


ОАО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ» (ОАО «НИИПТ»)

Повышение точности определения места короткого замыкания на линиях электропередачи с помощью спектрального подхода



Иванова Елена Алексеевна, н.с. ОАО «НИИПТ»

Санкт-Петербург
2017

Постановка задачи

Устройства ОМКЗ из-за погрешностей, как правило, могут указать только зону обхода.

Основной вклад в погрешности устройств ОМКЗ вносит в том числе неизвестное переходное сопротивление РП в месте к.з.

Цель работы –совершенствование дистанционных методов и устройств определения места короткого замыкания (ОМКЗ) при помощи спектрального анализа на линиях электропередачи для снижения погрешности при ОМКЗ и повышения надежности эксплуатации ЛЭП.

Основные направления исследований включали:

1. Разработку **комбинированного алгоритма ОМКЗ** на воздушных линиях переменного тока.

2. Разработку **математических моделей** для исследования установившихся и аварийных режимов в линиях переменного тока.

3. **Апробацию** разработанных алгоритмов ОМКЗ на базе спектрального метода на физических моделях ЛЭП на основе данных систем аварийных регистраторов ЛЭП.

Схема участка сети ВЛ переменного тока и схема замещения замкнутого участка линии

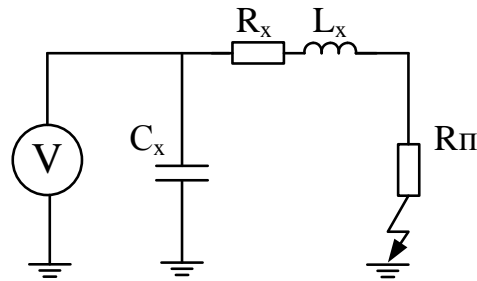


Рис. 12 Схема моделирования однородного короткозамкнутого участка линии ПТ

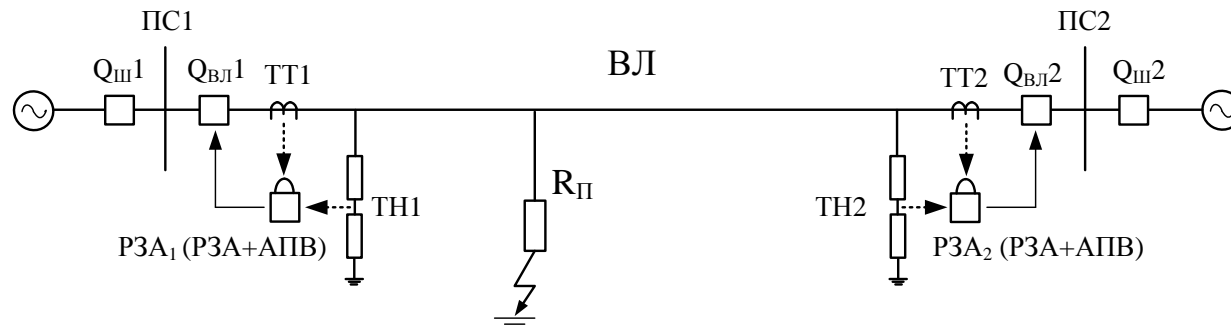
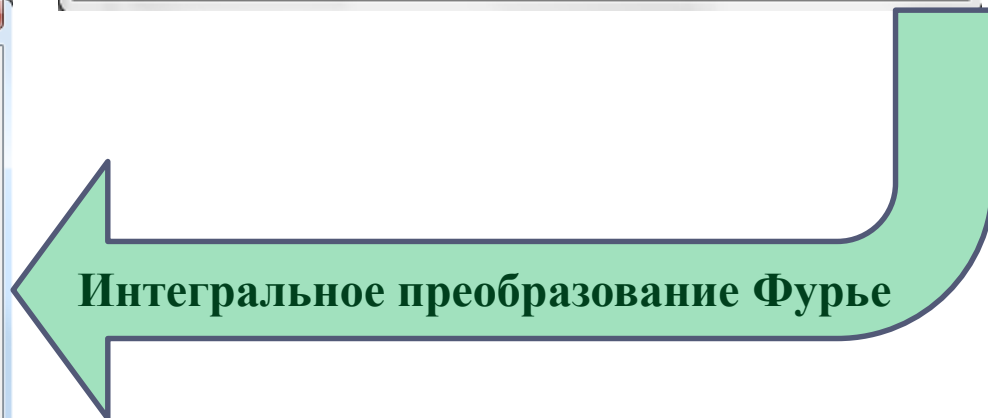
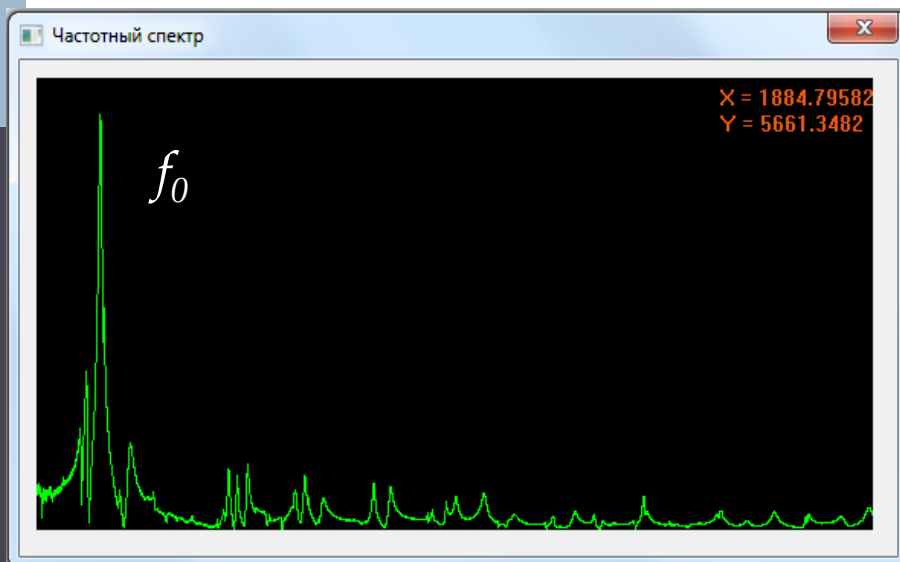
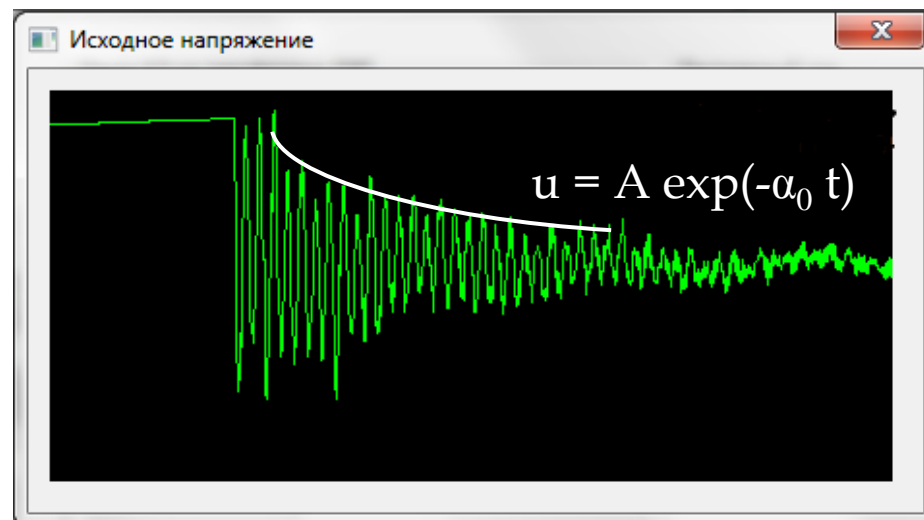


