

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ В МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ЕЁ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОСВЕННЫМ МЕТОДОМ

Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева  
г. Челябинск, ЮУрГУ

В данной работе исследуется влияние величины проводимости изоляции в месте повреждения на точность ее определения и на возможность определения поврежденного участка линии в зависимости от величины проводимости в месте повреждения расчетным методом по результатам измерения режимных параметров.

В работе [1] исследовались возможности определения проводимостей изоляции участков линии с отпайкой в зависимости от выбранных схем замещения и методов расчета. По анализу погрешностей результатов расчета параметров изоляции линии с отпайкой для двух вариантов схем замещения П-образной и Т-образной, полученных при расчете по методу узловых потенциалов (МУП) и методу контурных токов (МКТ) в работе [1] была выбрана П-образная схема замещения линии с отпайкой. Кроме того, в работе [1] были проанализированы результаты расчетов для случая ухудшения изоляции в фазе А на первом (головном) участке сети при заданном коэффициенте распределения проводимости  $m$  для всех трех фаз без повреждения.

В настоящей работе, с учетом результатов исследований, проведенных в [1] расчеты выполняются для П-образной схемы замещения линии с отпайкой по методу узловых потенциалов (МУП).

Как и в работе [1] считается, что заданной является трехфазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, поэтому расчеты выполняются для схемы фазы А. Схема замещения фазы участка сети представлена на рисунке.

Расчеты выполняются с использованием данных двух цифровых моделей (ЦМ):

– одна ЦМ рассчитана в работе [1] для линии с отпайкой, имеющей П-образную схему замещения для симметричного режима,

– вторая ЦМ рассчитана в данной работе для случая ухудшения изоляции в фазе А при  $\underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{b1} + 10 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb})$  по методике, описанной в работе [1],  
здесь  $\underline{Y}_{a1}$  – проводимость изоляции в фазе А на первом участке;

$\underline{Y}_{b1}$  – проводимость изоляции в фазе В на первом участке;

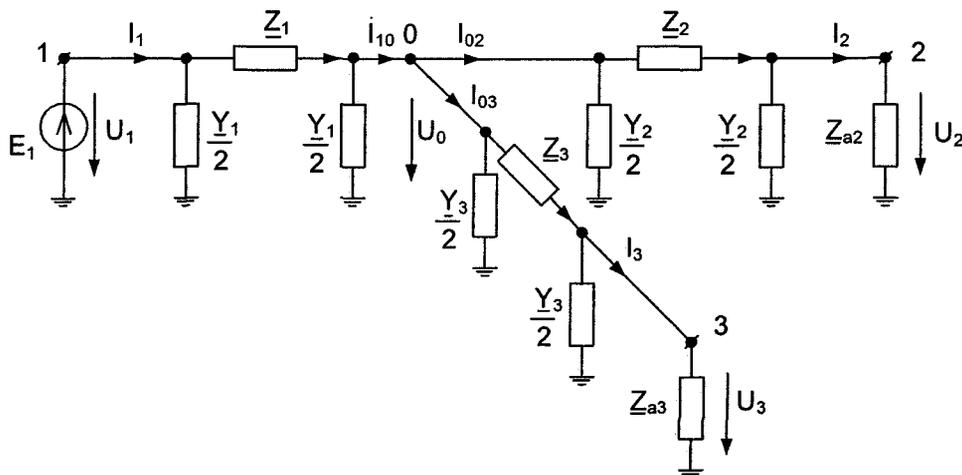
$\underline{Y}_{sb}$  – суммарная проводимость изоляции в фазе В,

где  $\underline{Y}_{sb} = \underline{Y}_{b1} + \underline{Y}_{b2} + \underline{Y}_{b3}$ ;

$\underline{Y}_{b2}$  – проводимость изоляции в фазе В на втором участке;

$\underline{Y}_{b3}$  – проводимость изоляции в фазе В на отпайке.

Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов изме-



П-образная схема замещения фазы участка сети

рений. Расчеты выполняются по методу узловых потенциалов для П-образной схемы замещения (см. рисунок) по трем вариантам уравнений цепи.

