

Верификация параметров электросетевого оборудования с помощью системы мониторинга переходных режимов

Р.Н. Николаев
ОАО «СО ЕЭС», Россия
nikolaevrn@yahoo.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вверификация параметров линий электропередачи, зависимость изменения параметров линий электропередачи от температуры окружающего воздуха и токовой загрузки линии.

1. ВВЕДЕНИЕ

В единой электроэнергетической системе России, начиная с 2005 года происходит поэтапное внедрение системы мониторинга переходных режимов. Основными элементами системы являются специальные измерительные приборы, которые позволяют с достаточной точностью измерять параметры электроэнергетического режима работы с привязкой каждого измерения с помощью современных навигационных спутниковых систем (например, GPS или "ГЛОНАСС") к единому времени. Высокая точность синхронизации дает возможность в различных географических точках энергосистемы получить данные о режиме работы энергосистемы при полностью синхронном измерении параметров электроэнергетического режима.

В статье рассматривается один из возможных примеров применения данных системы мониторинга переходных режимов для верификации параметров электросетевого оборудования расчетной модели. Для решения поставленной задачи была разработана методика определения параметров П-образной схемы замещения линии электропередач. В качестве исходной информации для данной методики используются данные полученные от системы мониторинга переходных режимов, которая установлена на объектах по концам линии.

2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассмотрим линию электропередачи между двумя подстанциями. Для указанной линии можно составить П-образную схему замещения (см. рис.1). В данной схеме замещения параметры линии электропередачи представляют собой сосредоточенные элементы: активное и реактивное сопротивления линии ($R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$), активную и емкостную проводимости линии на землю ($G_{\text{л}}$ и $B_{\text{л}}$).

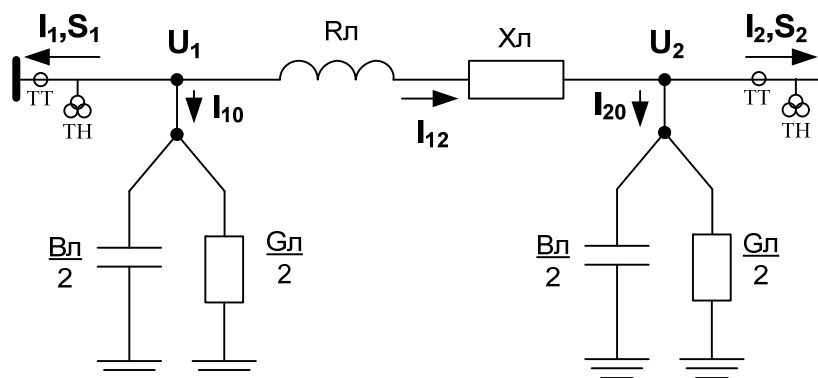


Рис. 1. П-образная схема замещения линии электропередач

В исходной схеме замещения обозначим направление мощности (S_1 и S_2) «к шинам» с учетом того, что данное направление означает положительное значение мощности. Запишем формулы для определения полной мощности с двух сторон линии (S_1 и S_2), через неизвестные параметры линии (R_L , X_L , G_L , B_L), и известные параметры: модуля двух напряжений по концам линии электропередачи ($U_{1\phi}$ и $U_{2\phi}$) и угла сдвига (δ_{21}) между напряжениями $U_{1\phi}$ и $U_{2\phi}$.

Полная мощность S_1 определяется следующим выражением

$$\dot{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{1\phi} \cdot \dot{\mathcal{E}}_1 = 3 \cdot \dot{U}_{1\phi} \cdot \dot{\mathcal{E}}_1,$$

где $\dot{U}_{1\phi}$ - фазное напряжение (фаза А), которое для удобства совместим с вещественной осью ($\dot{U}_{1\phi} = U_{1\phi}$);

$\dot{\mathcal{E}}_1$ - сопряженный ток.

Рассматриваемый ток $\dot{\mathcal{E}}_1$ можно переписать с учетом первого закона Кирхгофа как сумма двух токов: $\dot{\mathcal{E}}_1 = -(\dot{\mathcal{E}}_{12} + \dot{\mathcal{E}}_{10})$, а ток $\dot{\mathcal{E}}_{12}$ и $\dot{\mathcal{E}}_{10}$ определяется по 2 закону Кирхгофа по следующим формулам:

$$\dot{\mathcal{E}}_{12} = \frac{(U_{1\phi} - \mathcal{E}_{2\phi})}{\dot{\mathcal{Z}}_L},$$

$$\text{где } \dot{\mathcal{Z}}_L = R_L - j \cdot X_L.$$

$$\dot{\mathcal{E}}_{10} = U_{1\phi} \cdot \hat{Y}_1,$$

$$\text{где } \hat{Y}_1 = \frac{G_L}{2} - j \cdot \frac{B_L}{2}$$

С учетом записанных формул, выражение для мощности S_1 записывается в следующем виде:

$$\dot{S}_1 = -3 \cdot U_{1\phi} \cdot \left(\frac{U_{1\phi} - \mathcal{E}_{2\phi}}{R_L - j \cdot X_L} + U_{1\phi} \cdot \left(\frac{G_L}{2} - j \cdot \frac{B_L}{2} \right) \right)$$

