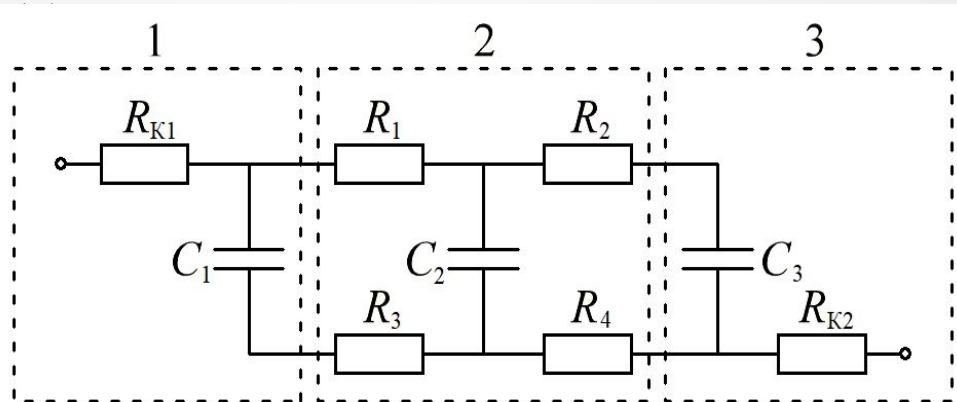
10000 циклов заряд-разряд

# Эквивалентная схема МПК для описания частотной зависимости емкости

(a)



$N_0 = 0$ ,  $N_1 = 5\,000$ ,  $N_3 = 15\,000$  циклов заряд-разряд. Маркеры – расчет, сплошные линии – эксперимент



$C_1$  и  $C_3$  – емкость катодных и анодных приконтактных областей;  
 $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  – сопротивление контактных узлов;  
 $C_2$  – емкость участков, отдаленных от контактных зон, где градиент потенциала незначительный;  
 $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ,  $R_4$  – эквивалентные сопротивления металлизированных электродов положительной и отрицательной полярности соответственно.

## Параметры эквивалентной схемы

$N$	$C_1$ , нФ	$C_2$ , нФ	$C_3$ , нФ	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом
0	83	214	160	122	18	407	12
5000	83	214	160	136	7	149	6
15000	79	213	159	264	2	139	10

# Выводы

1) В рамках настоящей ВКР создана испытательная установка и разработана экспериментальная методика для исследования влияния высоких токовых нагрузок на работоспособность МПК.

2) В ходе работы был обнаружен эффект полярного разрушения контактных узлов МПК. Эффект полярного разрушения может быть объяснен процессом электромиграции в области контактирования.

3) Было обнаружено появление частотной дисперсии емкости конденсаторов по мере их деградации, которая проявляется в виде значительного снижения эффективной емкости при частотах выше 1 кГц. Деградация контактных узлов сопровождается значительным ростом значения тангенса угла потерь в широком диапазоне частот, а также появлением одного или двух максимумов в области высоких частот.

4) Проведено численное моделирование распределения потенциала в конденсаторной структуре.

5) На основании экспериментальных и расчетных данных была предложена эквивалентная схема замещения МПК, учитывающая деградацию контактных узлов.



**Спасибо за внимание!**