Вариант 1

В расчетах принимаем  $\dot{U}_1 = U_1$ ;  
 $\dot{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)}$ ;  $\dot{U}_3 = U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)}$ ,

где  $\psi = \psi_2 + j\psi_3$ , здесь  $\psi_2$  – начальная фаза напряжения  $\dot{U}_2$  в конце второго участка;  $\psi_3$  – начальная фаза напряжения  $\dot{U}_3$  в конце отпаечной линии.

Так же, как и в работе [2] вводятся обозначения:  $\dot{I}_1 = I_1 \cdot e^{-j\varphi_1}$ ;  $\dot{I}_2 = I_2 \cdot e^{-j\varphi_2}$ ;  $\dot{I}_3 = I_3 \cdot e^{-j\varphi_3}$ .

Данными цифровых моделей являются:

$$\underline{Y}, \underline{Y}_3, m, \psi = \psi_2 + j\psi_3,$$

где  $\underline{Y}$  – проводимость основной линии;  $\underline{Y}_3$  – проводимость отпаечной линии;  $m$  – коэффициент распределения проводимости или доля проводимости первого участка в основной линии.

Расчеты ведем по данным двух цифровых моделей отдельно.

Запишем уравнения по методу узловых потенциалов:

$$\dot{\phi}_1 = \dot{U}_1;$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{U}_2;$$

$$\dot{\phi}_3 = \dot{U}_3;$$

$$\dot{\phi}_0 \cdot Y_{00} - \dot{\phi}_1 \cdot Y_{01} - \dot{\phi}_2 \cdot Y_{02} - \dot{\phi}_3 \cdot Y_{03} = 0,$$

$$\text{где } Y_{01} = \frac{1}{Z_1}; \quad Y_{02} = \frac{1}{Z_2}; \quad Y_{03} = \frac{1}{Z_3};$$

$$Y_{00} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + Y_0; \quad Y_0 = \frac{Y_1}{2} + \frac{Y_2}{2} + \frac{Y_3}{2},$$

здесь  $Z_1$  – сопротивление первого участка линии;  $Z_2$  – сопротивление второго участка линии;  $Z_3$  – сопротивление отпаечной линии.

Сделав замены согласно формул

$$\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = g; \quad \underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2, \quad \text{получим.}$$

$$Y_{00} = g + \frac{Y + Y_3}{2}.$$

С учетом приведенных выше обозначений уравнения по методу узловых потенциалов запишутся в виде:

$$\dot{U}_0 \cdot \left( g + \frac{Y + Y_3}{2} \right) - U_1 \cdot \frac{1}{Z_1} - U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} \frac{1}{Z_2} -$$

$$- U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_3} = 0;$$

$$\frac{U_1 - \dot{U}_0}{Z_1} + U_1 \cdot \frac{m \cdot Y}{2} - \dot{I}_1 = 0;$$

$$\frac{U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} - \dot{U}_0}{Z_2} + U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} \cdot (1-m) \cdot \frac{Y}{2} + \dot{I}_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} = 0;$$

$$\frac{U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} - \dot{U}_0}{Z_3} + U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{Y_3}{2} + \dot{I}_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} = 0.$$

Из второго уравнения выразим напряжение в месте присоединения отпайки

$$\dot{U}_0 = U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1$$

и подставим в остальные уравнения системы. В результате получим:

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( g + \frac{Y + Y_3}{2} \right) -$$

$$- U_1 \cdot \frac{1}{Z_1} - U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} \frac{1}{Z_2} - U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_3} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_2} \right) +$$

$$+ \left[ U_2 \cdot \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{(1-m) \cdot Y}{2} \right) + \dot{I}_2 \right] \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_3} \right) +$$

$$+ \left[ U_3 \cdot \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{Y_3}{2} \right) + \dot{I}_3 \right] \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} = 0.$$

и выполним расчет данных уравнений в программе MathCAD.