Рассмотрим векторную диаграмму напряжения по концам линии электропередач (см. рис.2). Вектора напряжений ($U_{1\phi}$ и $U_{2\phi}$) относительно оси отсчета записываются через абсолютный угол δ и модуль напряжения:

$$U_{1\phi} = U_{1\phi} \cdot e^{j \cdot \delta_1} = U_{1\phi} \cdot (\cos(\delta_1) + j \cdot \sin(\delta_1))$$

$$U_{2\phi} = U_{2\phi} \cdot e^{j \cdot \delta_2} = U_{2\phi} \cdot (\cos(\delta_2) + j \cdot \sin(\delta_2))$$

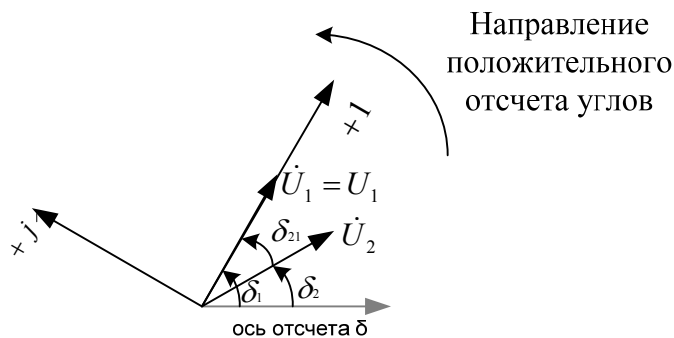


Рис.2 Векторная диаграмма напряжения

Введем новую переменную – взаимный угол δ_{21} между вектором напряжения U_2 и U_1 , который вычисляется из абсолютных углов (δ_1 и δ_2) по следующему выражению:

$$\delta_{21} = \delta_1 - \delta_2.$$

Положительное направление угла δ принимается при обходе против часовой стрелки от вектора напряжения U_2 к вектору напряжения U_1 .

С учетом того, что вектор напряжения $\dot{U}_{1\phi}$ мы совместили с вещественной осью, перепишем выражение для определения вектора напряжения U_2 через взаимный угол δ_{21} :

$$U_2 = U_2 \cdot e^{-j\delta_{21}} = U_2 \cdot (\cos(-\delta_{21}) + j \cdot \sin(-\delta_{21})),$$

где δ_{21} - угол сдвига между вектором напряжения U_2 и U_1 .

Соответственно сопряженный вектор напряжения определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\delta} = U_2 \cdot (\cos(\delta) + j \cdot \sin(\delta)).$$

В результате выражение для определения активной и реактивной мощности (P_1 и Q_1) перепишется в следующем виде:

$$P_1 = -\frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} + \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot U_{2\phi} \cdot \cos(\delta)}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} - \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot U_{2\phi} \cdot \sin(\delta)}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} - 3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot \frac{G_{\mathcal{L}}}{2}$$

$$Q_1 = -\frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} + \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot U_{2\phi} \cdot \cos(\delta)}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} + \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot U_{2\phi} \cdot \sin(\delta)}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} + 3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot \frac{B_{\mathcal{L}}}{2}$$

Аналогичным образом можно получить выражение для определения полной мощности S_2 , а также ее слагаемых: активной и реактивной мощностей (P_2 и Q_2). Полная мощность S_2 определяется следующим выражением

$$\dot{S}_2 = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{2\mathcal{L}} \cdot \mathcal{E}_2 = 3 \cdot \dot{U}_{2\phi} \cdot \mathcal{E}_2,$$

Рассматриваемый ток $\mathcal{E}_2$ можно переписать с учетом первого закона Кирхгофа как сумма двух токов: $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_{12} - \mathcal{E}_{20}$, а ток $\mathcal{E}_{12}$ и $\mathcal{E}_{20}$ определяется по 2 закону Кирхгофа по следующим формулам:

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{(U_{1\phi} - \mathcal{U}_{2\phi})}{\mathcal{Z}_{\mathcal{L}}},$$

$$\mathcal{E}_{20} = \hat{U}_{2\phi} \cdot \hat{Y}_2,$$

$$\text{где } \mathcal{Z}_{\mathcal{L}} = R_{\mathcal{L}} - j \cdot X_{\mathcal{L}}.$$

$$\text{где } \hat{Y}_2 = \frac{G_{\mathcal{L}}}{2} - j \cdot \frac{B_{\mathcal{L}}}{2}$$

