

2. Шипулин В. И., Лупандина Н. Д., Барсуковская Т. А. Биотехнологические аспекты совершенствования технологии сырокопченых колбас с использованием поликомпонентных многоцелевых функциональных модулей: материалы Первого Международного форума «Молодежь – интеллектуальный потенциал развития страны». г. Душанбе, Таджикистан, 2015.
3. Шипулин В. И., Лупандина Н. Д., Барсуковская Т. А. Роль деминерализованной сыворотки в технологии сырокопченых колбас // Современные достижения биотехнологии. Актуальные проблемы молочного дела: материалы V Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. 441 с.

УДК 621.3.088.2

**Данилов Максим Иванович, Романенко Ирина Геннадьевна,
Капаницкий Роман Анатольевич**

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА

Рассмотрена возможность идентификации параметров кабелей на основе предполагаемых данных синхронных измерений мгновенных значений токов и напряжений. Проанализирована возникающая погрешность определения восстанавливаемых параметров от точности измерений. Показано влияние измерительного напряжения и тока на погрешность восстановления параметров. Определена погрешность параметров кабелей без учета емкостного тока.

Ключевые слова: электроснабжение потребителей, параметры кабелей, косвенные измерения, мгновенные значения токов и напряжений, погрешность измерений.

**Maksim Danilov, Irina Romanenko,
Roman Kapanitskiy**

THE ANALYSIS OF FLAT BUILDING SUPPLY EQUIVALENT CIRCUIT CHARACTERISTIC RESTORING INACCURACY

The possibility of cable characteristic identification based on expected data of instantaneous current and voltage synchronous instrumentation was considered. The incipient inaccuracy of recoverable characteristic estimation from precision of measurement was analyzed. The measuring voltage and current influence on characteristic recovery inaccuracy was demonstrated. The cable characteristic inaccuracy nonmetering capacitive current was determined.

Key words: consumer supply, cable characteristic, indirect measurement, instantaneous current and voltage, measurement inaccuracy.

В настоящее время большое количество научных работ посвящено исследованию и разработке методов локализации потерь электроэнергии [4, 7, 10], использующих информацию о схеме сети [1, 2, 3, 6, 8, 13, 14] и измерениях мгновенных значений токов и напряжений [2, 3, 6]. Однако локализация потерь и определение параметров в системах электроснабжения многоквартирных домов требует своего развития.

В настоящей работе рассмотрен вопрос получения информации о схеме сети на основе измерений мгновенных значений тока и напряжения, которая может быть использована для установления мест хищения электроэнергии. Идентификация параметров проводилась для П-образной схемы замещения линии электропередачи [14]. В этом случае восстанавливаемыми параметрами являются ее сопротивления. Необходимыми исходными данными являются токи и напряжения на входе и выходе.

Расчет параметров схемы замещения проводился двумя способами: 1 – по справочным данным; 2 – на основе моделируемых измерений мгновенных значений тока и напряжения (этот способ позволяет оперативно при необходимости определять параметры схемы замещения сети). Во втором случае также определялось минимальное количество измерительных приборов, достаточное для восстановления параметров, и места их установки.

Восстановление параметров проводилось на примере одной фазы типовой схемы электроснабжения многоквартирного дома (рисунок 1) при известной топологии сети, марке и длине кабеля. При расчете считалось, что параметры кабелей каждого этажа идентичны. Известно, что параметры схемы замещения можно определить по марке и длине, используя каталожные данные кабеля. Однако для кабелей 0,4 кВ в справочниках отсутствует информация об индуктивностях и емкостях [11, 12]. В связи с этим для их определения необходимо воспользоваться известными методиками [5, 9].

Удельная индуктивность фазы кабеля определялась с учетом их расположения согласно [5]

$$L_{\text{ф}} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l_{\text{ср}}}{d_0} + \frac{1}{4} \right),$$

где $l_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между центрами жил кабеля, мм; d_0 – диаметр токопроводящей жилы, мм.

Емкость C фазы на единицу длины рассчитывалась по формуле [9]

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln(D/d_{\text{ж}})},$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость изоляции, D – диаметр кабеля по фазной изоляции, $d_{\text{ж}}$ – диаметр токопроводящей жилы.

