

---

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ  
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

---



**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ  
ПАО «ФСК ЕЭС»**

**СТО 56947007-  
29.240.55.224-2016**

---

**Методические указания по определению мест повреждений  
ВЛ напряжением 110 кВ и выше**

Стандарт организации

Дата введения: 17.08.2016

ПАО «ФСК ЕЭС»  
2016

## **Предисловие**

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», объекты стандартизации и общие положения при разработке и применении стандартов организаций Российской Федерации - ГОСТ Р 1.4 - 2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения», общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению межгосударственных стандартов, правил и рекомендаций по межгосударственной стандартизации и изменений к ним – ГОСТ 1.5-2001, правила построения, изложения, оформления и обозначения национальных стандартов Российской Федерации, общие требования к их содержанию, а также правила оформления и изложения изменений к национальным стандартам Российской Федерации - ГОСТ Р 1.5-2012.

## **Сведения о стандарте организации**

1. РАЗРАБОТАН: ООО «НПП Бреслер».
2. ВНЕСЁН: Департаментом релейной защиты, метрологии и автоматизированных систем управления технологическими процессами, Департаментом инновационного развития.
3. УТВЕРЖДЁН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ: Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 17.08.2016 № 289.
4. ВВЕДЕН: ВПЕРВЫЕ.

Замечания и предложения по стандарту организации следует направлять в Департамент инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» по адресу 117630, Москва, ул. Ак. Челомея, д. 5А, электронной почтой по адресу: [vaga-na@fsk-ees.ru](mailto:vaga-na@fsk-ees.ru).

Настоящий стандарт организации не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения ПАО «ФСК ЕЭС»

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Классификация методов определения мест повреждения ВЛ.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Расчет мест повреждений ВЛ без ответвлений с помощью формул. ....</b>	<b>7</b>
2.1. Двусторонние измерения .....	7
2.1.1. Расчетные формулы для многоцепных ВЛ.....	7
2.1.2. Расчетные формулы для одноцепных и двухцепных ВЛ.....	8
2.1.3. Расчетные формулы, учитывающие поперечную реактивную (емкостную) проводимость ВЛ .....	11
2.1.4. Расчетные формулы, учитывавшие активное сопротивление проводов ВЛ.....	16
2.1.5. Расчетные формулы для ВЛ, имеющих сближение на части трассы .....	16
2.2. Односторонние измерения .....	20
2.2.1. Измерение тока (напряжения) .....	20
<b>3 Расчет мест повреждений ВЛ с ответвлениями с помощью формул .....</b>	<b>23</b>
3.1. Методы ОМП на основе двусторонних измерений .....	23
3.2. Метод пассивного многополюсника .....	24
3.3. Метод активного многополюсника. ....	29
3.4. Метод, основанный на решении системы линейных алгебраических уравнений.....	31
<b>4 Программные способы расчета мест повреждений ВЛ .....</b>	<b>33</b>
4.1. Программный комплекс WinBres .....	33
4.1.1 Диспетчерский вариант расчета мест повреждений.....	34
4.1.2. Расширенный вариант расчета ОМП .....	40
4.2. Модуль определения места повреждения ВЛ программы АРМ-СРЗА .....	52
<b>5 Оценка погрешности определения мест повреждения ВЛ из-за неучета влияющих факторов.....</b>	<b>63</b>
5.1. Неучет частичной взаимоиндукции .....	63
5.2. Неучет токов ответвительных подстанций.....	65
5.3. Неучет изменения сопротивления силовых трансформаторов тупиковых подстанций .....	67
5.4. Неучет неоднородности ВЛ .....	68
Приложение А.....	73
<b>Библиография .....</b>	<b>73</b>

## **Введение**

Определение мест повреждения (ОМП) воздушных линий (ВЛ) напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов (индикаторов), регистраторов аварийных событий, микропроцессорных устройств РЗА стало неотъемлемой частью технического обслуживания электрических сетей. Эффективность поиска мест повреждения ВЛ при неустойчивых коротких замыканиях (КЗ) составила около 40 % проверенных при обходе ВЛ с таким повреждением.

Настоящие Методические указания являются переработанным и дополненным изданием ранее выпущенных Методических указаний [2], в котором учтены замечания и предложения филиалов ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС. При наличии на ПС устройств ОМП типа ФИП (фиксирующий индикатор повреждения), ЛИФП (линейный фиксирующий индикатор повреждения), ФИС (фиксирующий индикатор сопротивления) и т.п., следует руководствоваться указаниями, приведенными в [2].

Методическими указаниями предусматривается применение фиксирующих приборов (индикаторов), регистраторов аварийных событий, микропроцессорных устройств РЗА. Описание указанных приборов и устройств в Методических указаниях не приводится, так как оно подробно излагается в технической документации заводов-изготовителей.

Методы ОМП, рассматриваемые в настоящих Методических указаниях, основаны на использовании параметров аварийного режима, измеряемых и запоминаемых в установившемся режиме короткого замыкания ВЛ до ее отключения от устройства РЗА [7, 8].

К таким параметрам относятся фазные токи и напряжения, их симметричные составляющие, фазовые углы и другие.

Для минимизации возможных погрешностей измерения за счет нестационарности процесса необходимо производить измерение всех параметров аварийного режима по концам ВЛ в один и тот же ограниченный промежуток времени. Этот промежуток должен располагаться, возможно, ближе к концу переходного процесса. Следовательно, при времени работы пускового органа, равном нескольким миллисекундам времени отстройки от апериодической слагающей тока КЗ - 20-60 мс и времени запоминания - 15-30 мс, можно обеспечить фиксацию измеряемых величин для ВЛ, оборудованных устройствами релейной защиты с любым временем действия (в пределах от 50 до 150 мс).

В Методических указаниях приводятся рекомендуемые методы ОМП для наиболее распространенных видов ВЛ: одноцепных, двухцепных с ответвлениями и без них, транзитных с ответвлением по схеме захода, с электромагнитной связью на части трассы и длинных линий. Приведенные в них расчетные формулы обеспечивают с достаточной точностью определение мест КЗ. При этом использование расчетных формул в ряде случаев

предусматривает пренебрежение некоторыми влияющими факторами.

В Методических указаниях даются также рекомендации по оценке погрешности от неучета этих факторов с указанием их количественных показателей.

В приложениях к Методическим указаниям приводятся примеры расчетов ОМП для отдельных видов ВЛ.

Расчетные методы ОМП с использованием параметров нулевой последовательности во многих случаях могут использоваться и применительно к параметрам обратной последовательности. В приведенных расчетных выражениях и соответствующих схемах в обозначениях параметров нулевой последовательности индекс "0" опускается. В обозначениях параметров обратной последовательности ставится индекс "2". Отсчет искомого расстояния до мест КЗ  $l(n)$  в километрах (относительных единицах) производится от ПС-1, расположенной на левом (от места повреждения) конце ВЛ. С другого конца находится ПС-2, а подстанции на ответвлениях от ВЛ обозначаются последующими буквами русского алфавита (В, Г, Д и т.д.). Параметры, относящиеся к ПС-1 и ПС-2, имеют индексы соответственно ' и '' (например, токи  $\underline{I}'$  к  $\underline{I}''$ ); для ответвительных подстанций используются соответствующие буквы (например, токи  $\underline{I}^e$ ,  $\underline{I}^z$  и т.д.). Удельные параметры ВЛ обозначаются строчными буквами, а параметры - прописными (например, удельное индуктивное и индуктивное сопротивления ВЛ обозначаются соответственно  $X$  и  $X_l$ ). Расчетные формулы для ОМП в большинстве случаев даются в окончательном виде со ссылкой на соответствующие первоисточники.

Настоящие Методические указания обязательны для применения службами РЗА филиалов ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС, районных энергетических управлений (производственных энергетических объединений) и объединенных энергетических управлений.

## **1 Классификация методов определения мест повреждения ВЛ**

Существующие методы ОМП ВЛ 110 кВ и выше подразделяются на:

1. Методы основанные на фиксации (записи) параметров аварийного режима (токов и напряжений);
2. Методы основанные на измерении временных интервалов при распространении электромагнитных волн (импульсов) по ВЛ (локационные и волновые).

Классификация методов ОМП ВЛ 110 кВ и выше показана на рис. 2.1.

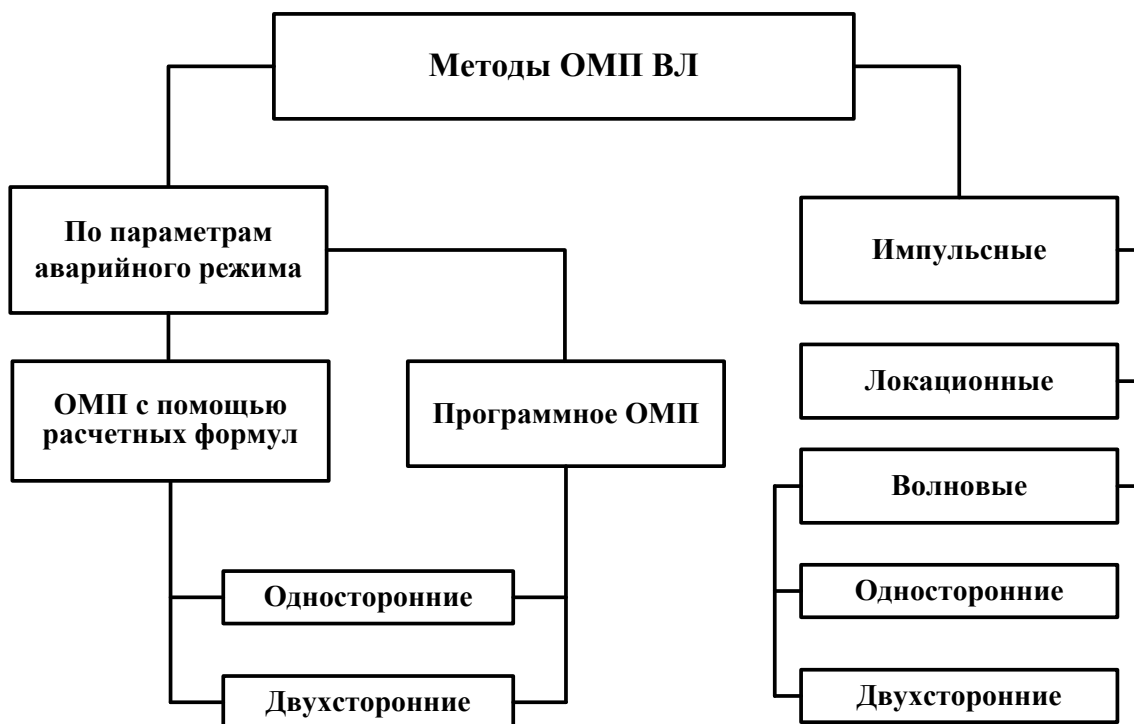


Рис. 2.1 Классификация методов ОМП ВЛ 110 кВ и выше

Методы расчета мест повреждения по параметрам аварийного режима, в свою очередь, разделяются на:

- ОМП при помощи расчетных формул на основе измерений токов и напряжений (нулевой и обратной последовательностей) выполненных устройствами ОМП, регистраторами аварийных событий и микропроцессорными устройствами РЗА.

- Программные способы расчета, на основе алгоритмической модели ВЛ или схемы замещения электрической сети.

Импульсные методы ОМП ВЛ разделяют на локационные и волновые.

Локационный метод ОМП основан на измерении времени между моментом посылки в ВЛ зондирующего электрического импульса и моментом прихода к началу ВЛ импульса, отраженного от места повреждения.

Волновые методы ОМП разделяют на односторонние и двухсторонние.

Волновой метод двухстороннего ОМП основан на измерении времени между моментами достижения концов ВЛ фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения.

Волновой односторонний метод основан на измерении времени между моментом прихода к началу ВЛ фронта волны, возникшей в месте повреждения и моментом вторичного прихода фронта волны после двух отражений (в начале ВЛ и месте повреждения).

В данных Методических указаниях описываются только метод ОМП по параметрам аварийного режима (программный и формульный).



- $U'_l, U''_l, U'_{ll}, U''_{ll}, \dots, U'_p, U''_p, U'_{pp}, U''_{pp}$  - напряжение нулевой последовательности, измеряемые на концах ВЛ  $W_l, W_{ll}, \dots, W_p$ ;
- $I'_l, I''_l, I'_{ll}, I''_{ll}, \dots, I'_p, I''_p, I'_{pp}, I''_{pp}$  - токи нулевой последовательности, измеряемые на концах ВЛ  $W_l, W_{ll}, \dots, W_p$ ;
- $Z_l, Z_{ll}, \dots, Z_p$  - полное сопротивление нулевой последовательности ВЛ  $W_l, W_{ll}, \dots, W_p$ ;
- $Z_{l2}, Z_{2l}, \dots, Z_{lp}, Z_{p1}, Z_{2p}, Z_{p2}$  - сопротивления взаимной индукции между линиями  $W_l - W_{ll}, W_{ll} - W_l, \dots, W_l - W_p, W_p - W_l, W_{ll} - W_p, W_p - W_{ll}$ .

Расстояние  $n_l$  для поврежденной ВЛ  $W_l$  должно определяться по выражению:

$$n_l = \frac{D_{nl}}{D}; \quad (3.2)$$

Где  $D = \begin{bmatrix} Z_1(I'_l + I''_l) & Z_{12} & \dots & Z_{1p} \\ Z_{21}(I'_l + I''_l) & Z_{ll} & \dots & Z_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{p1}(I'_l + I''_l) & Z_{p2} & \dots & Z_p \end{bmatrix}$  - определитель системы уравнений;

$D_{nl} = \begin{bmatrix} U''_l - U'_l + Z_l I''_l & Z_{12} & \dots & Z_{1p} \\ U''_{ll} - U'_{ll} + Z_{21} I''_l & Z_{ll} & \dots & Z_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U''_p - U'_p + Z_{p1} I''_l & Z_{p2} & \dots & Z_p \end{bmatrix}$  - определитель, получающийся из

определителя  $D$  путем замены столбца, составленного из коэффициентов при неизвестном  $n_l$ , столбцом, составленным из свободных членов уравнения (3.1).

Для определения места КЗ на ВЛ  $W_l$  должны быть измерены токи и напряжения на концах поврежденной ВЛ, а также на всех ВЛ имеющих электромагнитную связь с поврежденной.

На основании уравнений (3.1) и выражения (3.2) могут быть получены расчетные формулы для отдельных видов ВЛ без ответвлений.

### 2.1.2. Расчетные формулы для одноцепных и двухцепных ВЛ

#### Одноцепная линия

Схема такой ВЛ при однофазном КЗ представлена на рис. 3.2. и для нее определители  $D$  и  $D_{nl}$  состоят только из первого члена первой строки уравнения (3.1). Расчетная формула для нее имеет вид:



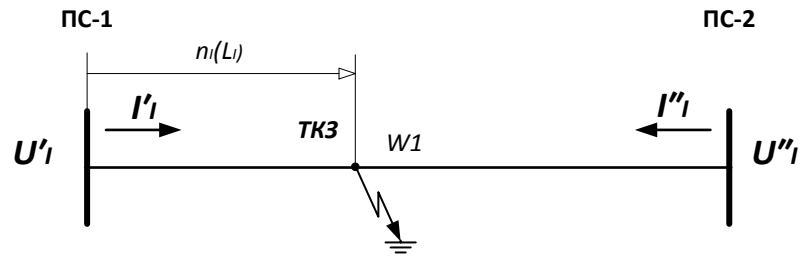


Рис. 3.2 Схема одноцепной ВЛ

$$l = n l = \frac{\underline{U}'' - \underline{U}' + \underline{Z}_L \underline{I}''}{\underline{Z}_L (\underline{I}' + \underline{I}'')} L, \quad (3.3)$$

где  $\underline{U}', \underline{U}''$  и  $\underline{I}', \underline{I}''$  - соответственно напряжения и токи по концам поврежденной ВЛ;

$\underline{Z}_L$  - полное сопротивление ВЛ.

Формула (3.3) действительна при использовании параметров как нулевой, так и обратной последовательности.

### Двухцепная линия

Схема такой ВЛ изображена на рис. 3.3.

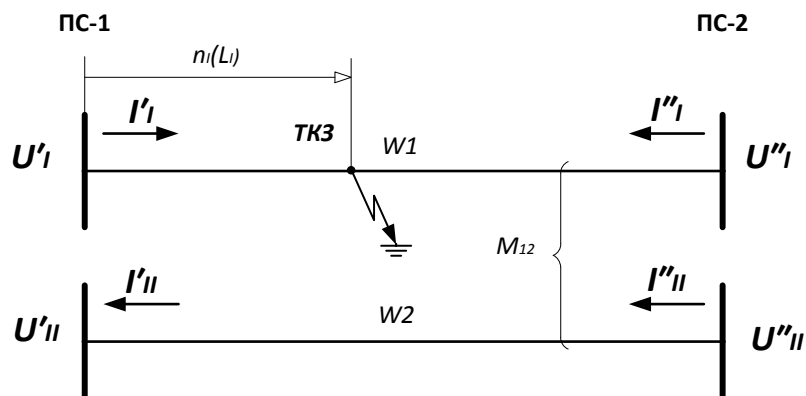


Рис. 3.3 Двухцепная ВЛ с раздельной работой по концам

В соответствии с выражением (3.1) получаем систему из двух линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными. Соответственно определители  $D$  и  $D_{nI}$  состоят из двух строк. Решение этой системы уравнений относительно расстояния  $n_I$  с учетом равенства  $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$  даст расчетную формулу для определения мест КЗ:

$$l_I = n_I L_I = \frac{Z_{II}(\underline{U}'_I - \underline{U}'_I) - Z_{12}(\underline{U}'_{II} - \underline{U}'_{II}) + (Z_I Z_{II} - Z_{12}^2) \underline{I}'_I}{(Z_I Z_{II} - Z_{12}^2)(\underline{I}'_I + \underline{I}'_{II})} L_I, \quad (3.4)$$

Где  $Z_{12}$  - сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между линиями  $W_I$  и  $W_2$ .

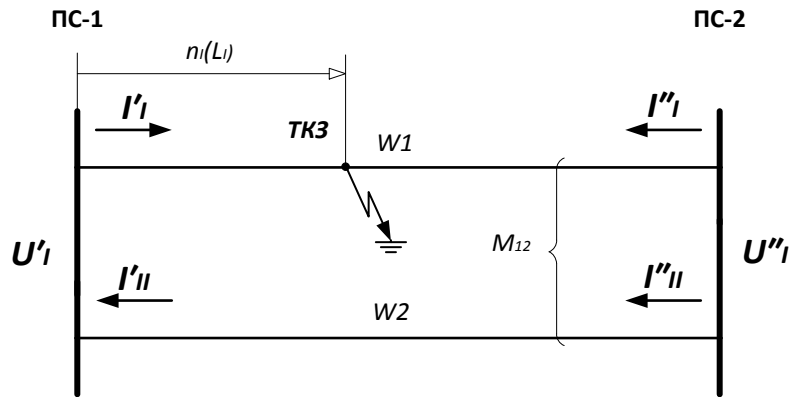


Рис. 3.4 Двухцепная ВЛ с работой на общие шины

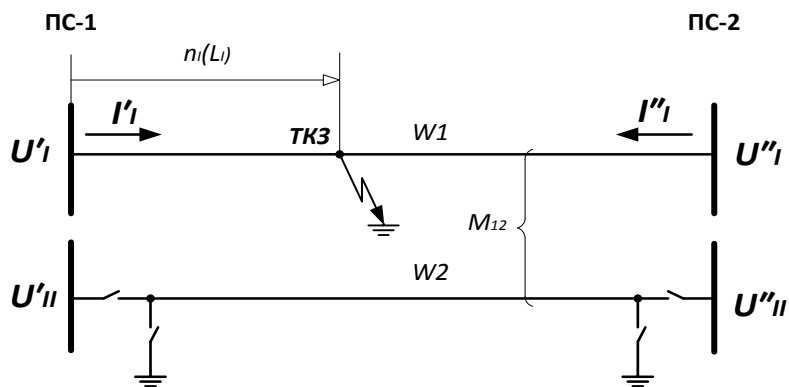


Рис. 3.5 Двухцепная ВЛ с одной отключенной цепью

Формула (3.4) является общей, на основании которой в зависимости от режима работы ВЛ, а также схемы включения фиксирующих амперметров могут быть получены другие расчетные формулы.

Эти наиболее употребительные формулы приведены в Таблице 3.1, где учтены режимы работы обеих цепей по концам на общие шины (рис. 3.2, рис. 3.3, рис. 3.4, рис. 3.5).

Таблица 3.1 Расчетные формулы для определения расстояния до мест повреждения двухцепных ВЛ

Режим работы ВЛ и параметры цепей	Измеряемые параметры при КЗ цепи $W_I$	Расчетные формулы
Работа обеих цепей на общие шины $Z_{LI} \neq Z_{LII}$	$\underline{U}'_I = \underline{U}'_{II} = \underline{U}'$ , $\underline{U}''_I = \underline{U}''_{II} = \underline{U}''$ ,	$\frac{(Z_{LII} - Z_{12})(\underline{U}'' - \underline{U}') + (Z_{LI} Z_{LII} - Z_{12}^2)}{(Z_{LI} Z_{LII} - Z_{12}^2)(\underline{I}'_I + \underline{I}'_{II})}$

Работа обеих цепей на общие шины $\underline{Z}_{ЛI} = \underline{Z}_{ЛII} = \underline{Z}_Л$	$\begin{aligned}\underline{U}'_I &= \underline{U}'_{II} = \underline{U}', \\ \underline{U}''_I &= \underline{U}''_{II} = \underline{U}'',\end{aligned}$	$\frac{\underline{U}'' - \underline{U}' + (\underline{Z}_Л + \underline{Z}_{12})\underline{I}''_I}{(\underline{Z}_Л + \underline{Z}_{12})(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I)} L_I$
Работа цепи $W_I$ при отключенной и заземленной с обоих концов цепи $W_{II}$ , $\underline{Z}_{ЛI} \neq \underline{Z}_{ЛII}$	$\underline{U}', \underline{U}'', \underline{I}'_I, \underline{I}''_I$	$\frac{\underline{Z}_{ЛII}(\underline{U}''_I - \underline{U}'_I) + (\underline{Z}_{ЛI}\underline{Z}_{ЛII} - \underline{Z}_{12}^2)\underline{I}''_I}{(\underline{Z}_{ЛI}\underline{Z}_{ЛII} - \underline{Z}_{12}^2)(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I)} L_I$
Работа цепи $W_I$ при отключенной и заземленной с обоих концов цепи $W_{II}$ ; $\underline{Z}_{ЛI} = \underline{Z}_{ЛII} = \underline{Z}_Л$	$\underline{U}', \underline{U}'', \underline{I}'_I, \underline{I}''_I$	$\frac{\underline{Z}_Л(\underline{U}'' - \underline{U}') + (\underline{Z}_Л^2 - \underline{Z}_{12}^2)\underline{I}''_I}{(\underline{Z}_Л^2 - \underline{Z}_{12}^2)(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I)} L_I$

### 2.1.3. Расчетные формулы, учитывающие поперечную реактивную (емкостную) проводимость ВЛ

На рис. 3.6 показана схема замещения одноцепной ВЛ с распределенными параметрами, на которой обозначены  $N$  элементарных участков, каждый из которых имеет параметры

$$\begin{aligned}\underline{Z}_1 &= \underline{Z}\Delta L; \\ \underline{Z}_2 &= \frac{1}{y\Delta L},\end{aligned}$$

где  $\underline{Z}$ ,  $y$  - полные удельные соответственно продольное сопротивление и поперечная проводимость;

$r$ ,  $L$ ,  $g$ ,  $c$  - соответственно активное сопротивление, индуктивность, проводимость изоляции и емкость линии, отнесенные к единице длины;

$\omega$  - круговая частота (при частоте 50 Гц  $\omega = 314$ );

$\Delta L$  - длина элементарного участка схемы замещения ВЛ, которая определяется протяженностью линии  $L$  и числом элементарных участков  $N$  ( $\Delta L = \frac{L}{N}$ ).

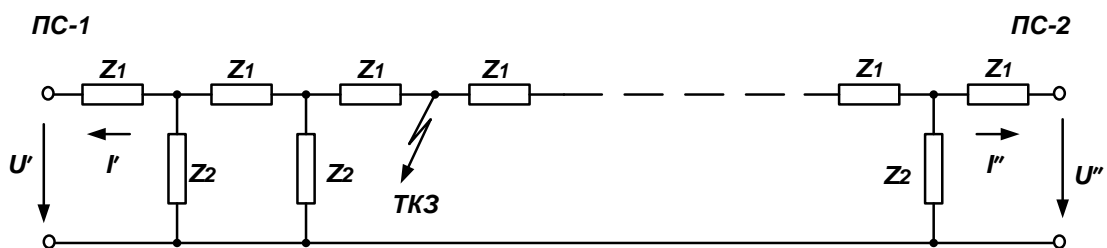


Рис. 3.6 Схема замещения ВЛ с распределенными параметрами

Чем больше число  $N$ , тем точнее схема замещения рассматриваемой линии. Такая ВЛ характеризуется также и вторичными параметрами:

волновым сопротивлением  $\underline{Z}_B$  и коэффициентом распространения  $\underline{\gamma}$ , которые соответственно равны

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r+j\omega L}{g+j\omega c}}; \quad (3.5)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}\underline{y}} = \sqrt{(r+j\omega L)(g+j\omega c)}. \quad (3.6)$$

Место КЗ линии с распределенными параметрами следует вычислять по формуле

$$l = \frac{1}{\underline{\gamma}} \operatorname{arcth} \frac{\underline{U}'' \operatorname{ch} \underline{\gamma} L - \underline{U}' + \underline{I}'' \underline{Z}_B \sin \underline{\gamma} L}{\underline{U}'' \operatorname{sh} \underline{\gamma} L + \underline{I}' \underline{Z}_B + \underline{I}'' \underline{Z}_B \cos \underline{\gamma} L} \quad (3.7)$$

Для ВЛ без потерь гиперболические функции превращаются в тригонометрические, и формула (2.7) преобразовывается

$$l = \frac{1}{\underline{\gamma}} \operatorname{arcth} \frac{\underline{U}'' \cos \underline{\gamma} L - \underline{U}' + \underline{I}'' \underline{Z}_B \sin \underline{\gamma} L}{\underline{I}' \underline{Z}_B - \underline{U}'' \sin \underline{\gamma} L + \underline{I}'' \underline{Z}_B \cos \underline{\gamma} L}. \quad (3.8)$$

С помощью формул (3.7) и (3.8) вычисляется расстояние до мест КЗ по параметрам нулевой (обратной) последовательности. Для облегчения ОМП по формуле (3.8) можно воспользоваться приведенной на рис. 3.7 характеристикой  $l = f(\operatorname{tg} \underline{\gamma} l)$ , построенной для разных значений величины  $\square$  применительно к параметрам обратной и нулевой последовательностей ВЛ 110-500 кВ [7].

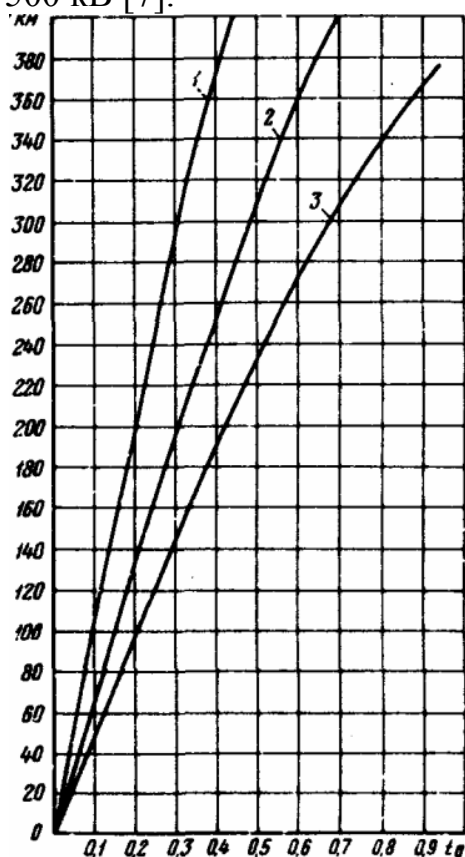


Рис. 3.7 График  $l = f(\operatorname{tg} \underline{\gamma} l)$ :

- 1)  $\gamma_2 = 1 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}$ ;
- 2)  $\gamma_0 = 1.5 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}$ ;
- 3)  $\gamma_0 = 2 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}$

В ряде случаев, нет необходимости в учете реактивной проводимости, что, однако, должно быть предварительно оценено. Пренебрежение этой проводимостью (в особенности при расчетах вручную) допустимо, если возникающая из-за этого погрешность расчета расстояния не превышает 2 %. Погрешность от пренебрежения реактивной проводимостью зависит от протяженности ВЛ и сопротивления примыкающих к ней сетей. На рис. 3.8 показаны характеристики, позволяющие оценить погрешность от пренебрежения реактивной проводимостью [7]. Соответствующие расчеты выполнены во ВНИИЭ на ЭВМ на основе сравнения результатов ОМП по формулам (3.8) и (3.3). Для линий с двусторонним питанием в качестве сопротивления  $X_C$  принимается среднее арифметическое его значение по концам ВЛ, то есть,

$$X_C = \frac{X'_C + X''_C}{2}$$

На основе выполненных расчетов и приведенных характеристик можно дать следующие практические рекомендации для оценки необходимости учета реактивной проводимости для ОМП ВЛ. При использовании параметров нулевой последовательности допустимо пренебрежение этой проводимостью для ВЛ протяженностью до 100 км, при использовании параметров обратной последовательности - до 120-150 км. Для ВЛ большой протяженности, где основное значение приобретает отношение сопротивлений примыкающей сети и ВЛ, допускается не учитывать реактивную проводимость для линий длиной до 200-250 км, если это отношение находится в диапазоне 0,1-0,5.