С учетом записанных формул для определения тока, выражение для мощности S_2 записывается в следующем виде:

$$\dot{S}_2 = 3 \cdot \dot{U}_{2\phi} \cdot \left(\frac{U_{1\phi} - \mathcal{U}_{2\phi}}{R_{\mathcal{L}} - j \cdot X_{\mathcal{L}}} - \hat{U}_{2\phi} \cdot \left(\frac{G_{\mathcal{L}}}{2} - j \cdot \frac{B_{\mathcal{L}}}{2} \right) \right)$$

В связи с ранее принятыми обозначениями, сопряженный вектор напряжения определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\delta} = U_2 \cdot (\cos(\delta) + j \cdot \sin(\delta)).$$

В результате выражение для определения активной и реактивной мощностей (P_2 и Q_2): перепишется в следующем виде:

$$P_2 = \frac{3 \cdot U_{2\phi} \cdot U_{1\phi}}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} \cdot \cos(\delta) + \frac{3 \cdot U_{2\phi} \cdot U_{1\phi}}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} \cdot \sin(\delta) - \frac{3 \cdot U_{2\phi}^2}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} - 3 \cdot U_{2\phi}^2 \cdot \frac{G_{\mathcal{L}}}{2}$$

$$Q_2 = -\frac{3 \cdot U_{2\phi} \cdot U_{1\phi}}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot R_{\mathcal{L}} \cdot \sin(\delta) + \frac{3 \cdot U_{2\phi} \cdot U_{1\phi}}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} \cdot \cos(\delta) - \frac{3 \cdot U_{2\phi}^2}{R_{\mathcal{L}}^2 + X_{\mathcal{L}}^2} \cdot X_{\mathcal{L}} + 3 \cdot U_{2\phi}^2 \cdot \frac{B_{\mathcal{L}}}{2}$$

По результатам выполненных преобразований была получена система нелинейных уравнений, состоящая из 4 неизвестных параметров линии электропередачи ($R_{\mathcal{L}}$, $X_{\mathcal{L}}$, $G_{\mathcal{L}}$, $B_{\mathcal{L}}$).

$$F(x) = \begin{cases} f_1(\{P_1, U_{2\phi}, U_{1\phi}, \delta\}, \{R_{\text{Л}}, X_{\text{Л}}, G_{\text{Л}}\}) = 0 \\ f_2(\{Q_1, U_{2\phi}, U_{1\phi}, \delta\}, \{R_{\text{Л}}, X_{\text{Л}}, B_{\text{Л}}\}) = 0 \\ f_3(\{P_2, U_{2\phi}, U_{1\phi}, \delta\}, \{R_{\text{Л}}, X_{\text{Л}}, G_{\text{Л}}\}) = 0 \\ f_4(\{Q_2, U_{2\phi}, U_{1\phi}, \delta\}, \{R_{\text{Л}}, X_{\text{Л}}, B_{\text{Л}}\}) = 0 \end{cases}$$

Для решения данной системы нелинейных алгебраических уравнений используется метод Ньютона. Данный метод широко известен, поэтому в статье рассмотрим только алгоритм расчета, который применим к ранее полученной системе нелинейных алгебраических уравнений $F(R, X, G, B)$.

В соответствии с методом Ньютона, сначала определяется матрица Якоби, которая составляется из частных производных функции. В данном случае матрица Якоби выражается в следующем виде:

$$F'(x) = J(R, X, G, B) = \begin{pmatrix} \frac{df_1}{dR_{\text{Л}}} & \frac{df_1}{dX_{\text{Л}}} & \frac{df_1}{dG_{\text{Л}}} & \frac{df_1}{dB_{\text{Л}}} \\ \frac{df_2}{dR_{\text{Л}}} & \frac{df_2}{dX_{\text{Л}}} & \frac{df_2}{dG_{\text{Л}}} & \frac{df_2}{dB_{\text{Л}}} \\ \frac{df_3}{dR_{\text{Л}}} & \frac{df_3}{dX_{\text{Л}}} & \frac{df_3}{dG_{\text{Л}}} & \frac{df_3}{dB_{\text{Л}}} \\ \frac{df_4}{dR_{\text{Л}}} & \frac{df_4}{dX_{\text{Л}}} & \frac{df_4}{dG_{\text{Л}}} & \frac{df_4}{dB_{\text{Л}}} \end{pmatrix}$$

В дальнейшем производится итерационный расчет, в результате которого определяется значение неизвестных параметров (R, X, G, B) на шаге $(k+1)$ по формуле:

$$x^{k+1} = x^k - J(x^k)^{-1} \cdot F(x^k),$$

где x^{k+1} - вектор столбец неизвестных параметров на шаге $(k+1)$;

x^k - вектор столбец неизвестных параметров на текущем шаге расчета (k) ;

$J(x^k)$ - Якобиан функции $F(x)$ на текущем шаге расчета (k) , которая представляет собой матрицу значений;

$F(x^k)$ - значение функции на текущем шаге расчета (k) .