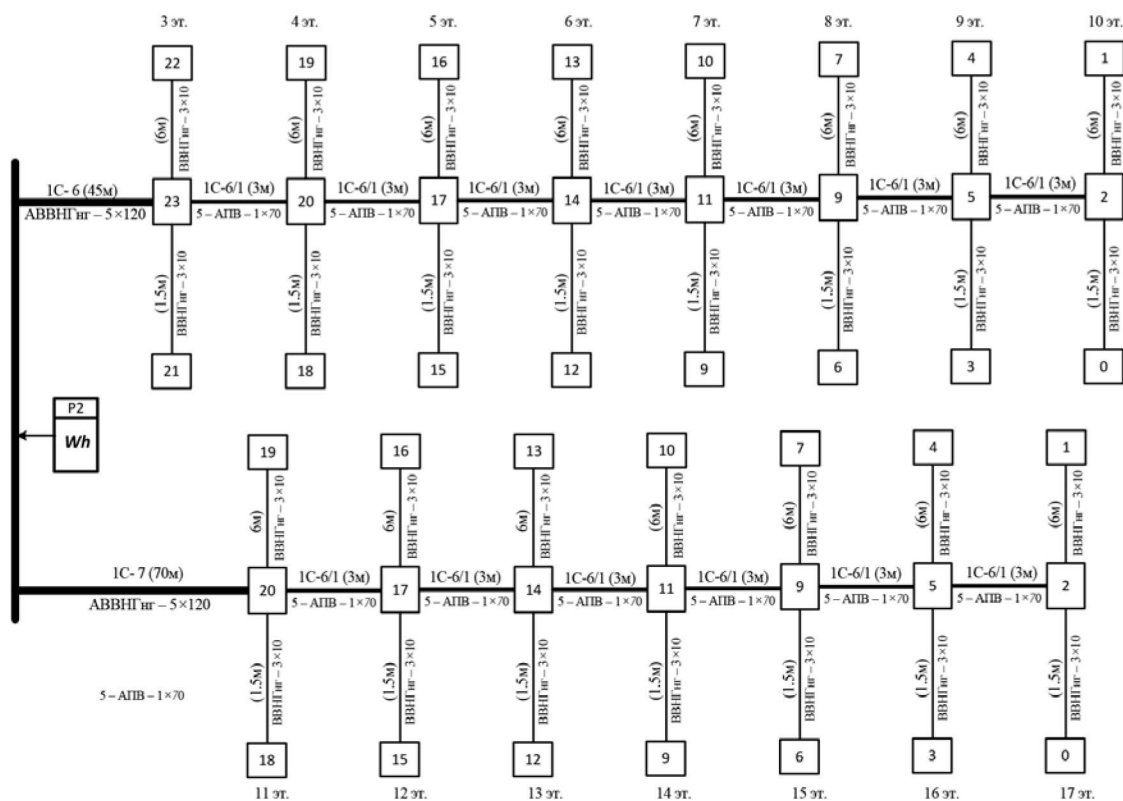


Рис. 1. Схематичное изображение питания квартир, подключенных к фазе А, секции Б жилого дома

При расчете на основе моделируемых измерений предполагается, что установленные у потребителей счетчики электроэнергии могут взаимодействовать с главным счетчиком (P2 – на рис. 1), реализуя следующий режим: по команде с главного счетчика возможно подключение и отключение потребителей и подключение тестовой нагрузки, которая должна быть размещена в счетчиках потребителей. Главный счетчик может формировать напряжение различной величины, а тестовая нагрузка позволяет формировать ток требуемой величины.

Рассмотрим алгоритм расчета параметров схемы замещения на основе моделируемых измерений мгновенных значений тока и напряжения. Вначале определяются параметры кабеля на участках: от источника питания до узла 23 (АВВГнг – 45 м); от 23 до 22 (ВВГнг – 1,5 м), от 23 до 21 (ВВГнг – 6 м); в счетчиках узлов 21 и 22 подключается тестовая нагрузка Z_H (рис. 1). При расчете оставшаяся часть схемы отключена (рис. 2). На практике же эта часть схемы остается подключенной и работает в режиме холостого хода, оказывая влияние на входной ток и потенциалы узлов 23, 22, 21. Это вносит некоторую погрешность в результаты расчета (погрешность метода).

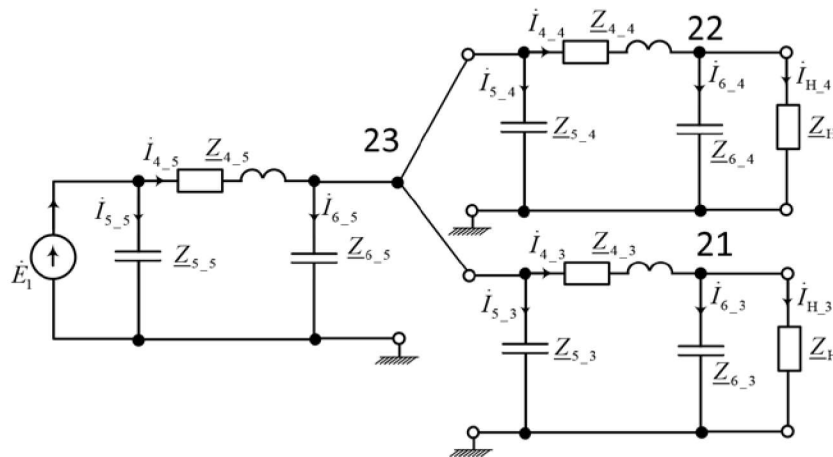


Рис. 2. Схема замещения участка цепи

В этой цепи всего двенадцать ветвей, поэтому можно составить двенадцать независимых уравнений по законам Кирхгофа, из которых можно определить требуемые неизвестные величины. Неизвестными величинами являются параметры $Z_{4,3}$, $Z_{5,3} = Z_{6,3}$, $Z_{4,4}$, $Z_{5,4} = Z_{6,4}$, $Z_{4,5}$, $Z_{5,5} = Z_{6,5}$ и токи через них $\dot{I}_{4,3}$, $\dot{I}_{5,3}$, $\dot{I}_{6,3}$, $\dot{I}_{4,4}$, $\dot{I}_{5,4}$, $\dot{I}_{6,4}$, $\dot{I}_{4,5}$, $\dot{I}_{5,5}$, $\dot{I}_{6,5}$. Всего неизвестных параметров пятнадцать, таким образом, решить задачу, используя только законы Кирхгофа, не представляется возможным. Необходимы еще три дополнительных условия. Два из которых – соотношение длины кабелей исходя из исходных данных:

$$\frac{Z_{4,3}}{Z_{4,4}} = \frac{l_{4,3}}{l_{4,4}} = \frac{1}{4} \text{ и } \frac{Z_{5,3}}{Z_{5,4}} = \frac{l_{4,4}}{l_{4,3}} = \frac{4}{1}.$$

Третьим условием может служить известный потенциал $\dot{f}_{23}$, который для решения поставленной задачи необходимо измерять.

