

УДК 621.316.732.3

ББК 31.221

Ю.А. ДЕМЕНТИЙ, К.П. НИКОЛАЕВ, Р.Р. ГАЛИМЗЯНОВ

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА В БАЗИСЕ МГНОВЕННЫХ ВЕЛИЧИН

Ключевые слова: ДГР, определение индуктивности реактора, мгновенный базис, анализ влияния шумов.

В распределительных сетях 6–35 кВ имеют место однофазные замыкания на землю. Одним из устройств, предназначенных для устранения однофазных замыканий на землю, является дугогасящий реактор. Индуктивность реактора настраивается в резонанс с ёмкостью сети, результатом чего является подавление ёмкостной составляющей тока.

Предложен метод определения индуктивности реактора, использующий мгновенные значения тока и напряжения. Получено дифференциальное уравнение, связывающее измеряемые величины. Уравнение записано для двух моментов времени, составлена система, из которой получено выражение для индуктивности реактора. Проведена численная аппроксимация производных с помощью несимметричной разностной производной. Составлена математическая модель реактора. Проведён анализ влияния коэффициента несимметрии и основных параметров рассматриваемых переходных процессов на точность определения индуктивности реактора.

Рассмотрено влияние шума на точность определения индуктивности реактора. Проанализировано влияние основных параметров рассматриваемых переходных процессов на устойчивость метода к шуму. Построены доверительные интервалы рассчитываемой индуктивности для разных значений величины относительного шума.

Предложен модернизированный метод определения расстройки, основанный на решении переопределённой системы уравнений. Проанализирована устойчивость модернизированного метода к влиянию шума. Модернизированный метод показал большую устойчивость к влиянию шума в сравнении с методом, основанным на решении системы, состоящей из уравнений, записанных для двух моментов времени.

Описывается испытание методов на реальной осциллограмме тока и напряжения. Предложены рекомендации по практическому применению разработанных методов. Модернизированный метод целесообразно применять, когда наблюдается высокое влияние шума и нет ограничений на вычислительную мощность устройств, метод вычисления индуктивности по двум отсчётам следует применять во всех остальных случаях.

Введение. В распределительных сетях 6–35 кВ имеют место однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые негативно сказываются на параметрах сети. Известно, что ток ОЗЗ представляет собой сумму активной и ёмкостной составляющих. Одними из устройств, предназначенных для устранения ОЗЗ, являются дугогасящие реакторы (ДГР). Изменяемая индуктивность реактора, подключенного в нейтраль сети, настраивается в резонанс с ёмкостью сети, результатом чего является подавление ёмкостной составляющей тока [1, 8, 9].

Интеллектуальное устройство управления автоматикой ДГР, описанное в [4], использует все возможные данные о реакторе и контуре нулевой последовательности в целом. Метод, представленный в данной статье, может быть применён для измерения индуктивности реактора для целей управления автоматикой ДГР посредством данного устройства.

Выражение для индуктивности. Наиболее логичным выглядит вывод аналитической формулы вычисления индуктивности. Так, используя схему замещения реактора и мгновенные значения тока и напряжения реактора, можно определить его индуктивности. Метод, а также результаты работы и их анализ были представлены в докладе [3].

Измерение мгновенных значений напряжения и тока реактора проводится с помощью вольтметра, подключенного ко вторичной обмотке, и трансформатора тока, встроенного в первичную обмотку. Схема замещения реактора изображена на рис. 1.

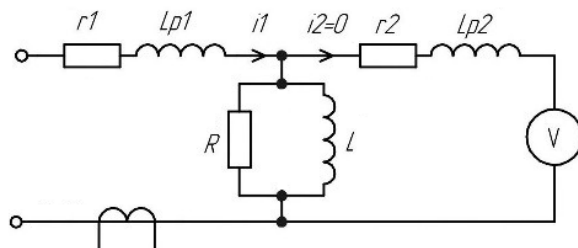


Рис. 1. Схема замещения реактора с подключенным вольтметром:

r_1 – активное сопротивление первичной обмотки; L_{p1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки; r_2 – активное сопротивление вторичной (сигнальной) обмотки; L_{p2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки; R – эквивалентное сопротивление потерь (потери на намагничивание); L – индуктивность намагничивания