Расчет производится при заданном начальном приближении параметров линии электропередач. В качестве первого приближения можно взять расчетные значения, полученные с помощью погонных сопротивлений линии взятыми из соответствующего справочника по проектированию электрических сетей на температуру 20°C .

Итерационный расчет выполняется до тех пока не выполнено условие остановки, в качестве которого можно взять $|x^{k+1} - x^k| < \xi$, где ξ характеризуется заданной величиной погрешности расчета. Если на $(k+1)$ -шаге расчета выполняется вышеописанное условие, то полученные значения $R_{\text{Л}}, X_{\text{Л}}, G_{\text{Л}}, B_{\text{Л}}$ на данном шаге расчета соответствуют реальным параметрам П-образной схемы замещения линии электропередачи для определенного режима работы, который характеризуется определенной частотой, температурой окружающего воздуха и токовой нагрузкой линии.

Следует отметить, что полученная выше методика расчета параметров линий для П-образной схемы замещения была успешно протестирована с помощью программного комплекса Rastr. Все параметры схемы замещения линии были с достаточной точностью получены при заданных значениях: модуля двух напряжений по концам линии электропередачи ($U_{1\phi}$ и $U_{2\phi}$) и угла сдвига (δ_{21}) между напряжениями $U_{1\phi}$ и $U_{2\phi}$ и величины активной и реактивной мощностей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВАНИИ РЕАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве объекта исследований была выбрана одна из линий электропередачи 750 кВ, которая расположена на территории России. Линия характеризуется следующими параметрами: длина линии составляет 124 км, провод марки 5*АС 300/39, расположение фаз горизонтальное. Исследуемая линия на всей протяженности трассы не проходит в одном коридоре с другими линиями электропередачи, в результате этого отсутствует необходимость учета явления взаимоиндукции между линиями. В случае необходимости учета явления взаимоиндукции необходимо внести соответствующие изменения в представленный выше алгоритм определения параметров линий (в настоящей статье данные изменения не рассматриваются).

В качестве первого исследования, которое выполнено в рамках данной работы, представлено изменение экспериментально полученных параметров линий для П-образной схемы замещения на сравнительно малом промежутке времени (10 минут). По результатам исследования были построены зависимости изменения активного сопротивления (рис.3), индуктивного сопротивления (рис.4) и емкостной проводимости (рис.5) от времени. По результатам эксперимента видно, что все параметры изменяются плавно и без резких колебаний. В результате данного исследования можно сделать вывод об относительном постоянстве параметров линии (активного и индуктивного сопротивления и емкостной проводимости) в течение сравнительно малого промежутка времени. Следует отметить, что небольшие изменения экспериментально полученных параметров П-образной схемы замещения на сравнительно малом промежутке времени вызваны колебаниями токовой загрузки линии.

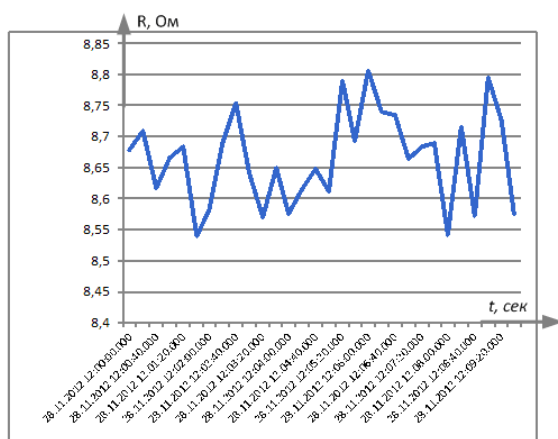


Рис. 3. Изменение активного сопротивления линии (Ом) в течение времени 10 минут при температуре окружающего воздуха 0 градусов Цельсия

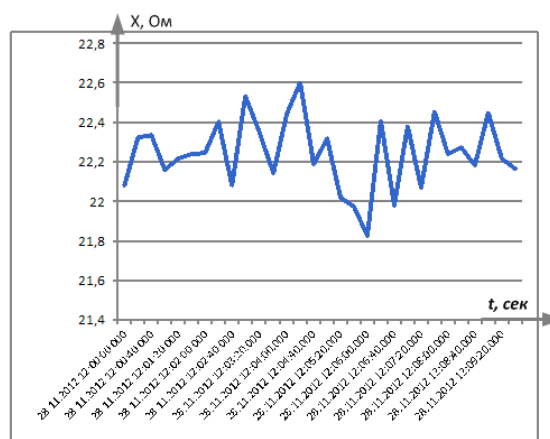


Рис.4. Изменение индуктивного сопротивления (Ом) в течение времени 10 минут при температуре окружающего воздуха 0 градусов Цельсия