Рис. 13 Первичная схема участка сети ВЛ

Получение спектральной характеристики напряжения поврежденной фазы ЛЭП



К.з. на ЛЭП переменного тока

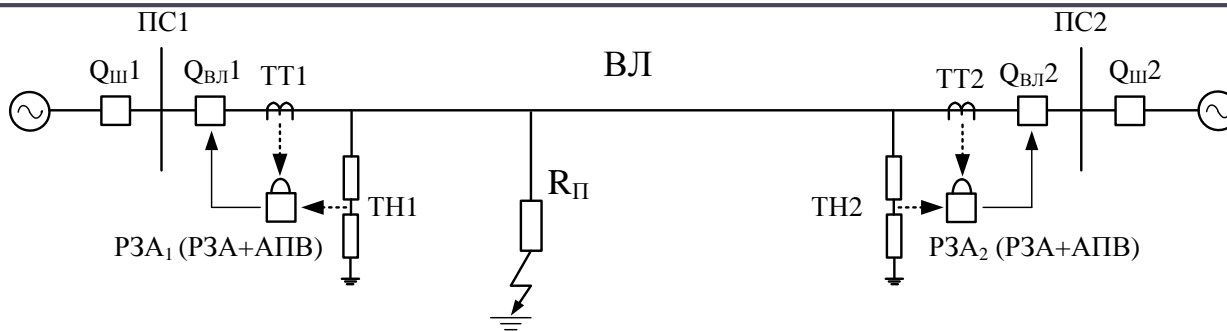


Рис. 11 Первичная схема участка сети ВЛ

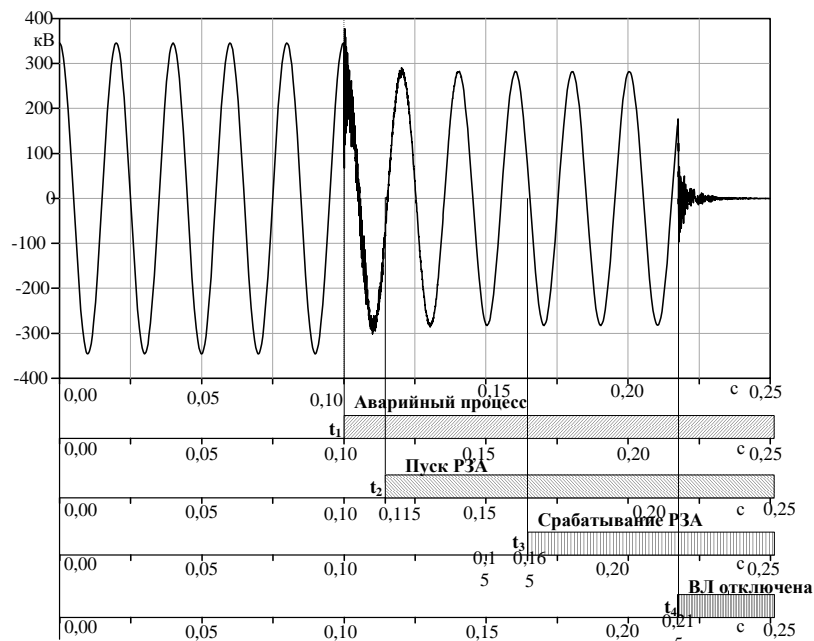


Рис. 12 Осциллограмма напряжения поврежденной фазы при однофазном к.з. ЛЭП и временная диаграмма действия РЗ и АПВ

Комбинированный алгоритм ОМКЗ на ЛЭП переменного тока

1. $l_{X_ДНСТ} \longrightarrow ?$

2. $l_1 = l_{X_ДНСТ} + 0.3l_{X_ДНСТ} = 1.3l_{X_ДНСТ}; l_2 = l_{X_ДНСТ} - 0.3l_{X_ДНСТ} = 0.7l_{X_ДНСТ} \longrightarrow$ диапазон частот $f_1 \dots f_2$

$$f_n = \frac{-\dot{b}_f'' \pm \sqrt{\dot{b}_f''^2 - 4 \cdot \dot{a}_f'' \cdot \dot{c}_f''}}{2 \cdot \dot{a}_f''} \quad n=1,2 \quad \dot{a}_f'' = \left(-\frac{4}{\pi^2} \cdot l_n^2 \cdot L_0 \cdot C_0 \right)$$

$$\dot{b}_f'' = \left(j \cdot 2 \cdot l_n^2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot C_0 \cdot L_0 \cdot \alpha + j \cdot l_n^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot r_0 + j \cdot l_n \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot R_{II} \right) \quad \dot{c}_f'' = \left(l_n^2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot C_0 \cdot L_0 \cdot \alpha^2 + l_n^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot r_0 \cdot \alpha + l_n \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot R_{II} \cdot \alpha + 1 \right)$$

3. Диапазон частот $f_1 \dots f_2 \longrightarrow f_0$ – доминирующая частота в спектральной характеристике