Вариант 2

К полученным выше уравнениям добавим дополнительные уравнения для токов  $\dot{I}_{10}, \dot{I}_{02}, \dot{I}_{03}$  в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии. В результате получим уравнения:

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( g + \frac{Y + Y_3}{2} \right) -$$

$$- U_1 \cdot \frac{1}{Z_1} - U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} \frac{1}{Z_2} - U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_3} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_2} \right) +$$

$$+ \left[ U_2 \cdot \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{(1-m) \cdot Y}{2} \right) + \dot{I}_2 \right] \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_3} \right) +$$

$$+ \left[ U_3 \cdot \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{Y_3}{2} \right) + \dot{I}_3 \right] \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} = 0;$$

$$\left[ \dot{I}_1 - \frac{m \cdot Y}{2} \cdot \left[ U_1 \cdot \left( 2 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \right] - I_{10} = 0;$$

$$\left[ \dot{I}_2 + \frac{(1-m) \cdot Y}{2} \cdot \left[ U_2 \cdot \left( 2 + \frac{(1-m) \cdot Y \cdot Z_2}{2} \right) + \dot{I}_2 \cdot Z_2 \right] \right] - I_{02} = 0;$$

$$\left[ \dot{I}_3 + \frac{Y_3}{2} \cdot \left[ U_3 \cdot \left( 2 + \frac{Y_3 \cdot Z_3}{2} \right) + \dot{I}_3 \cdot Z_3 \right] \right] - I_{03} = 0.$$

и выполним расчет данных уравнения в программе MathCAD.

### Вариант 3

К полученным выше по 1-му варианту уравнениям введем дополнительные уравнения для напряжения  $\dot{U}_0$  в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии. В результате получим уравнения:

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( g + \frac{Y + Y_3}{2} \right) - U_1 \cdot \frac{1}{Z_1} - U_2 \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} \frac{1}{Z_2} - U_3 \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_3} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_2} \right) + \left[ U_2 \cdot \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{(1-m) \cdot Y}{2} \right) + \dot{I}_2 \right] \cdot e^{j\text{Re}(\psi)} = 0;$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right] \cdot \left( \frac{-1}{Z_3} \right) + \left[ U_3 \cdot \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{Y_3}{2} \right) + \dot{I}_3 \right] \cdot e^{j\text{Im}(\psi)} = 0;$$

$$\left| U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot Z_1 \right| - U_0 = 0;$$

$$\left| U_2 \cdot \left( 1 + \frac{(1-m) \cdot Y \cdot Z_2}{2} \right) + \dot{I}_2 \cdot Z_2 \right| - U_0 = 0;$$

$$\left| U_3 \cdot \left( 1 + \frac{Y_3 \cdot Z_3}{2} \right) + \dot{I}_3 \cdot Z_3 \right| - U_0 = 0.$$

Все три варианта уравнений с данными двух цифровых моделей (симметричной и с ухудшением изоляции) решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в программе MathCAD.

Результаты расчета погрешности определения суммарной проводимости изоляции по двум цифровым моделям для трех вариантов уравнений цепи приведены в табл. 1 и 2.

Из табл. 1 видно, что для симметричной цепи 3-й вариант с дополнительными уравнениями по напряжению дает большую погрешность в определении параметров изоляции. Это связано с тем, что напряжение в начале линии  $\dot{U}_1$  и в месте присоединения отпайки  $\dot{U}_0$  мало отличаются друг от друга, так как падение напряжения на первом участке с сопротивлением  $Z_1$  незначительно. Дополнительные уравнения по напряжению накладывают в расчеты дополнительную погрешность, в результате чего увеличивается общая погрешность в определении параметров изоляции. Поэтому 3-й вариант расчетов с дополнительными уравнениями по напряжению для симметричной цепи при определении проводимости изоляции и места повреждения в дальнейших расчетах не рассматривается.

Данные погрешности из табл. 2 получились из-за того, что не учтено изменение коэффициента распределения проводимости  $m$ . В случае ухудшения изоляции коэффициент  $m$  не соответствует распределению проводимости по участкам сети. Поэтому необходимо выполнить перерасчет коэффициента распределения проводимости  $m$  по предполагаемым гипотезам повреждения участков сети.