Вследствие высокого входного сопротивления вольтметра можно принять следующее допущение: ток вторичной обмотки равен нулю. Принятие данного допущения позволяет определить, что измеряемые ток и напряжение связаны дифференциальным уравнением:

$$i'(t) = \frac{u'(t)}{R} + \frac{u(t)}{L}. \quad (1)$$

Неизвестными параметрами реактора в уравнении (1) являются сопротивление потерь R и индуктивность намагничивания L . Параметры реактора могут быть определены, если записать уравнение (1) для двух моментов времени и составить систему уравнений:

$$\begin{cases} i'(t_1) = \frac{u'(t_1)}{R} + \frac{u(t_1)}{L}; \\ i'(t_2) = \frac{u'(t_2)}{R} + \frac{u(t_2)}{L}, \end{cases} \quad (2)$$

где $i'(t_1)$, $u'(t_1)$, $u(t_1)$ – значения производной тока, производной напряжения и напряжения в первый момент времени; $i'(t_2)$, $u'(t_2)$, $u(t_2)$ – значения производной тока, производной напряжения и напряжения во второй момент времени.

Из решения системы (2) получено выражение для определения индуктивности реактора:

$$L = \frac{u(t_1)u'(t_2) - u'(t_1)u(t_2)}{i'(t_1)u'(t_2) - i'(t_2)u'(t_1)}. \quad (3)$$

В предлагаемом методе не предполагается непосредственное измерение значений производных тока и напряжения реактора. Проводится их численная аппроксимация методом конечных разностей. Используется несимметричная разность [7], в которой коэффициент k является ее степенью:

$$f'(t) \approx \frac{f(t+h)(1-k) + f(t)(2k-1) - f(t-h)k}{h}, \quad (4)$$

где k – степень несимметрии, h – шаг дискретизации.

Анализ ошибок. Анализ ошибок проводится на основе математической модели. Поскольку наиболее перспективным видится использование данного метода в автоматике ДГР совместно с импульсным методом измерения расстройки компенсации [6], выражения для измеряемых тока и напряжения переходных процессов, генерируемых импульсным методом, выглядят следующим образом:

$$u = U \sin(w_{\text{св}}t + \varphi) e^{-\delta t};$$

$$i = \frac{U}{R} \sin(w_{\text{св}}t + \varphi) e^{-\delta t} + \frac{U}{L} \left(-\frac{\delta \sin(w_{\text{св}}t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + w_{\text{св}}^2 e^{\delta t}} - \frac{w_{\text{св}} \cos(w_{\text{св}}t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + w_{\text{св}}^2 e^{\delta t}} \right),$$

где U – амплитудное значение напряжения; $w_{\text{св}}$ – частота свободных колебаний; φ – начальная фаза колебаний; δ – коэффициент затухания.

Изменяемым параметром при измерении индуктивности реактора предлагаемым методом является коэффициент несимметрии k . Далее приведены зависимости относительной ошибки определения индуктивности от коэффициента несимметрии.

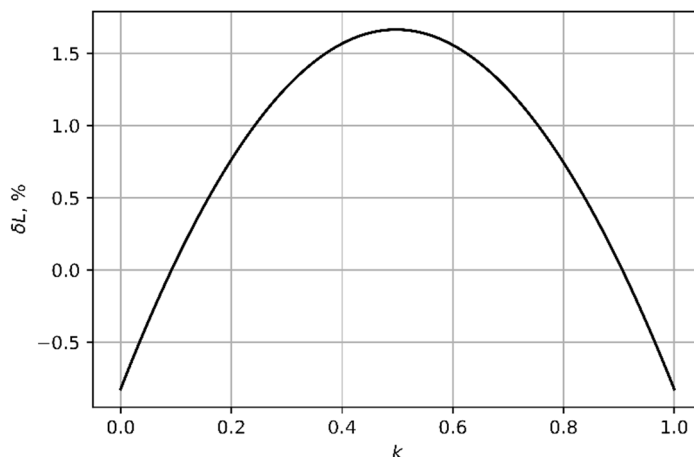


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки определения L от k , $L=2,5$ Гн

Из рис. 2 видно, что коэффициент несимметрии k влияет на ошибку определения индуктивности. Можно отметить, что существуют два значения коэффициента несимметрии, при которых достигается нулевая ошибка определения индуктивности реактора.