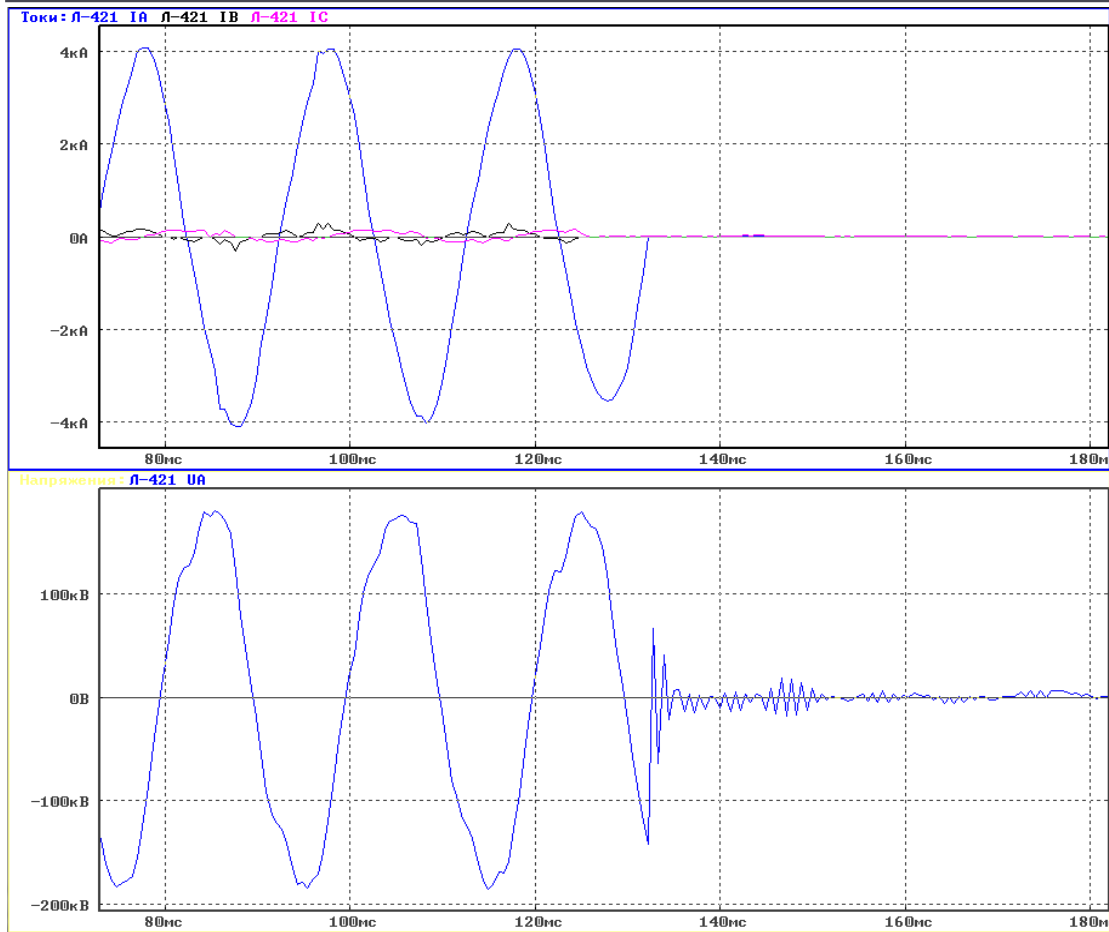
4. Расчет расстояния до места к.з. предлагаемым спектральным методом:

$$l_{X_СПЕКТР} = \operatorname{Re} \left(\frac{-\dot{b}_f'' + \sqrt{\dot{b}_f''^2 - 4 \cdot \dot{a}_f'' \cdot \dot{c}_f''}}{2 \cdot \dot{a}_f''} \right)$$

$$\dot{a}_f'' = \left(\frac{4}{\pi^2} \cdot \dot{p}_0^2 \cdot (L_{0Л} + L_{0З}) \cdot C_{0Л} + \frac{2}{\pi} \cdot \dot{p}_0 \cdot C_{0Л} \cdot (r_{0Л} + r_{0З}) \right) \quad \dot{b}_f'' = \left(\frac{2}{\pi} \cdot \dot{p}_0 \cdot C_{0Л} \cdot R_{II} \right) \quad c'' = 1 \quad \dot{p}_0 = -\alpha_0 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