В расчетах используем средние значения проводимостей, полученные при определении параметров по всем трем вариантам уравнений:

$$Y_{sa} = \frac{G_{s \max} + G_{s \min}}{2} + j \frac{B_{s \max} + B_{s \min}}{2} \quad - \text{средняя суммарная проводимость поврежденной фазы А;}$$

Таблица 1  
Погрешности определения суммарной проводимости изоляции (для симметричной ЦМ)

Варианты уравнений	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
1	33,293	-47,492	49,587	-45,116
2	13,351	-22,356	10,659	-24,089
3	67,358	-116,513	215,448	-70,421

Таблица 2

Погрешности определения суммарной проводимости изоляции (для ЦМ с ухудшением изоляции)

Варианты уравнений	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
1	7,770	4,338	348,277	209,274
2	44,067	28,542	32,795	17,588
3	46,266	6,990	123,921	-68,617

– в симметричном режиме

$$\underline{Y}_{sb} = \frac{G_{s \max} + G_{s \min}}{2} + j \frac{B_{s \max} + B_{s \min}}{2} \quad \text{– средняя суммарная проводимость фазы В;}$$

– средняя суммарная проводимость фазы В;

$$\underline{Y} = \frac{G_{s \max} + G_{s \min}}{2} + j \frac{B_{s \max} + B_{s \min}}{2} \quad \text{– средняя проводимость главной линии;}$$

– средняя суммарная проводимость главной линии;

$$\underline{Y}_3 = \frac{G_{s \max} + G_{s \min}}{2} + j \frac{B_{s \max} + B_{s \min}}{2} \quad \text{– средняя проводимость отпаечной линии;}$$

– средняя суммарная проводимость отпаечной линии;

$$\Delta \underline{Y} = \underline{Y}_{sa} - \underline{Y}_{sb} \quad \text{– величина ухудшения суммарной проводимости изоляции.}$$

Гипотеза 1

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на первом (головном) участке (1–0). Тогда для второго участка без повреждения величина проводимости  $\underline{Y}_2 = (1 - m) \cdot \underline{Y}$  определяется по заданному коэффициенту распределения проводимости  $m$ .

На первом участке проводимость  $\underline{Y}_1$  определяем с учетом ухудшения изоляции как  $\underline{Y}_1 = \underline{Y} - \underline{Y}_2$ , где проводимость  $\underline{Y}$  определяется с учетом ухудшения изоляции как  $\underline{Y} = \underline{Y}' + \Delta \underline{Y}$ , здесь  $\underline{Y}'$  – среднее значение проводимости главной линии, рассчитанное выше. После этого выполняем перерасчет коэффициента распределения проводимости  $m = \frac{\underline{Y}_1}{\underline{Y}}$ .

Далее выполняются расчеты по всем трем вариантам уравнений в программе MathCAD.

Гипотеза 2

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на втором участке (0–2). Тогда для первого участка без повреждения величина проводимости  $\underline{Y}_1 = m \cdot \underline{Y}$  определяется по заданному коэффициенту распределения проводимости  $m$ .

На втором участке проводимость  $\underline{Y}_2$  определяем с учетом ухудшения изоляции как  $\underline{Y}_2 = \underline{Y} - \underline{Y}_1$ , где проводимость  $\underline{Y}$  определяется с учетом ухудшения изоляции аналогично гипотезе 1 как  $\underline{Y} = \underline{Y}' + \Delta \underline{Y}$ . Аналогично выполняем перерас-

чет коэффициента распределения проводимости

$$m = 1 - \frac{\underline{Y}_2}{\underline{Y}}.$$

Далее выполняются расчеты по всем трем вариантам уравнений в программе MathCAD.

Гипотеза 3

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на третьем участке (0–3). Тогда для третьего участка величина проводимости  $\underline{Y}_3 = \underline{Y}' + \Delta \underline{Y}$ , где  $\underline{Y}'$  – среднее значение проводимости отпаечной линии, рассчитанное выше.

Коэффициент распределения проводимости  $m$  сохранился.

Далее аналогично выполняются расчеты по всем трем вариантам уравнений методом минимизации среднеквадратичной погрешности в программе MathCAD.

Результаты расчета погрешности определения суммарной проводимости изоляции по трем гипотезам для трех вариантов уравнений цепи приведены в табл. 3.

Проанализируем результаты расчетов, представленные в табл. 3.

Вполне допустимые результаты расчетов по 1 варианту уравнений наблюдаются по гипотезе 1. Результаты расчета погрешностей по 2 и 3 гипотезам по некоторым суммарным проводимостям в сотни, тысячи раз превышают показатели по 1 гипотезе.

Результаты расчетов 2 варианта с дополнительными уравнениями по току дают хороший результат также по 1 гипотезе. Погрешности расчетов по 2 и 3 гипотезам превышают в десятки, сотни раз показатели суммарной проводимости по 1 гипотезе.