На рис. 3 и 4 приведены аналогичные зависимости при разных значениях частоты свободных колебаний $f_{св}$ и коэффициента затухания δ генерируемых переходных процессов.

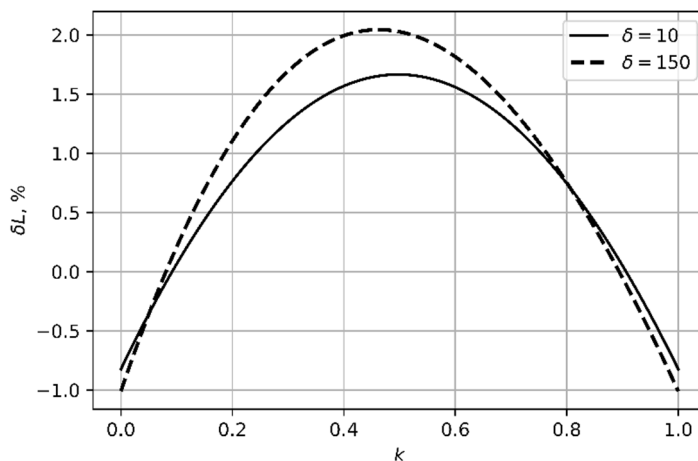


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки определения L от k при разных коэффициентах затухания, $L = 2,5$ Гн

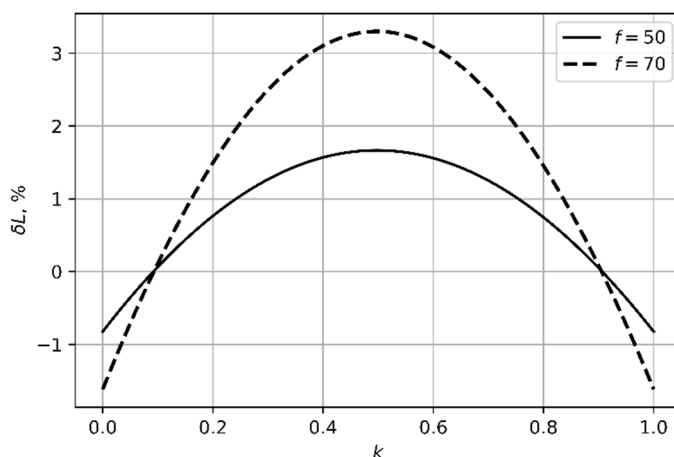


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки определения L от k при разных частотах свободных колебаний, $L = 2,5$ Гн

Из анализа данных рисунков можно сделать следующие выводы:

1) увеличение коэффициента затухания приводит к смещению значений коэффициента несимметрии, при которых достигается нулевая ошибка определения индуктивности в сторону нуля;

2) увеличение частоты свободных колебаний переходного процесса приводит лишь к увеличению абсолютного значения ошибки, не влияя на значения коэффициента несимметрии, при которых достигается нулевая ошибка определения индуктивности.

Из анализа зависимостей ошибки определения индуктивности от коэффициента несимметрии, изображённых на рис. 3–5, следует вывод: целесообразно проводить измерение индуктивности при значениях коэффициента несимметрии k_0 , минимизирующих ошибку определения индуктивности.

Необходимо оценить значения относительной ошибки определения индуктивности при разных коэффициентах затухания и частотах свободных колебаний. На рис. 5 с помощью изолиний, на которых указана величина ошибки определения индуктивности, показана оценка значений ошибок при разных коэффициентах затухания и частотах свободных колебаний. При увеличении частоты свободных колебаний и коэффициента затухания наблюдается увеличение ошибки определения индуктивности. Это связано с коэффициентом несимметрии. Методы определения оптимальных значений коэффициента несимметрии будут приведены в последующих исследованиях.