$r_{0Л}, L_{0Л}, C_{0Л}$ – погонные параметры фазы линии, $L_{0З}, r_{0З}$ – погонные параметры земляного провода

Натурная проверка алгоритма ОМКЗ на базе спектрального анализа на линии переменного тока



Погонные параметры линии:

$$C_0 = 0,01086 \text{ мкФ/км,}$$

$$L_0 = 1,045 \text{ мГн/км,}$$

$$r_0 = 0,1 \text{ Ом/км.}$$

Расстояние от подстанции до
места замыкания - 88 км

$$f_0 = 800 \text{ Гц}$$

$$p = -215 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 800,$$

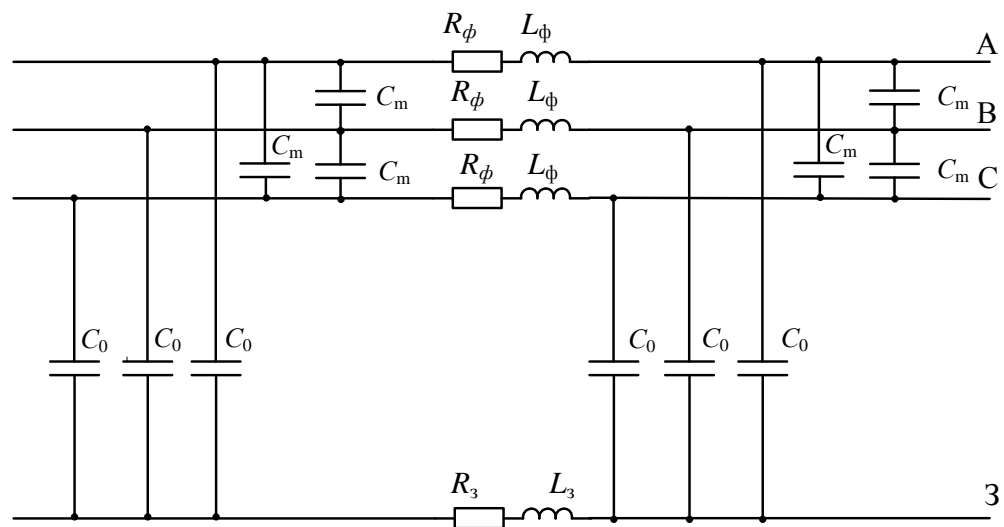
$$k_x = 92,027 \text{ км}$$

Погрешность:

$$\delta = 4,5\% \text{ от длины линии}$$

Рис. 13 Кривые токов в фазах линии и кривая напряжения поврежденной фазы А при коротком замыкании ВЛ-421 330 кВ

Цифровая модель линии электропередачи переменного тока 330 кВ, 200 км



$$N_{\text{звеньев}} = 20$$

$$l_{\text{звена}} = 10 \text{ км}$$

Рис. 14 Схема замещения ячейки ВЛ

Параметры ячейки схемы замещения линии

| R, Ом | L, мГн | C, нФ |
|------------------|--------------------|---------------|
| $R_{\phi} = 1,2$ | $L_{\phi} = 10,45$ | $C_0 = 108,6$ |
| $R_3 = 0,49$ | $L_3 = 6,5$ | $C_m = 20$ |

Проверка комбинированного алгоритма на модели линии переменного тока (1)