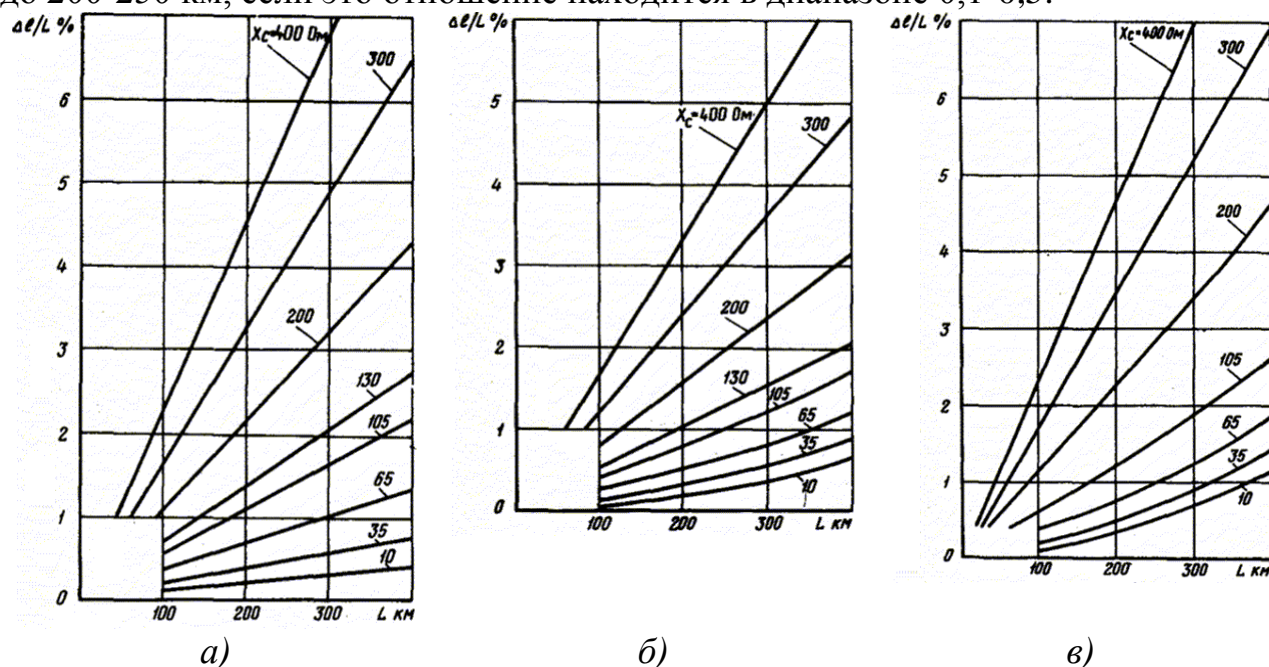


Рис. 3.8 Характеристики  $\Delta \frac{l}{L} = f(L)$ :

а)  $\gamma_2 = 1 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}$ ;  $x_2 = 0.4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ ;  $Z_{B2} = 400 \text{ Ом}$ ;

$$\text{б) } \gamma_0 = 1,5 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}; \quad x_0 = 1,2 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; \quad Z_{B0} = 800 \text{ Ом};$$

$$\text{в) } \gamma_0 = 2 * 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}; \quad x_0 = 1,5 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; \quad Z_{B0} = 750 \text{ Ом};$$

Для двухцепной линии, примыкающей к системам с индуктивной нагрузкой (рис. 3.4), при однофазном КЗ цепи  $W_I$  расстояние до места повреждения следует вычислять [7, 17] по двум независимым формулам:

$$l_I = \frac{1}{K_1} \arctg \frac{(U_I'' - \eta_1 U_{II}'') \cos k_1 L + (I_I'' + \eta_2 I_{II}'') Z_a \sin k_1 L - (U_I' - \eta_1 U_{II}')} {(I_I' - \eta_2 I_{II}') Z_B + (I_I'' + \eta_2 I_{II}'') Z_a \cos k_1 L - (U_I'' - \eta_1 U_{II}'') \sin k_1 L}; \quad (3.9)$$

$$l_I = \frac{1}{K_2} \arctg \frac{(U_{II}'' - \eta_2 U_I'') \cos k_2 L + (I_{II}'' + \eta_1 I_I'') Z_B \sin k_2 L - (U_{II}' - \eta_2 U_I')} {(I_{II}' - \eta_1 I_I') Z_B + (I_{II}'' + \eta_1 I_I'') Z_B \cos k_2 L - (U_{II}'' - \eta_2 U_I'') \sin k_2 L}; \quad (3.10)$$

$$\text{где } k_1 = \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \sqrt{(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^2 + 4\sigma^2 \delta^2}}{2}}; \quad k_2 = \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 - \sqrt{(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^2 + 4\sigma^2 \delta^2}}{2}};$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma^2}{\gamma_1^2 - k_2^2}; \quad \eta_2 = \frac{\delta^2}{\gamma_1^2 - k_2^2}; \quad \gamma_1^2 = x_1 \beta_1 - x_{12} \beta_{12}; \quad \gamma_2^2 = x_2 \beta_2 - x_{12} \beta_{12};$$

$$\sigma^2 = x_1 \beta_{12} - x_{12} \beta_2; \quad \delta^2 = x_2 \beta_{12} - x_{12} \beta_1; \quad Z_a = \frac{x_1 - \eta_1 x_{12}}{k_1}; \quad Z_B = \frac{x_2 - \eta_2 x_{12}}{k_2};$$

$x_1, x_2$  - удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности соответственно цепей  $W_I$  и  $W_{II}$ ;

$\beta_1, \beta_2$  - удельная реактивная (емкостная) проводимость нулевой последовательности соответственно цепей  $W_I$  и  $W_{II}$ ;

$x_{12}, \beta_{12}$  - удельные соответственно индуктивное сопротивление взаимной индукции и емкостная проводимость нулевой последовательности между цепями.

Формулы (3.9) и (3.10) являются основными, на их базе могут быть получены другие формулы для различных режимов работы цепей ВЛ. Рекомендуются формулы приведены в Таблице 3.2. Поскольку в неповрежденной цепи направление токов и напряжений нулевой последовательности может изменяться в зависимости от места КЗ, следует учитывать еще их фазное соотношение. В то же время использование в расчетных формулах только реактивных сопротивлений позволяет заменить геометрическое суммирование алгебраическим, что требует определения знака токов и напряжений. При включении фиксирующих амперметров в соответствии с рис. 3.2 производится непосредственное измерение линейной комбинации токов, с сохранением знака тока поврежденной цепи. Знак линейной комбинации напряжений может изменяться. Так, например, при отключении с одного конца цепи  $W_{II}$  - (см. рис. 2.1, в) напряжение на

отключенном конце ( $U''_{II}$ ) может оказаться противоположным по знаку и превышающим по значению напряжение того же конца поврежденной цепи ( $U'_I$ ). В результате линейная комбинация напряжений принимает отрицательное значение.

В большинстве случаев обе цепи работают на общие шины и расчет расстояния до мест КЗ выполняется в соответствии с формулами (2.9) и (2.10). Для сложных случаев необходимо выполнять расчеты по специальным программам с использованием ЭВМ.

Как и для одноцепной ВЛ, в ряде случаев возможно пренебрежение реактивной проводимостью при ОМП двухцепной линии. При работе обеих цепей на общие шины с двух концов ВД для них справедливы рекомендации, приведенные выше для одноцепной линии.

Как показывает анализ [7], при включении фиксирующих приборов на разность токов обеих цепей погрешность расчета расстояния из-за пренебрежения реактивной проводимостью не зависит от сопротивления примыкающих к ВЛ сетей. Эта погрешность равна нулю по концам и в середине линии. Она максимальна с разными знаками при КЗ на расстоянии 20 % от концов ВЛ. При измерении разности токов обеих цепей в случае КЗ вблизи шин противоположного конца ВЛ показания фиксирующего прибора близки к нулю либо он не срабатывает. Для исключения ложной работы прибора при каскадном отключении поврежденной цепи он блокируется при первом срабатывании от фиксирующего прибора, включенного на сумму токов обеих цепей. В случае нулевых показаний в расчетной формуле следует использовать значение нижнего предела прибора, включенного на разность токов.

Таблица 3.2. Расчетные формулы для определения расстояния до мест повреждения двухцепных ВЛ с учетом реактивной проводимости

Режим работы ВЛ и параметры цепей	Измеряемые параметры при КЗ цепи $W_I$	Расчетные формулы
Работа обеих цепей на общие шины; $Z_{LI} = Z_{LI} = Z_L$		$\frac{1}{k_1} \arctg \frac{I''_{\Delta} \sin k_1 L_I}{I'_{\Delta} + I''_{\Delta} \cos k_1 L_I}$
То же	$U'_I, U''_I$ $I'_{\Sigma}, I''_{\Sigma}$	$\frac{1}{k_2} \arctg \frac{2U'' \cos k_2 L_I + I''_{\Sigma} \sin k_2 L_I - 2U'}{I'_{\Sigma} Z_B + I''_{\Sigma} Z_B \cos k_2 L_I - 2U'' \sin k_2 L_I}$
Работа цепи при отключенной и заземленной с обоих концов цепи $W_{II}$ ; $Z_{LI} = Z_{LI} = Z_L$	$U'_I, U''_I$ $I'_{\Delta}, I''_{\Delta}$	$\frac{1}{k_1} \arctg \frac{U'_I \cos k_1 L_I + I''_{\Delta} Z_a \sin k_1 L_I - U'_I}{I'_{\Delta} Z_a + I''_{\Delta} \cos k_1 L_I - U'_I \sin k_1 L_I}$
Работа цепи при отключенной и заземленной с	$U'_I, U''_I$ $I'_{\Sigma}, I''_{\Sigma}$	$\frac{1}{k_2} \arctg \frac{U'_I \cos k_2 L_I + I''_{\Sigma} Z_B \sin k_2 L_I - U'_I}{I'_{\Sigma} Z_B + I''_{\Sigma} Z_B \cos k_2 L_I - U'_I \sin k_2 L_I}$

обоих концов цепи $W_{II}$ ; $Z_{LI} = Z_{LI} = Z_L$		
--	--	--

#### 2.1.4. Расчетные формулы, учитывавшие активное сопротивление проводов ВЛ

Для ВЛ, где требуется учитывать активное сопротивление проводов, место КЗ необходимо вычислять [7] по формуле

$$l = \frac{-(\varepsilon^2 \rho_1 + \rho_2 + 1 + x^2) + \varepsilon(\rho_1 + \rho_2 + 1 + x^2) \sqrt{1 + \frac{x^2(\varepsilon^2 - 1)(\rho_2^2 - \varepsilon^2 \rho_1^2)}{\varepsilon^2(\rho_1 + \rho_2 + 1 + x^2)}}}{(\varepsilon^2 - 1)(1 + x^2)} L, \quad (3.11)$$

где  $\rho_1 = \frac{x'_c}{x_l}$ ;  $\rho_2 = \frac{x''_c}{x_l}$ ;  $x = \frac{r}{x}$ .

Для оценки целесообразности применения формулы (3.11) следует предварительно определить относительную погрешность от пренебрежения активным сопротивлением, которая вычисляется по формуле

$$\Delta l_* = -\frac{x^2}{1+x^2} (\rho_2 - \varepsilon \rho_1) \left[ \frac{1}{1-\varepsilon} - \frac{\rho_2 + \varepsilon \rho_1}{2\varepsilon(\rho_1 + \rho_2 + 1 + x^2)} \right]. \quad (3.12)$$

Если значение погрешности  $\Delta l_*$  не превышает 2 %, то ею можно пренебречь, и расчет расстояния до мест КЗ выполняется по формуле (3.3). Как правило, учет активного сопротивления должен производиться для ВЛ напряжением 110 кВ сечением 70 мм<sup>2</sup>.

Допустимо использование упрощенных формул для ОМП, приведенных в [18].

#### 2.1.5. Расчетные формулы для ВЛ, имеющих сближение на части трассы

Ниже приводятся расчетные формулы для ОМП [19-21], схемы которых показаны на рис. 3.9.

При коротком замыкании на землю ВЛ  $W_I$  протяженностью  $L_I$ , имеющей электромагнитную индукцию с линией  $W_{II}$  протяженностью  $L_{II}$  на участке  $L_{12}$  (рис. 3.9, а), расстояние от ПС-1 до места КЗ следует определять по формуле

$$l_I = \frac{\underline{U}'_I - \underline{U}' + \underline{Z}_{LI} \underline{I}'_I + \underline{Z}_{12} \underline{I}'_I}{\underline{Z}_{LI}(\underline{I}'_I + \underline{I}'')} L_I, \quad (3.13)$$

где  $Z_{12}$  - сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между линиями  $W_I$  и  $W_{II}$ .

В формуле (3.13) ставится знак "плюс" перед  $\underline{Z}_{12} \underline{I}'_I$  при указанном на рис.



2.6, а направлении токов линий. При противоположном направлении тока в линии  $W_{II}$  знак должен меняться на "минус".

Возможен другой способ определения мест КЗ [16], автоматически учитывающий направление тока неповрежденной ВЛ. В этом случае вместо тока  $I'_{II}$  линии  $W_{II}$  измеряются напряжения  $\underline{U}'$  и  $\underline{U}''_{II}$  по ее концам, а расстояние до мест КЗ с учетом выражения (3.1) следует определять по формуле

$$l_I = \frac{\underline{Z}_{лп}(\underline{U}''_{II} - \underline{U}') - \underline{Z}_{12}(\underline{U}''_{II} - \underline{U}') + (\underline{Z}_{лп}\underline{Z}_{лпII} - \frac{L_I}{L_{12}}\underline{Z}_{12}^2)\underline{I}''_{II}}{(\underline{Z}_{лп}\underline{Z}_{лпII} - \frac{L_I}{L_{12}}\underline{Z}_{12}^2)(\underline{I}'_I + \underline{I}''_{II})} L_I. \quad (3.14)$$

Аналогичной формулой с соответствующей заменой индексов определяется место КЗ линии  $W_{II}$ .

В случае нескольких электромагнитосвязанных ВЛ расчет расстояния целесообразно выполнять с помощью ЭВМ по специальной программе.

Для одноцепной транзитной линии с проходной подстанцией В (рис. 3.9, б) при однофазном КЗ на участке с указанным направлением токов в соответствии с формулой (3.13) расстояние от подстанции В до места повреждения необходимо определять по формуле

$$l_1 = \frac{\underline{U}' - \underline{U}^B + \underline{Z}_{лп}\underline{I}_1^B + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2^B}{\underline{Z}_{лп}(\underline{I}'_1 + \underline{I}_1^B)} L_1, \quad (3.15)$$

Где  $\underline{Z}_{лп1}$  - полное сопротивление нулевой последовательности линии  $W_1$ ;

$\underline{Z}_{12}$  - полное сопротивление взаимной индукции между ВЛ  $W_1$  и  $W_2$  на участке длиной  $L_{12}$

Необходимость учета направления тока неповрежденной линии усложняет определение места КЗ.

Токи поврежденной и неповрежденной ВЛ на подстанции В можно выразить в виде алгебраической полусуммы геометрической суммы и геометрической разности токов обеих линий. Тогда получаем:

$$\begin{cases} \underline{I}_1^B = \frac{\underline{I}_2^B}{2} + \frac{\underline{I}_\Delta^B}{2} = \frac{\underline{I}_1^B + \underline{I}_2^B}{2} + \frac{\underline{I}_1^B - \underline{I}_2^B}{2}; \\ \underline{I}_2^B = \frac{\underline{I}_2^B}{2} - \frac{\underline{I}_\Delta^B}{2} = \frac{\underline{I}_1^B + \underline{I}_2^B}{2} - \frac{\underline{I}_1^B - \underline{I}_2^B}{2} \end{cases} \quad (3.16)$$

Подставив значения токов  $\underline{I}_1^B$  и  $\underline{I}_2^B$  в формулу (3.15), получим:

$$l_1 = \frac{2(\underline{U}' - \underline{U}_1^B) + 2\underline{Z}_{лп1}\underline{I}'_1 + 2\underline{Z}_{12}(\underline{I}_2^B - \underline{I}_\Delta^B)}{\underline{Z}_{лп1}(\underline{I}_2^B + \underline{I}_\Delta^B + 2\underline{I}'_1)} L_1 \quad (3.17)$$

В соответствии с формулой (3.17) для определения мест КЗ на линии  $W_1$ ,

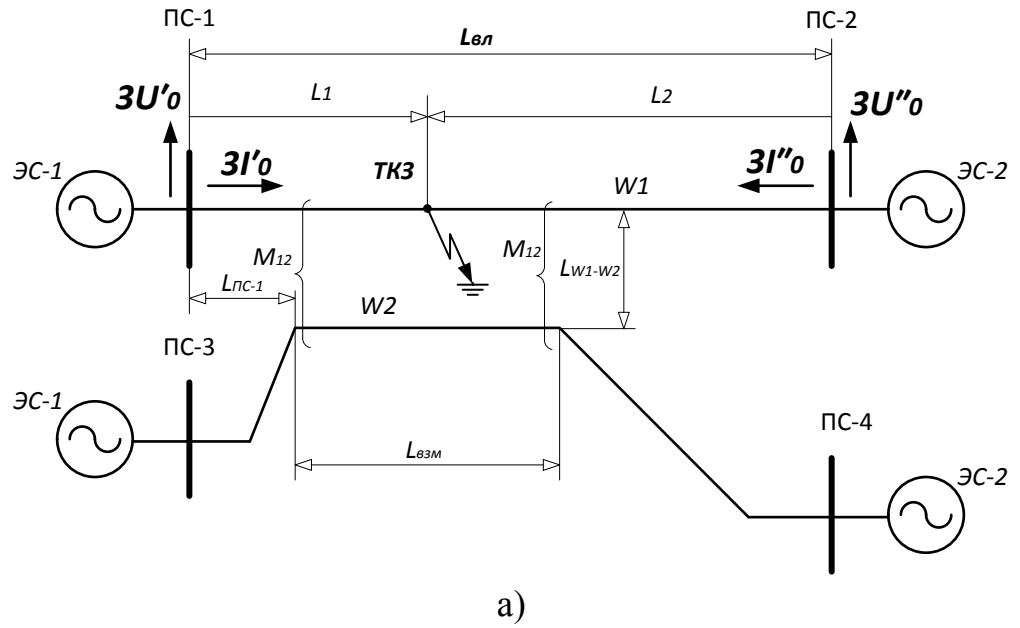
на подстанции В производится одновременное измерение геометрической суммы и геометрической разности токов обеих линий, идущих к промежуточной подстанции [22].

При коротком замыкании на участке  $W_2$  транзитной линии (с учетом соответствующего направления токов ВЛ) получаем аналогичную формулу для расчета расстояния от подстанции В до мест КЗ:

$$l_2 = \frac{\underline{U}'' - \underline{U}^B + 2\underline{Z}_{Л2}\underline{I}'' + 2\underline{Z}_{Л2}(\underline{I}_S^B - \underline{I}_\Delta^B)}{\underline{Z}_{Л2}(\underline{I}_S^B + \underline{I}_\Delta^B + 2\underline{I}'')} L_2 \quad (3.18)$$

Для двухцепной транзитной линии с проходными подстанциями В и Г (рис. 3.9, в) формулы для ОМП усложняются. Рассмотрим пример однофазного КЗ в точке  $K_1$  на участке  $W_1$ . С учетом указанного на рис. 3.9, в направления токов по аналогии с формулой (3.15) расстояние от подстанции А до места КЗ следует вычислять по выражению

$$l_1 = \frac{\underline{U}^B - \underline{U}' + \underline{Z}_{Л1}\underline{I}_1^B - \underline{Z}_{Л2}\underline{I}_2'' + \underline{Z}_{Л3}\underline{I}_3' + \underline{Z}_{Л4}\underline{I}_4''}{\underline{Z}_{Л1}(\underline{I}_1' + \underline{I}_1^B)} L_1. \quad (3.19)$$





Входящие в формулу (3.19) токи в линиях могут быть выражены через геометрическую сумму и геометрическую разность токов двух смежных участков линии по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{I}'_1 &= \frac{\underline{I}'_2}{2} + \frac{\underline{I}'_A}{2}; & \underline{I}'_3 &= \frac{\underline{I}'_A}{2} - \frac{\underline{I}'_2}{2}; & \underline{I}''_2 &= \frac{\underline{I}''_2}{2} + \frac{\underline{I}''_A}{2}; \\ \underline{I}''_4 &= \frac{\underline{I}''_2}{2} - \frac{\underline{I}''_A}{2}; & \underline{I}^B_1 &= \frac{\underline{I}^B_2}{2} - \frac{\underline{I}^B_A}{2} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Подставив значения токов из выражений (3.20) в формулу (3.19), получим формулу для расчета расстояния от подстанции А до мест КЗ на участке  $W_1$ , двухцепных транзитных линий:

$$l_1 = \frac{2(\underline{U}^B - \underline{U}') + \underline{Z}_{11}(I_\Sigma^B + I_\Delta^B) - \underline{Z}_{12}(I_\Sigma'' + I_\Delta'') + \underline{Z}_{13}(\underline{I}_\Delta' - \underline{I}_\Sigma') + \underline{Z}_{14}(I_\Sigma'' - \underline{I}_\Delta'')}{\underline{Z}_{11}(I_\Sigma' + I_\Delta' + I_\Sigma^B + I_\Delta^B)} L_1. \quad (3.21)$$

Формула (3.21) действительна при любом направлении токов на участках линии, имеющей электромагнитную связь с поврежденным участком  $W_1$ .

Ниже приводятся расчетные формулы для ОМП на участках  $W_2, W_3$  и  $W_5$ , которые получены аналогичным путем.

При однофазном КЗ на участке  $W_2$  расчетная формула имеет вид:

$$l_1 = \frac{2(\underline{U}^B - \underline{U}''') + \underline{Z}_{12}(I_\Delta^B - I_\Sigma^B) + \underline{Z}_{21}(I_\Sigma' - I_\Delta') + \underline{Z}_{24}(I_\Delta'' - I_\Sigma'')}{\underline{Z}_{12}(I_\Sigma'' + I_\Delta'' + I_\Delta^B - I_\Sigma^B)} L_2. \quad (3.22)$$

Отсчет расстояния ведется от подстанции Б.

В случае однофазного КЗ на участке  $W_3$ , расстояние от подстанции А до

места повреждения следует определять по формуле:

$$l_3 = \frac{2(\underline{U}^\Gamma - \underline{U}') + Z_{Л3}(\underline{I}_\Sigma^\Gamma + \underline{I}_\Delta^\Gamma) + Z_{31}(\underline{I}'_\Delta - \underline{I}'_\Sigma) - Z_{34}(\underline{I}_\Sigma^\Gamma - \underline{I}_\Delta^\Gamma)}{Z_{Л3}(\underline{I}'_\Delta - \underline{I}'_\Sigma + \underline{I}_\Sigma^\Gamma + \underline{I}_\Delta^\Gamma)} L_3. \quad (3.23)$$

Расстояние от подстанции Б до места однофазного КЗ на участке  $W_4$ , следует определять по формуле:

$$l_4 = \frac{2(\underline{U}^2 - \underline{U}'') + Z_{Л4}(\underline{I}_\Delta^2 - \underline{I}_\Sigma^2) + Z_{41}(\underline{I}'_\Sigma + \underline{I}'_\Delta) + Z_{42}(\underline{I}''_\Delta - \underline{I}''_\Sigma) - Z_{43}(\underline{I}'_\Sigma - \underline{I}'_\Delta)}{Z_{Л4}(\underline{I}''_\Delta - \underline{I}''_\Sigma + \underline{I}_\Delta^2 - \underline{I}_\Sigma^2)} L_4. \quad (3.24)$$

Аналогично могут быть получены формулы для определения мест повреждения двухцепных транзитных линий при большем числе отходящих от каждой цепи промежуточных подстанций по схеме захода. В этом случае увеличивается количество необходимой для ОМП информации, поэтому здесь целесообразно применение других методов ОМП на основе расчетов по программе на базе ЭВМ.

## 2.2. Односторонние измерения

### 2.2.1. Измерение тока (напряжения)

Одностороннее измерение тока (напряжения) может использоваться как дополнительный способ для определения мест повреждения ВЛ при отсутствии части измерений (например, отказ фиксирующих приборов), а также при опробовании линии в случае ее одностороннего включения после неуспешного АПВ.

#### Одноцепная линия

При определении мест повреждения рассматриваемым методом данные измерений фиксирующих приборов сравниваются с предварительно рассчитанными значениями токов (напряжений) КЗ контролируемой ВЛ. На основе расчетов получается характеристика зависимости тока (напряжения) от места короткого замыкания, которая может быть представлена графически либо в виде таблицы. На рис. 3.10 показана расчетная характеристика

$l = f(I')$ , из которой видно, что ее крутизна максимальна в начале ВЛ и минимальна в конце линии. Поскольку характеристика построена для металлического КЗ, неучет переходного сопротивления может приводить к увеличенным погрешностям ОМП при повреждениях на участке, примыкающем к противоположному концу ВЛ. В то же время, при близких КЗ погрешность ОМП практически невелика. Точность описанного метода ОМП может быть несколько повышена, если при выполнении расчетов токов (напряжений) КЗ учитывать переходное сопротивление. Его целесообразно принимать равным среднему значению сопротивления опор данной ВЛ, а для линий, где грозозащитный трос заземляется на каждой опоре, переходное сопротивление следует определять с учетом шунтирующего влияния троса.

При определении мест КЗ на основе односторонних измерений тока (напряжения) расчетные характеристики  $l = f(I')$  выполняются для наиболее характерных режимов энергосистемы, значительно влияющих на изменение абсолютных значений параметров аварийного режима. Количество режимов должно быть два-три, а в ряде случаев целесообразно составление одной усредненной характеристики, хотя в этом случае погрешность ОМП может быть выше. При этом следует увеличить зону обхода ВЛ после КЗ по сравнению с указанным [6].

С учетом изложенного, рассмотренный выше способ следует использовать в основном для относительно коротких линий (не более 50 км), отходящих от шин мощных электростанций и подстанций.

При однофазных КЗ возможно определение мест повреждения на основе одновременного измерения токов (напряжений) нулевой и обратной последовательностей [7]. В этом случае, (учитывается только индуктивное сопротивление ВЛ и сети) расстояние до мест КЗ определяется по формуле

$$l = \left[ 1 - \frac{(X'_{c2} + X_{л2} + X''_{c2})X''_{c0} - \varepsilon(X'_{c0} + X_{л0} + X''_{c0})X''_{c2}}{\varepsilon(X'_{c0} + X_{л0} + X''_{c0})X_{л2} - X_{л0}(X'_{c2} + X_{л2} + X''_{c2})} \right] L, \quad (3.25)$$

где  $\varepsilon = \frac{I'_0}{I'_2} = \frac{U'_0 X'_{c2}}{U'_2 X'_{c0}}$

Из формулы (3.25) видно, что расстояние до мест КЗ не зависит от переходного сопротивления в месте повреждения, однако его точность определяется соотношением параметров ВЛ и системы в схемах замещения нулевой и обратной последовательностей.

Как показывает анализ [7], эффективность данного способа снижается на коротких линиях, где отношение  $X''_{c2}/X_{л2} > 10$ , и на длинных ВЛ, где  $X''_{c2}/X_{л2} < 0,25$ .

При этом на коротких линиях погрешность ОМП велика для всех точек КЗ, а на длинных линиях она значительно снижается при повреждениях в конце ВЛ. Поэтому на длинных линиях целесообразно сочетание двух способов ОМП: на основе измерения абсолютных значений тока (напряжения) нулевой последовательности при близких КЗ и по отношению  $I'_0/I'_2$  при удаленных КЗ.