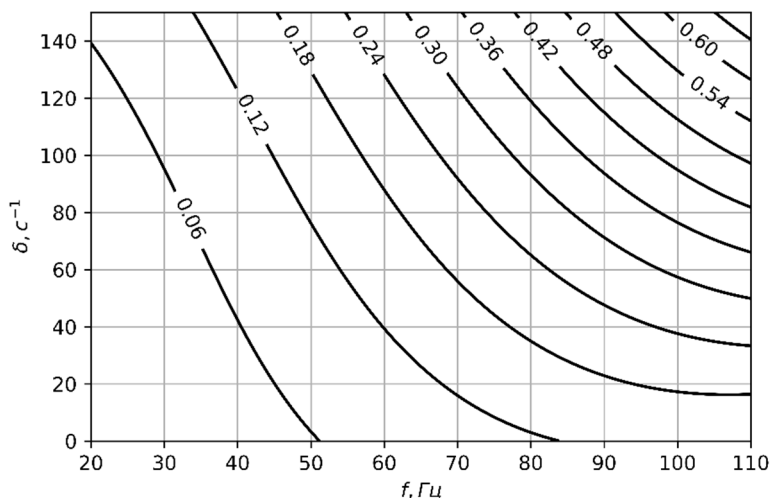


Рис. 5. Оценка относительной ошибки определения L от частоты свободных колебаний и коэффициента затухания; $L = 0,1$ Гн

Для расчёта ошибки использовались значения коэффициента затухания от 0 до 150 с^{-1} и частоты свободных колебаний из диапазона от 20 Гц до 110 Гц. Из рис. 5 видно, что величина относительной ошибки при рассматриваемых диапазонах параметров переходного процесса не превышает 1%, что удовлетворяет требованиям¹, предъявляемым к автоматике управления ДГР.

¹ СТО 34.01-3.2-008-2017. Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35кВ. Общие технические требования: стандарт организации: дата введения 28.02.2017 / Публичное акционерное общество «Российские сети».

Анализ влияния шумов. Наличие шума в измеряемых величинах является довольно распространённым явлением в электрических сетях. Предполагается, что на всём участке измерения тока и напряжения реактора индуктивность реактора не изменяется. В таком случае самым простым способом минимизировать влияние шума на определение индуктивности реактора является усреднение значений индуктивности, полученных для пар соседствующих отсчётов по выражению (3):

$$L_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} L_i}{n-2}, \quad (5)$$

где n – число отсчётов в выборке.

Для моделирования измеряемых величин с шумом в математическую модель добавляются шумовые компоненты:

$$u = U \sin(\omega_{\text{CB}} t + \varphi) e^{-\delta t} + n_1(\mu, \sigma_u);$$

$$i = \frac{U}{R} \sin(\omega_{\text{CB}} t + \varphi) e^{-\delta t} +$$

$$+ \frac{U}{L} \left(-\frac{\delta \sin(\omega_{\text{CB}} t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + \omega_{\text{CB}}^2 e^{-\delta t}} - \frac{\omega_{\text{CB}} \cos(\omega_{\text{CB}} t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + \omega_{\text{CB}}^2 e^{-\delta t}} \right) + n_2(\mu, \sigma_i),$$

где n_1, n_2 – шумовые компоненты, заданные случайным распределением; μ – математическое ожидание распределения шумов; σ_i, σ_u – стандартные отклонения шумов напряжения и тока.

Ниже приводятся зависимости доверительных интервалов вычисляемых значений индуктивности от величины относительного стандартного отклонения шума (соотношения шум/полезный сигнал).

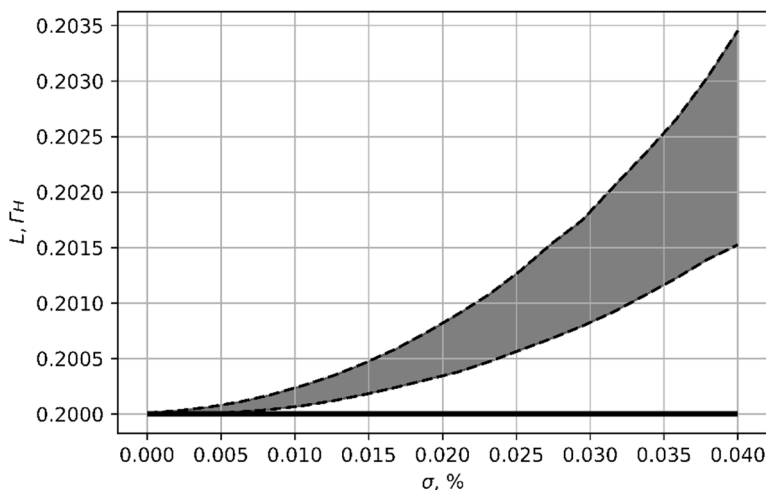


Рис. 6. Доверительный интервал L для разных значений стандартного отклонения шума;
 $\delta = 10 \text{ с}^{-1}, f_{\text{CB}} = 50 \text{ Гц}, L = 0,2 \text{ Гн}$