В связи с этим можем записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\dot{f}_{23} - \dot{f}_{21}}{Z_{4,3}} = \frac{\dot{f}_{21}}{Z_{5,3}} + \frac{\dot{f}_{21}}{Z_H}; \\ \frac{\dot{f}_{23} - \dot{f}_{22}}{Z_{4,3} \cdot \frac{l_{4,4}}{l_{4,3}}} = \frac{\dot{f}_{22}}{Z_{5,3} \cdot \frac{l_{4,3}}{l_{4,4}}} + \frac{\dot{f}_{22}}{Z_H}. \end{cases}$$

При известных l_{4_3}/l_{4_4} сопротивления $\underline{Z}_{4_3}$, $\underline{Z}_{5_3} = \underline{Z}_{6_3}$ (ВВГнг 15 м) равны:

$$\underline{Z}_{4_3} = -\frac{5}{4} \cdot \underline{Z}_H + \frac{4}{3} \cdot \underline{Z}_H \cdot \frac{\dot{f}_{23}}{\dot{f}_{21}} - \frac{1}{12} \cdot \underline{Z}_H \cdot \frac{\dot{f}_{23}}{\dot{f}_{22}},$$

$$\underline{Z}_{5_3} = -\underline{Z}_H \cdot \frac{15 \cdot \dot{f}_{21} \cdot \dot{f}_{22} + \dot{f}_{21} \cdot \dot{f}_{23} - 16 \cdot \dot{f}_{22} \cdot \dot{f}_{23}}{3 \cdot \dot{f}_{21} \cdot \dot{f}_{22} + \dot{f}_{21} \cdot \dot{f}_{23} - 4 \cdot \dot{f}_{22} \cdot \dot{f}_{23}}.$$

Параметры $\underline{Z}_{4_5}$, $\underline{Z}_{5_5}$ (АВВГнг 45 м) определялись согласно [14]:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{4\clubsuit 5} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{f}_{23}}{\dot{I}_{\text{ИСТ}} \cdot \dot{f}_{23} + \dot{I}_H \cdot \dot{E}_1}; \\ \underline{Z}_{5\clubsuit 5} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{f}_{23}}{\dot{I}_{\text{ИСТ}} - \dot{I}_H}. \end{cases}$$

где

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{f}_{21}}{\underline{Z}_H} + \frac{\dot{f}_{21}}{\underline{Z}_{5_3}} + \frac{\dot{f}_{23}}{\underline{Z}_{5_3}} + \frac{\dot{f}_{22}}{\underline{Z}_H} + \frac{\dot{f}_{22}}{\underline{Z}_{5_4}} + \frac{\dot{f}_{23}}{\underline{Z}_{5_4}}$$

Таким образом, для вычисления параметров $\underline{Z}_{4_3}$, $\underline{Z}_{5_3} = \underline{Z}_{6_3}$, $\underline{Z}_{4_4}$, $\underline{Z}_{5_4} = \underline{Z}_{6_4}$ и $\underline{Z}_{4_5}$, $\underline{Z}_{5_5} = \underline{Z}_{6_5}$ необходимо измерить величины $\dot{E}_1$, $\dot{I}_{\text{ИСТ}}$, $\dot{f}_{21}$, $\dot{f}_{22}$, $\dot{f}_{23}$.

Рассмотрим влияние погрешности измерения на точность восстанавливаемых параметров схемы замещения. Для этого были определены параметры схемы замещения по каталожным данным и известным формулам, приведенным выше. Затем с использованием Mathcad методом узловых потенциалов были рассчитаны потенциалы в узлах, принятые впоследствии за истинные (действительные). Далее моделировалась погрешность измерения путем изменения значения потенциалов на единицу соответствующего разряда (младший значащий разряд).

Рассмотрим на примере R_{4_3} формирование максимальной погрешности восстановления. Запишем активное сопротивление $R_{4_3} = \text{Re}(\underline{Z}_{4_3})$ через модули f_{21} , f_{22} , f_{23} и фазы ϕ_{21} , ϕ_{22} , ϕ_{23} измеряемых потенциалов:

$$\text{Re}\left(\frac{\dot{f}_{23}}{\dot{f}_{21}}\right) = \frac{f_{23} \cdot \sin(\phi_{23}) \cdot f_{21} \cdot \sin(\phi_{21}) + f_{23} \cdot \cos(\phi_{23}) \cdot f_{21} \cdot \cos(\phi_{21})}{(f_{21} \cdot \cos(\phi_{21}))^2 + (f_{21} \cdot \sin(\phi_{21}))^2} = \frac{f_{23}}{f_{21}} \cdot \cos(\phi_{23} - \phi_{21}).$$

Аналогичное выражение можно записать и для

$$\text{Re}\left(\frac{\dot{f}_{23}}{\dot{f}_{22}}\right) = \frac{f_{23}}{f_{22}} \cdot \cos(\phi_{23} - \phi_{22}).$$

Таким образом, активное сопротивление R_{4_3} определится:

$$R_{4\clubsuit 3} = -\frac{5}{4} \cdot \underline{Z}_H + \frac{4}{3} \cdot \underline{Z}_H \cdot \frac{f_{23}}{f_{21}} \cdot \cos(\phi_{23} - \phi_{21}) - \frac{1}{12} \cdot \underline{Z}_H \cdot \frac{f_{23}}{f_{22}} \cdot \cos(\phi_{23} - \phi_{22}). \quad (1)$$

Так как восстановление параметров схемы можно отнести к косвенным измерениям, то далее будем рассматривать погрешность определения расчетных параметров на основе методики анализа погрешностей косвенных измерений [15]. Максимальная погрешность величины R_{4_3} будет наблюдаться при противоположных знаках погрешностей ее слагаемых (вычитаемых).