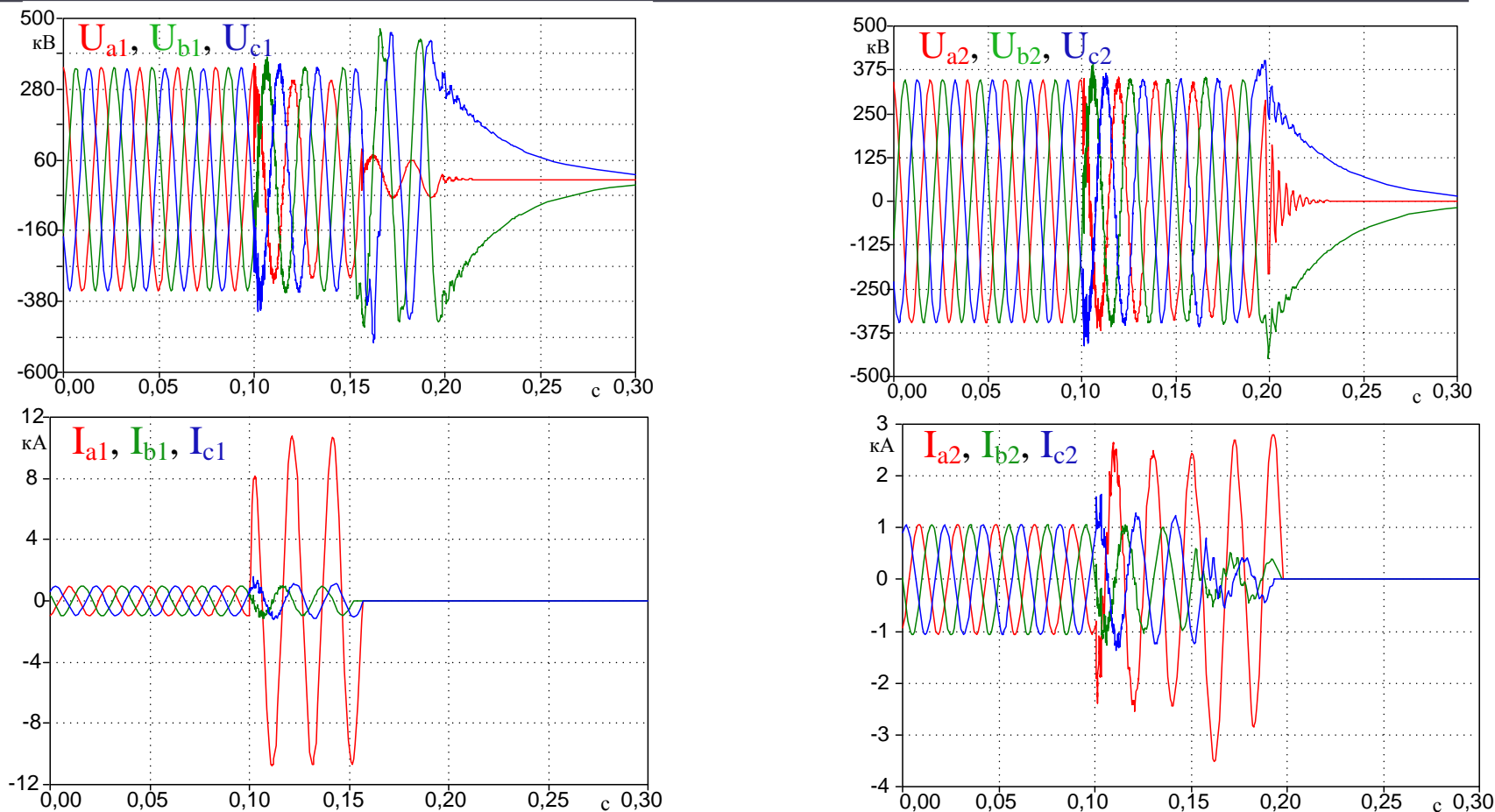
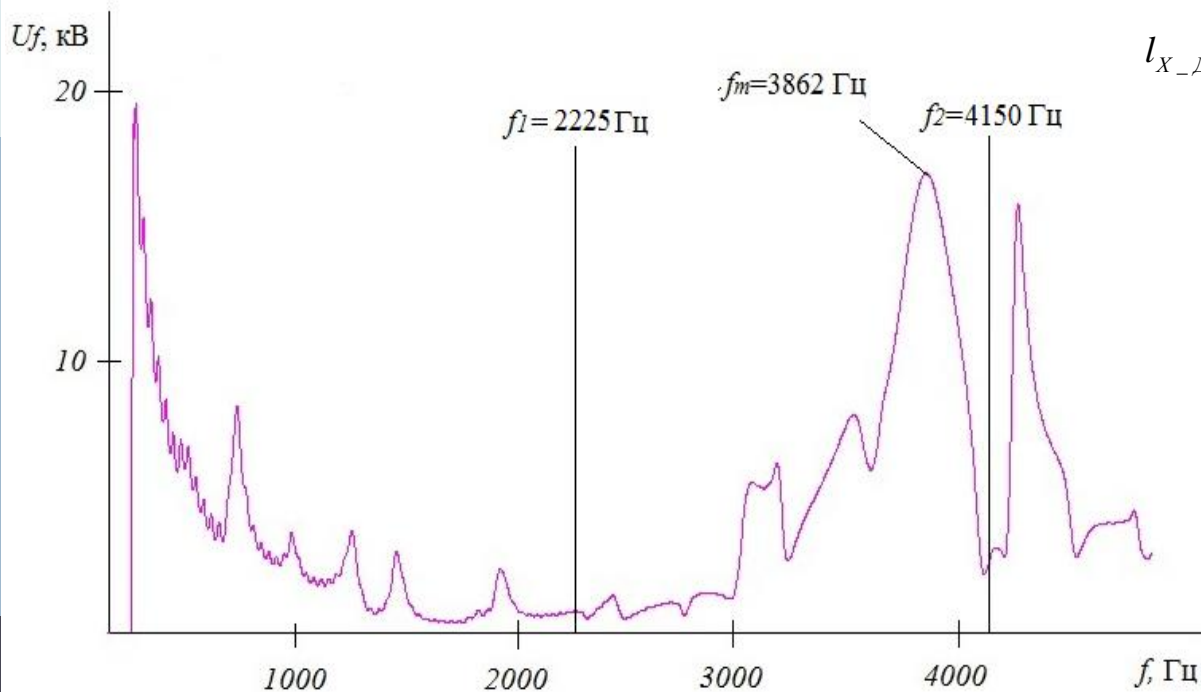