К недостаткам последнего способа следует отнести необходимость учета сопротивлений сетей  $X_{c0}$  и  $X_{c2}$ , примыкающих к поврежденной линии. Если сопротивление сети, примыкающей к началу ВЛ, вычисляется по данным измерений напряжений и токов ( $X'_{c0} = \frac{U'_0}{I'_0}$ ,  $X'_{c2} = \frac{U'_2}{I'_2}$ ), то используются расчетные значения сопротивления сети с противоположного конца. Если сопротивление  $X''_{c0}$  может быть относительно стабильно, то сопротивление  $X''_{c2}$  в значительной степени зависит от нагрузки и режима работы генератора.

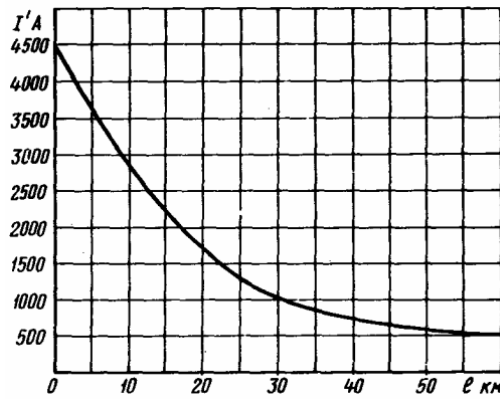


Рис. 3.10 Характеристика  $l = f(I')$

Применение данного способа целесообразно на ВЛ, где сопротивление  $X''_{c2}$  практически не изменяется или его изменение заранее известно. Этот способ не может быть использован для ОМП при опробовании.

Рассмотрим способ определения мест двухфазного КЗ на основе измерений параметров обратной последовательности [7]. В этом случае, если пренебречь переходным сопротивлением в месте повреждения, напряжение обратной последовательности в месте КЗ составляет половину фазного напряжения. Исходя из этого, напряжение обратной последовательности, измеряемое в начале ВЛ, равно

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_{2k} - \underline{z}_1 l \underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}_\phi}{2} - \underline{z}_1 l \underline{I}'_2$$

откуда получаем расчетную формулу для определения мест двухфазных КЗ:

$$l = \frac{\underline{U}_\phi - 2\underline{U}'_2}{2\underline{z}_1 \underline{I}'_2}, \quad (3.26)$$

где  $\underline{U}_\phi$  - фазное напряжение на шинах подстанции, откуда ведется отсчет расстояния до мест КЗ;

$\underline{U}'_2, \underline{I}'_2$  - соответственно напряжение и ток обратной последовательности в начале ВЛ;

$\underline{z}_1$  - удельное полное сопротивление прямой последовательности ВЛ.

Данный способ следует применять на ВЛ, где велика доля междуфазных коротких замыканий. Переходным сопротивлением в месте повреждения можно пренебречь [7].

### **Двухцепная линия**

На такой ВЛ (рис. 3.4) следует применять те же способы определения мест короткого замыкания, которые описаны выше применительно к одноцепной ВЛ. Следует только обратить внимание на то, что при ОМП по

отношению токов  $\frac{I'_0}{I'_2}$  или напряжений  $\frac{U'_0}{U'_2}$  вместо сопротивления линии  $X_l$  используется расчетное сопротивление  $X_p$ , равное

$$X_p = \frac{X_l + X_{12}}{2}$$

При включении фиксирующих амперметров на сумму токов двух цепей ( $\varepsilon = \frac{I'_{0\Sigma}}{I'_{2\Sigma}}$ ) формула (3.25) преобразовывается:

$$l = \left\{ 1 - \frac{2[(X'_{c2} + X_{p2} + X''_{c2})X''_{co} - \varepsilon(X'_{co} + X_{po} + X''_{co})X''_{c2}]}{\varepsilon(X'_{co} + X_{po} + X''_{co})X_{l2} - (X_{l0} + X_{12(0)})(X'_{c2} + X_{p2} + X''_{c2})} \right\} L. \quad (3.27)$$

При использовании формулы (3.42) следует, по возможности, устанавливать избиратели поврежденных фаз, чтобы отличать двухфазные КЗ на землю от однофазных.

Для рассматриваемых двухцепных ВЛ может применяться способ ОМП, основанный на одновременном одностороннем измерении суммы и разности токов нулевой (обратной) последовательности обеих цепей. В этом случае расстояние до мест КЗ следует определять по формуле:

$$l = \frac{(2X'_c + 2X''_c + X_l + X_{12})I'_\Sigma - (2X'_c + X_l + X_{12})I'_\Delta}{(2X'_c + 2X''_c + X_l + X_{12})I'_\Sigma - (X_l + X_{12})I'_\Delta} L. \quad (3.28)$$

Точность рассматриваемого способа зависит от соотношения параметров ВЛ и примыкающих к ней сетей. Значительное влияние при этом оказывает сопротивление  $X''_c$ . При  $X''_c = 0$  способ оказывается неприемлемым, так как функция (3.28) имеет вид  $l = L$ . Анализ погрешностей ОМП [7] показывает, что данный способ имеет оптимальное применение только для определения места КЗ при включении одной из цепей на однофазное или двухфазное КЗ на землю.

### 3. Расчет мест повреждений ВЛ с ответвлениями с помощью формул

#### 3.1. Методы ОМП на основе двусторонних измерений

Согласно требованиям п. 4.1. СТО 56947007-29.240.55.159-2013 установка устройств ОМП обязательна для ВЛ длиной более 20 км.

В случае ВЛ с ответвлениями установка устройств ОМП на ответвительных ПС обязательна при протяженности участка ответвления более 20 км.

Методы двустороннего ОМП на ВЛ с ответвлениями выполнены на основе теории многополюсников с использованием алгебры матриц и разделяются на:

- Метод пассивного многополюсника;

- Метод активного многополюсника;
- Метод, основанный на решении системы алгебраических уравнений.

### 3.2. Метод пассивного многополюсника

Расчет расстояния до места КЗ для общего случая многоцепной линии с ответвлениями (рис. 4.1) выполняется решением матричных уравнений, что требует применения ЭВМ.

#### Одноцепная линия

Рассматривается ВЛ с пятью ответвлениями (рис. 4.1, а) с однофазным КЗ на третьем участке. Схема замещения нулевой последовательности данной ВЛ приведена на (рис. 4.1., б).

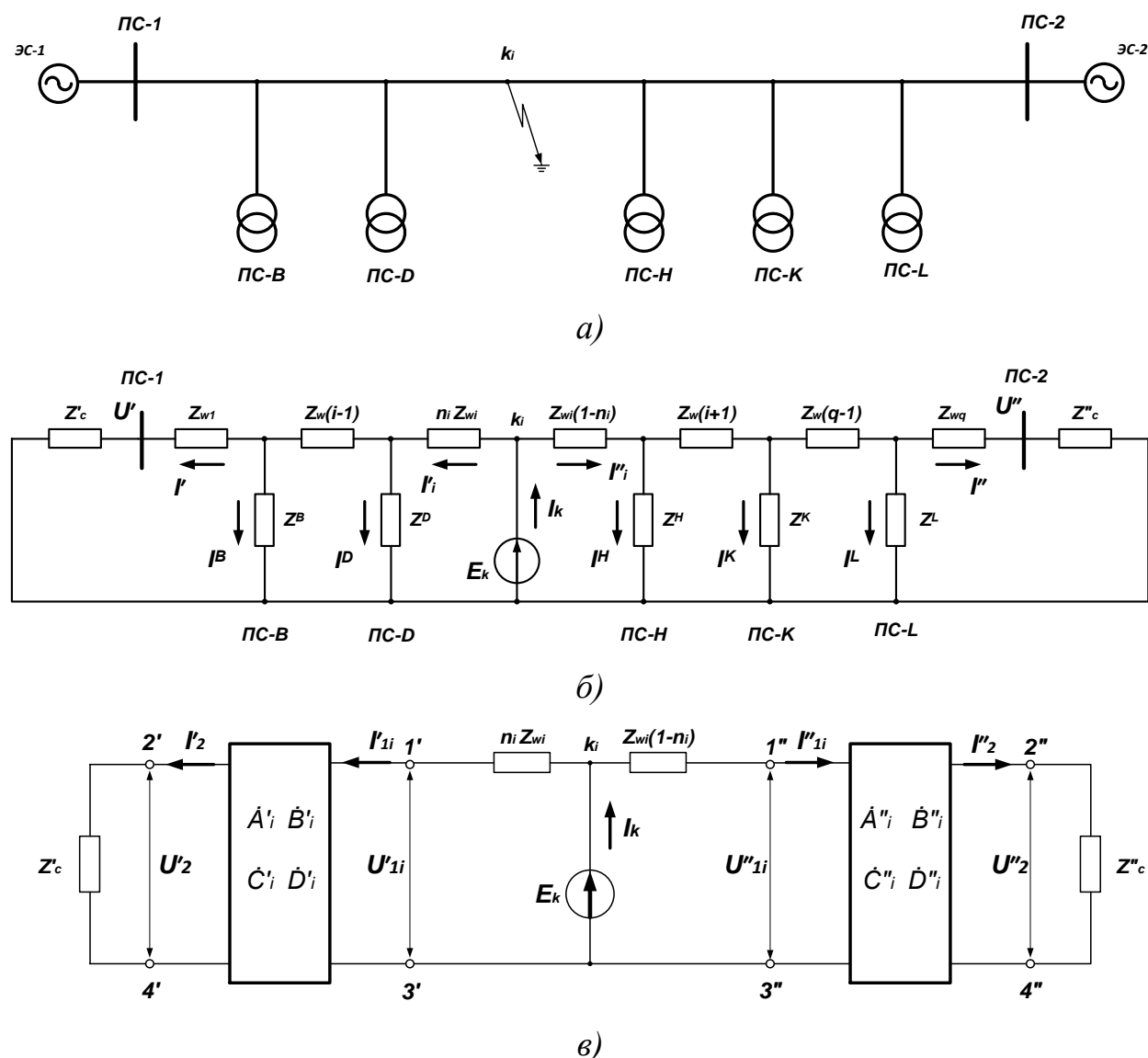


Рис. 4.1 Схема одиночной ВЛ с ответвлениями при коротком замыкании на землю

- а) Схема одиночной ВЛ с пятью ответвлениями; б) схема замещения нулевой последовательности; в) эквивалентная схема в виде двух пассивных четырехполюсников



В соответствии с методом пассивного многополюсника рассматриваемая ВЛ может быть представлена в виде двух пассивных четырехполюсников ( $p=1$ ) и одного задающего напряжения  $E_K$  (рис. 4.1, в). Параметры четырехполюсника характеризуются постоянными коэффициентами  $\dot{A}$ ,  $\dot{B}$ ,  $\dot{C}$ ,  $\dot{D}$ , равными соответственно параметрам  $\dot{A}_{aa}$ ,  $\dot{A}_{ab}$ ,  $\dot{A}_{ba}$ ,  $\dot{A}_{bb}$ .

В общем случае расстояние от начала  $i$ -го участка до места повреждения следует определять по формуле:

$$l_i = \frac{(\dot{A}_i'' + L_i z_{yd} \dot{C}_i'') U_2'' - \dot{A}_i' U_2' + (\dot{B}_i'' + L_i z_{yd} \dot{D}_i'') I_2'' - \dot{B}_i' I_2'}{z_{yd} (\dot{C}_i' U_2' + \dot{C}_i'' U_2'' + \dot{D}_i' I_2' + \dot{D}_i'' I_2'')} ; \quad (4.1)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го участка;

$\dot{A}_i'$ ,  $\dot{B}_i'$ ,  $\dot{C}_i'$ ,  $\dot{D}_i'$  и  $\dot{A}_i''$ ,  $\dot{B}_i''$ ,  $\dot{C}_i''$ ,  $\dot{D}_i''$  – постоянные коэффициенты четырехполюсников, эквивалентных части ВЛ соответственно до и после  $i$ -го участка;

$I_2'$ ,  $U_2'$ ,  $I_2''$ ,  $U_2''$  – токи и напряжения, измеряемые соответственно на опорных (концевых) ПС-1 и ПС-2.

Расстояние до места повреждения на  $i$ -м участке в относительных единицах получается из формулы (4.1), если обе его части разделить на  $L_i$ .

Тогда получаем:

$$n_i = \frac{(\dot{A}_i'' + z_{wi} \dot{C}_i'') U_2'' - \dot{A}_i' U_2' + (\dot{B}_i'' + z_{wi} \dot{D}_i'') I_2'' - \dot{B}_i' I_2'}{z_{wi} (\dot{C}_i' U_2' + \dot{C}_i'' U_2'' + \dot{D}_i' I_2' + \dot{D}_i'' I_2'')} . \quad (4.2)$$

Формула (4.2) применительно к повреждению каждого участка ВЛ составляется предварительно с учетом соответствующих расчетных коэффициентов  $\dot{A}_i$ ,  $\dot{B}_i$ ,  $\dot{C}_i$ ,  $\dot{D}_i$ , которые определяются способом холостого хода и короткого замыкания [8].

Относительное расстояние  $n_i$  до места повреждения в пределах каждого участка изменяется от нуля до единицы. Поэтому расстояние, вычисленное по формуле (4.2), будет соответствовать месту повреждения [25] при выполнении условия:

$$0 \leq n_i \leq 1. \quad (4.3)$$

Для определения места повреждения ВЛ с ответвлениями в соответствии с формулой (4.2), начиная с первого участка вычисляется, значение  $n_i$ . При выполнении условия (4.3) расчет заканчивается.

Поскольку число ПС на ответвлениях от ВЛ с заземленной нейтралью трансформаторов в подавляющем большинстве случаев составляет 1 – 2, ниже приводятся соответствующие формулы для таких ВЛ.

### Расчетная формула для ВЛ с одним ответвлением

Схема замещения нулевой последовательности и эпюра напряжений при повреждении на первом и втором участках ВЛ приведены на (рис. 4.2 и рис. 4.3).

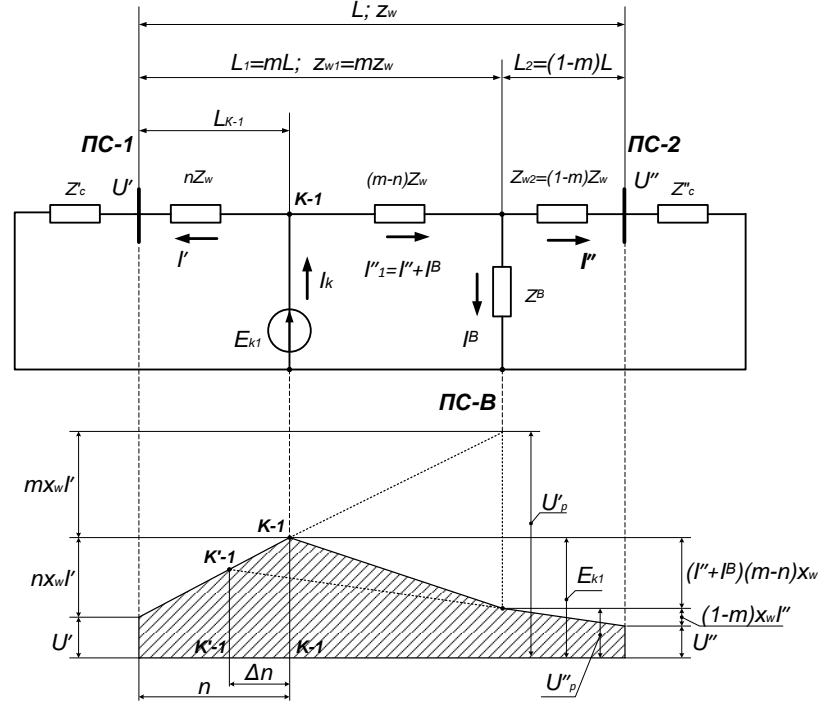


Рис. 4.2 Схема замещения и эпюра напряжений нулевой последовательности ВЛ с одним ответвлением при повреждении на первом участке

При повреждении на участке  $L_i$  (точка  $K-1$ ) параметры холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника, примыкающего слева и справа к месту повреждения, равны:

$$Z'_{1x} = \infty; Z'_{2x} = \infty; Z'_{2k} = 0,$$

откуда получаем соответствующие значения пассивных параметров:

$$\dot{A}'_1 = 1; \dot{B}'_1 = 0; \dot{C}'_1 = 0; \dot{D}'_1 = 1.$$

Аналогично получаем значения пассивных параметров четырехполюсника, расположенного справа от места повреждения:

$$\dot{A}'_1 = 1; \dot{B}'_1 = 0; \dot{C}'_1 = \frac{1}{Z^B}; \dot{D}'_1 = \frac{Z_{wz} + Z^B}{Z^B}.$$

Подставляя найденные значения пассивных параметров в (4.11) и считая  $L_i Z_{уд} = Z_{wi}$ , получаем расчетную формулу для ОМП на участке  $L_i$ :

$$l_1 = \frac{(z_{w1} + z^B)U_2'' - z^B U_2' + [z_{w2}z^B + z_{w1}(z^B + z_{w2})]I_2''}{z_{yд}(U_2' + z^B I_2' + (z^B + z_{w2})I_2'')}$$

$$n_1 = \frac{l_1}{L_1}$$

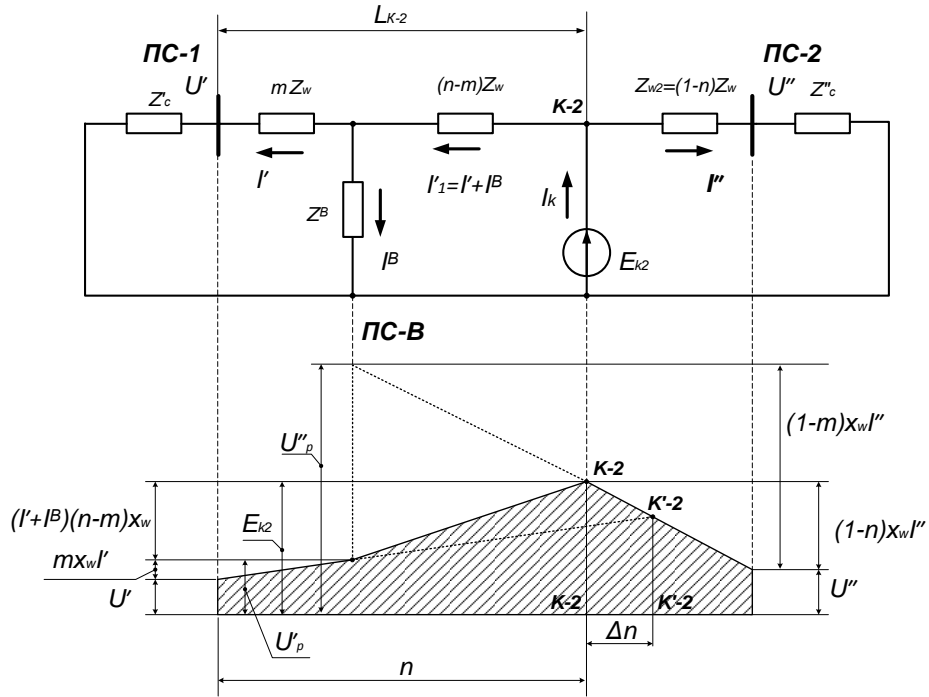


Рис. 4.3 Схема замещения и эпюра напряжений нулевой последовательности ВЛ с одним ответвлением при повреждении на втором участке

Для случая повреждения на участке  $L_2$  (точка  $K-2$ ) получаем аналогичные значения пассивных параметров четырехполюсников справа и слева от места повреждения:

$$\begin{cases} \dot{A}'_2 = 1; \dot{B}'_2 = z_{w1}; \dot{C}'_2 = \frac{1}{z^B}; \dot{D}'_2 = \frac{z_{w2} + z^B}{z^B} \\ \dot{A}''_2 = 1; \dot{B}''_2 = 0; \dot{C}''_2 = \frac{1}{z^B}; \dot{D}''_2 = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{A}'_2 = 1; \dot{B}'_2 = z_{w1}; \dot{C}'_2 = \frac{1}{z^B}; \dot{D}_2 = \frac{z_{w2} + z^B}{z^B} \\ \dot{A}''_2 = 1; \dot{B}''_2 = 0; \dot{C}''_2 = \frac{1}{z^B}; \dot{D}''_2 = 1. \end{cases}$$

Место повреждения на участке  $L_2$  определяется по выражению:

$$l_2 = L_{K-2} = \frac{z^B(U_2'' - U_2') - z_{w1}z^BI_2' + z_{w2}z^BI_2''}{z_{yd}[U_2' + (z^B + z_{w1})I_2' + z^BI_2'']}$$

$$n_2 = \frac{l_2}{L_2}$$

Для линии с двумя ответвлениями расчетные формулы для ОМП не приводятся из-за их громоздкости. Они могут быть получены на основе формулы (4.1) путем подстановки в нее параметров  $\underline{A}_i$ , соответствующих четырехполюсникам при КЗ на первом, втором и третьем участках ВЛ. Формулы для расчета этих параметров приведены в Таблице 3.1. После замены в расчетных формулах параметров  $\underline{A}_i$  их численными значениями получаются три отдельные формулы, каждая из которых имеет (как и в случае ВЛ с одним ответвлением) четыре параметра аварийного режима с соответствующими цифровыми коэффициентами. В Таблице 3.1  $\underline{Z}^\Gamma$  - полное сопротивление ответвления к подстанции Г,  $\underline{Z}_{л3}$  - полное сопротивление 3-го участка ВЛ. Частное решение для ВЛ с двумя и более ответвлениями было получено ранее [26].

Аналогично, используя известные [8] соотношения, можно получить значения параметров четырехполюсников и расчетные формулы для вычисления расстояния до мест КЗ для линий с тремя и более ответвлениями.

#### Двухцепная линия

Для общего случая таких ВЛ, работающих по концам отдельно (рис. 3.1, в) формулы для ОМП получаются на основе известных [8] матричных уравнений. При этом схема замещения ВЛ представляется двумя пассивными шестиполюсниками, примыкающими слева и справа к поврежденному участку. Расчетные формулы для СМП требуют применения ЭВМ.

Применительно к двухцепной ВЛ с одним ответвлением от каждой цепи эквивалентная схема в виде двух шестиполюсников показана на рис. 4.4. Параметры  $\underline{A}$  шестиполюсников при КЗ на 2-м участке следует определять по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{A}'_{2aa} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \underline{A}'_{2a\beta} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{л1} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{л1} \end{bmatrix}; \\ \underline{A}'_{2\beta a} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_I^B} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\underline{Z}_{II}^B} \end{bmatrix}; \quad \underline{A}'_{2\beta\beta} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{л1} + \underline{Z}_I^B}{\underline{Z}_I^B} & \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_I^B} \\ \frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{II}^B} & \frac{\underline{Z}_{л1} + \underline{Z}_{II}^B}{\underline{Z}_{II}^B} \end{bmatrix}; \\ \underline{A}''_{2aa} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \underline{A}''_{2a\beta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \underline{A}''_{2\beta a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \underline{A}''_{2\beta\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Для рассматриваемых ВЛ при определении мест повреждения необходимо знать направление токов и напряжений по концам цепей, что требует установки соответствующих устройств. Расчетные выражения для ОМП упрощаются для ВЛ, обе цепи которых работают по концам на общие шины.

Таким образом при отсутствии ЭВМ метод пассивного многополюсника следует применять главным образом на одноцепных линиях с ответвлениями.

### 3.3. Метод активного многополюсника

В отличие от метода, описанного в 4.2, рассматриваемый метод основан на представлении схемы замещения ВЛ в виде активного многополюсника [8]. Здесь также расчет расстояния до места КЗ в общем случае многоцепной линии с ответвлениями выполняется на основе решения соответствующих матричных уравнений с использованием ЭВМ. Ниже рассматривается метод активного многополюсника применительно к ВЛ, где данный метод не требует использования ЭВМ при выполнении оперативных расчетов для ОМП.

#### Одноцепная линия

Схема замещения такой ВЛ представляется одним активный четырехполюсником (рис. 4.5, а). Место КЗ рассматриваемым методом следует определять на основе известных [8] соотношений:

$$\underline{K}_J = \frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} = \frac{\underline{I}' + \frac{D}{B}\underline{U}' - \frac{1}{B}\underline{U}''}{\underline{I}'' - \frac{1}{B}\underline{U}' + \frac{A}{B}\underline{U}''} = f_1(l); \quad (4.5)$$

и

$$\underline{K}_e = \frac{\underline{e}_1}{\underline{e}_2} \frac{\underline{U}' + \frac{A}{C}\underline{I}' - \frac{1}{C}\underline{I}''}{\underline{U}'' - \frac{1}{C}\underline{I}' + \frac{D}{C}\underline{I}''} = f_2(l), \quad (4.6)$$

где  $\underline{J}_1, \underline{J}_2, \underline{e}_1, \underline{e}_2$  - автономные параметры активного четырехполюсника.

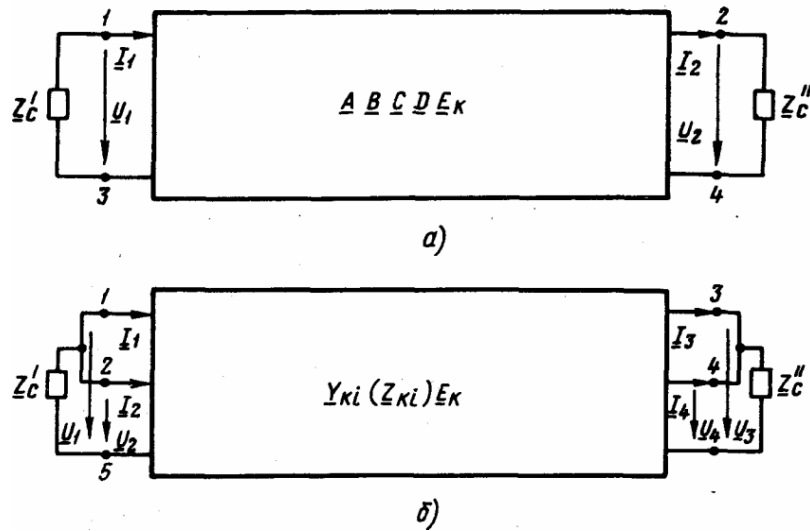


Рис. 4.5 Эквивалентные схемы ВЛ в виде активных многополюсников:

а - схема одноцепной ВЛ с ответвлениями в виде активного четырехполюсника

б - схема двухцепной ВЛ с ответвлениями в виде активного шестиполюсника

Выражения (4.5) и (4.6) эквивалентны и соответствуют одному и тому же месту КЗ.

Для определения мест повреждения методом активного многополюсника в дополнение к соотношениям (4.5) и (4.6) предварительно выполняется расчет относительных значений автономных параметров при КЗ в точках, равномерно распределенных вдоль ВЛ. Расчет может выполняться с помощью ЭВМ либо модели. Результаты расчета автономных параметров представляют в виде графической характеристики (сетчатой номограммы или номограммы из выравненных точек) либо в табличной форме. Чем больше расчетных точек ВЛ, тем меньше погрешность ОМП, обусловленная интерполяцией. В приложении 2 дан пример методики ОМП одноцепной ВЛ на основе активного многополюсника.

#### Двухцепная линия

Для такой линии следует использовать отношения автономных параметров  $\underline{I}$  и  $\underline{e}$  применительно к цепи  $W_I$  и цепи  $W_{II}$ :

$$\begin{cases} \underline{K}_{IJ} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3} = \frac{\underline{I}_1 - (\underline{Y}_{11} + \underline{Y}_{12})\underline{U}' - (\underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{14})\underline{U}''}{\underline{I}_3 - (\underline{Y}_{31} + \underline{Y}_{32})\underline{U}' - (\underline{Y}_{33} + \underline{Y}_{34})\underline{U}''} = f_1(l); \\ \underline{K}_{IIJ} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_4} = \frac{\underline{I}_2 - (\underline{Y}_{21} + \underline{Y}_{22})\underline{U}' - (\underline{Y}_{23} + \underline{Y}_{24})\underline{U}''}{\underline{I}_4 - (\underline{Y}_{41} + \underline{Y}_{42})\underline{U}' - (\underline{Y}_{43} + \underline{Y}_{44})\underline{U}''} = f_2(l); \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} \underline{K}_{I\delta} = \frac{\underline{e}_1}{\underline{e}_3} = \frac{\underline{U}' - \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 - \underline{Z}_{12}\underline{I}_2 - \underline{Z}_{13}\underline{I}_3 - \underline{Z}_{14}\underline{I}_4}{\underline{U}'' - \underline{Z}_{31}\underline{I}_1 - \underline{Z}_{32}\underline{I}_2 - \underline{Z}_{33}\underline{I}_3 - \underline{Z}_{34}\underline{I}_4} = F_1(l); \\ \underline{K}_{II\delta} = \frac{\underline{e}_2}{\underline{e}_4} = \frac{\underline{U}' - \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 - \underline{Z}_{22}\underline{I}_2 - \underline{Z}_{23}\underline{I}_3 - \underline{Z}_{24}\underline{I}_4}{\underline{U}'' - \underline{Z}_{41}\underline{I}_1 - \underline{Z}_{42}\underline{I}_2 - \underline{Z}_{43}\underline{I}_3 - \underline{Z}_{44}\underline{I}_4} = F_2(l). \end{cases} \quad (4.8)$$

Кроме формул (4.7) и (4.8), для двухцепных ВЛ могут быть получены другие формулы, основанные на различных сочетаниях отношений автономных параметров  $\underline{I}$  и  $\underline{e}$ , являвшихся функцией расстояния до мест КЗ [8]. Это позволяет повысить достоверность ОМП.