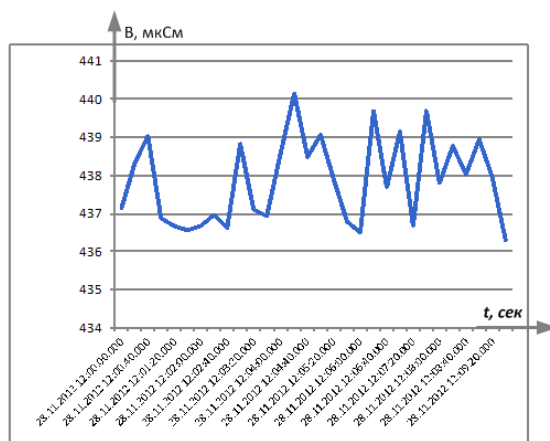


Рис.5. Изменение емкостной проводимости на землю (мкСм) в течение времени 10 минут при температуре окружающего воздуха 0 градусов Цельсия

Далее, рассмотрим изменение активного и индуктивного сопротивления и емкостной проводимости линии электропередачи в течение длительного времени (48 часов) при изменении как температуры окружающего воздуха, так и токовой загрузки линии. По результатам исследования были построены зависимости изменения активного и индуктивного сопротивления (см. рис.6) с учетом изменения температуры окружающего воздуха в течение 48 часов, а также изменение активного сопротивления (рис.7), индуктивного сопротивления (рис.8) и емкостной проводимости (рис.9) с учетом изменения токовой загрузки в течение 48 часов.

По результатам эксперимента (см. рис. 6) было получено, что изменение температуры окружающего воздуха (колебание температуры на 10 градусов) не привело к значительному изменению активного и индуктивного сопротивлений. Изменение токовой загрузки линии (см. рис. 7, рис.8 и рис.9 приводит к значительному изменению параметров П-образной схемы замещения линии. Так например, изменение токовой загрузки линии с 1250 А до 1100 А приводит к увеличению активного сопротивления от значения 5,6 Ом до значения 7,5 Ом, индуктивное сопротивление уменьшилось от значения 24,5 Ом до значения 22 Ом, а емкостная проводимость увеличилась от значения 415 мкСм до значения 427 мкСм.