Относительная погрешность деления двух потенциалов f_{23} / f_{21} :

$$\delta_{\text{дел}, f_{23}-f_{21}} = \frac{f_{23} / f_{21} - (f_{23} + \varepsilon) / (f_{21} - \varepsilon)}{f_{23} / f_{21}} \cdot 100 \%,$$

Знак и величина погрешности зависят от того, прибавляется погрешность измерения ε к соответствующему потенциалу или вычитается из него. В представленной выше формуле приведен случай $(+/-)$, возможны еще три случая $(-/+)$, $(-/-)$, $(+/+)$: $(f_{23} - \varepsilon)/(f_{21} + \varepsilon)$, $(f_{23} - \varepsilon)/(f_{21} - \varepsilon)$, $(f_{23} + \varepsilon)/(f_{21} + \varepsilon)$.

В таблице 1 представлены результаты расчета максимальной погрешности для кабеля ВВГнг (1,5 м). Значение ε соответствует изменению соответствующего разряда для измеренного параметра на единицу. В столбцах 5–10 представлены значения погрешностей от деления или вычитания параметров для заданного значения и сочетания знаков перед ε , в том числе для функции $\cos(\phi)$. В 3, 4 столбцах представлены погрешности вычисления R_{4-3} по формуле (1) с положительным или отрицательным знаком, максимальные для данной строчки. Во втором столбце – то же без учета $\cos(\phi)$.

Таблица 1

Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля ВВГнг (1,5 м)
с истинным значением $R_{4-3} = 2,745 \cdot 10^{-3}$ Ом

ε , м.з.р	$\delta_{R_{\text{без cos}}}$, %	$\delta_{R_{\text{пол}}}$, %	$\delta_{R_{\text{отр}}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$\delta_{\text{дел } f_{23}-f_{21}}$, %	$R_{\text{отр}}$, Ом	$R_{\text{пол}}$, Ом	$R_{\text{без cos}}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.01	-4.864e3	4.855e3	-4.864e3	-0.182	0.182	4.535e-6	6.009e-8	1.814e-5	0	0.136	-0.131	0.136
1e-3	-485.994	485.907	-485.993	-0.018	0.018	4.538e-7	5.255e-10	1.815e-6	0	0.016	-0.011	0.016
1e-4	-48.595	48.595	-48.595	-1.819e-3	1.819e-3	4.539e-8	-2.286e-12	1.816e-7	0	4.079e-3	1.411e-3	4.079e-3
1e-5	-4.86	4.859	-4.86	-1.819e-4	1.819e-4	4.539e-9	-7.769e-13	1.816e-8	0	2.878e-3	2.612e-3	2.878e-3
1e-6	-0.486	0.486	-0.486	-1.819e-5	1.819e-5	4.539e-10	-8.317e-14	1.816e-9	0	2.758e-3	2.732e-3	2.758e-3

В столбцах 11–13 представлены полученные значения сопротивлений при соответствующих погрешностях. Из таблицы 1 следует, что для определения сопротивления R_{4-3} достаточно измерить только модули потенциалов и при рассматриваемых параметрах точность необходима 10^{-6} В, тогда погрешность R_{4-3} не превысит $\pm 0,486$ %. Точность 10^{-6} В достижима при измерительном напряжении 11 В если использовать АЦП с разрядностью 24: $11/2^{24} = 0,6557 \cdot 10^{-6}$.

На основе полученных данных рассмотрим влияние измерительного напряжения и тока (рис. 3) на формирование погрешности R_{4-3} .

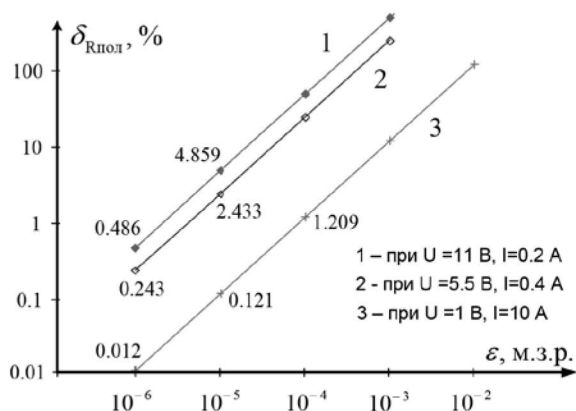


Рис. 3. Зависимость погрешности R от измерительного напряжения и тока

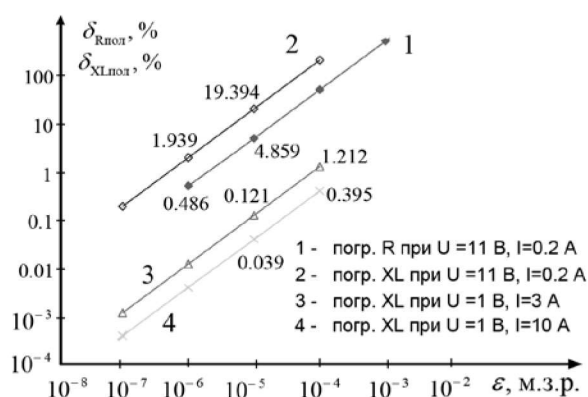


Рис. 4. Зависимость погрешности XL от измерительного напряжения и тока

Измерительные ток и напряжение выбирались из соображения возможной установки соответствующего резистора в корпус измерительного прибора. Из рис. 3 видно, что снижение погрешности наблюдается при увеличении измерительного тока (напряжение при этом необходимо уменьшать).