Результаты расчетов 3 варианта с дополнительными уравнениями по напряжению дают также лучший результат по 1 гипотезе по сравнению с гипотезами 2 и 3. Однако даже по 1 гипотезе наблюдается большая погрешность. Причина такой большой погрешности результатов расчета была отмечена выше, поэтому 3 вариант с дополнительными уравнениями по напряжению для случая ухудшения изоляции, также как и для симметрич-

Таблица 3

Погрешности определения суммарной проводимости изоляции

Варианты	Гипотезы	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
1	1	4,684	-2,034	79,292	-30,833
	2	13,904	-1309,841	5023,801	-104,958
	3	7,770	4,338	348,277	209,274
2	1	2,550	-2,994	10,126	-18,781
	2	-95,235	-95,680	-38,845	-43,600
	3	-94,413	-114,012	46,750	-48,379
3	1	7,790	-13,072	128,889	-77,515
	2	107,723	45,980	238,842	146,164
	3	41,527	-235,192	1120,569	-70,380

ного режима, в дальнейших расчетах по определению проводимости изоляции и места повреждения не рассматривается.

Таким образом, анализ данных табл. 3 дает положительный результат по 1 гипотезе, что подтверждает наличие повреждения изоляции на первом участке цепи. Гипотезы 2 и 3 в дальнейших расчетах не рассматриваются.

Анализ полученных значений погрешностей определения суммарной проводимости изоляции, приведенных в табл. 3, показывает, что лучшими являются результаты по 2 варианту с дополнительными уравнениями по току. Это связано со значительным изменением токов в цепи за счет довольно существенных токов утечки на землю. Поэтому дополнительные уравнения по току дают большую точность в расчетах, тем самым, уменьшая величину погрешности определения проводимости изоляции.

На следующем этапе для гипотезы 1 уже для оставшихся двух вариантов уравнений выполняется уточнение параметров изоляции линии с отпайкой и перерасчет правильной гипотезы по не-

скольким приближениям. Расчеты уравнений выполняются в программе MathCAD.

Для 1 варианта уравнений выполнено шесть приближений, результаты приведены в табл. 4.

Результаты, приведенные в табл. 4 показывают, что 4 - 6 приближения практически не отличаются от 3-го приближения. Кроме того, погрешности расчетов меняются по случайному закону, и разница в погрешностях расчета определяется случайной погрешностью измерительных приборов, поэтому в дальнейших расчетах ограничиваемся тремя приближениями. Для проводимости третьего участка (отпаечной линии) получаем значения не совпадающие с действительными. Это связано с тем, что проводимость отпаечной линии на порядок меньше проводимости поврежденного участка.

Для 2 варианта с дополнительными уравнениями по току, с учетом изложенного выше, рассчитано три приближения, результаты приведены в табл. 5.

По данным табл. 5 можно отметить, что погрешности расчетов по определению проводимости изоляции в сравнении с данными табл. 4 уменьша-

Таблица 4

Уточнение погрешности определения проводимости изоляции и величины ухудшения суммарной проводимости по участкам сети по 1 варианту уравнений для гипотезы 1

Приближения	1	2	3
$\Delta Y$	0,00367+0,000158i	0,00360+0,0000236i	0,00359+0,00000555i
G max, %	55,784	59,781	60,366
G min, %	-57,756	-57,172	-57,088
B max, %	420,685	452,927	457,654
B min, %	-427,320	-422,740	-422,080
G3 max, %	1995,481	1975,698	1972,848
G3 min, %	-1966,970	-2111,870	-2133,120
B3 max, %	1078,294	1067,038	1065,417
B3 min, %	-1031,893	-1109,368	1065,417
Gs max, %	4,463	4,4292	4,424
Gs min, %	-5,511	-6,0261	-6,102
Bs max, %	74,551	73,852	73,752
Bs min, %	-63,507	-67,837	-68,468
Приближения	4	5	6
$\Delta Y$	0,00359+0,00000292i	0,00359+0,00000253i	0,00359+0,00000247i
G max, %	60,453	60,466	60,467
G min, %	-57,076	-57,074	-57,074
B max, %	458,351	458,454	458,469
B min, %	-421,983	-421,969	-421,967
G3 max, %	1972,429	1972,368	1972,359
G3 min, %	-2136,253	-2136,715	-2136,783
B3 max, %	1065,179	1065,144	1065,139
B3 min, %	-1122,387	-1122,634	-1122,671
Gs max, %	4,423	4,423	4,423
Gs min, %	-6,113	-6,115	-6,115
Bs max, %	73,737	73,735	73,734
Bs min, %	-68,561	-68,575	-68,577