Пассивные параметры  $\underline{Y}_{ki}$  и  $\underline{Z}_{ki}$  следует вычислять по формулам:

$$\begin{cases} \underline{Y}_{ki} = \frac{\underline{i}_k}{\underline{u}_i}; \\ \underline{Z}_{ki} = \frac{\underline{u}_k}{\underline{i}_i} \end{cases} \quad (4.9)$$

где  $\underline{i}_k$  - ток в  $k$ -м полюсе при условии, что все полюсы, кроме  $i$ -го, соединены накоротко с соответствующим базисным полюсом;

$\underline{u}_i$  - напряжение между  $i$ -м полюсом и соответствующим базисным полюсом при тех же условиях;

$\underline{u}_k$  - напряжение между  $k$ -м и базисным полюсом при условии, что все полюсы, кроме  $i$ -го, разомкнуты;

$\underline{i}_i$  - ток в  $i$ -м полюсе при тех же условиях.

Параметры  $\underline{Y}_{ki}$  и  $\underline{Z}_{ki}$  рассчитываются с помощью ЭВМ либо модели.

Расчетные выражения (4.7) - (4.9) и соответствующие характеристики  $l = f(\underline{k}_J)$  и  $l = F(\underline{k}_B)$  составляются для каждой ВЛ. Учитывая относительную простоту расчетных выражений (они аналогичны формулам для ОМП ВЛ без ответвлений), определение мест КЗ методом активного многополюсника выполняется с использованием простейших вычислительных средств. Применение ЭВМ может оказаться необходимым лишь при расчете пассивных параметров в формулах для ОМП.

Таким образом метод активного многополюсника следует применять для ОМП как одноцепных, так и двухцепных ВЛ с ответвлениями с использованием соответствующих графических характеристик или таблиц. Расчет автономных параметров может выполняться предварительно на модели линии либо с использованием ЭВМ.

### **3.4. Метод, основанный на решении системы линейных алгебраических уравнений**

В ряде случаев, целесообразно дополнительное измерение тока на подстанции ответвления [27]. Это может иметь место, в частности, при изменении режима работы силовых трансформаторов ответвительных подстанций, что приводит к переменному значению сопротивления ответвления в схеме замещения. Ниже рассматривается этот метод применительно к ВЛ различных видов.

#### **Многоценная линия**

Для такой линии справедлива [8] система уравнений:

$$\begin{aligned}
& \underline{Z}_I(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I + \dots + \underline{I}^{N-1}_I)n + \underline{Z}_{12}[\underline{I}'_I + (1 - m_1)\underline{I}^B_I + \dots + m_N\underline{I}^{N-1}_I] + \dots \\
& \quad + \underline{Z}_{1p}[\underline{I}'_p + (1 - m_1)\underline{I}^B_p + \dots + m_N\underline{I}^{N-1}_p] \\
& \quad = \underline{U}''_I - \underline{U}'_I + \underline{Z}_I[\underline{I}''_I + m_1\underline{I}^B_I + (1 - m_N)\underline{I}^{N-1}_I]; \\
& \quad \dots\dots\dots \\
& \underline{Z}_{p1}(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I + \dots + \underline{I}^{N-1}_I)n + \underline{Z}_{p2}[\underline{I}'_I + (1 - m_1)\underline{I}^B_I + \dots + m_N\underline{I}^{N-1}_I] + \dots \\
& \quad + \underline{Z}_p[\underline{I}'_p + (1 - m_1)\underline{I}^B_p + \dots + m_N\underline{I}^{N-1}_p] \\
& \quad = \underline{U}''_p - \underline{U}'_p + \underline{Z}_{p1}[\underline{I}''_I + m_1\underline{I}^B_I + (1 - m_N)\underline{I}^{N-1}_I],
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

где  $m_1, \dots, m_N$  - доля участка ВЛ между ответвлениями  $L_1, \dots, L_N$  от протяженности цепи ( $m_1 = \frac{L_1}{L}, \dots, m_N = \frac{L_N}{L}$ );  
 $\underline{I}^B_I, \underline{I}^B_{II}, \dots, \underline{I}^B_p, \dots, \underline{I}^{N-1}_I, \underline{I}^{N-1}_{II}, \dots, \underline{I}^{N-1}_p$  - токи на подстанциях ответвлений  $B, \dots, N-1$  соответственно от цепей  $I, II, \dots, p$ .

Относительное расстояние  $n_i$  для поврежденной линии следует определять по выражению:

$$n_i = \frac{D_{nI}}{D}, \tag{4.11}$$

где  $D = \begin{bmatrix} \underline{Z}_I(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I + \dots + \underline{I}^{N-1}_I)\underline{Z}_{12} \dots \underline{Z}_{1p} \\ \dots\dots\dots \\ \underline{Z}_{p1}(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I + \dots + \underline{I}^{N-1}_I)\underline{Z}_{p2} \dots \underline{Z}_p \end{bmatrix}$  - определитель системы уравнений;

$$D_{nI} = \begin{bmatrix} \underline{U}''_I - \underline{U}'_I + \underline{Z}_I[\underline{I}''_I + m_1\underline{I}^B_I + \dots + (1 - m_N)\underline{I}^{N-1}_I]\underline{Z}_{12} \dots \underline{Z}_{1p} \\ \dots\dots\dots \\ \underline{U}''_p - \underline{U}'_p + \underline{Z}_{p1}[\underline{I}''_I + m_1\underline{I}^B_I + \dots + (1 - m_N)\underline{I}^{N-1}_I]\underline{Z}_{p2} \dots \underline{Z}_p \end{bmatrix}$$

- определитель, получающийся из определителя  $D$  путем замены столбца, составленного из коэффициентов при неизвестном  $n_I$ , столбцом, составленным из свободных членов уравнений (4.10).

Аналогично определяется место КЗ на остальных линиях.

### **Одноцепная линия**

Расчетные формулы для ОМП получаются из первого уравнения (4.10) в зависимости от числа ответвлений. Так, для наиболее распространенных ВЛ с одним ответвлением, расчетная формула имеет вид

$$l = nL = \frac{\underline{U}''_I - \underline{U}'_I + \underline{Z}_I(\underline{I}''_I + m_1\underline{I}^B_I)}{\underline{Z}_I(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I)} L \tag{4.12}$$

### **Двухцепная линия**

Здесь также расчетные формулы получаются решением системы из двух



первых уравнений (4.10). Применительно к двухцепным ВЛ с одним ответвлением от каждой цепи, работающим на общие шины с двух концов, расстояние до мест КЗ, например, цепи  $W_1$ , следует определять по формуле

$$l_I = n_I L_I = \frac{\underline{U}'' - \underline{U}' + (\underline{Z}_L + \underline{Z}_{12})(\underline{I}'_I + m_1 \underline{I}^B_I)}{(\underline{Z}_L + \underline{Z}_{12})(\underline{I}'_I + \underline{I}''_I + \underline{I}^B_I)} L_I \quad (4.13)$$

В целях повышения точности и достоверности расчета расстояния целесообразно одновременное измерение геометрической суммы и разности токов обеих цепей [28]. В этом случае при раздельной работе цепей по концам получаем:

$$\begin{cases} l = \frac{(\underline{U}''_I - \underline{U}'_I) + (\underline{U}''_{II} - \underline{U}'_{II}) + (\underline{Z}_L - \underline{Z}_{12})(\underline{I}''_S + m_1 \underline{I}^B_S)}{(\underline{Z}_L + \underline{Z}_{12})(\underline{I}'_S + \underline{I}''_S + \underline{I}^B_S)} L; \\ l = \frac{(\underline{U}''_I - \underline{U}'_I) - (\underline{U}''_{II} - \underline{U}'_{II}) + (\underline{Z}_L - \underline{Z}_{12})(\underline{I}''_A + m_1 \underline{I}^B_A)}{(\underline{Z}_L - \underline{Z}_{12})(\underline{I}'_A + \underline{I}''_A + \underline{I}^B_A)} L, \end{cases} \quad (4.14)$$

где  $\underline{U}'_I, \underline{U}''_I$  и  $\underline{U}'_{II}, \underline{U}''_{II}$  - напряжения нулевой (обратной) последовательности по концам первой и второй цепей ВЛ на конечных подстанциях;

$\underline{I}'_S, \underline{I}''_S$  и  $\underline{I}'_A, \underline{I}''_A$  - геометрическая сумма и разность токов нулевой (обратной) последовательности обеих цепей;

$\underline{I}^B_S, \underline{I}^B_A$  - геометрическая сумма и разность токов нулевой (обратной) последовательности обеих цепей линии на ответвительных подстанциях.

Формулы (4.14) следует главным образом применять, если на подстанции ответвления установлены трансформаторы с одинаковыми сопротивлениями. При этом в случае отключения трансформатора цепи  $W_I$  для определения места КЗ на ней во второй формуле (4.14) перед  $\underline{I}^B_A$  знак "плюс" должен быть заменен на "минус". Если же сопротивления ответвлений не равны между собой, то в ряде случаев также может изменяться направление тока  $\underline{I}^B_A$ , что требует установки реле направления мощности.

Для исключения контроля направления тока  $\underline{I}^B_A$  следует на подстанциях ответвлений измерять токи каждого из ответвлений [29]. В этом случае в первой формуле (4.14) вместо тока  $\underline{I}^B_S$  подставляется сумма токов  $(\underline{I}^B_I + \underline{I}^B_{II})$ , а во второй формуле вместо тока  $\underline{I}^B_A$  - разность токов  $(\underline{I}^B_I - \underline{I}^B_{II})$ .

Расчетные формулы рассматриваемого метода сравнительно просты и не требуют при определении мест повреждения использования ЭВМ.

## 4. Программные способы расчета мест повреждений ВЛ

### 4.1. Программный комплекс WinBres

Программный комплекс WinBres предназначен для просмотра и анализа цифровых осциллограмм, записанных микропроцессорными терминалами релейной защиты и автоматики, а также определения по ним места повреждения на ВЛ.

Программный комплекс WinBres помимо чтения осциллограмм всех модификаций терминалов производства НПП «Бреслер», осциллограмм

международного формата COMTRADE стандарта 1991 и 1999 годах (текстового и двоичного формата файла данных), также поддерживает чтение файлов осциллограмм сторонних фирм-производителей.

В Таблице 5.1. перечислены типы файлов, поддерживаемые для чтения в WinBres.

Таблица 5.1.

№	Формат названия файла осциллограммы	Тип устройства
1	reg***.***	терминалы НПП «Бреслер» серии 0104
2	*.brs	терминалы НПП «Бреслер» серии 0105-0107
3	*.dfr	терминалы НПП «Экра»
4	*.bb	терминалы НТЦ «Госан» серии «Черный ящик»
5	*.do	терминалы ООО «Парма»
6	*.os*	терминалы «Нева» НПФ «Энергосоюз»
7	*.aura	терминалы «Аура» ООО «Свей»
8	*.sg2	терминалы «РЭС-3» инженерной компании «Прософт-Системы»
9	*.cfg;*.dat;*.hdr	файлы осциллограмм международного формата COMTRADE 1991/1999 г.г. Чтение файлов данных (*.dat) поддерживается как в двоичном виде (BINARY формат), так и в текстовом (ASCII формат)

Программный комплекс WinBres включает в себя высокоточную функцию определения места повреждения (ОМП) на ВЛ. Расчет места повреждения производится по файлам осциллограмм всех поддерживаемых форматов. По результатам каждого расчета формируется типовой протокол.

Данный протокол может быть сохранен в виде файла на жестком диске, либо распечатан при помощи формы печати WinBres.

#### 4.1.1 Диспетчерский вариант расчета мест повреждений

Суть диспетчерского варианта расчета ОМП заключается в том, чтобы свести к минимуму количество операций, требуемых от пользователя для запуска расчета ОМП на выбранной ВЛ. Для удовлетворения данного требования программный комплекс предусматривает возможность запуска расчета ОМП непосредственно из формы «Проводник WinBres», без открытия и анализа файлов аварийных осциллограмм с разных сторон выбранной ВЛ в области просмотра осциллограмм. Диспетчеру рекомендуется использовать режим проводника «По линиям», так как, в этом случае, легче найти необходимый для расчета модуль ОМП. Последовательность действий, которую необходимо выполнить диспетчеру для запуска расчета ОМП в форме «Проводник WinBres», состоит из следующих этапов:

- выбор модуля ОМП в дереве объектов проводника. Модули ОМП отображаются в дереве проводника при помощи названий соответствующих ВЛ;

- запуск расчета ОМП при помощи кнопки «ОМП» панели инструментов главной формы либо при помощи горячей клавиши F5;

- выбор, а при необходимости, и импорт файлов осциллограмм аварийного процесса в автоматически появляющейся форме выбора осциллограмм для ОМП. Данный этап необходимо повторить для каждой из подстанций соответствующей ВЛ. Если на какой-либо из подстанций нет возможности получить файл аварийной осциллограммы, форма выбора позволяет задать значения сигналов доаварийного и аварийного процессов «вручную». Значения сигналов могут быть зафиксированы диспетчером при помощи микропроцессорных устройств сторонних производителей, установленных на данной подстанции;

- печать протокола из автоматически появляющейся формы результата расчета ОМП.

### Выбор ВЛ для расчета ОМП

Как было упомянуто выше, диспетчеру при работе с программой, рекомендуется использовать режим проводника «По линиям». Для выбора ВЛ, на которой будет производиться расчет ОМП, необходимо выделить модуль ОМП (ориентируясь на название ВЛ) в дереве проводника при помощи левой клавиши мыши (рис. 5.1.):

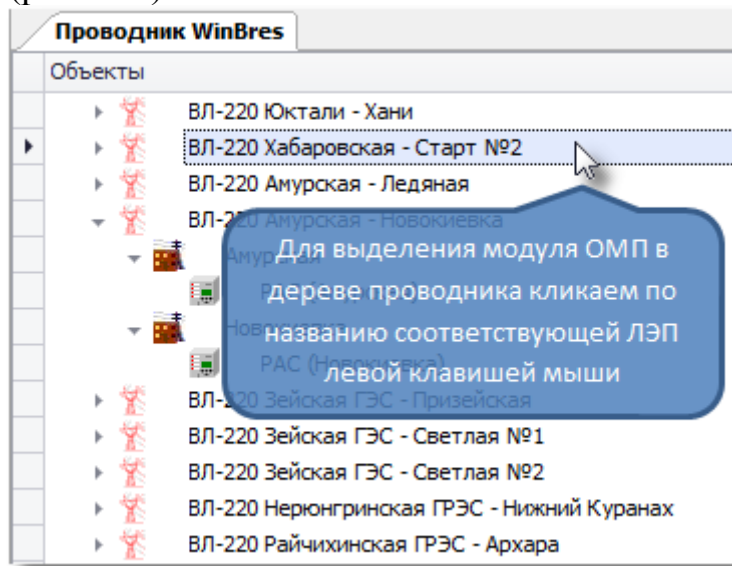


Рис. 5.1 Выбор ВЛ для расчета ОМП

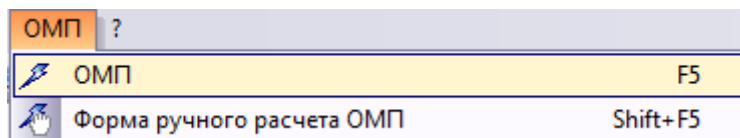
В случае, если дерево проводника содержит большое количество узлов, для ускорения поиска необходимого модуля ОМП можно воспользоваться следующими функциями программы:

- отсортировать узлы дерева проводника в алфавитном порядке по возрастанию или убыванию в зависимости от того, к какой части алфавита принадлежит первая уникальная буква в названии ВЛ искомого модуля ОМП;
- воспользоваться меню «Найти», где в качестве критерия поиска указать либо часть названия (при этом в меню «Найти» должна отсутствовать отметка в поле «искать только слово целиком»), либо название ВЛ искомого модуля ОМП полностью.

### Запуск расчета ОМП

Для запуска функции расчета ОМП можно воспользоваться следующими способами:

- выполнить пункт главного меню «ОМП»-> «ОМП»:



- нажать кнопку «ОМП» панели инструментов «ОМП»:



- воспользоваться горячей клавишей F5.

### Выбор осциллограмм для расчета ОМП

После запуска расчета ОМП, на экране автоматически появляется форма выбора осциллограммы аварийного режима. При работе с данной формой необходимо обратить внимание на следующее:

**для какой из сторон ВЛ была вызвана форма.** Название подстанции, для которой была вызвана форма, отображается крупным шрифтом непосредственно над списком файлов осциллограмм (рис. 5.2):

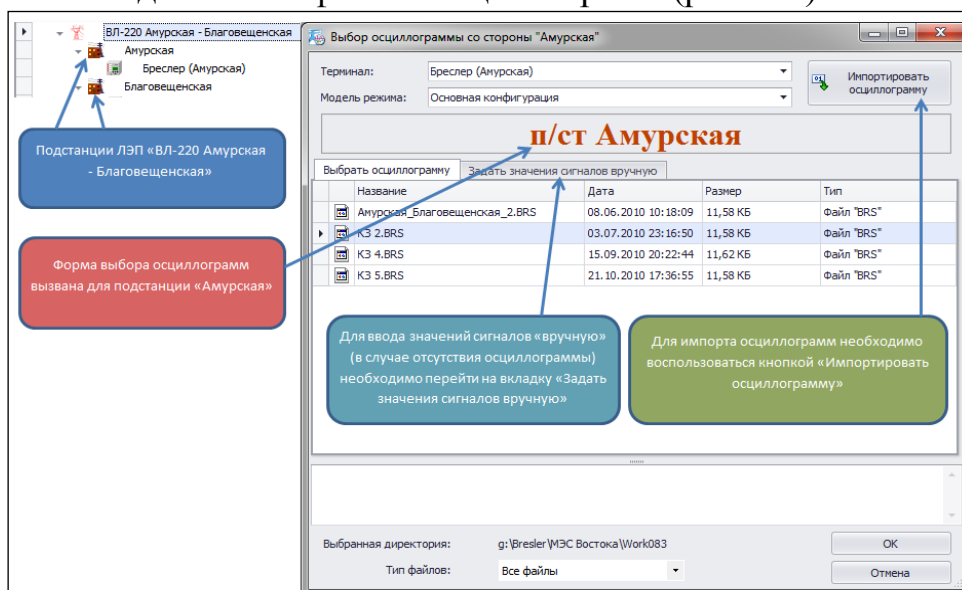


Рис. 5.2 Окно выбора осциллограмм для расчета ОМП

Отображение названия соответствующей подстанции в форме выбора

осциллограммы

**осциллограммы какого из терминалов подстанции отображаются в таблице.** Название терминала, содержащееся в рабочей папке которого приводится внутри таблицы списка осциллограмм, отображается в **выпадающем списке «Терминал»**, расположенном в самом верху формы. При помощи выпадающего списка можно выбрать для расчета ОМП любой из терминалов, установленных на подстанции;

**какую из осциллограмм выбрать для расчета.** Для поиска необходимой осциллограммы в качестве ориентира, как правило, используется информация о дате и времени повреждения на ВЛ. Поиск необходимой осциллограммы можно ускорить воспользовавшись возможностью сортировки списка осциллограмм по значению любой из представленных колонок. Для сортировки необходимо кликнуть левой клавишей мыши по заголовку соответствующей колонки. В случае сортировки файлов по значению **колонки «Дата»** в убывающей последовательности, вверху списка оказываются наиболее «свежие» файлы осциллограмм;

**как импортировать осциллограмму в рабочую папку выбранного терминала.** Если необходимая осциллограмма отсутствует в списке файлов рабочей директории выбранного терминала, предусмотрена возможность импорта файлов из других директорий жесткого диска, сетевых дисков либо внешних носителей информации. Для импорта файлов используется форма открытия осциллограмм, позволяющая просматривать содержимое всех указанных выше источников информации. Форма открытия осциллограмм вызывается при помощи нажатия **кнопки «Импорт осциллограмм»**. Выбранный внутри формы файл (либо файлы) будет скопирован в рабочую директорию текущего терминала и автоматически отобразится в таблице списка файлов;

**как выбрать осциллограмму для использования функцией расчета ОМП.** Для этого необходимо дважды кликнуть по ней левой клавишей мыши в таблице списка файлов рабочей директории либо, предварительно выделив нужную осциллограмму в таблице при помощи клика по ней левой клавишей мыши, нажать кнопку «ОК».

В ходе одного расчета ОМП форма выбора осциллограмм автоматически появляется столько раз, сколько сторон у выбранного модуля ОМП. Если для какой-то из подстанций ВЛ отсутствует осциллограмма аварийного режима, и не удастся получить значения сигналов доаварийного и аварийного режимов для ввода в поля формы «вручную», в форме выбора необходимо нажать **кнопку «Отмена»**, при этом, если есть возможность произвести расчет по осциллограммам оставшихся подстанций ВЛ, WinBres сделает соответствующий запрос пользователю.

Например, при расчете места повреждения с использованием двухстороннего модуля ОМП, форма выбора осциллограмм автоматически появляется два раза - для левой и правой подстанции ВЛ (рис. 5.3).

Можно отказаться от выбора осциллограммы, либо ввода данных «вручную», для любой из этих подстанций (но только для одной!), при этом будет произведен расчет одностороннего ОМП, относительно той подстанции, для которой была выбрана осциллограмма (рис. 5.4, рис. 5.5).

Если указать осциллограммы для обеих подстанций, будет произведен двухсторонний расчет ОМП (рис. 5.3).

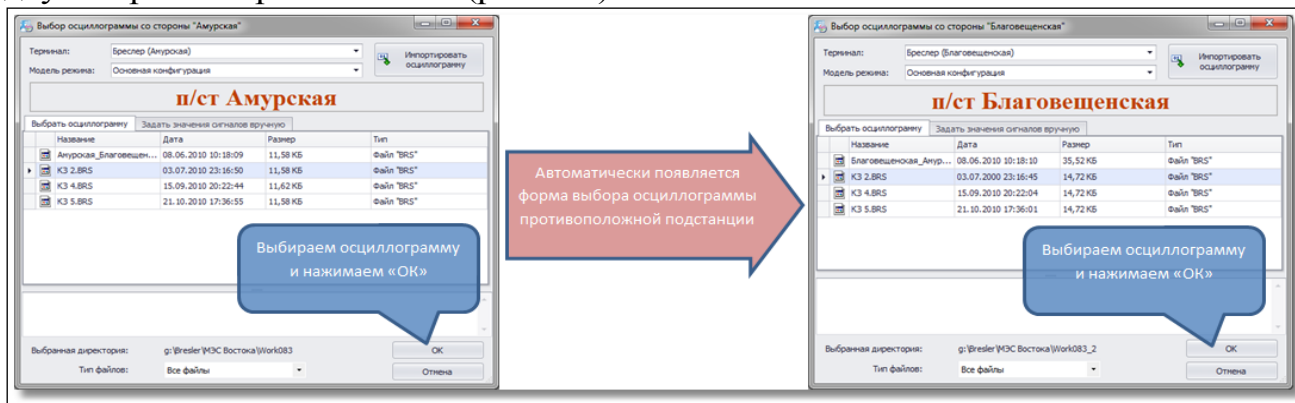


Рис. 5.3 Расчет двухстороннего ОМП на ВЛ 220 кВ Амурская – Благовещенская

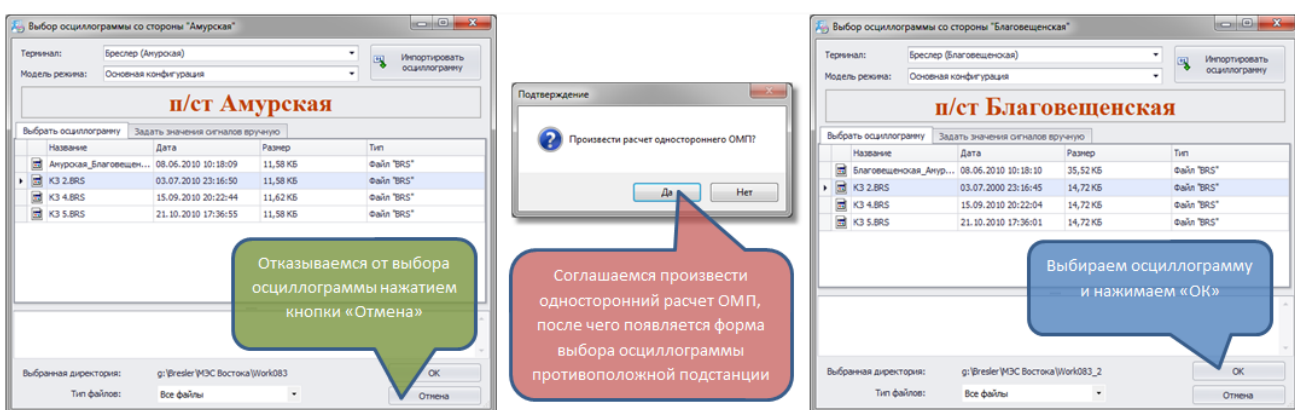


Рис. 5.4 Расчет одностороннего ОМП со стороны ПС 220 кВ Благовещенская на ВЛ 220 кВ Амурская – Благовещенская

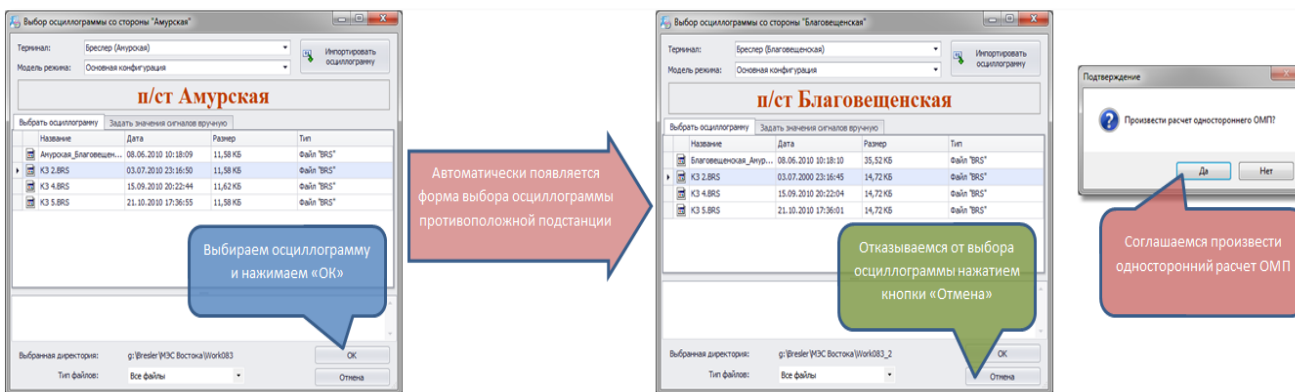


Рис. 5.5 Расчет одностороннего ОМП со стороны ПС 220 кВ Амурская на ВЛ 220 кВ Амурская – Благовещенская

### Задание значений сигналов вручную

В случае отсутствия аварийных осциллограмм и наличия значений сигналов до аварийного и аварийного режимов можно воспользоваться ручным заданием сигналов. Для этого после запуска расчета ОМП в форме выбора осциллограммы необходимо перейти на вкладку «Задание значения сигналов вручную» (рис. 5.6).

Выбор осциллограммы со стороны "Заря"

Терминал: Черный ящик (Заря)  
Модель режима: С генерацией  
☐ использовать режим опробования линии

Импортировать осциллограмму

**п/ст Заря**

Выбрать осциллограмму    Задать значения сигналов вручную

Название записи: Текущая запись  
Дата/время записи: 19.08.2015 17:09:06  
Вид повреждения: Автоматический выбор

Фазные величины	Доаварийный режим	Аварийный режим
Ua, кВ	300.703 0.000°	299.057 2.568°
Ub, кВ	303.600 -119.300°	149.598 -165.548°
Uc, кВ	299.230 119.870°	312.748 117.698°
Ia, кА	0.133 -177.598°	0.242 169.699°
Ib, кА	0.119 57.584°	5.657 -175.566°
Ic, кА	0.119 -60.456°	0.095 -119.475°

Сохранить    Копировать    Удалить    Удалить все

Выбранная директория: C:\Bresler\МЭС Сибири\Work004  
Тип файлов: Все файлы

OK    Отмена

Рис. 5.6 Окно задания значений сигналов вручную

Для одностороннего расчета ОМП необходимо ввести значения сигналов как для аварийного, так и для доаварийного режимов, при двухстороннем расчете допускается использование величин только лишь аварийного режима, однако точность расчета ОМП при этом будет ниже. При вводе данных необходимо учитывать угол между доавариным и аварийным режимами.