Аналогично были определены погрешности для сопротивления $X_{4,3}$. Результаты приведены в таблице 2 и на рис. 4, из которого видно, что снижение погрешности наблюдается при увеличении измерительного тока.

Таблица 2

Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля ВВГнг (1,5 м)
с истинным значением $X_{4,3} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$

ε , м.з.р	$\delta_{R_{пол}}$, %	$\delta_{R_{отр}}$, %	(+/-) sin $\delta_{\text{выч. } f_{23-f_{21}}}$, %	(+/-) sin $\delta_{\text{выч. } f_{23-f_{22}}}$, %	$X_{отр}$, Ом	$X_{пол}$, Ом
1e-4	193.934	-193.941	-1.819e-3	1.816e-7	3.88e-4	-1.24e-4
1e-5	19.394	-19.394	-1.819e-4	1.816e-8	1.576e-4	1.064e-4
1e-6	1.939	-1.939	-1.819e-5	1.816e-9	1.346e-4	1.294e-4
1e-7	0.194	-0.194	-1.819e-6	1.816e-10	1.323e-4	1.317e-4

В таблице 3 представлены результаты расчета максимальной погрешности определения $X_{5,3}$ по аналогичному алгоритму при указанных значениях измерительных напряжения и тока. В таблице ε_f и ε_ϕ представляет собой изменение соответствующего разряда модуля f и фазы ϕ потенциалов на единицу. Влияние измерительного напряжения и тока на формирование погрешности $X_{5,3}$ представлено на рис. 5.

Таблица 3

Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля ВВГнг (1,5м)
с истинным значением $X_{5,3} = -1.333 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$

ε , м.з.р	$\delta_{X_{пол}}$, %	$X_{пол}$, Ом	$\delta_{X_{пол}}$, %	$X_{пол}$, Ом	$\delta_{X_{пол}}$, %	$X_{пол}$, Ом	$\delta_{X_{пол}}$, %	$X_{пол}$, Ом
	$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$ U=11В, I=0.2А		$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$ U=1В, I=3А		$\varepsilon_f = 10^{-6}$, $\varepsilon_\phi = \text{var}$ U=11В, I=0.2А		$\varepsilon_\phi = 10^{-6}$, $\varepsilon_f = \text{var}$ U=11В, I=0.2А	
1e-4	99.976	-3.145e3	99.976	-3.147e3	99.976	-3.145e3	97.695	-3.073e5
1e-5	99.765	-3.138e4	99.764	-3.14e4	99.765	-3.138e4	97.695	-3.073e5
1e-6	97.695	-3.073e5	97.694	-3.075e5	97.695	-3.073e5	97.695	-3.073e5
1e-7	80.905	-2.546e6	80.896	-2.547e6	80.905	-2.546e6	97.695	-3.073e5
1e-8	29.735	-9.369e6	29.731	-9.369e6	29.737	-9.368e6	97.695	-3.073e5
1e-9	4.066	-1.279e7	4.058	-1.279e7	4.062	-1.279e7	97.695	-3.073e5
1e-10	0.417	-1.328e7	0.421	-1.328e7	0.426	-1.328e7	97.695	-3.073e5

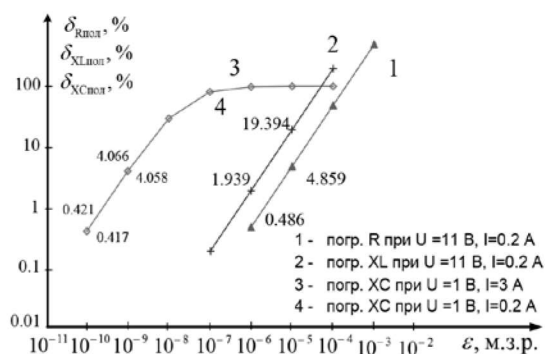
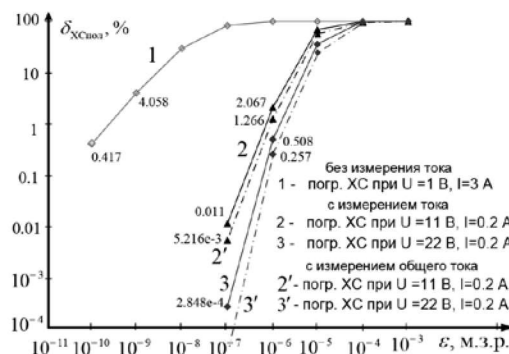


Рис. 5. Зависимость погрешности ХС от измерительного напряжения и тока

Рис. 6. Зависимость погрешности ХС от измерительного напряжения и тока: 1 – без измерения тока; 2, 3 – при измерении тока $I_{5,4} + I_{4,4}$; 2', 3' – при измерении общего тока

Из рис. 5 видно, что погрешность практически не зависит от измерительного тока и напряжения (кривая 3 и 4, полученные при разных измерительных токах, практически совпадают), а в основном зависит от точности измерения фазы (таблица 3). Погрешность 0,42 % достигается при определении фазы с точностью 10^{-10} град, что является практически недостижимой точностью. Для снижения требования к точности измерения можно ввести дополнительную измеряемую величину – ток, входящий в узел 23 (рис. 2). Это позволит использовать описанный выше метод без снижения точности восстановления параметров. В таблице 4 представлены результаты расчета максимальной погрешности определения X_{5_3} при различных значениях измерительных напряжения и тока.