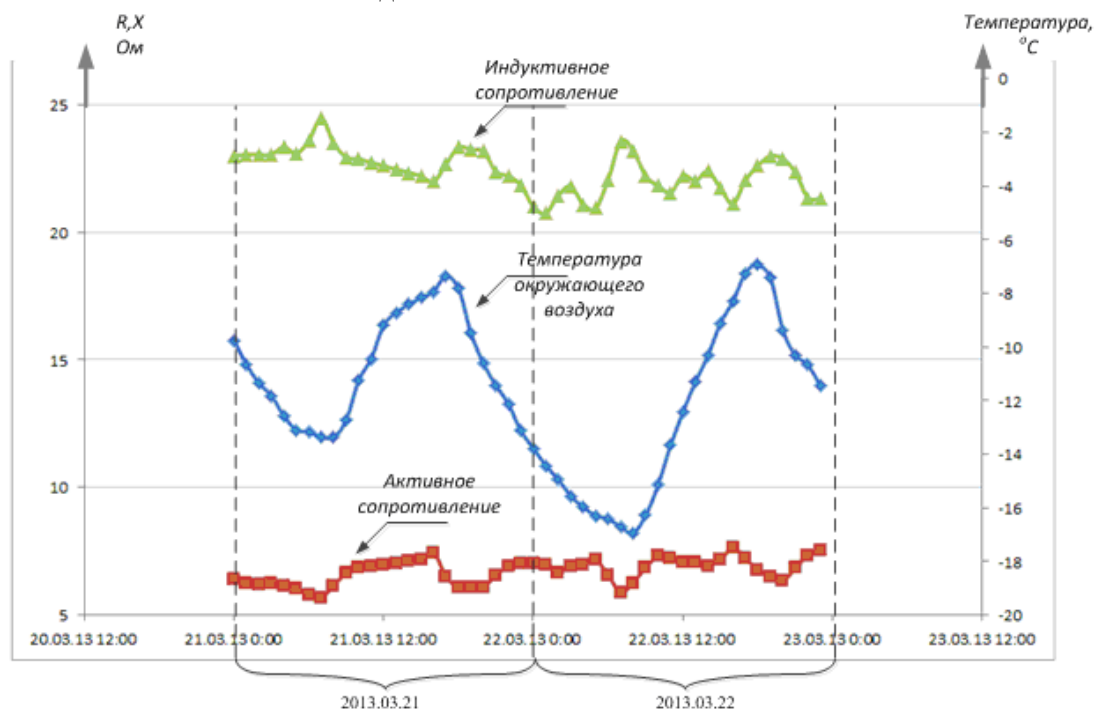


Рис. 6. Изменение активного и индуктивного сопротивления линии (Ом), а также изменение температуры окружающего воздуха в течение 48 часов.

Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.

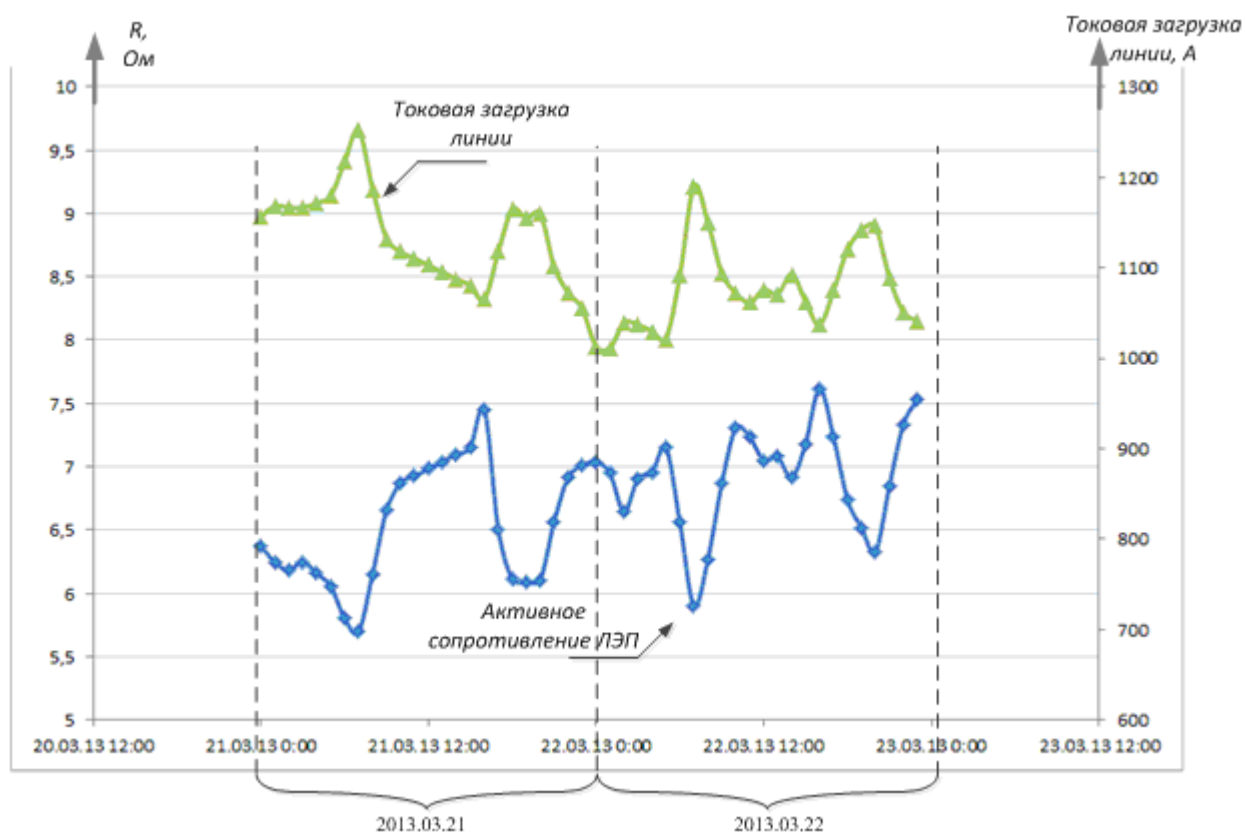


Рис. 7. Изменение активного сопротивления линии (Ом), а также токовой загрузки линии в течение 48 часов.