Для двухсторонних и многосторонних модулей выбор осциллограмм для расчета ОМП можно комбинировать с введением значений сигналов вручную.

### Печать протокола ОМП

После выбора осциллограмм аварийного процесса автоматически запускается непосредственно расчет ОМП, который занимает некоторое время. Затем на экране появляется форма «Результаты расчета ОМП» (рис. 5.7).

[01] - Для печати протокола ОМП	
Название	необходимо нажать эту кнопку
Класс напряжения	220 кВ
Длина	22,7 км
Тип ОМП	Двухстороннее
Режим объекта	Основная конфигурация

[02] - Информация о повреждении	
Повреждение на линии	59,982 км от п/ст Амурская
	69,808 км от п/ст Благовещенская
Дата, время повреждения	03.07.2010 23:16:50.105
Вид повреждения на ВЛ	
п/ст Амурская	Двухфазное замыкание на землю фаз С и А
п/ст Благовещенская	Двухфазное замыкание на землю фаз С и А
Осциллограммы	
п/ст Амурская	g:\bresler\yac востока\work083\ыз 2.brs
п/ст Благовещенская	g:\bresler\yac востока\work083_2\ыз 2.brs

[03] - Параметры расчета (п/ст Амурская, п/ст Благовещенская)	
Предшествующий режим	73 мс, 80 мс
Момент времени пуска	105 мс, 112 мс
Аварийный режим	145 мс, 150 мс

[04] - Входные каналы в Ктр ({п/ст Амурская}, {п/ст Благовещенская})	
Напряжение фазы А	{{[01] - Ктр = 2200,000}, {[01] - Ктр = 2200,000}}
Напряжение фазы В	{{[02] - Ктр = 2200,000}, {[02] - Ктр = 2200,000}}
Напряжение фазы С	{{[03] - Ктр = 2200,000}, {[03] - Ктр = 2200,000}}
Ток фазы А	{{[13] - Ктр = 200,000}, {[08] - Ктр = 200,000}}
Ток фазы В	{{[14] - Ктр = 200,000}, {[09] - Ктр = 200,000}}
Ток фазы С	{{[15] - Ктр = 200,000}, {[10] - Ктр = 200,000}}

Рис. 5.7 Внешний вид формы «Результаты расчета ОМП»

Для печати протокола расчета ОМП в появившейся форме необходимо нажать кнопку **«Печать бланка отчета»**, расположенную в левой части инструментальной панели формы.

#### 4.1.2. Расширенный вариант расчета ОМП

Расширенный вариант расчета отличается от диспетчерского тем, что требует открытия соответствующих осциллограмм (либо осциллограммы) задействованного модуля ОМП и осуществляется при помощи вспомогательного окна «ОМП». Анализируя сигналы открытых осциллограмм, пользователь, при необходимости, может сам определять моменты времени предшествующего и аварийного установившихся режимов, а также вид повреждения, воздействуя тем самым на результат расчета ОМП. Не исключен и полностью автоматический вариант расчета, в этом случае WinBres полностью повторяет результат диспетчерского варианта расчета.

##### Открытие вспомогательного окна «ОМП»

Расширенный вариант расчета осуществляется при помощи вспомогательного окна «ОМП».

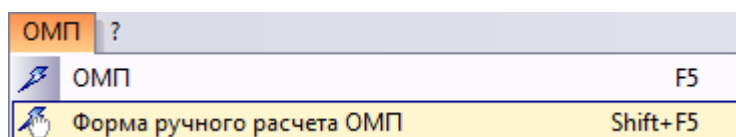
Для открытия окна «ОМП» необходимо, чтобы в области просмотра осциллограмм активным было окно осциллограммы, по сигналам которой планируется произвести расчет ОМП. Терминал, из рабочей директории которого была открыта просматриваемая осциллограмма, называется далее в тексте – «активный терминал».

Вызывается окно «ОМП» при помощи тех же самых способов, что используются для запуска диспетчерского варианта расчета.



## Способы открытия окна «ОМП»

- выполнить пункт главного меню «ОМП»-> «ОМП»:



- нажать кнопку «ОМП» панели инструментов «ОМП»:



- воспользоваться сочетанием горячих клавиш Shift + F5.

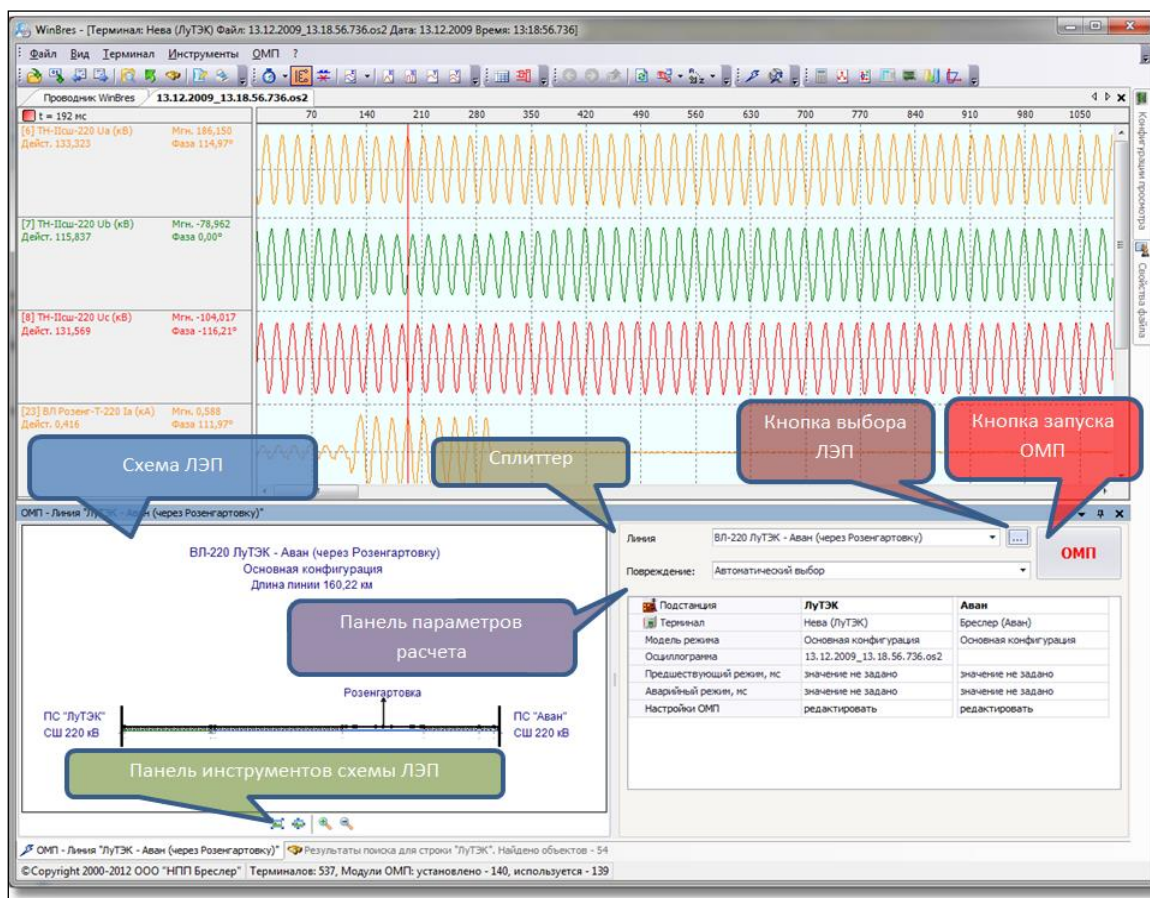


Рис. 5.8 Элементы интерфейса окна «ОМП»

По умолчанию окно «ОМП» открывается в нижней части главной формы приложения, однако, как и любое другое вспомогательное окно, может быть размещено вдоль любой стороны ее периметра (рис. 5.8):

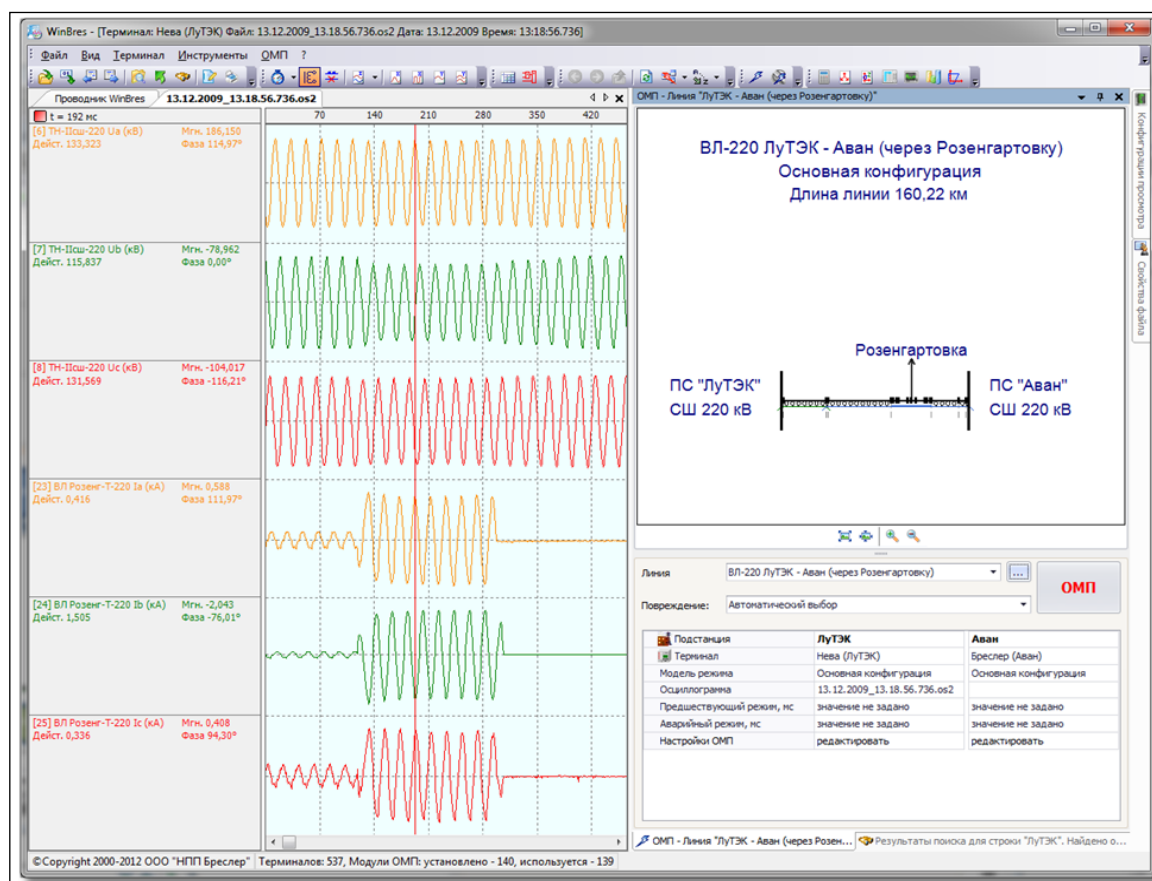


Рис. 5.9 Вертикальное расположение окна «ОМП»

Основными элементами интерфейса окна являются схема ВЛ и панель параметров расчета, которые автоматически изменяют порядок своего расположения с горизонтального на вертикальный в случае если высота окна "ОМП" становится больше его ширины. Между схемой и панелью расположен элемент управления - сплиттер, перемещая который мышью можно изменять размеры элементов интерфейса.

### Структура таблицы параметров расчета ОМП (рис. 5.10)

Одним из основных элементов управления панели параметров расчета является таблица, занимающая большую часть панели. В зависимости от структуры, выбранной для расчета ВЛ, таблица может содержать разное количество столбцов, каждый из которых соответствует одной подстанции. Название соответствующей подстанции отображается в первой ячейке столбца:

Подстанция	Хабаровская	Биробиджан №1
Терминал	Бреслер (Хабаровская)	РАС (Биробиджан №1)
Модель режима	Основная конфигурация	Основная конфигурация
Осциллограмма		
Предшествующий режим, мс	значение не задано	значение не задано
Аварийный режим, мс	значение не задано	значение не задано
Настройки ОМП	редактировать	редактировать
Названия параметров расчета	Параметры подстанции «Хабаровская»	Параметры подстанции «Биробиджан №1»

Рис. 5.10 Таблица параметров расчета

### Выбор ВЛ для расчета ОМП

Выбор ВЛ для расчета ОМП осуществляется при помощи выпадающего списка «Линия», расположенного в верхней части панели параметров расчета. Список является нередактируемым и содержит перечень модулей ОМП, связанных с активным терминалом. Для выбора произвольного модуля ОМП, не связанного с активным терминалом, используется кнопка «Обзор», расположенная справа от списка «Линия». После ее нажатия на экране появляется форма «Выбор установленного модуля ОМП» (рис. 5.11), в которой перечислены все модули ОМП, установленные в структуре данных WinBres:

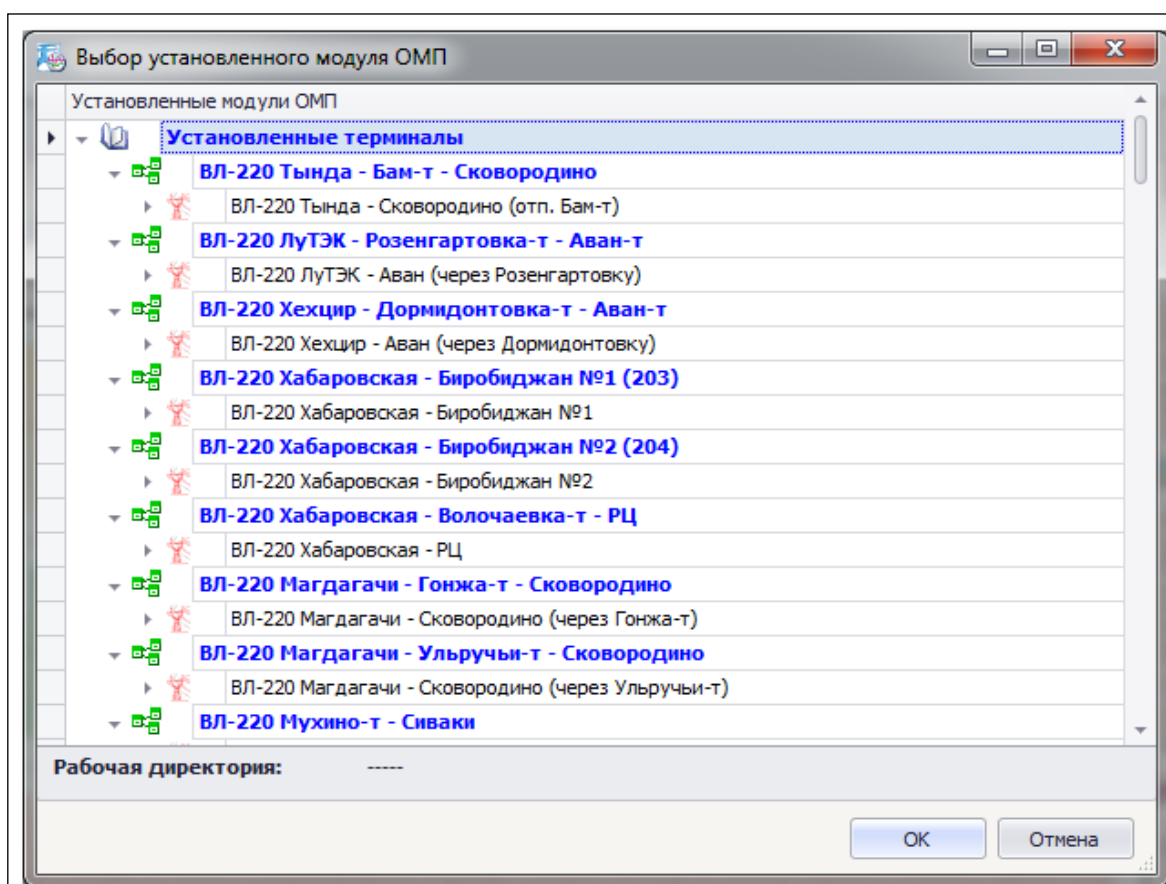


Рис. 5.11 Внешний вид формы «Выбор установленного модуля ОМП»

Список может быть отсортирован при помощи клика левой клавиши мыши по его заголовку (область с надписью «Установленные модули ОМП»). Для выбора модуля ОМП необходимо выделить в списке соответствующую строку и нажать кнопку «ОК» либо дважды кликнуть по строке списка левой клавишей мыши. После смены активного модуля ОМП, автоматически обновляется изображение на схеме ВЛ, а также значения таблицы параметров расчета.

### **Выбор терминала, установленного на подстанции**

Выбор терминалов для подстанций ВЛ осуществляется при помощи соответствующих ячеек строки «Терминал» таблицы параметров расчета ОМП. Ячейки представляют собой фиксированные списки, каждый из которых содержит перечень установленных на подстанции терминалов.

### **Выбор файлов осциллограмм**

Выбор файлов аварийных осциллограмм осуществляется при помощи соответствующих ячеек строки «Осциллограмма» таблицы параметров расчета ОМП. Если активировать какую-либо из ячеек строки «Осциллограмма» нажатием левой клавиши мыши, в правой части ячейки появится кнопка, при нажатии которой на экране появится форма выбора осциллограмм для ОМП. После закрытия формы при помощи кнопки «ОК», ячейка будет содержать название выбранной в форме осциллограммы.

Если форма выбора осциллограммы для расчета ОМП закрывается при помощи кнопки «Отмена», пользователю предлагается сбросить осциллограмму, которая была выбрана в ячейке до вызова формы. В случае положительного ответа значение ячейки будет пустым. Описанное поведение может быть использовано для сброса значений ячеек строки «Осциллограмма»

Выбранная осциллограмма автоматически открывается в области просмотра осциллограмм, при условии, что во вкладке «ОМП» формы «Настройки WinBres» установлена отметка в поле «автоматически открывать файлы осциллограмм, выбираемых для расчета в окне «ОМП»».

В форме выбора осциллограмм для ОМП допускается выбор ручной записи пользователя вместо осциллограммы. В этом случае в соответствующей ячейке таблицы параметров расчета будет отображаться название выбранной ручной записи пользователя.

### **Просмотр осциллограмм, участвующих в расчете ОМП**

Если для каждой подстанции модуля ОМП выбраны осциллограммы, и все они являются открытыми в области просмотра осциллограмм, переключение между их окнами просмотра может быть осуществлено при помощи клика левой клавишей мыши по любой из ячеек соответствующего столбца таблицы параметров расчета ОМП (рис. 5.12):

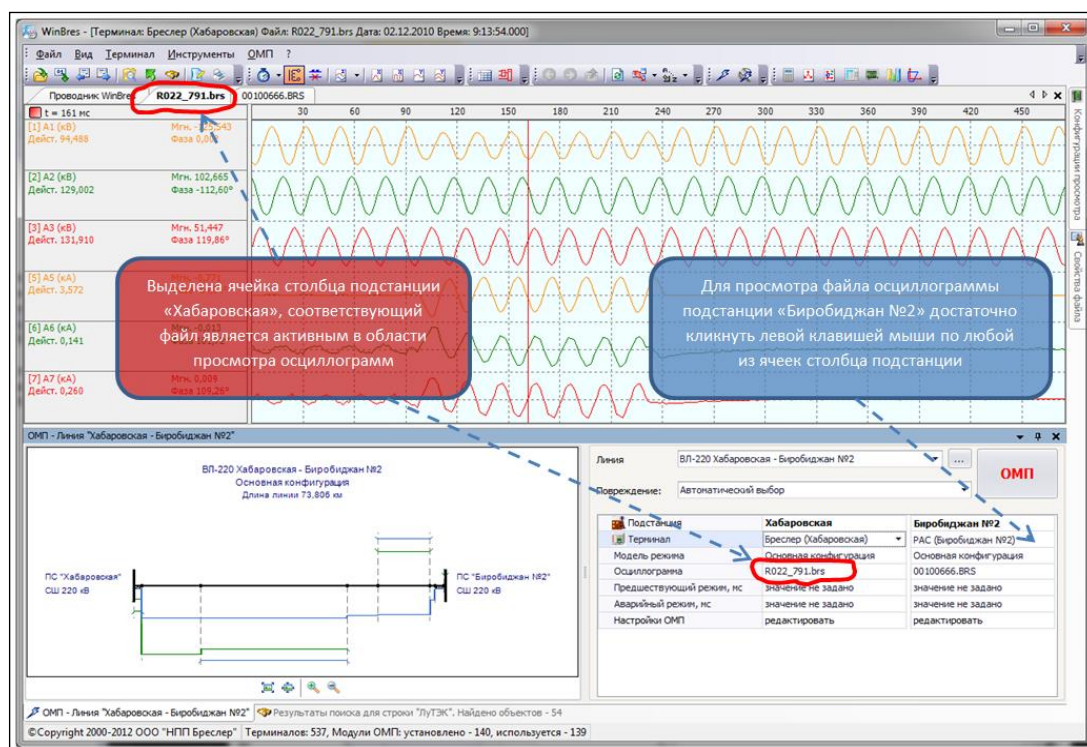


Рис. 5.12 Переключение между окнами осциллограмм, участвующих в расчете ОМП

Данное поведение имеет место при условии, что во вкладке «ОМП» формы «Настройки WinBres» установлена отметка в поле «автоматически показывать осциллограммы для которых редактируются данные в окне ОМП».

### Ручной выбор вида повреждения

Пользователь, при необходимости, может вручную задать вид повреждения на ВЛ при помощи выпадающего списка «Повреждение», расположенного над таблицей параметров расчета ОМП. Внутри списка перечислены все возможные виды повреждений, а также присутствует строка «Автоматический выбор», при выборе которой WinBres автоматически определит вид повреждения в ходе расчета ОМП.

### Ручной выбор моментов времени установившихся предшествующего и аварийного режимов

Возможность ручного выбора моментов времени предшествующего и аварийного режимов становится доступной только после выбора файла осциллограммы в соответствующем столбце таблицы параметров расчета ОМП. Ячейки задания значений моментов времени представляют собой редактируемые списки, в которых перечислены указки соответствующих осциллограмм. Выбор момента времени предшествующего установившегося режима осуществляется в строке «Предшествующий режим, мс», аварийного – «Аварийный режим, мс». Значения времени задаются относительно начала



соответствующей осциллограммы. Есть два варианта задания значения момента времени:

при помощи клавиатуры - значение вводится непосредственно при помощи клавиатуры в виде целого числа миллисекунд относительно начала осциллограммы;

при помощи строки из выпадающего списка - выбирается одна из доступных указок осциллограммы. После выбора указки, значение момента времени режима (предшествующего либо аварийного) принимается равным значению момента времени указки. Перемещение указки вдоль оси времени осциллограммы приводит к автоматическому изменению значения момента времени соответствующего режима. Для того чтобы отменить описанную связь между значениями моментов времени режима и указки, необходимо выбрать в выпадающем списке строку «Сбросить значение» либо ввести значение момента времени при помощи клавиатуры.

Особенности выбора моментов времени предшествующего и аварийного режимов проиллюстрированы на (рис. 5.13).

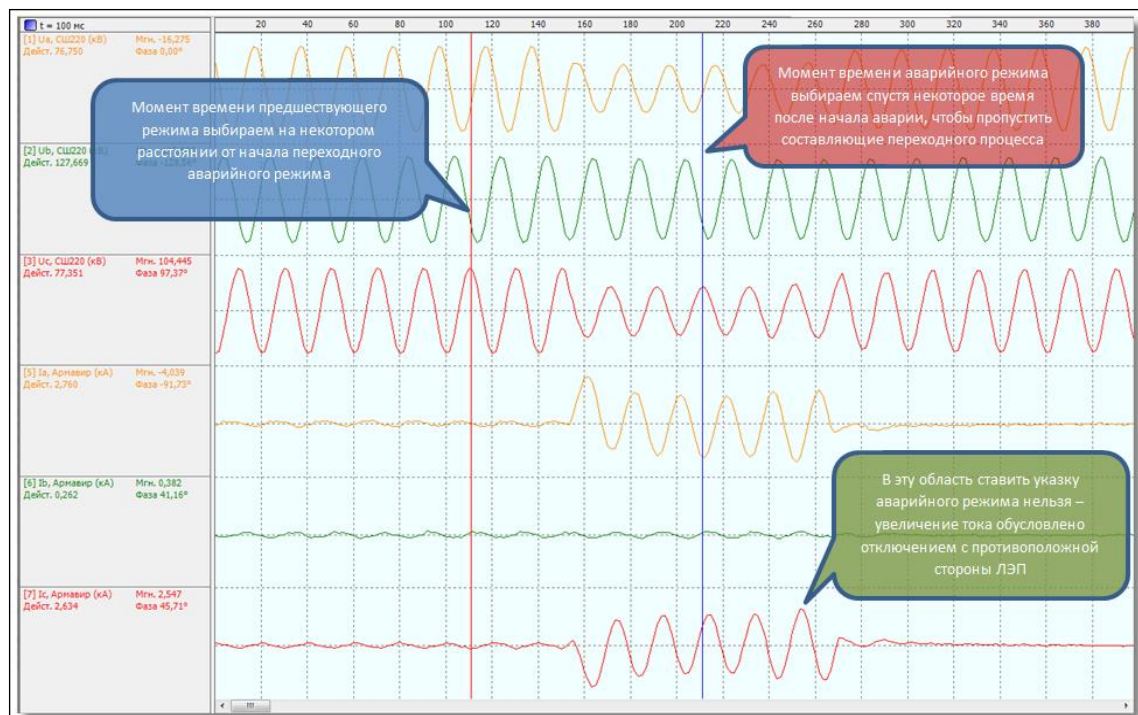


Рис. 5.13 Особенности выбора моментов времени  
Предшествующего и аварийного режимов

Как показано на (рис. 5.13), при выборе момента времени аварийного режима, необходимо избегать временного интервала, когда линия отключается с противоположной стороны ВЛ. В этом интервале происходит наложение двух режимов: аварийного и режима отключения ВЛ с одной стороны, что приводит к появлению значительной погрешности определения места повреждения.

Если моменты времени предшествующего и аварийного режимов остаются незадаанными пользователем, WinBres в ходе расчета определит их

автоматически, используя те же алгоритмы, что и в диспетчерском варианте расчета.

### Запуск расчета ОМП

Для запуска процедуры расчета ОМП, необходимо нажать кнопку «ОМП», расположенную в правом верхнем углу панели параметров расчета. Если окно «ОМП» находится в развернутом состоянии, для запуска процедуры ОМП также можно воспользоваться средствами, описанными в разделе «Способы открытия окна «ОМП»» (см. выше). После окончания расчета на экране появится форма «Результаты расчета ОМП».

### Отображение результата расчета ОМП на схеме ВЛ

В случае определения места повреждения на выбранной для расчета ВЛ, найденное место повреждения отображается на структурной схеме ВЛ при помощи мерцающей стрелки красного цвета (рис. 5.14):

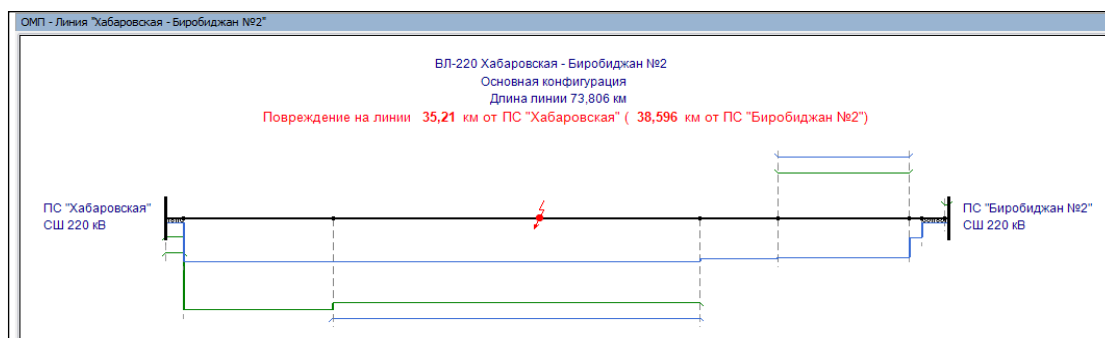


Рис. 5.14 Отображение найденного места повреждения на структурной схеме ВЛ

### Многостороннее ОМП

ВЛ с многосторонним питанием, имитационная модель которых состоит из нескольких файлов, до начала расчета отображаются в виде укрупненной структурной схемы, где каждому отрезку соответствует свой файл модели линии (рис. 5.15):



Рис. 5.15 Изображение структурной схемы многосторонней ВЛ

Для перехода к просмотру подробной схемы какого-либо из участков, необходимо кликнуть дважды левой клавишей мыши по его отрезку на укрупненной схеме (рис. 5.16):



Рис. 5.16 Изображение подробной структурной схемы участка ВЛ

Для возврата к структурной схеме всей линии необходимо нажать на кнопку, расположенной в правом нижнем углу структурной схемы.