Рис. 15 Осциллограммы фазных напряжений и токов линии со стороны подстанций ПС1 и ПС2 при однофазном к.з. ($l_{к.з.} = 15$ км, $R_{П} = 30$ Ом)

Проверка комбинированного алгоритма на модели линии переменного тока (2)



$$l_{X_ДИСТ} = \frac{1}{0,518} \cdot \frac{305,98 \cdot 10^3}{8,72 \cdot 10^3} \cdot \sin 17^\circ = 19,35 \text{ км}$$

$$\delta_{КЗ} = 29 \%$$

$$\delta_{\Lambda} = 2,2 \%$$

$$l_1 = l_{X_ДИСТ} - 0,3 \cdot l_{X_ДИСТ} = 13,5 \text{ км}$$

$$l_2 = l_{X_ДИСТ} + 0,3 \cdot l_{X_ДИСТ} = 25,2 \text{ км}$$

Диапазон частот 2225...4150 Гц.

$$f_0 = 3862 \text{ Гц}$$

$$l_{X_СПЕКТР} = 14,6 \text{ км}$$

$$\delta_{КЗ} = 2,7 \%$$

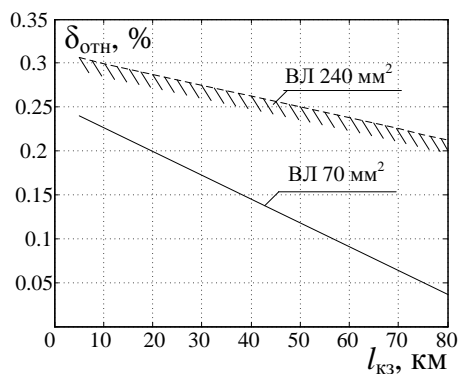
$$\delta_{\Lambda} = 0,2 \%$$

Рис. 16 Диапазон значимых частот в спектре напряжения поврежденной фазы со стороны ПС1

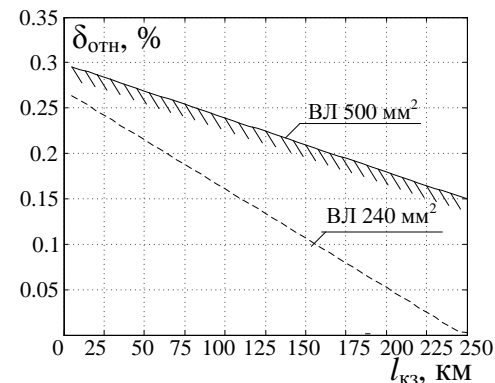
Проверка комбинированного алгоритма на модели линии переменного тока (3)

| Тип к.з. | R_{Π} , Ом | $L_{X_реальн'}$ кМ | ОМП импедансным методом | | Комбинированный метод ОМП | |
|-------------------------|----------------|------------------------|----------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| | | | $L_{X_расч'}$ кМ | δ , % | $L_{X_расч'}$ кМ | δ , % |
| Однофазное | 30 | 10 | 10,2 | 0,1 | 10,08 | 0,04 |
| Двухфазное без земли | 0,2 | 90 | 81,2 | 4,4 | 89,7 | 0,15 |
| Трехфазное на землю | 20 | 60 | 53,5 | 3,25 | 60,09 | 0,05 |