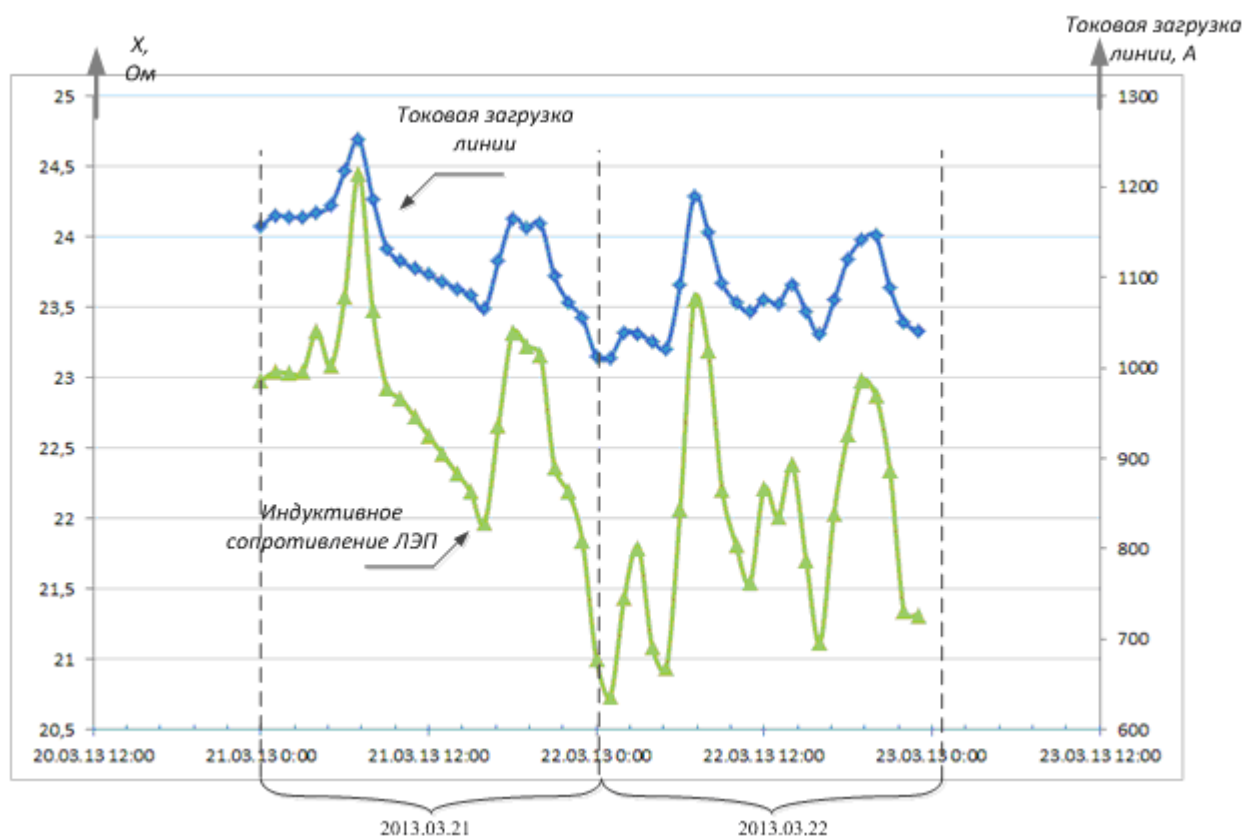


Рис. 8. Изменение индуктивного сопротивления линии (Ом), а также токовой загрузки линии в течение 48 часов.