Расчет ОМП на линиях с многосторонним питанием проходит после выбора осциллограммы с каждой из сторон ВЛ (рис. 5.17) или занесения значений сигналов вручную и нажатия кнопки расчет.

Линия: ВЛ-500 Балашовская - Липецкая Западная с отпайкой на Нововоронеж... ... **ОМП**

Повреждение: Автоматический выбор

	Балашовская	Нововоронежская АЭС	Липецкая
Подстанция	Бреслер (Балашовская)	Парма (Нововоронежска...)	Бреслер (Липецкая)
Терминал	Основная конфигурация	Основная конфигурация	Основная конфигурация
Модель режима	г008_627.brs	V2L7V9E0.DO	R004_856.BRS
Осциллограмма	значение не задано	значение не задано	значение не задано
Предшествующий режим, мс	значение не задано	значение не задано	значение не задано
Аварийный режим, мс	редактировать	редактировать	редактировать

Рис. 5.17 Выбор осциллограмм для расчета ОМП на линии с многосторонним питанием

После определения места повреждения, участок ВЛ, на котором было обнаружено короткое замыкание, будет выделен красным цветом (рис. 5.18):



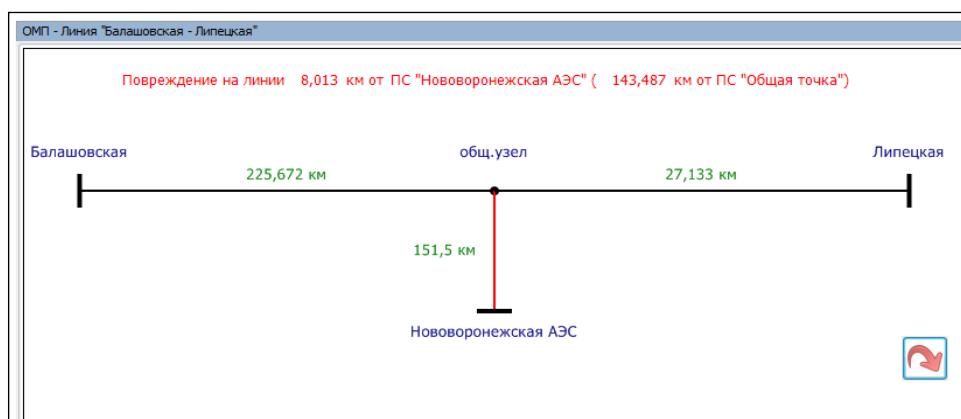


Рис. 5.18 Отображение поврежденного участка на укрупненной схеме многосторонней ВЛ

Для перехода к просмотру подробной схемы поврежденного участка с точным указанием места повреждения необходимо кликнуть дважды левой клавишей мыши по его отрезку на укрупненной схеме, либо нажать на кнопку, расположенную в правом нижнем углу структурной схемы (рис. 5.19):

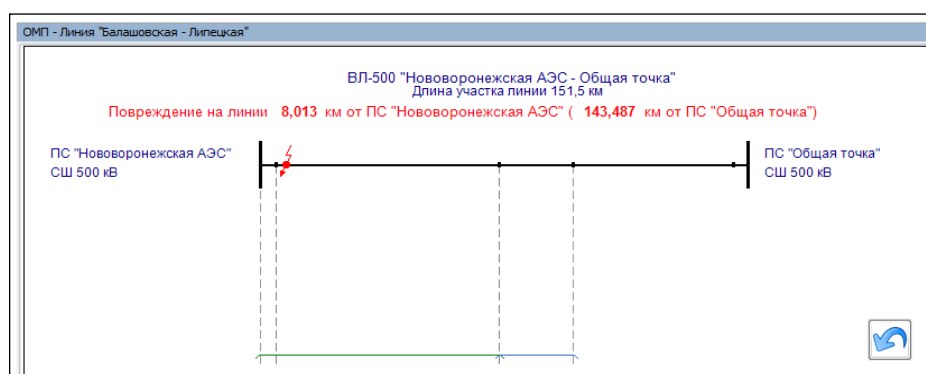


Рис. 5.19 Подробное отображение поврежденного участка ВЛ с указанием места КЗ

### Волновой метод ОМП

Волновой метод ОМП основан на измерении интервалов времени между моментами, в которые электромагнитные волны, возникающие в месте повреждения и движущиеся к концам ВЛ, достигают концов ВЛ.

Волны достигают шин подстанции слева и справа, соответственно, в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 5.20). Моменты времени синхронизируются приёмниками ГЛОНАСС. По известной скорости распространения электромагнитной волны, длине линии и измеренной величине  $\Delta t = t_1 - t_2$  определяется расстояние до места повреждения.

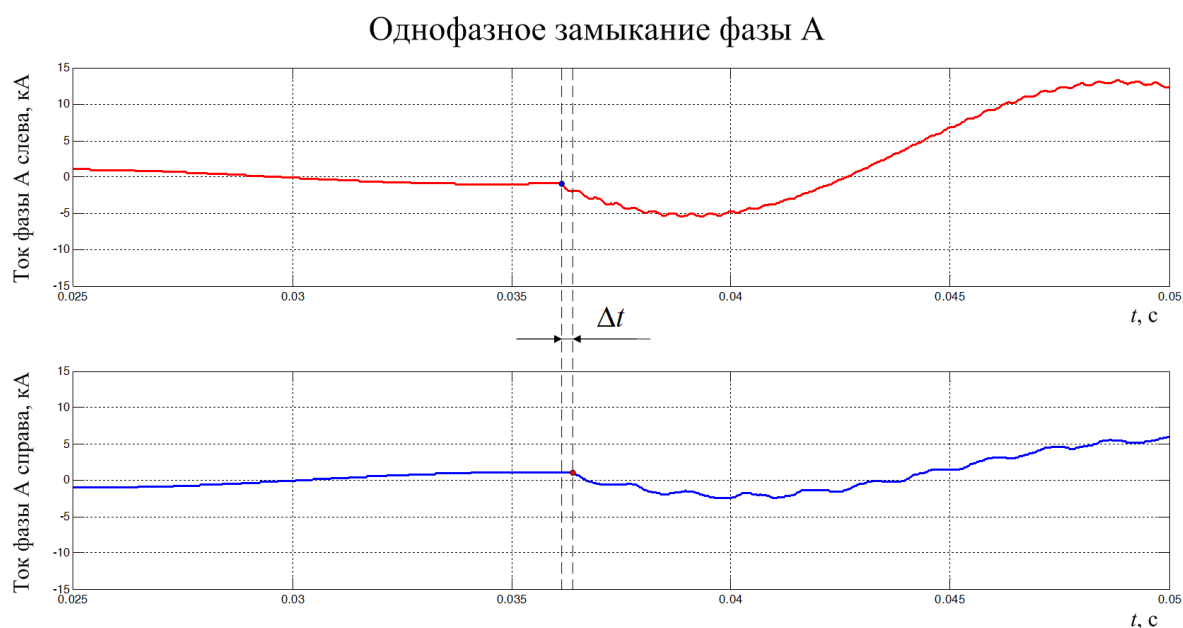


Рис. 5.20 Токи короткого замыкания по концам ВЛ

Устройства, например, «Бреслер-0107.090», синхронизированные посредством глобального времени, следят за электрическими величинами по концам ВЛ (рис. 5.21). Пусковые органы в момент возникновения повреждения выделяют отрезок высокочастотного сигнала, включающий участки, как нормального режима, так и режима повреждения. Далее происходит обработка ВЧ-сигнала и нахождение меток времени  $t_1$  и  $t_2$ , которыми полукомплекты обмениваются. Каждый из них определяет величину  $\Delta t$  и расстояние до места повреждения.

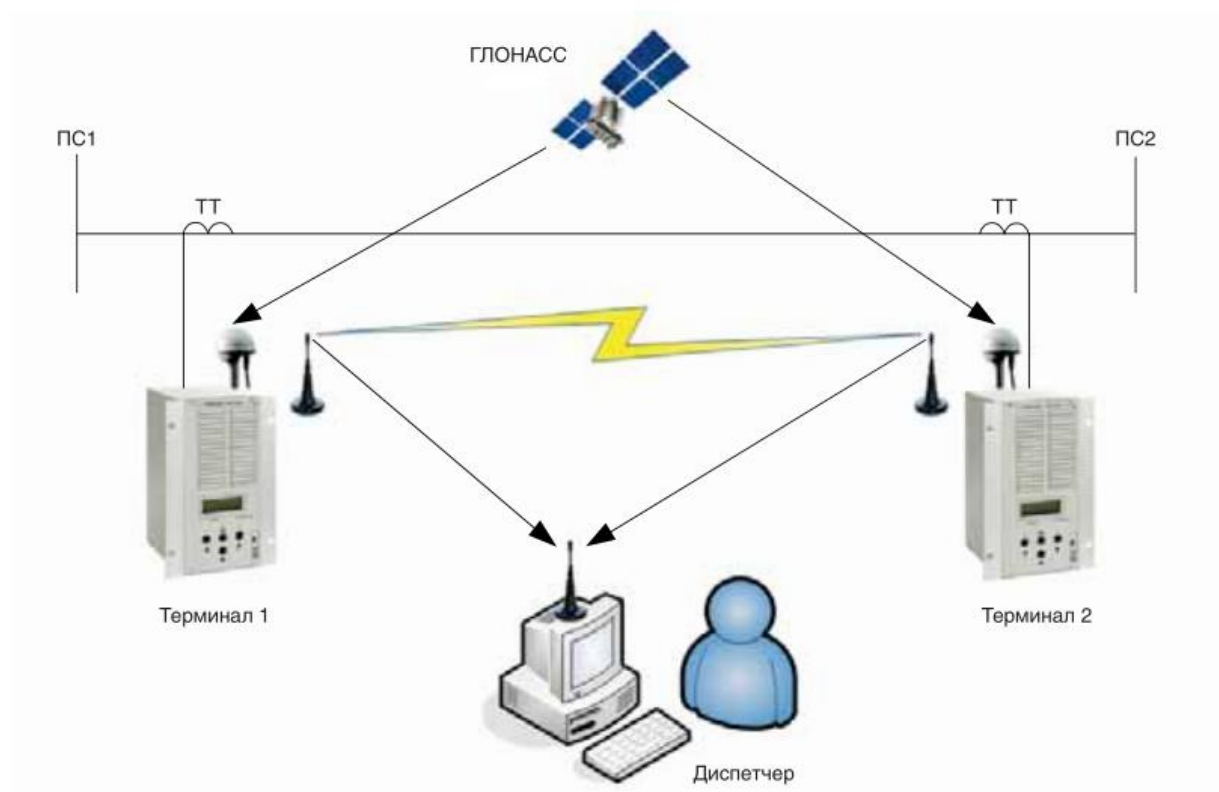


Рис. 5.21 Структурная схема организации волнового ОМП

На основе аварийных осциллограмм, записанных, например, устройствами «Бреслер-0107.090», возможен расчет ОМП волновым методом в программном комплексе WinBres. Разница времени прохождения волны между подстанциями вычисляется в автоматическом и ручном режиме. В результате ОМП отображается форма расчета, изображенная на рис. 5.22.

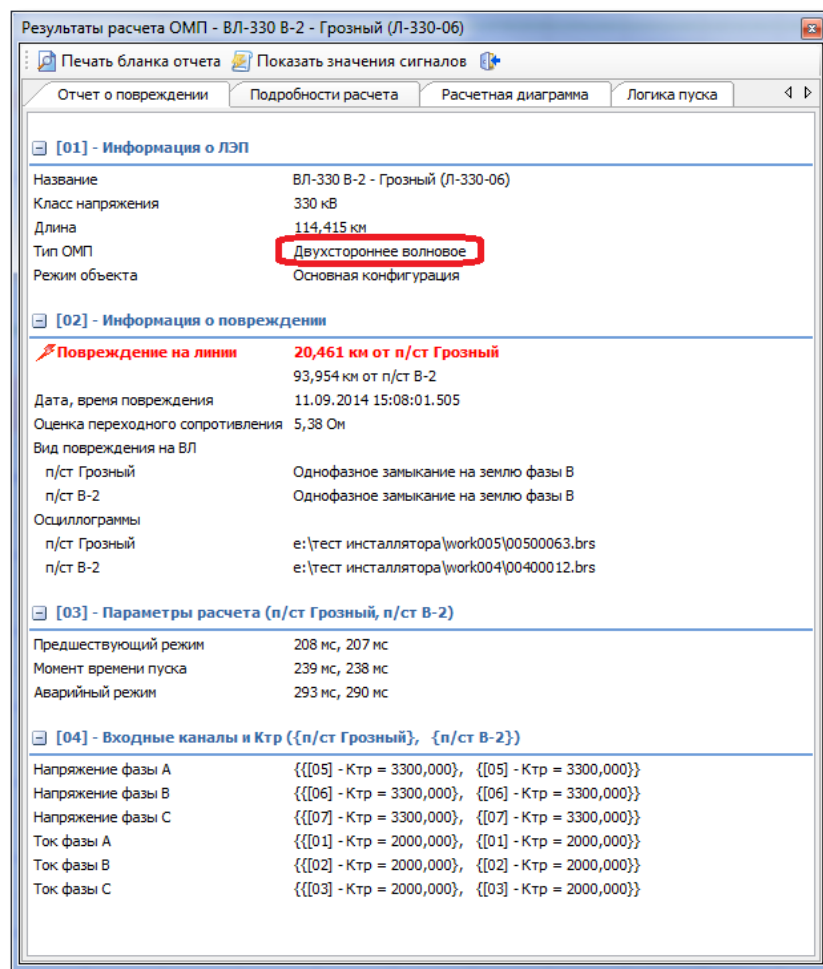


Рис. 5.22 Структурная схема организации волнового ОМП

## 4.2. Модуль определения места повреждения ВЛ программы АРМ - СРЗА

Данная программа позволяет определять место повреждения на линиях без отпаек и на линиях с отпайками по показаниям тока и напряжения нулевой и обратной последовательностей.

Всего мест установки приборов ОМП может быть одно, два или три.

Порядок расчета:

- выбрать сеть и изображение к ней;
- выбрать линию, на которой необходимо найти повреждение;
- ввести показания;
- настроить предшествующий режим (коммутации);
- сделать расчет.

### Выбор сети и изображения

Главное меню: «Настройки» – «Выбор сети»;

Главное меню: «Настройки» – «Выбор изображения».

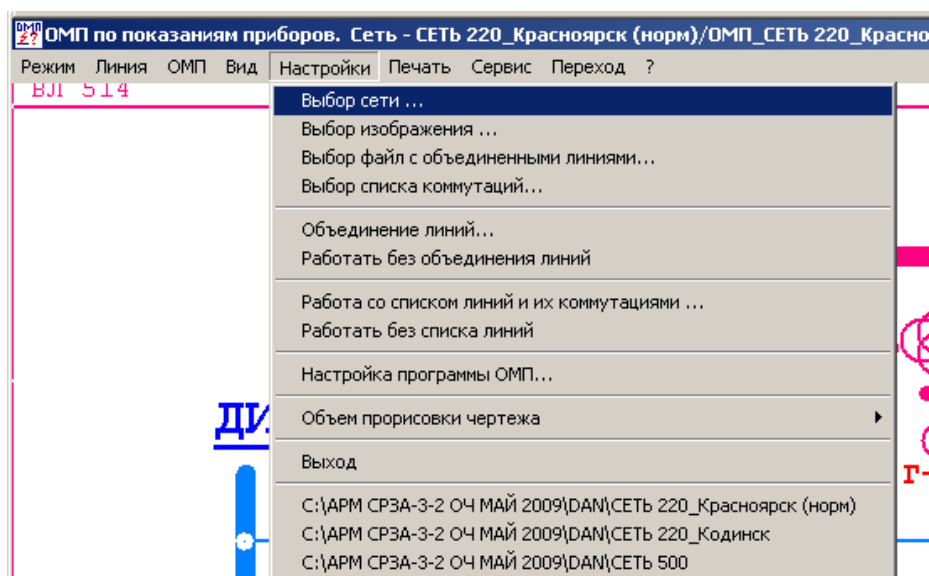


Рис. 5.18 Окно выбора сети

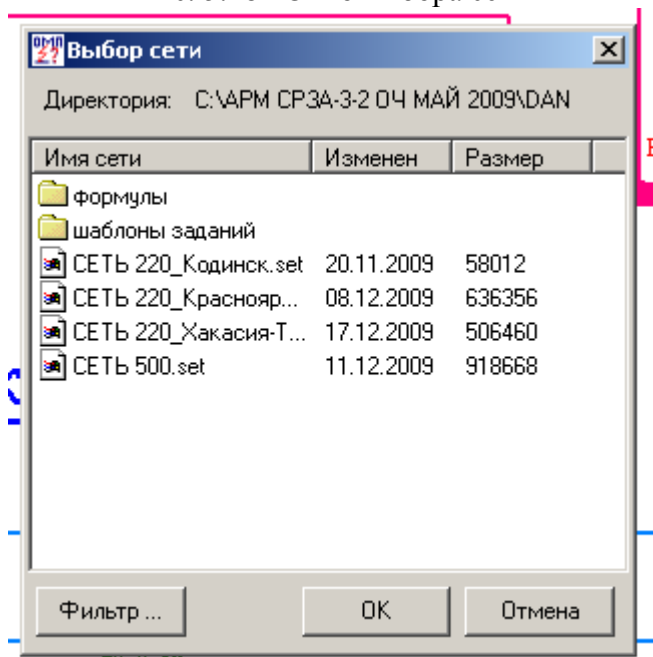


Рис. 5.19 Окно выбора сети

Выбрать сеть в зависимости от ВЛ, на которой необходимо произвести расчет:

ВЛ 220 кВ Д-141, Д-142 (сеть 220 Кодинск)

ВЛ 220 кВ КПМЭС (кроме Д-141, Д-142)

ВЛ 220 кВ ХПМЭС

ВЛ 500 кВ

Выбор изображения:

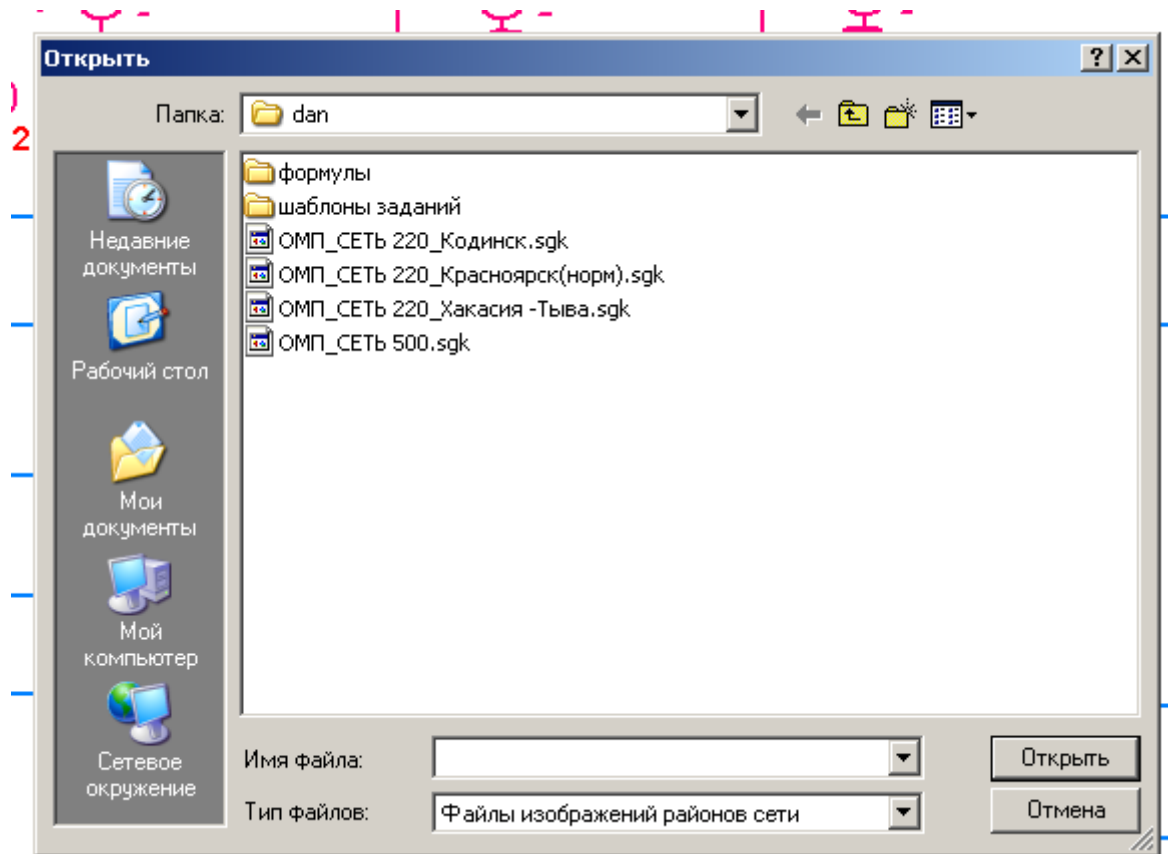


Рис. 5.20 Окно выбора изображения

Выбранное изображение должно соответствовать выбранной сети.

### Выбор ВЛ

Выбор линии осуществляется двумя способами. Первый – найти и выбрать линию на чертеже (рис. 5.21)

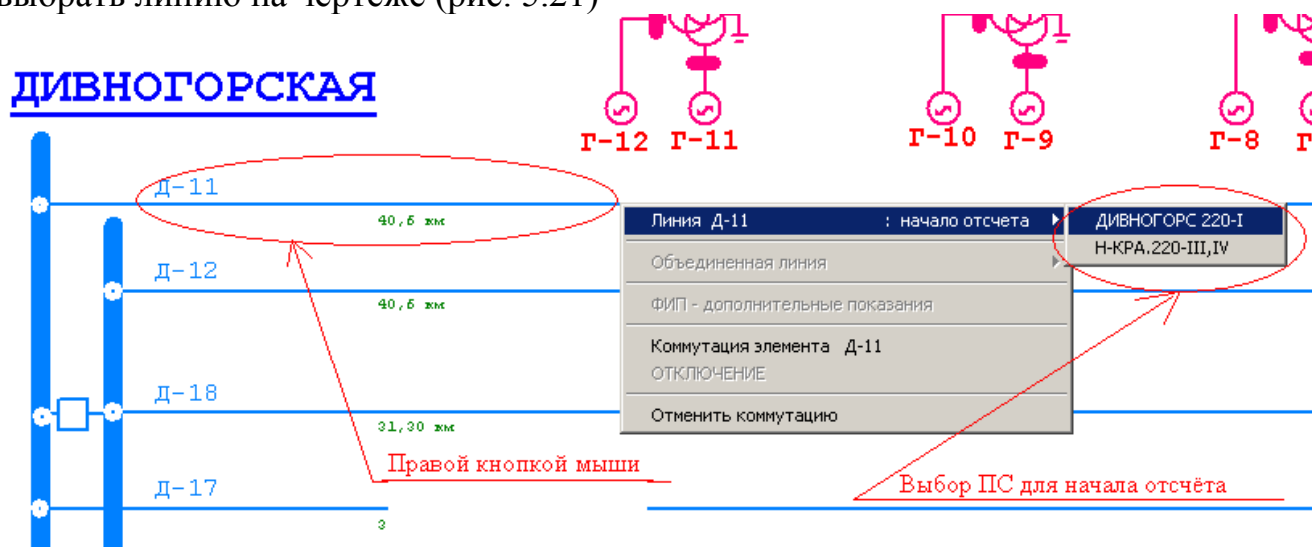
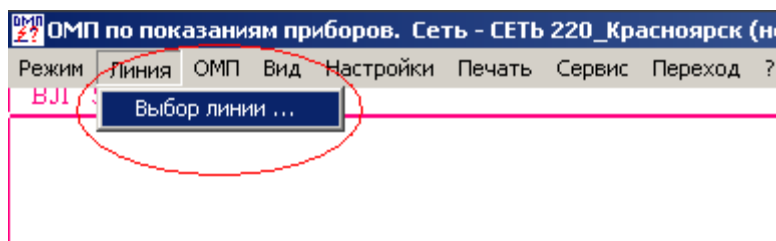


Рис. 5.21 Первый способ выбора ВЛ

Второй – выбрать линию (рис. 5.22)



и подстанцию начала отсчета в таблице через пункт меню – выбор линии

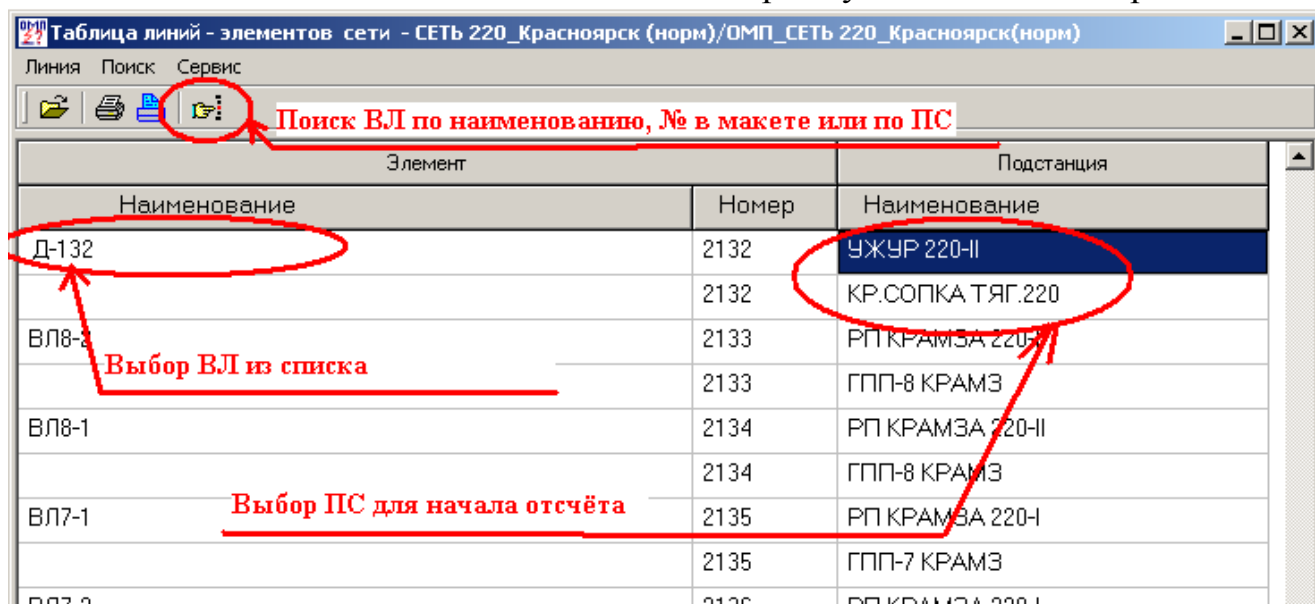


Рис. 5.22 Второй способ выбора ВЛ

### Ввод показаний приборов ОМП ( $3I_0$ , $3U_0$ , $I_2$ , $U_2$ ).

После выбора линии откроется окно, в котором будет схематично нарисована линия и указаны места ввода показаний (рис. 5.23).