Уточнение погрешности определения проводимости изоляции и величины ухудшения суммарной проводимости по участкам сети по 2 варианту уравнений для гипотезы 1

Приближения	1	2	3
$\Delta Y$	0,0036+0,0000171i	0,00356+0,0000188i	0,0036+0,0000395i
G max, %	5,073	5,115	5,113
G min, %	-2,987	-2,945	-2,957
B max, %	81,605	82,194	81,590
B min, %	-59,797	-59,307	-59,893
G3 max, %	113,757	112,696	113,530
G3 min, %	-184,572	-185,949	-185,107
B3 max, %	132,125	131,100	132,040
B3 min, %	-184,012	-185,169	-184,322
Gs max, %	0,872	0,833	0,942
Gs min, %	-3,460	-1,567	-1,253
Bs max, %	10,076	15,801	12,972
Bs min, %	-18,2786	-18,247	-18,497

Таблица 6

Погрешности определения проводимости изоляции и величина ухудшения суммарной проводимости по участкам сети по результатам проверки правильности программы

Варианты	1	2
$\Delta Y$	0,00367+0,000158i	0,00360+0,0000171i
G max, %	55,527	4,575
G min, %	-53,933	-3,467
B max, %	418,072	76,049
B min, %	-398,001	-64,205
G3 max, %	1863,986	124,318
G3 min, %	-1960,548	-170,239
B3 max, %	1003,509	142,020
B3 min, %	-1028,482	-172,274
Gs max, %	4,185	1,024
Gs min, %	-5,565	-1,056
Bs max, %	69,168	8,954
Bs min, %	-64,112	-11,403

ются, особенно для отпаечной линии. Порядок величины погрешности определяется правильно, но сами значения для отпаечной линии не соответствуют действительным по причине, указанной выше. Так как результаты данных табл. 5 практически близки друг другу, то достаточно уточнения по 1-му приближению, и дальнейшее уточнение расчетов не требуются; то же самое можно сказать о результатах расчета приведенных в табл. 4.

Поэтому для гипотезы 1 выполняется проверка правильности программы для двух вариантов уравнений цепи по первому приближению, с перерасчетом коэффициента распределения проводимости  $m$  по данным цифровой модели с ухудшением изоляции

$$m = \frac{Y_{a1}}{Y_{a1} + Y_{a2}},$$

где  $Y_{a1}$  - проводимость на первом участке с ухудшением изоляции,  $Y_{a2}$  - проводимость на втором участке.

Расчеты уравнений выполняются в программе MathCAD. Результаты проверки правильности программы по расчету погрешности определения проводимости изоляции по участкам сети приведены в табл. 6.

Данные табл. 6 близки к результатам первого приближения по данным табл. 4 и 5. Это подтверждает правильность программы по расчету погрешности определения проводимости изоляции по участкам сети и дает возможность определения места повреждения участка линии, в зависимости от величины проводимости изоляции в месте повреждения.

**Литература**

1. Хусаинов, Ш.Н. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2007. - Вып. 8. - № 20(92). - С. 32-37.

2. Хусаинов, Ш.Н. Определение параметров изоляции для линии с отпайкой по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2001. - Вып. 1. — № 4(04). - С. 55-59.

**Хусаинов Шамиль Нагимович** окончил энергетический факультет Челябинского политехнического института (ныне Южно-Уральский государственный университет) в 1960 году. В 1988 году получил ученую степень доктора технических наук. Защита проходила в Московском энергетическом институте (техническом университете) по теме: «Развитие теории и методов анализа электрических схем с многополюсными элементами». Утвержден в звании профессора в 1999 году. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете на кафедре «Системы электроснабжения».

**Нараева Рузалия Раисовна** окончила энергетический факультет Челябинского политехнического института (ЧПИ) в 1983 году. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете в должности старшего преподавателя кафедры «Электротехника».