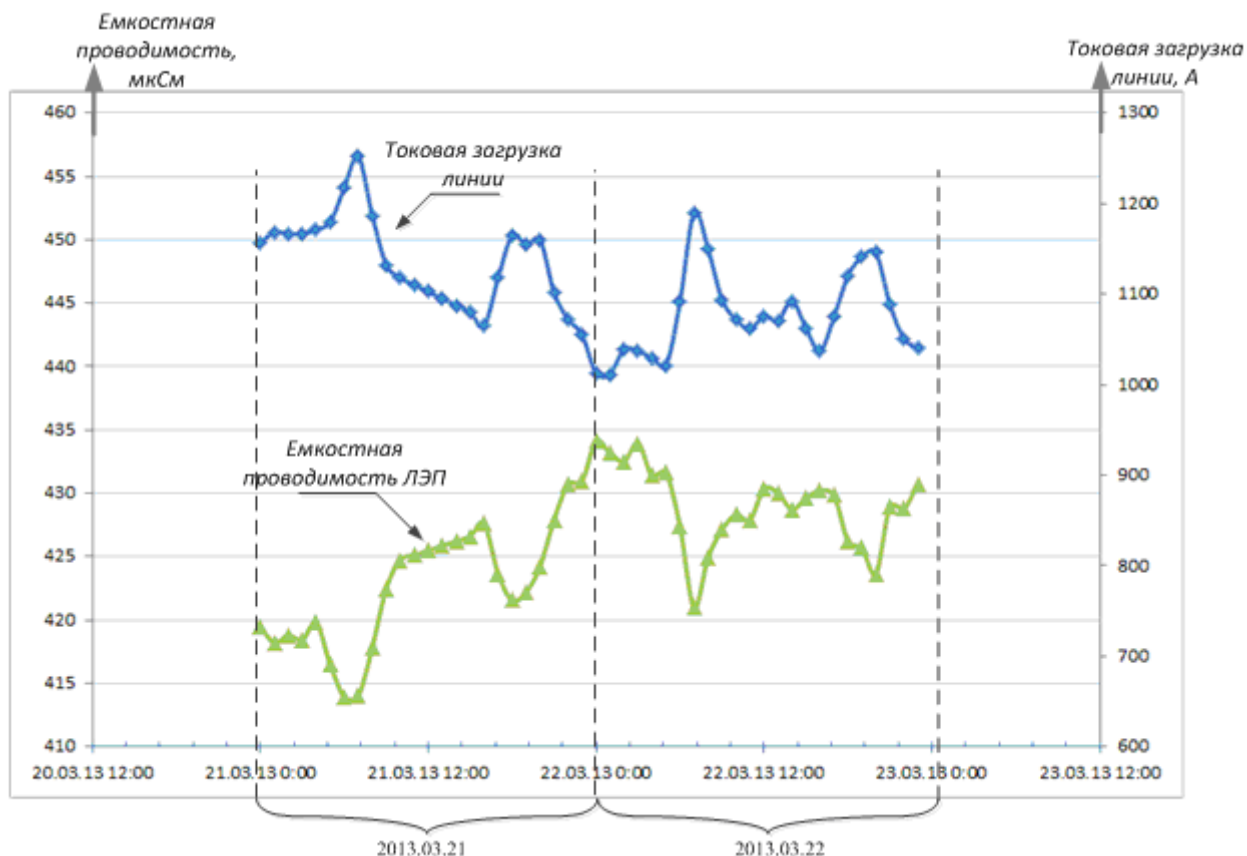


Рис. 9. Изменение емкостной проводимости линии (мкСм), а также токовой загрузки линии в течение 48 часов.

Также следует заметить, что по результатам исследований были получены параметры П-образной схемы замещения линии отличные от сопротивлений линии, рассчитанных по погонным сопротивлениям, взятыми из соответствующего справочника по проектированию электрических сетей на температуру 20°C (см. табл. 1). Такое различие в значениях параметров линии вызвано многими факторами: температуры окружающего воздуха, токовой загрузки линии, потерями на корону и т.д. Таким образом, внедрение и использование системы мониторинга переходных режимов на объектах электроэнергетики позволит определить реальные параметры схемы замещения в любой момент времени.

Табл.1. Сводная таблица по результатам сравнения параметров П-образной схемы замещения.

Параметр П-образной схемы замещения	Расчетные сопротивления на основании справочных данных	Экспериментально полученные значения (усредненное значение за 48 часов)	Несоответствие значений в процентном соотношении
Активное сопротивление, Ом	2,77	6,7	241%
Индуктивное сопротивление, Ом	35,34	22,39	63%
Емкостная проводимость, мкСм	490	425,8	86%

4. ВЫВОДЫ

В работе представлена методика определения параметров П-образной схемы замещения линии электропередачи (активного и индуктивного сопротивления, а также активной и емкостной проводимостей линии на землю). В качестве исходной информации в методике используются данные, полученные от системы мониторинга переходных режимов, которая установлена на объектах по концам линии. На основании результатов расчетов по предложенной методике были построены экспериментально полученные зависимости изменения активного сопротивления, индуктивного сопротивления и емкостной проводимости на сравнительно малом промежутке времени (10 минут) и в течение длительного времени (48 часов). По результатам исследования на малом промежутке времени был сделан вывод об относительном постоянстве измеряемых величин (активного и индуктивного сопротивления и емкостной проводимости). По результатам исследования в течение длительного времени была в явном виде получена зависимость изменения параметров П-образной схемы замещения от токовой загрузки линии. Следует отметить, что полученные параметры П-образной схемы замещения существенно отличаются от расчетных сопротивлений линии, полученных на основании справочных данных, так как зависят от многих факторов: температуры окружающего воздуха, токовой загрузки линии и т.д. Применение системы мониторинга переходных режимов на объектах электроэнергетики позволит однозначно определить параметры схемы замещения линии в любой момент времени.

В заключение стоит обратить внимание на то, что для систематизации и накопления информации о параметрах линий кроме измерений параметров об электроэнергетическом режиме, дополнительно требуется информация о температуре окружающего воздуха, атмосферном давлении и влажности.

5. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Идельчик «Электрические системы и сети» // Москва, Энергоатомиздат, - 1989г. - 592 с.
2. И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро “Справочник по проектированию электрических сетей” // Москва, НЦ Энас, - 2006г. - 352с.