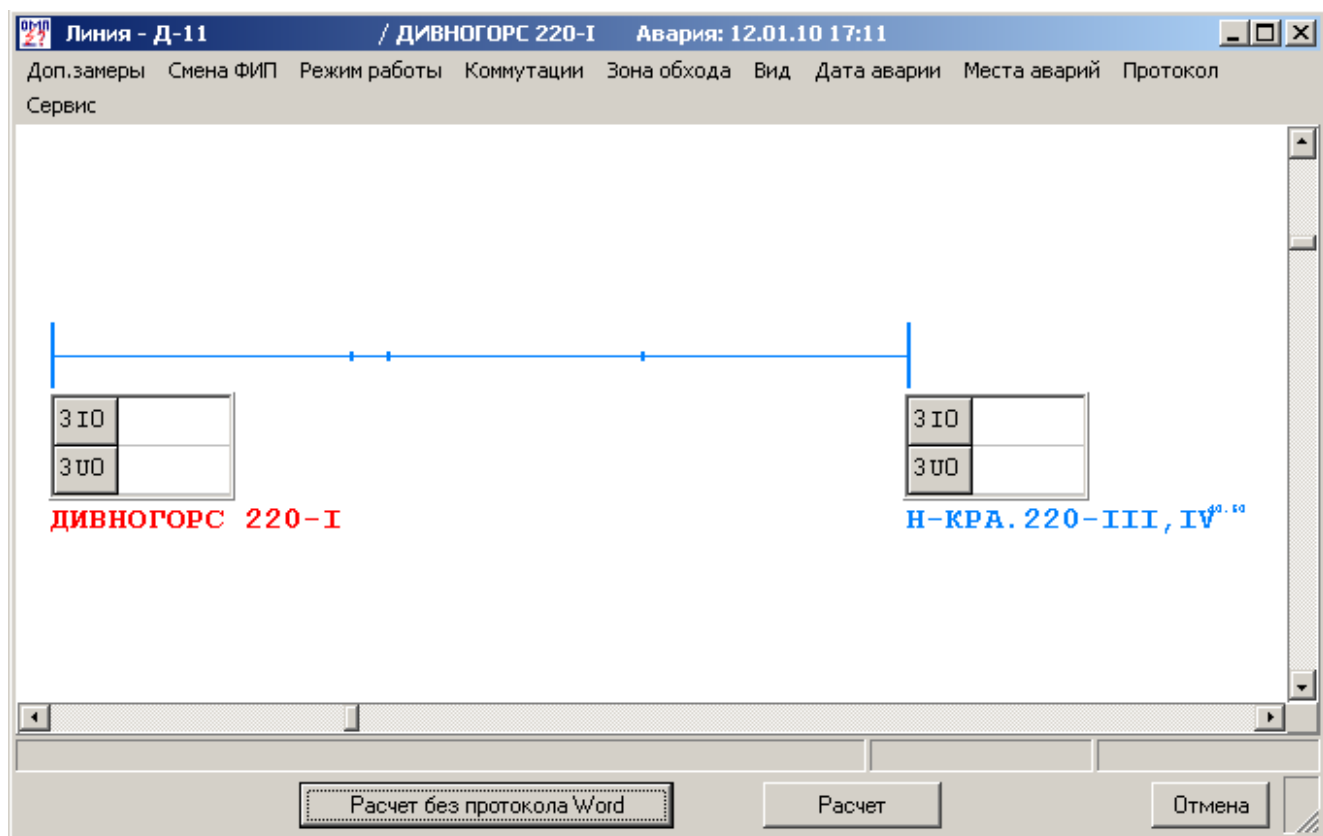


Рис. 5.23 Окно ввода показаний приборов ОМП

В этом окне необходимо задать значения  $3I_0$ ,  $3U_0$ , взятые с показаний приборов ОМП или с осциллограмм с обеих ПС для двустороннего расчёта или с одной из ПС для одностороннего расчёта.

При необходимости расчёта ОМП по токам обратной последовательности (к примеру междуфазное КЗ без замыкания на землю), в программе предусмотрена возможность замены токов и напряжений нулевой последовательности на токи и напряжения обратной последовательности (рис. 5.24).



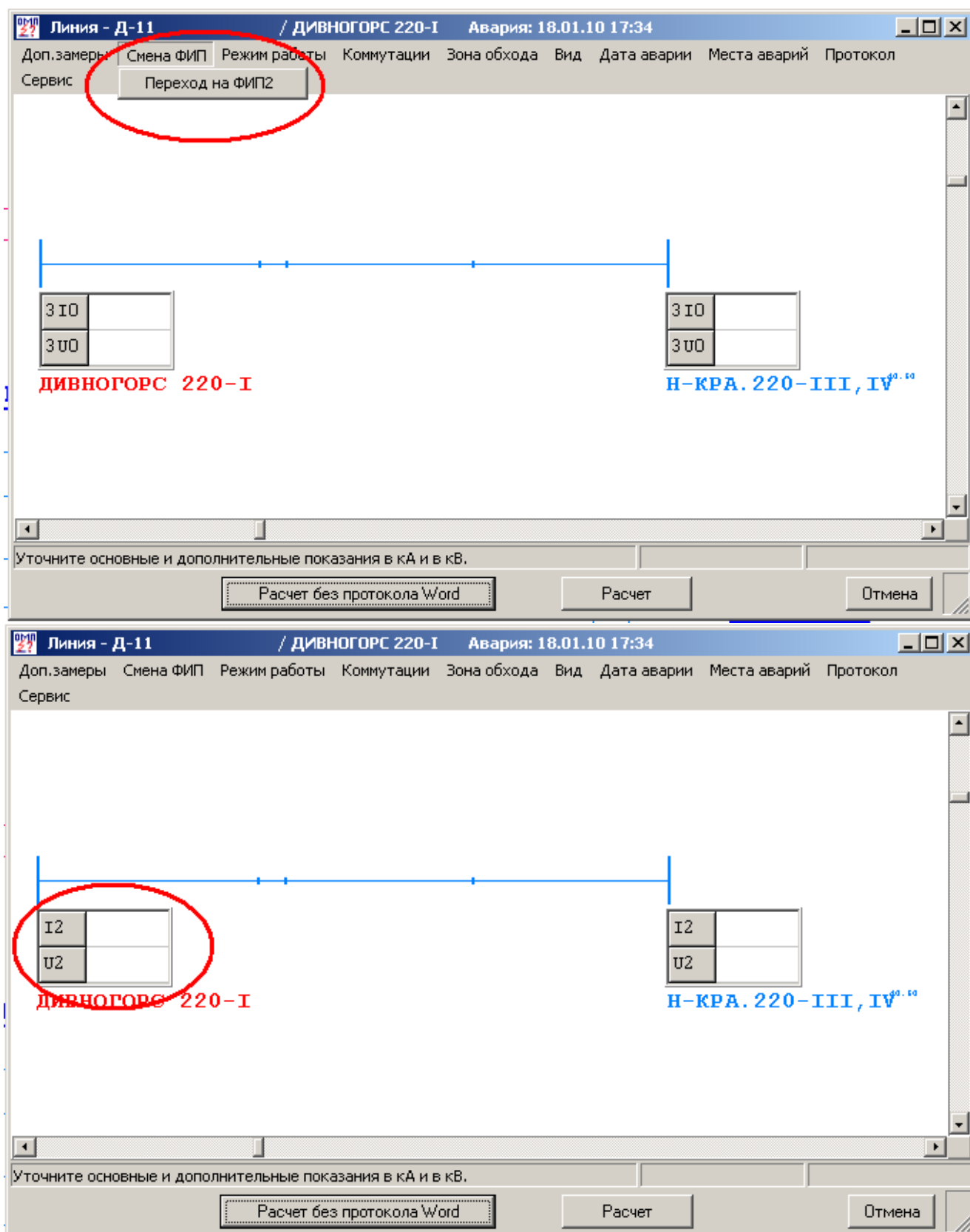


Рис. 5.24 Окно ввода показаний приборов ОМП при расчете по обратной последовательности

В этом окне необходимо задать значения  $I_2$ ,  $U_2$ , взятые с показаний приборов ОМП или с осциллограмм с обеих ПС для двустороннего расчёта или с одной из ПС для одностороннего расчёта.

### Настройка предшествующего режима (коммутации)

Выполнить отмену всех ранее созданных коммутаций, так как программа запоминает все ранее сделанные коммутации, при запуске программы для нового расчёта ОМП (рис. 5.25).

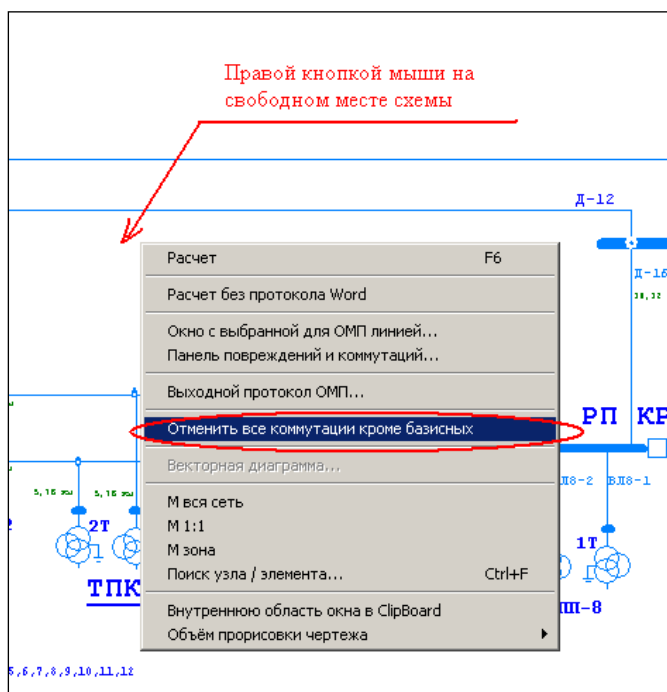
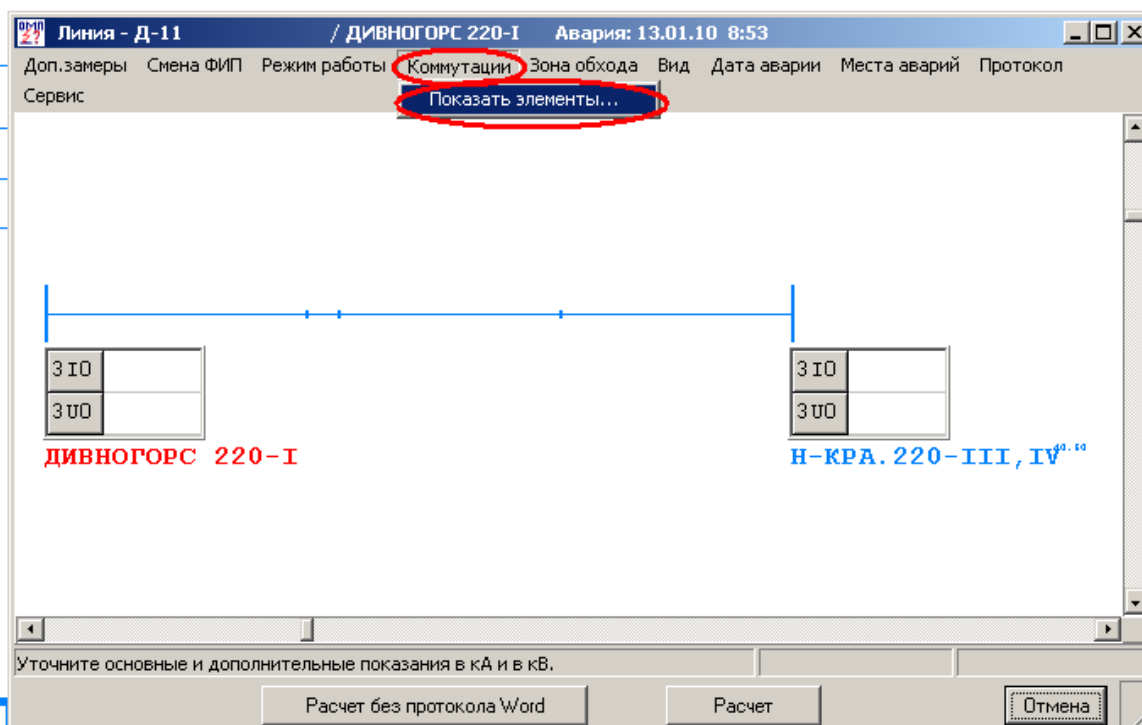


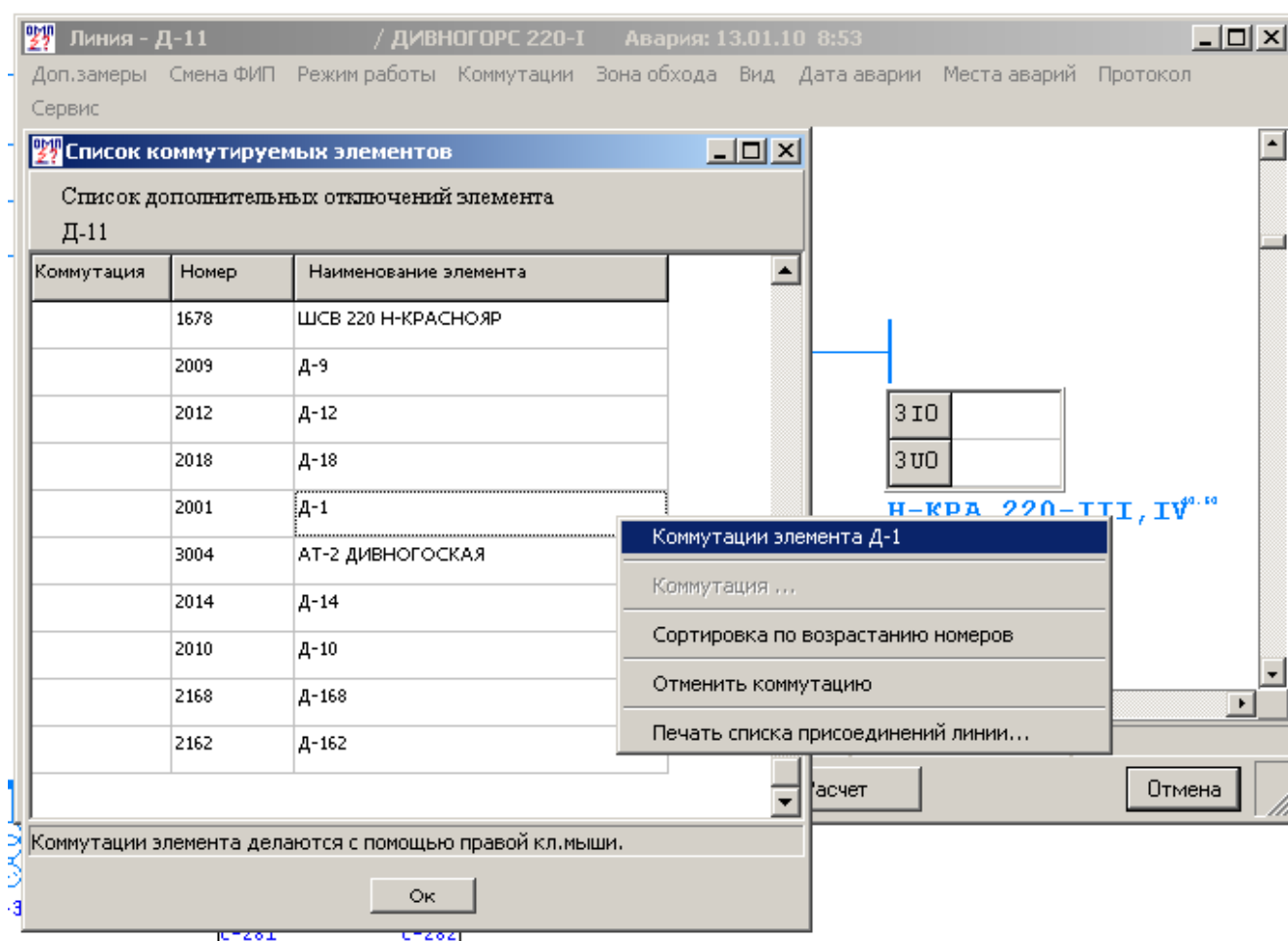
Рис. 5.25 Окно отмены коммутаций

### Работа со списком коммутаций

Для каждой ВЛ автоматически заложен список элементов по концам ВЛ, коммутационное положение которых может повлиять на результаты расчёта ОМП:



Список объектов для коммутации, влияющих на расчёт ОМП для ВЛ Д - 11 (рис. 5.26):



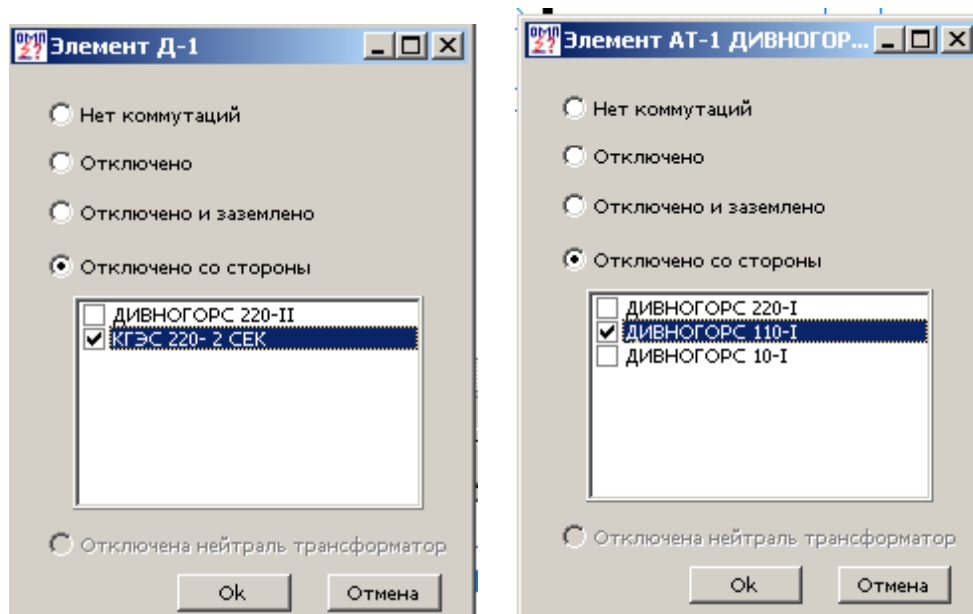
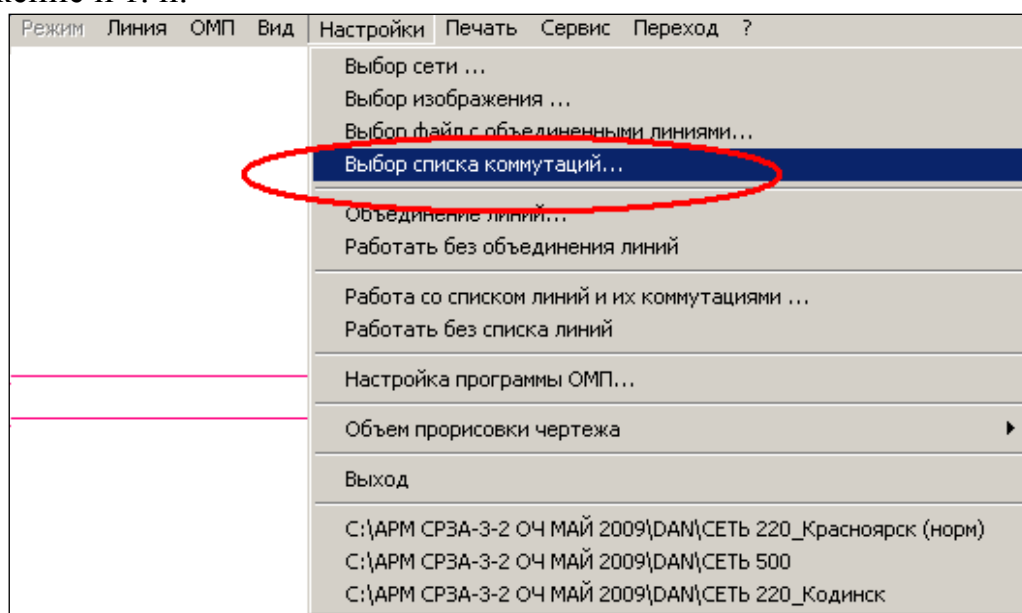
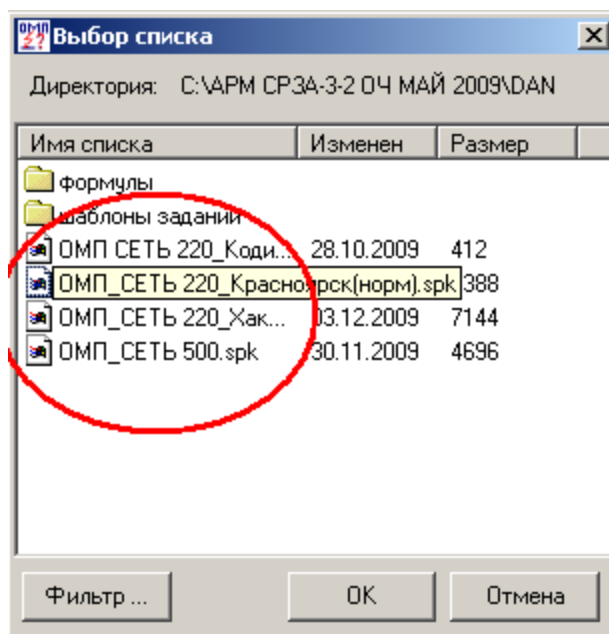


Рис. 5.26 Окно списка коммутируемых объектов

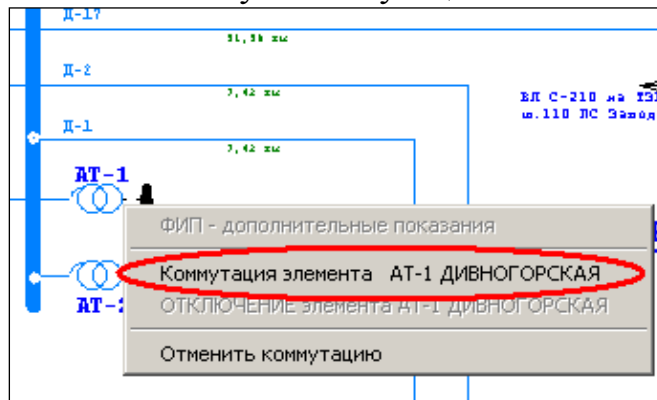
Для правильного расчёта важно правильно указать коммутационное состояние влияющих элементов – наличие заземлений на ВЛ, отключенное положение и т. п.





Выбрать список коммутаций соответствующий сети.

Также есть возможность коммутировать элементами со схемы. Все эти коммутации делаются через объектное меню элемента «Коммутация элемента ...». С помощью объектного меню ветви можно отключить одиночную ветвь, включить отключенный шиносоединительный выключатель, отключить нейтраль трансформатора. С помощью объектного меню ветви можно отменить любую коммутацию.



## Выполнение расчёта

Расчет ОМП выполняется при помощи клавиши «Расчет» (рис. 5.27)

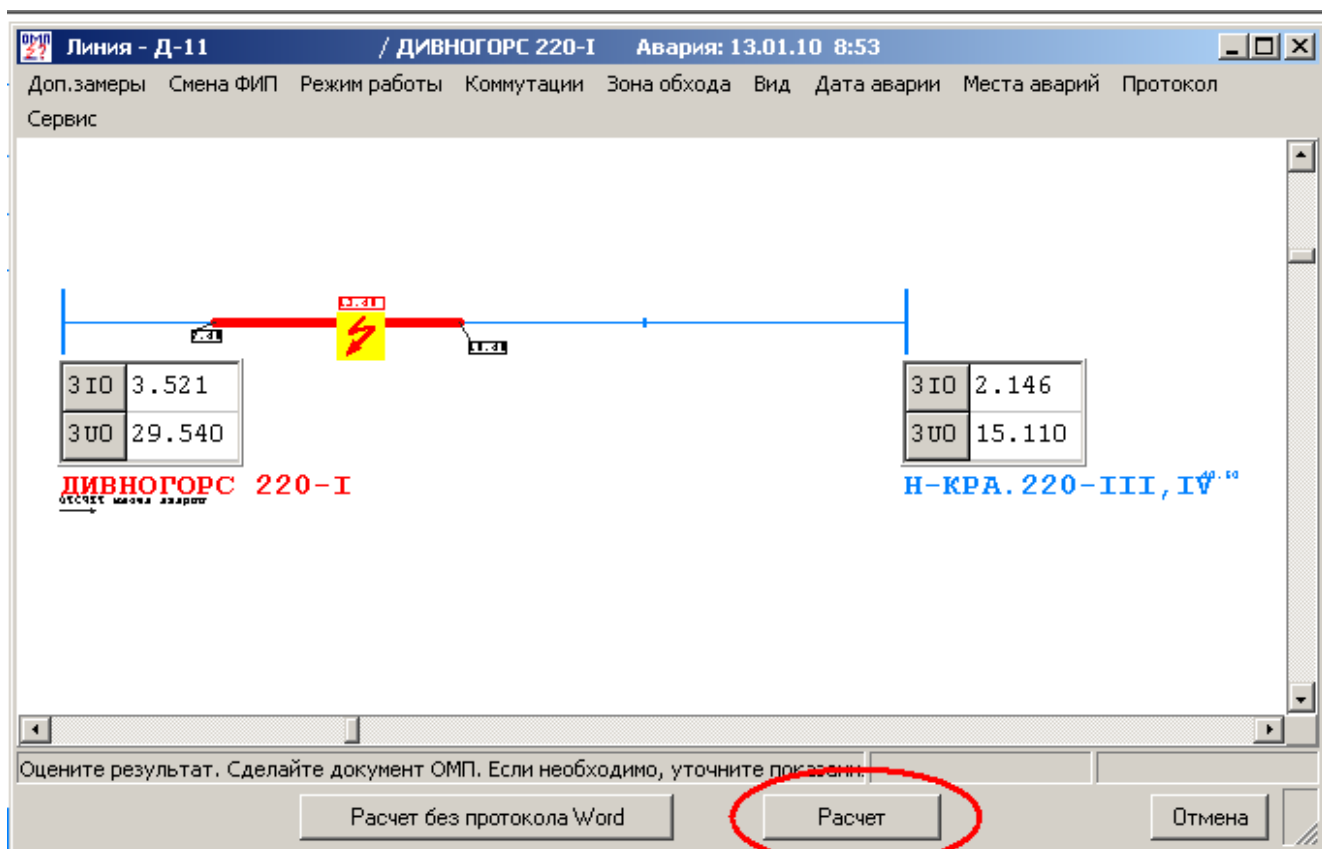


Рис. 5.27

Результат будет выведен графически с указанием возможных видов КЗ (конкретный вид КЗ определяется на основе анализа осциллограмм или работы ФИП) (рис. 5.28).

Места повреждений				
КМ	УЧАСТОК ПОВРЕЖДЕНИЯ	ВИД КЗ	Рпер (Ом)	ДИВНОГОРС 220-I Н-КРА. 220-III, IV
13.49	ДИВНОГОРС 220-I - Н-КРА. 220-III	1 фазное	22.92	I U I U
		2 ф на зе	10.96	

Рис. 5.28 Окно расчета мест повреждений

и в протоколе расчёта ОМП, выведенном в отдельный файл формата MS Word.

В процессе расчета будет оценена достоверность показаний, найдено одно, два или более мест повреждений, при необходимости подобрано переходное сопротивление для каждого вида короткого замыкания (одно, двухфазное или двухфазное на землю). Все недостоверные показания или показания, не подтвердившие найденное место повреждения, будут выделены красным цветом (рис. 5.29).

В найденных возможных местах повреждения будут сделаны все виды коротких замыканий и выданы все электрические величины.

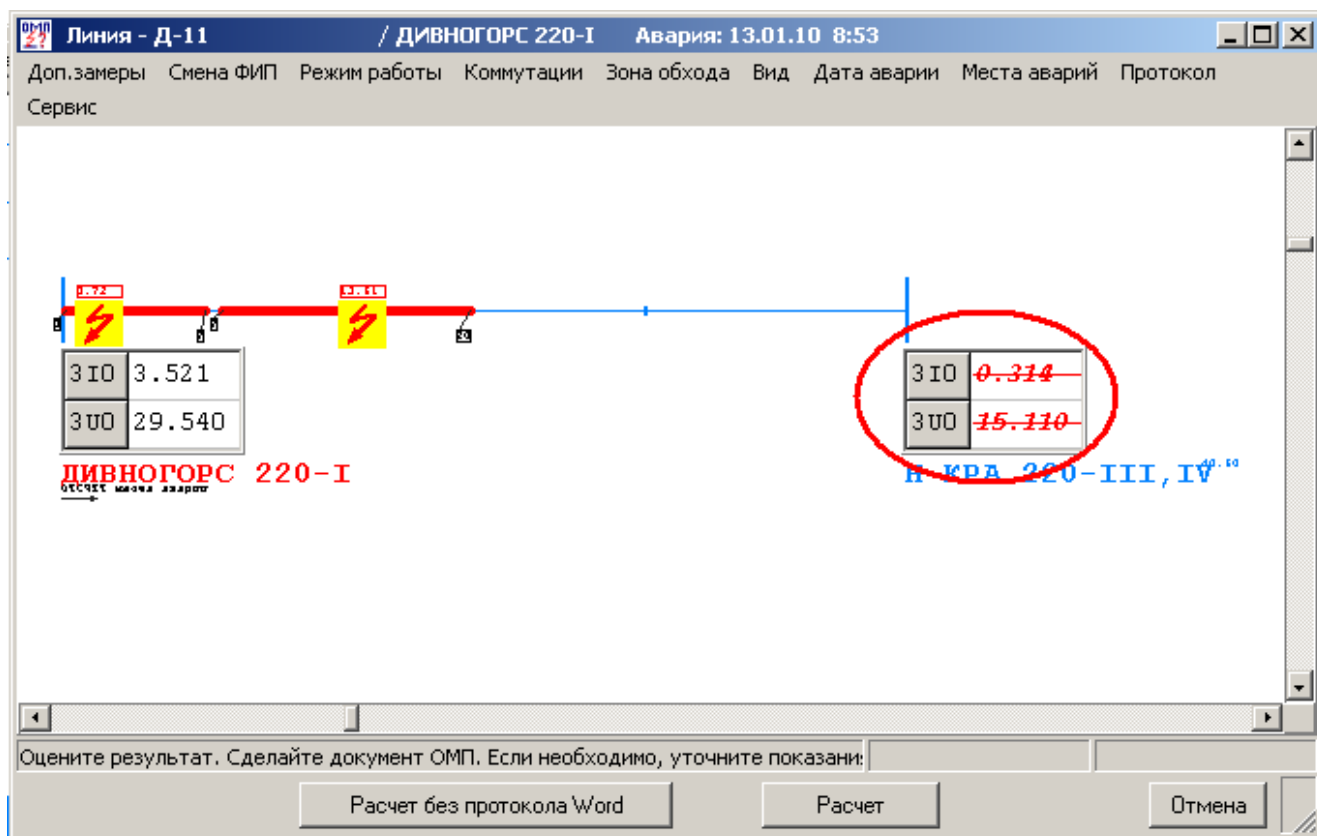


Рис. 5.29 Отбраковка показаний приборов ОМП

## 5 Оценка погрешности определения мест повреждения ВЛ из-за неучета влияющих факторов

В ряде случаев расчет расстояния до мест КЗ может выполняться без учета отдельных влияющих факторов, что значительно упрощает ОМП и позволяет использовать простейшие вычислительные средства. К таким влияющим факторам относятся: частичная взаимоиндукция электромагнитосвязанных линий, токи ответвительных подстанций, неточность задания сопротивления силовых трансформаторов тупиковых подстанций, неоднородность ВЛ. Однако пренебрежение влияющими факторами приводит к погрешности расчета расстояния, которая иногда может достигать недопустимых значений. Можно считать практически недопустимой погрешность, если при неучете отдельного влияющего фактора она не превышает 2%. В отдельных случаях это значение может быть принято другим с учетом особенностей работы каждой ВЛ и ее протяженности. Ниже приводятся расчетные формулы для оценки рассматриваемых погрешностей [20, 21].