Таблица 4

**Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля ВВГнг (1,5 м)
с истинным значением $X_{5_3} = -1,333 \cdot 10^7$ Ом**

ε , м.з.р	$\delta_{X_{\text{Спол}}}$, %	$\Delta X_{\text{пол}}$, Ом	$\delta_{X_{\text{Спол}}}$, %	$\Delta X_{\text{пол}}$, Ом	$\delta_{X_{\text{Спол}}}$, %	$\Delta X_{\text{пол}}$, Ом	$\delta_{X_{\text{Спол}}}$, %	$\Delta X_{\text{пол}}$, Ом
	$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$, $U = 11В, I = 0,2А$		$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$, $U = 22В, I = 0,2А$		$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$, $U = 22В, I = 0,1А$		$\varepsilon_{f, I_{\text{ист}}} = 10^{-6}$, $\varepsilon_\phi = \text{var}$, $U = 22В, I = 0,1А$	
1e-3	99.999	-149.893	99.995	-600.025	99.984	-2.176e3	-	-
1e-4	99.334	-8.885e4	97.383	-3.49e5	97.364	-3.515e5	-4.016	-1.387e7
1e-5	57.784	-5.629e6	25.141	-9.981e6	26.009	-9.865e6	-0.067	-1.334e7
1e-6	1.266	-1.316e7	0.257	-1.33e7	0.311	-1.329e7	0.311	-1.329e7
1e-7	5.216e-3	-1.333e7	3.8e-5	-1.333e7	6.645e-5	-1.333e7	0.349	-1.329e7

На рис. 6 представлено влияние измерительного напряжения и тока на формирование погрешности X_{5_3} . Расчеты проводились для различных случаев: без измерения тока (кривая 1); при измерении тока, входящего во второй узел (кривые 2', 3'); при измерении тока $I_{5_4} + I_{4_4}$. Из рисунка видно, что для уменьшения погрешности необходимо увеличивать измерительное напряжение, при этом ток оказывает незначительное влияние (таблица 4).

В таблице 5 представлены результаты расчета максимальной погрешности определения сопротивлений кабеля АВВГнг: Z_{4_5} , $Z_{5_5} = Z_{6_5}$.

Таблица 5

**Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля АВВГнг (45 м)
с истинными значениями $Z_{4_5} = 0,01012 + j \cdot 2,44 \cdot 10^{-3}$, $X_{5_5} = -5,952 \cdot 10^5$ Ом**

ε , м.з.р	$\delta_{R_{\text{пол}}}$, %	$R_{\text{пол}}$, Ом	$\delta_{X_{\text{Лпол}}}$, %	$X_{\text{Лпол}}$, Ом	$\delta_{X_{\text{Спол}}}$, %	$X_{\text{Спол}}$, Ом
	$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}$, $U = 22В, I = 0,2А$					
1e-5	0.494	0.0100699753	0.394	2.43039856e-3	22.816	-4.5942897464e5
1e-6	0.049	0.0101149975	0.039	2.439039856e-3	0.33	-5.93276369e5
1e-7	4.943e-3	0.0101194998	3.935e-3	2.4399039856e-3	6.713e-3	-5.9519813514e5

При определении параметров кабеля АПВ подключаются отключенные ранее нагрузки узлов 0, 1, ветвь 23-2 (рис. 7). Необходимо рассмотреть несколько случаев:

а) измеряется ток $\dot{I}_{\text{ист}, 1}$, а ток нагрузки

$$\dot{I}_H = \dot{I}_{H_0} + \frac{\dot{f}_0}{Z_{5_0}} + \frac{\dot{f}_2}{Z_{5_0}} + \dot{I}_{H_1} + \frac{\dot{f}_1}{Z_{5_1}} + \frac{\dot{f}_2}{Z_{5_1}}$$

рассчитывается через измеренные потенциалы $\dot{f}_2$, $\dot{f}_1$, $\dot{f}_0$ и вычисленные ранее значения Z_{5_0} , Z_{5_1} ;

б) рассчитывается ток

$$\dot{I}_{\text{ИСТ.1}} = \dot{I}_{4_5} - \dot{I}_{6_5} - \left(\frac{\dot{f}_{23}}{Z_{5_4}} + \frac{\dot{f}_{22}}{Z_{5_4}} + \dot{I}_{H_4} \right) - \left(\frac{\dot{f}_{23}}{Z_{5_3}} + \frac{\dot{f}_{21}}{Z_{5_3}} + \dot{I}_{H_3} \right)$$

через измеряемый ток $\dot{I}_{4_5} - \dot{I}_{6_5}$, а ток нагрузки рассчитывается аналогично представленному выше;

в) измеряется ток $\dot{I}_{\text{ИСТ.1}}$ и ток нагрузки $\dot{I}_H$;

г) измеряется ток $\dot{I}_{4_5} - \dot{I}_{6_5}$ и ток $\dot{I}_H$.