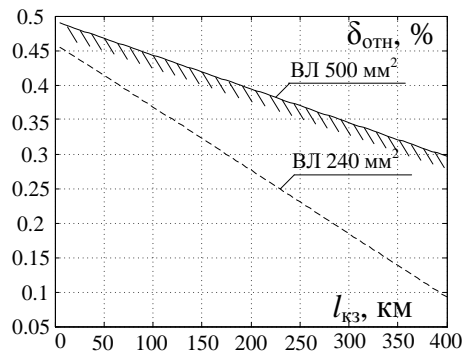
Погрешность, вносимая неизвестной величиной переходного сопротивления в разработанный алгоритм ОМКЗ (1)



а)



б)



в)

Рис. 18 Относительная погрешность разработанного метода ОМП при к.з. на ВЛ 110 кВ (а), ВЛ 220 кВ (б), ВЛ 330 кВ (в) через переходное сопротивление $R_{\text{п}}=30 \text{ Ом}$

Выводы

- ✓ Разработан комбинированный метод ОМКЗ на линиях переменного тока на базе совместного применения спектрального анализа и известных дистанционных алгоритмов ОМКЗ.
- ✓ Разработанный комбинированный метод ОМКЗ на ВЛ переменного тока позволяет существенно повысить точность известных дистанционных методов и устройств ОМКЗ.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Повышение точности результата ОМКЗ на базе спектрального подхода

1. Шаг интегрирования регистрируемых величин

$$N > 2Tf_{\text{верх}}$$
$$f_{\text{верх}} \leq 13-16 \text{ кГц}$$
$$l_{\text{min}} \approx \frac{V}{4 \cdot f_{\text{верх}}} = \frac{300 \cdot 10^3}{4 \cdot (13 \div 16) \cdot 10^3} = 5 \div 6 \text{ км}$$

2. Шаг дискретизации по частоте

$$f_{\text{min}} \approx \frac{250 \cdot 10^3}{4 \cdot 200} = 312,5 \text{ Гц}$$

Неточность в 3 Гц $\rightarrow \delta = 1\%$ (примерно 2 км на длине 200 км)

3. Выделение постоянной составляющей

$$\hat{u}(n) = u(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(n)$$

4. Метод среднего наклона

$$\bar{\alpha}_m = \frac{1}{\frac{N}{3} \left(N - \frac{N}{3} \right) \Delta t} \left[\sum_{n=\frac{2}{3}N}^N u(n) - \sum_{n=1}^{\frac{N}{3}} u(n) \right]$$
$$u^*(n) = \hat{u}(n) - \bar{\alpha}_m \left(n - \frac{N}{2} \right)$$

Моделирование частотных характеристик земли в рассматриваемом диапазоне частот $0 \dots f_{\text{макс}}$

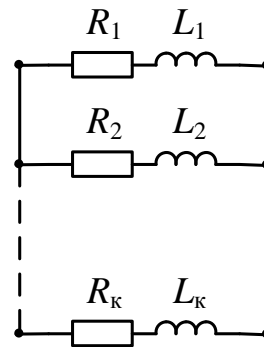


Рис. 26 Ячейка цепочечной схемы, моделирующая землю

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^k \frac{R_n}{R_n^2 + (\omega_i L_n)^2} &= \frac{r(\omega_i)}{[r(\omega_i)]^2 + [\omega_i L(\omega_i)]^2} \\ \sum_{n=1}^k \frac{\omega_i L_n}{R_n^2 + (\omega_i L_n)^2} &= \frac{\omega_i L(\omega_i)}{[r(\omega_i)]^2 + [\omega_i L(\omega_i)]^2} \end{aligned} \right\}$$

$$f_{\text{макс}} = 20 \text{ кГц}$$