### 5.1. Неучет частичной взаимоиндукции

Для линии  $W_I$ , имеющей частичную взаимоиндукцию  $Z_{12}$  с ВЛ  $W_{II}$  (рис. 3.9, а), погрешность ОМП от неучета этой взаимоиндукции при указанном направлении токов следует определять по формуле:

$$\Delta n_I = - \frac{Z_{12}I'_{II}}{Z_{II}(I'_I + I'_{II})} \quad (6.1)$$

Аналогично следует определять погрешность и для линии  $W_{II}$ .

Применительно к пяти электромагнитосвязанным ВЛ выражение (6.1) преобразовывается:

$$\Delta n_1 = - \frac{Z_{12}I'_{II} + Z_{13}I'_{III} + Z_{14}I'_{IV} + Z_{15}I'_{V}}{Z_{II}(I'_I + I'_{II})} \quad (6.2)$$

При неучете взаимоиндукции с одной из электромагнитосвязанных линий формула (4.1) приобретает вид:

$$\Delta n_j = - \frac{Z_{1i}I'_i}{Z_{II}(I'_I + I'_{II})} \quad (6.3)$$

где  $Z_{1i}$  - полное сопротивление взаимоиндукции между линией  $W_i$  и линией  $W_I$  ( $i = II, III, IV, V$ ).

Аналогично следует определять погрешность при повреждении остальных электромагнитосвязанных ВЛ.

Из выражения (6.2) видно, что погрешность ОМП зависит от длины участков сближения ВЛ, модуля и знака токов во всех неповрежденных линиях, электромагнитосвязанных с поврежденной. Эти параметры аварийного режима зависят от места короткого замыкания поврежденной линии. Следовательно, погрешность от пренебрежения взаимоиндукцией может принимать как положительное, так и отрицательное значение, а иногда равняться нулю.

В реальной схеме электромагнитосвязанных линий должен выполняться расчет токов КЗ для граничных точек ВЛ в отдельных режимах работы линий и примыкающих сетей. Такими точками являются концы поврежденной ВЛ, начало и конец ее участка сближения. На базе этих расчетов определяется максимальная погрешность. При этом оценку погрешности следует производить как для случая пренебрежения электромагнитным влиянием всех линий, так и отдельных ВЛ. В последнем случае появляется возможность исключения дополнительных измерений. Если расчетная максимальная погрешность не превышает заранее заданного значения (например, 2%), ею можно пренебречь.

Оценку возможности пренебрежения всеми (четырьмя) или частью электромагнитосвязанных ВЛ при повреждении, например, линии  $W_I$  следует производить в следующей последовательности.

Определяется погрешность расчета расстояния до мест КЗ во всех граничных точках поврежденной ВЛ при пренебрежении всеми электромагнитосвязанными линиями на основе выражения (6.2).

Из полученных значений погрешности находится максимальное значение; если оно не превышает 2 % длины поврежденной ВЛ, расчет на этом



заканчивается. (Такой погрешностью можно пренебречь, что позволяет определять место повреждения без учета электромагнитного влияния всех неповрежденных ВЛ).

Если по данным расчета максимальная погрешность превышает 2 %, то по формуле (6.2) вычисляется погрешность при КЗ в граничных точках поврежденной ВЛ из-за пренебрежения током каждой линии, электромагнитосвязанной с поврежденной, и определяются их максимальные значения погрешности.

На основе данных расчета производится распределение максимальных значений погрешности в порядке их убывания по модулю для обоих знаков (положительного и отрицательного).

Из полученных максимальных значений погрешности определяется их наибольшее значение, и если оно менее 2 %, влиянием соответствующей линии можно пренебречь.

Если погрешность превышает 2 %, то берется следующее по модулю значение максимальной погрешности, которое не должно превышать 2 %, и в расчете расстояния до мест повреждения влиянием соответствующей линии можно пренебречь.

Если наибольшее значение максимальных погрешностей намного меньше 2 %, то определяется сумма максимальных значений погрешности одного знака отдельных линий, которая не должна превышать 2 %. В этом случае, можно пренебречь электромагнитным влиянием линий, погрешности которых являются слагаемыми этой суммарной погрешности. Расчет погрешности на этом заканчивается.

Аналогично следует определять погрешность ОМП для других электромагнитосвязанных линий.

## 5.2. Неучет токов ответвительных подстанций

Рассматриваются погрешности ОМП при использовании параметров нулевой и обратной последовательностей на основе двусторонних измерений (активным сопротивлением можно пренебречь).

Параметры нулевой последовательности. Для наиболее распространенного случая одноцепной ВЛ с заземленным ответвлением (рис. 3.9, б) погрешность ОМП на участке длиной  $L_1$ , из-за пренебрежения током ответвления будет отрицательной и должна определяться [8] по формуле:

$$\Delta n_1 = - \frac{n^2 - \left(m_1 - \frac{x'_c}{x_l}\right)n - m_1 \frac{x'_c}{x_l}}{n + m + q_1}, \quad (6.4)$$

где

$$q_1 = \frac{\frac{x'_c + x_l + x''_c}{x_l}}{\frac{x''_c}{x_l} + (1 - m_1)} \frac{x^6}{x_l}$$

При расчете погрешности для случая повреждения на участке длиной  $L_2$

необходимо использовать формулу (6.4), приняв подстанцию Б за начало отсчета расстояния до мест КЗ. Погрешность имеет положительное значение. Значение максимальной погрешности из-за неучета тока ответвления следует определять по упрощенной формуле

$$\Delta n_{1max} = - \frac{\left(m_1 + \frac{x'_c}{x_{л1}}\right)^2}{2\left(3m_1 - \frac{x'_c}{x_{л1}}\right) + 4q_1} \quad (6.4a)$$

Для одноцепной ВЛ с двумя заземленными ответвлениями рассматривается только погрешность при КЗ на участках длиной  $L_1$  и  $L_2$ , так как характер ее изменения на участке длиной  $L_3$  тот же, что и для участка длиной  $L_1$ . При этом в случае КЗ на участке длиной  $L_1(L_3)$  необходимо схему замещения преобразовать в эквивалентную с одним заземленным ответвлением, а погрешности определять по формулам (6.4) и (6.4a).

При КЗ на участке длиной  $L_2$  (в относительных единицах величина  $n_2$  изменяется от 0 до 1) и пренебрежении током ответвлений погрешность ОМП следует вычислять по формуле

$$\Delta n_2 = \frac{n_2^2 + an_2 + c}{n_2 + \beta}, \quad (6.5)$$

где

$$a = \frac{x'x''(x^6 + x^2)}{x_{л2}(x^2x' + x^6x'')};$$

$$\beta = \frac{x^6x^2(x' + x'') + x_{л2}(x^2 + x'')}{x_{л2}(x^2x' - x^6x'')};$$

$$c = \frac{x^6x'x''}{x_{л2}(x^2x' - x^6x'')}; \quad x' = x'_c + x_{л1}; \quad x'' = x''_c + x_{л3}$$

В отличие от ВЛ с одним ответвлением, погрешность ОМП рассматриваемой ВЛ положительна при КЗ в начале участка и отрицательна в его конце. Максимальное значение погрешности следует определять по формуле (6.5) подстановкой в нее одного из значений  $n_2$ , равных нулю либо единице.

Параметры обратной последовательности. Влияние ответвления на распределение токов КЗ меньше, чем при использовании параметров нулевой последовательности [8]. Это объясняется тем, что сопротивление ответвления обратной последовательности определяется не только сопротивлением силового трансформатора, но и нагрузки. Сопротивление обратной последовательности нагрузки  $X_{n2}$  обычно представляется эквивалентной реактивностью, его значение следует принимать равным 35-45% и относить к полной рабочей мощности нагрузки и тому напряжению, где она подключена.

Расчет погрешности ОМП должен выполняться по тем же формулам, что и при использовании параметров нулевой последовательности. Как показали расчеты [8], погрешность для рассматриваемых параметров в несколько раз меньше.

### 5.3. Неучет изменения сопротивления силовых трансформаторов тупиковых подстанций

Рассматривается ВЛ, где место КЗ определяется по току и напряжению нулевой последовательности на питающей подстанции и только по току на тупиковой подстанции, где установлен силовой трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой. Его сопротивление зависит от положения переключателя ответвления регулирующей обмотки и, как показано в приложении 1, изменяется в широком диапазоне. Неучет этого изменения может приводить к недопустимой погрешности расчета расстояния до мест КЗ [12]. Это также относится и при несоответствии расчетного сопротивления нулевой последовательности трансформатора его действительному значению.

Погрешность расчета следует определять в соответствии с формулой

$$\Delta n_{XT} = \frac{n+\sigma}{1+\sigma+\rho} \rho \Delta X_{TO}, \quad (6.6)$$

$$\text{где } \sigma = \frac{X'_{co}}{X_{ло}}; \quad \rho = \frac{X_{TO}}{X_{ло}}; \quad \Delta X_{TO} = \frac{X_{T1}-X_{TO}}{X_{TO}}$$

Из формулы (4.6) видно, что при данных значениях  $\sigma$  и  $\rho$  погрешность  $\Delta n_{XT}$  минимальна в начале линии и достигает максимального значения при КЗ в конце ВЛ. Максимальная погрешность соответственно равна

$$\Delta n_{XTmax} = \frac{1+\sigma}{1+\sigma+\rho} \rho \Delta X_{TO} \quad (6.7)$$

Для ВЛ, примыкающих со стороны питания к относительно мощной системе ( $X'_{co} \ll X_{ло}$ ), величиной  $\sigma$  можно пренебречь. Тогда формула (6.7) преобразовывается

$$\Delta n_{XTmax} = \frac{1}{1+\rho} \rho \Delta X_{TO}. \quad (6.8)$$

Чем короче ВЛ, тем больше максимальная погрешность. Она также возрастает при увеличении расхождения между действительным и расчетным значениями сопротивления трансформатора.

Исходя из изложенного, в случае недопустимых погрешностей при изменении положения переключателя ответвлений трансформатора должны быть составлены расчетные формулы для ОМП для двух-трех групп положений переключателя. В пределах каждой группы погрешность ОМП не должна превышать допустимого значения.

#### 5.4. Неучет неоднородности ВЛ

В ряде случаев ВЛ состоят из проводов разных марок, подвешенных на опорах различных типов, при этом трасса ВЛ проходит по местности с отличающимися характеристиками грунтов. В результате, линия становится неоднородной, состоящей из отдельных участков со своими удельными сопротивлениями. Если пренебречь такой неоднородностью, то может возникнуть погрешность ОМП. Ниже приводятся формулы, позволяющие оценить количественно эту погрешность; и, если она невелика (2 %), для определения мест КЗ можно использовать расчетные формулы для однородных линий [30]. (Для упрощения анализа активное сопротивление ВЛ не учитывается).

Для одноцепной ВЛ, состоящей из двух неоднородных участков разной длины  $L_1$  и  $L_2$  соответственно удельными индуктивными сопротивлениями  $X_1$  и  $X_2$  (индекс "0" опускается), схема замещения нулевой последовательности и потенциальные диаграммы при КЗ на первом участке показаны на рис.4.1.

Если пренебречь неоднородностью участков ВЛ, то погрешность расчета расстояния до мест КЗ на участке длиной  $L_1$  следует определять по формуле:

$$\Delta n_1 = \left( \frac{x_1}{x} - 1 \right) n, \quad (6.9)$$

где  $x = x_1 m_1 + x_2 m_2$

Максимальное значение погрешности имеет место при КЗ в конце участка и должно определяться по формуле:

$$\Delta n_{1max} = \frac{(x_1 - x_2)m_1 + x_2 n}{x}. \quad (6.10)$$

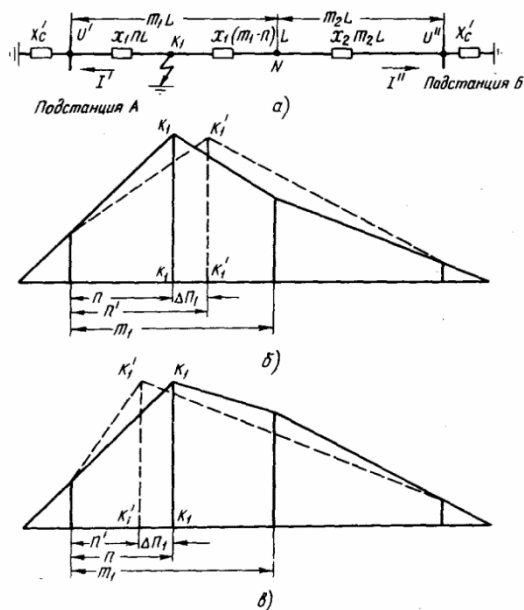


Рис. 6.1 Схема неоднородной ВЛ с двумя участками:  
а - схема замещения нулевой последовательности; б – потенциальная диаграмма при  $X_1 > X_2$ ; в - потенциальная диаграмма при  $X_1 < X_2$ .

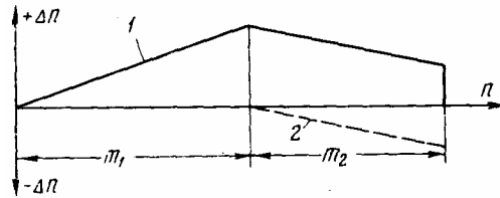


Рис. 6.2 Характеристика  $\Delta n = f(n)$ :  
1 - общая погрешность; 2 - составляющая погрешности от второго участка

При КЗ на втором участке погрешность следует определять по формуле

$$\Delta n_2 = \frac{X_1 - X_2}{X} m_1 + \frac{X_2 - X}{X} n \quad (6.11)$$

При КЗ в конце второго участка ( $n_2 = m_2$ ) можно получить формулу для определения максимального значения этой погрешности.

Как видно из формулы (6.9), погрешность изменяется по линейному закону. Поскольку удельное сопротивление  $X_1$  может быть больше или меньше  $X_2$ , то погрешность расчета расстояния до мест КЗ может принимать положительное и отрицательное значения (рис. 6.1, а и б). Изменение погрешности вдоль ВЛ с двумя неоднородными участками для случая  $X_1 > X_2$  показано на рис. 6.2. Здесь максимальное значение погрешности имеет место в конце первого (начале второго) участка.

Для общего случая ВЛ, состоящей из  $N$  неоднородных участков, формула для расчета погрешности при КЗ на  $N$ -м участке имеет вид:

$$\Delta n_N = \frac{X_1 - X_N}{X} m_1 + \frac{X_2 - X_N}{X} m_2 + \dots + \frac{X_N - X}{X} n \quad (6.12)$$

При оценке максимальной погрешности необходимо рассматривать КЗ в конце каждого участка и выбирать наибольшее из них, которое и определяет допустимость пренебрежения неоднородностью ВЛ. Значение максимальной погрешности на  $N$ -м участке следует определять по формуле

$$\Delta n_{Nmax} = \frac{X_1 - X}{X} m_1 + \frac{X_2 - X}{X} m_2 + \dots + \frac{X_N - X}{X} m_N \quad (6.13)$$

Аналогично следует определять погрешности расчета расстояния до мест КЗ из-за неучета неоднородности ВЛ при использовании параметров обратной последовательности.

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ к разделу 3

**Пример 1.** Для одноцепной ВЛ 110 кВ с одним ответвлением составить расчетные формулы для ОМП методом пассивного многополюсника. данные и параметры элементов электрической схемы (активным сопротивлением пренебрегаем):

$$L_1 = 20 \text{ км}; L_2 = 16 \text{ км}; L = 36 \text{ км}; X = 1,4 \text{ Ом/км}; X_{Л1} = 28 \text{ Ом};$$

$$X_{Л2} = 22,4 \text{ Ом}; S_T = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_k = 12 \text{ \%}; X_T = X^B = 145 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем предварительно постоянные коэффициенты четырехполюсников для случаев КЗ на первом и втором участках в соответствии с формулами (4.1) и (4.2). Результаты расчета приведены в Таблице П1.1.

Таблица П1.1. Результаты расчета коэффициентов четырехполюсников

Постоянные коэффициенты	Короткое замыкание на участке	
	первом	втором
$A'$	1	1
$B'$ Ом	0	28
$C'$ 1/Ом	0	0,007
$D'$	1	1,19
$A''$	1	1
$B''$ Ом	22,4	0
$C''$ 1/Ом	0,007	0
$D''$	1,15	1

Подставив численные значения коэффициентов из Таблицы П1.1 в формулы (4.3), получим расчетную формулу для ОМП в относительных величинах:

$$n_1 = \frac{(28+145)U'' - 145U' + [22,4 \cdot 145 + 28(22,4+145)]I''}{1,4[U'' + 145I' + (22,4+145)I'']20} = \frac{6,2U'' - 5,2U' + 283,4I''}{U'' + 145I' + 167,4I''} \quad (\text{П1.1})$$

$$n_2 = \frac{145(U'' - U') - 28 \cdot 145I' + 22,4 + 145I''}{1,4[U' + (28+145)I' + 145I'']16} = \frac{9,1(U'' - U') - 181,2I' + 145I''}{U' + 173I' + 145I''} \quad (\text{П1.2})$$

С учетом полученных расчетных формул место КЗ определяется на основе соотношения (4.5) путем последовательного расчета по формулам П1.1 и П1.2.

**Пример 2.** Составить методику ОМП методом активного многополюсника

для одноцепной ВЛ 110 кВ с тремя ответвлениями со следующими данными и параметрами схемы без учета активного сопротивления: первый участок ВЛ  $L_1 = 20$  км;  $X_{Л1} = 28$  Ом; второй участок  $L_2 = 16$ ;  $X_{Л2} = 22,4$  Ом; третий участок  $L_3 = 12$  км;  $X_{Л3} = 16,8$  Ом; четвертый участок  $L_4 = 24$  км;  $X_{Л4} = 33,6$  Ом; трансформаторы на подстанциях ответвлений:  $B - S_T = 10$  МВ·А;  $U_k = 12$  %;  $X^B = 145$  Ом;  $\Gamma - S_T = 75$  МВ·А;  $U_k = 17$  %;  $X^\Gamma = 28$  Ом;  $\Delta - S_T = 20$  МВ·А;  $U_k = 17$  %;  $X^\Delta = 103$  Ом.

Для ОМП данный методом предварительно определяются автономные параметры активного четырехполюсника, эквивалентного рассматриваемой ВЛ. Воспользуемся отношением параметров  $e$  (задающими напряжениями), которые могут быть определены по данным измерений на модели ВЛ в соответствии с рис. П2.1. Для этой цели в место КЗ от стабилизированного источника напряжения постоянного тока подается единичное напряжение  $e_k$  неизменного значения (в нашем примере  $e_k = 10$  В) и на разомкнутых зажимах четырехполюсника высокоомным вольтметром измеряются напряжения  $e_1$  и  $e_2$ . Результаты измерений и расчета  $K_e$  приведены в Таблице П2.2.

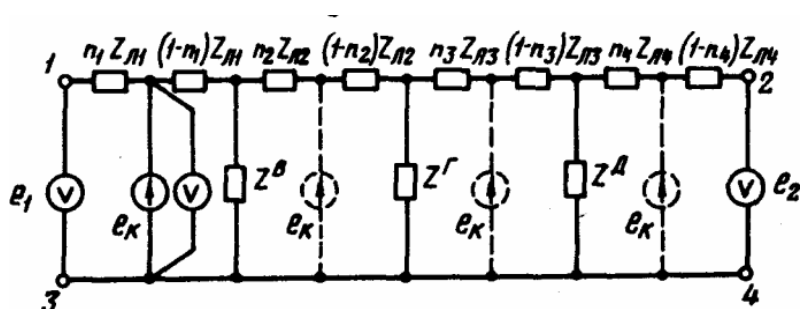


Рис. П2.1 Схема измерений задающих напряжений  $e_1$  и  $e_2$

В соответствии с Таблицей П2.2 строится характеристика (сетчатая монограмма)  $l = f(K_e)$  показанная на рис. П2.2.

Далее определяются коэффициенты активного четырехполюсника, которые соответственно равны:  $A = 4,27$ ;  $B = 258,2$  Ом;  $C = 0,067$  1/Ом;  $D = 4,3$ . Подставив значения коэффициентов в выражение (3.9), получим расчётную формулу для ОМП:

Таблица П2.2. Данные измерений напряжений  $e_1$  и  $e_2$  и расчета коэффициента  $K_e$

$l$ км	$e_1, B$	$e_2, B$	$K_e$
0	10	2,3	4,35
6	10	2,7	3,70
12	10	3,2	3,13
20	10	4,2	2,38
24	9,6	4,8	2,00
30	9,1	6,2	1,47
36	8,6	8,5	1,01
42	6,4	9,1	0,70
48	5,1	10	0,51
54	3,9	10	0,39

60	3,2	10	0,32
66	2,7	10	0,27
72	2,4	10	0,24

$$K_{\theta} = \frac{U' + \frac{4.27}{0.067}I' - \frac{1}{0.067}I''}{U'' - \frac{1}{0.067}I'' + \frac{4.3}{0.067}I''} = \frac{U' + 63.7I' - 14.9I''}{U'' - 14.9I' + 64.2I''} = f(l) \quad (\text{П2.3})$$

Место повреждения определяется следующим образом. Получив данные измерений фиксирующих амперметров и вольтметров с концевых (спорных) подстанций А и Б по формуле П2.3, вычисляем значение  $K_e$ . Затем по характеристике  $l = f(K_e)$  находим соответствующее расстояние от подстанции А до места КЗ. На рис. П2.2 пунктиром показано определение места КЗ по данным измерений фиксирующих приборов:  $U' = 48$  кВ;  $U'' = 70$  В;  $I' = 4,8$  кА;  $I'' = 3,5$  кА. Подставив эти значения в формулу (П2.3), получим:

$$K_e = \frac{48 + 63.7 * 4.8 - 14.9 * 3.5}{70 - 14.9 * 4.8 + 64.2 * 3.5} = 1.35$$

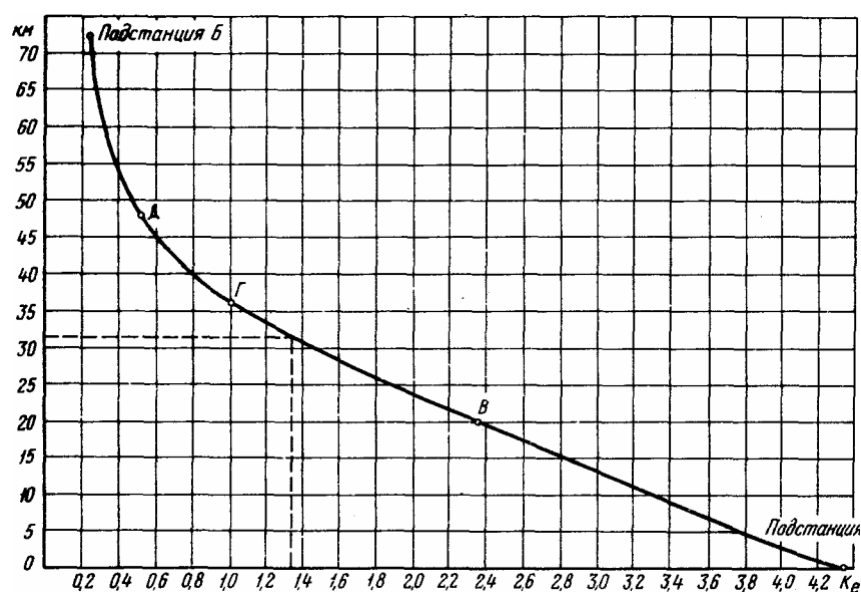


Рис. П2.2 Характеристика  $l = f(K_e)$

Значению  $K_e = 1,35$  соответствует расстояние  $l = 31,5$  км от подстанции А до места КЗ.



## Библиография

1. Айзенфельд А. И. Обобщение опыта внедрения и эксплуатации методов и средств ОМП ВЛ 110-750 кВ по параметрам аварийного режима. Экспресс-информация. Серия: Эксплуатация и ремонт электрических сетей. Вып. 5. - М.: Информэнерго, 1988.
2. Методические указания по использованию различных способов определения мест повреждения ВЛ напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов. - М.: СПО ОРГРЭС, 1989.
3. Борухман В.А., Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П. Устройства для определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. - М.: Энергия, 1980.
4. Айзенфельд А.И., Аронсон В.Н., Гловацкий В.Г. Фиксирующие индикаторы тока и напряжения ЛИФП-А, ЛИФП-В, ФПТ и ФПН. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. СТО 56947007-29.240.55.159-2013 Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше (утвержден приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 28.11.2013 № 712 в редакции приказа ПАО «ФСК ЕЭС» от 18.01.2016 № 10).
6. Шалыт Г.М., Айзенфельд, А.И., Малый А.С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. 2-е изд., переработанное и дополненное - М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Айзенфельд А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. 2-е изд., переработанное и дополненное - М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Айзенфельд А.И. Способ уменьшения времени фиксации фиксирующих индикаторов ЛИФП, ФПТ и ФПН. Экспресс-информация. Серия: Эксплуатация и ремонт электрических сетей. Вып. 10. - М.: Информэнерго, 1987.
9. Руководящие указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. Вып. 11. - М.: Энергия, 1979.

10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970.
11. Айзенфельд А.И. Учет сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов при определении мест повреждения ВЛ. - Электрические станции, 1978, № 11.
12. Бурков Ю.А., Соболев Л.А. Экспериментальное определение параметров линий электропередачи 110-220 кВ. Экспресс-информация. Серия: Эксплуатация и ремонт электрических сетей. Вып. 5. М.: Информэнерго, 1985.
13. Баранаваскас Л.П. Уточнение сопротивления нулевой последовательности (НП) воздушных линий электропередачи. Экспресс-информация. Серия: Строительство сельских электросетей. Вып. 4. - М.: Информэнерго, 1981.
14. Айзенфельд А.И., Кузнецов А.П. Применение фиксирующих приборов с фильтрами обратной последовательности для определения мест повреждения на линиях электропередачи. - Энергетик, 1972, № 3.
15. Баранаваскас Л.П., Геурков Э.А. Учет полного сопротивления при определении мест повреждения воздушных линий электропередачи. - Электрические станции, 1980, № 12.
16. Айзенфельд А.И. Определение мест повреждения воздушных линий, имеющих сближение на части трассы. Информационный листок N Э072-75. Серия 11А-10. - М.: СПО ОРГРЭС, 1975.
17. Гловацкий В.Г., Кузнецов А.П., Аронсон В.Н. Применение фиксирующих индикаторов для определения мест повреждения на линиях электропередачи с двусторонним питанием. - Электрические станции, 1988, № 5.
18. Розенкноп М.П.. Определение места замыкания на землю по токам и напряжениям нулевой последовательности на линиях электропередачи с ответвлениями. - Электричество, 1966, № 11.
19. Айзенфельд А.И. Погрешность определения мест повреждения ВЛ при пренебрежении неоднородностью ее участков. - Электричество. 1980, № 2.
20. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969.

21. Борозинец Б.В., Шалыт Г.М. Развитие методов определения мест повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам аварийного режима. - В кн.: Определение мест повреждений в элементах электрических систем. Сб. научные труды ВНИИЭ. - М.: Энергоатомиздат, 1985.