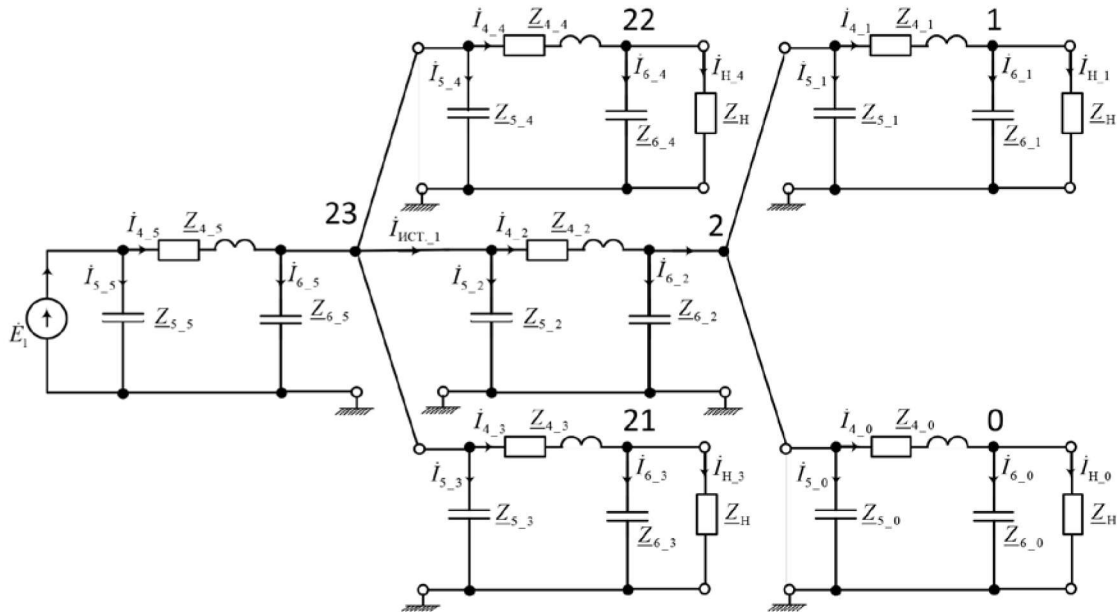


Рис. 7. Схема замещения для определения параметров на участке от 23 узла до 2 и от 2 до 0, и от 2 до 1

В таблице 6 представлены результаты расчета максимальной погрешности параметров Z_{4_2} , $Z_{5_2} = Z_{6_2}$ для кабеля АПВ. Из таблицы видно, что наименьшая погрешность наблюдается при измерении токов $\dot{I}_{\text{ИСТ.1}}$, $\dot{I}_H$. Ее значение можно снизить, увеличивая измерительное напряжение, как это было показано выше.

Таблица 6

Результаты расчета максимальной погрешности для кабеля АПВ (21 м)
с истинными значениями $Z_{4_2} = 0,00184 + j \cdot 1,344 \cdot 10^{-3}$, $X_{5_2} = -1,36057 \cdot 10^6$ Ом

ε, м.з.р	δ _{Рпол} , %	δ _{ХЛпол} , %	δ _{ХСпол} , %	δ _{Рпол} , %	δ _{ХЛпол} , %	δ _{ХСпол} , %
	ε _f = ε _φ = var, U = 11В, I = 0,2А					
	а) изм. $\dot{I}_{\text{ИСТ.1}}$, расч. $\dot{I}_H$			б) изм. $\dot{I}_{4_5} - \dot{I}_{6_5}$, расч. $\dot{I}_H$		
1e-5	0.596	0.714	40.585	0.595	0.713	58.726
1e-6	0.06	0.071	39.105	0.059	0.071	59.618
1e-7	5.959e-3	7.143e-3	40.41	5.948e-3	7.132e-3	60.467
	в) изм. $\dot{I}_{\text{ИСТ.1}}$, изм. $\dot{I}_H$			г) изм. $\dot{I}_{4_5} - \dot{I}_{6_5}$, изм. $\dot{I}_H$		
1e-5	0.596	0.714	60.588	0.597	0.724	49.246
1e-6	0.06	0.071	1.427	0.06	0.079	37.915
1e-7	5.959e-3	7.143e-3	6.702 e-3	6.826e-3	0.015	40.283

Рассмотрим погрешность метода. Для этого проведены расчеты параметров схемы замещения с отключением участка схемы и при его работе на холостом ходу. В первом случае для кабеля ВВГнг 1,5 м (23–22) погрешность в процентах составила: для R – порядка 10^{-10} , для XL – порядка 10^{-13} , для XC – порядка 10^{-7} . Во втором случае: для R – порядка 10^{-6} , для XL – порядка 10^{-4} для XC – порядка 10^{-6} . Погрешность определения параметров кабеля для АВВГнг очень мала, исключение составляет погрешность XC, которая для второго случая составляет 81,84 %, что обусловлено емкостным током холостого хода всей цепи. Исключить эту погрешность можно, отключив часть схемы, находящуюся на холостом ходу. При определении погрешности для кабеля АПВ (участок 23–2) часть схемы (ветви с кабелями ВВГнг между узлами 23 и 2) находилась на холостом ходу. Результаты показали, что погрешности по R и XL – чрезвычайно малы, погрешность XC кабеля при работе оставшейся части схемы на холостом ходу составила 75,35 %.

Считается, что при напряжении 0,4 кВ емкостной ток можно не учитывать. Рассмотрим погрешность определения параметров схемы замещения, возникающую при данном допущении. Параметры определяются как:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{4_0\text{расч}} &= \frac{\dot{f}_2 - \dot{f}_0}{\dot{f}_0 / \underline{Z}_H}, \quad \underline{Z}_{4_1\text{расч}} = \frac{\dot{f}_2 - \dot{f}_1}{\dot{f}_1 / \underline{Z}_H}, \\ \underline{Z}_{4_2\text{расч}} &= \frac{\dot{f}_{23} - \dot{f}_2}{\dot{f}_1 / \underline{Z}_H + \dot{f}_0 / \underline{Z}_H}, \\ \underline{Z}_{4_5\text{расч}} &= \frac{\dot{E}_1 - \dot{f}_{23}}{\dot{f}_{22} / \underline{Z}_H + \dot{f}_{21} / \underline{Z}_H + \dot{f}_1 / \underline{Z}_H + \dot{f}_0 / \underline{Z}_H}. \end{aligned}$$

Расчеты проводились для двух случаев: 1) линии от 23 до 2 узла отключены; 2) линии подключены и находятся на холостом ходу. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7

**Результаты расчета максимальной погрешности для кабелей на всех участках
без учета емкостного тока**

ε , м.з.р.	$\underline{Z}_{4_0}$		$\underline{Z}_{4_1}$		$\underline{Z}_{4_2}$		$\underline{Z}_{4_5}$	
	δ_R , %	δX_L , %	δ_R , %	δX_L , %	δ_R , %	δX_L , %	δ_R , %	δX_L , %
	$\varepsilon_f = \varepsilon_\phi = \text{var}, U = 11\text{В}, I = 0,2\text{А}$							
	Линии подключены и находятся на холостом ходу							
1e-5	3.647	14.545	0.91	3.635	-0.604	-5.147	0.034	0.171
1e-6	0.364	1.454	0.09	0.362	-0.068	-0.646	2.504e-3	-6.507e-3
1e-7	0.036	0.145	7.47e-3	0.035	-0.014	-0.196	-6.761e-4	-0.024
	Линии отключены							
1e-5	3.647	14.545	0.91	3.635	-0.598	-5.103	0.035	0.177
1e-6	0.364	1.454	0.09	0.362	-0.061	-0.603	3.388e-3	-3.181e-4
1e-7	0.036	0.145	7.47e-3	0.035	-7.397e-3	-0.153	2.08e-4	-0.018

Из таблицы следует, что погрешности в обоих случаях отличаются незначительно. Следовательно, емкостной ток оказывает несущественное влияние на погрешность определяемых параметров.

Таким образом, был проведен анализ погрешностей, обусловленных выбранным методом восстановления параметров схемы электроснабжения жилого дома, а также точностью измерений токов и напряжений. При исследовании влияния точности измерений токов и напряжений установлено, что восстановление значения активного сопротивления кабеля ВВГнг можно проводить, измеряя только

модули соответствующих потенциалов. Рассмотрено влияние измерительного напряжения и тока на формирование погрешности активного и индуктивных сопротивлений кабеля ВВГнг. Установлено, что при увеличении тока погрешности уменьшаются. Погрешность емкостного сопротивления зависит только от точности измерения фазы, к которой предъявляются недостижимо высокие требования. Введение еще одного измеряемого тока позволило в значительной степени снизить эти требования. Установлено, что точность измерения 10^{-6} дает погрешность для всех рассматриваемых участков не более 1,5 %. На примере показано, что при измерениях под нагрузкой погрешность метода в процентах для кабеля ВВГнг с учетом емкостного тока не превышает 10^{-7} , без его учета – не превышает 10^{-4} . Погрешности для кабелей АВВГнг и АПВ также очень малы, за исключением погрешности ХС, которая для второго случая для АВВГнг составила 81,84 %, а для АПВ – 75,35 %.

Литература

1. Бартоломей П. И., Лебедев Е. М., Котова Е. Н. Способы повышения достоверности результатов процедуры оценивания состояния энергосистем // Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение: сборник докладов 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГМК, 2015. С. 53–55.
2. Бердин А. С., Коваленко П. Ю. Определение параметров схемы замещения ЛЭП по векторным измерениям // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. № 71. С. 29.
3. Бердин А. С., Коваленко П. Ю., Плесняев Е. А. Влияние погрешности измерений РМУ при определении параметров схемы замещения ЛЭП // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2012. № 66. С. 29–38.
4. Жуков М. В., Зеленский Е. Г., Кононов Ю. Г. Локализация коммерческих потерь электроэнергии в сетях 6–10 кВ методами оценивания состояния // Вестник СКФУ. 2013. № 1 (34). С. 132–137.
5. Каменский М., Холодный С. Силовые кабели 1-10 кВ с пластмассовой изоляцией. Расчет активного и индуктивного сопротивлений // Новости Электротехники. 2005. № 4(34). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/15.php> (дата обращения: 04.04.2016).
6. Кононов Ю. Г., Жуков М. В. Расчет режимов разомкнутых электрических сетей 0,38 кВ по данным измерений мгновенных значений токов и напряжений // Вестник СКФУ. 2010. № 3. С. 99–105.
7. Кононов Ю. Г., Пейзель В. М. Учет емкости линий электропередач в расчетах энергораспределения и потерь энергии в электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки 2008. № 3. С. 63–69.
8. Кононов Ю. Г., Степанова А. А. Диагностика состояния ЛЭП на основе идентификации удельных электрических параметров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 56–57.
9. Ларина Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 368 с.
10. Пейзель В. М., Степанов А. С. Расчет технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ // Электричество. 2002. № 3. С. 10.
11. Провода установочные. URL: http://kabelmag2012.narod.ru/Kab_ustanovS.html (дата обращения: 04.04.2016).
12. Спецификация. Кабели силовые с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией, ЗАО «Завод «Юж-кабель» URL: http://www.elektal.com.ua/upload/iblock/e74/kabeli_silovye_s_bumazhnoy_propitannoy_i_plastmassovoy_izolyatsiey.pdf (дата обращения: 04.04.2016).
13. Степанов А. С., Маругин В. И., Пейзель В. М. Расчёты режимов распределительных электрических сетей в условиях неопределённости исходной информации // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 40–42.
14. Суворов А. А. Адаптивная идентификация параметров элементов электрической сети для задач оперативного и противоаварийного управления: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2003. 205 с.
15. Шабалин С. А. Прикладная метрология в вопросах и ответах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во стандартов, 1990. 192 с.