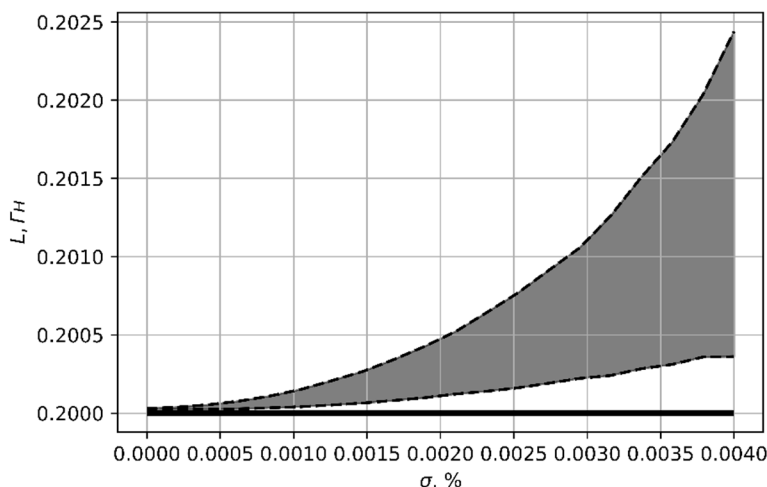


Рис. 7. Доверительный интервал L для разных значений стандартного отклонения шума; $\delta = 120 \text{ с}^{-1}, f_{ce} = 80 \text{ Гц}, L = 0,2 \text{ Гн}$

Проанализировав рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что метод, вычисляющий индуктивность по выражению (5), показывает низкую устойчивость к шуму, причём эта устойчивость уменьшается с увеличением коэффициента затухания и частоты свободных колебаний переходного процесса. Влияние шума носит завышающий характер и приводит завышению определяемого значения индуктивности над истинным.

Предлагается модернизировать метод для повышения его устойчивости. Выражение (1) записывается для всех отсчётов времени и составляет переопределённая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i'(t_2) = \frac{u'(t_2)}{R} + \frac{u(t_2)}{L}, \\ i'(t_3) = \frac{u'(t_3)}{R} + \frac{u(t_3)}{L}, \\ \dots \\ i'(t_{n-1}) = \frac{u'(t_{n-1})}{R} + \frac{u(t_{n-1})}{L}. \end{array} \right. \quad (6)$$

На рис. 8 и 9 показаны доверительные интервалы [2] значений индуктивности, вычисляемой из решения переопределённой системы по методу наименьших квадратов [5] для разных значений относительного стандартного отклонения шума.

Из анализа рис. 8 и 9 следует вывод о том, что метод вычисления индуктивности из системы (6) во много раз устойчивее к шуму, чем метод вычисления индуктивности по выражению (5).

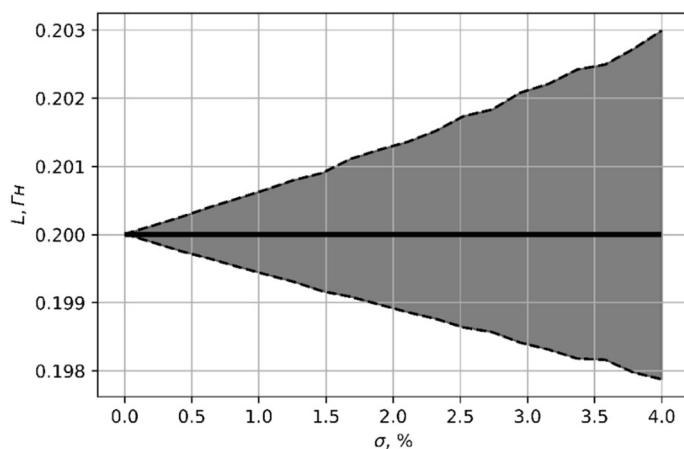


Рис. 8. Доверительный интервал L , определяемой из решения системы (4), от величины относительного стандартного отклонения шума;

$$\delta = 10 \text{ с}^{-1}; f_{\text{св}} = 50 \text{ Гц}, L = 0,2 \text{ Гн}$$

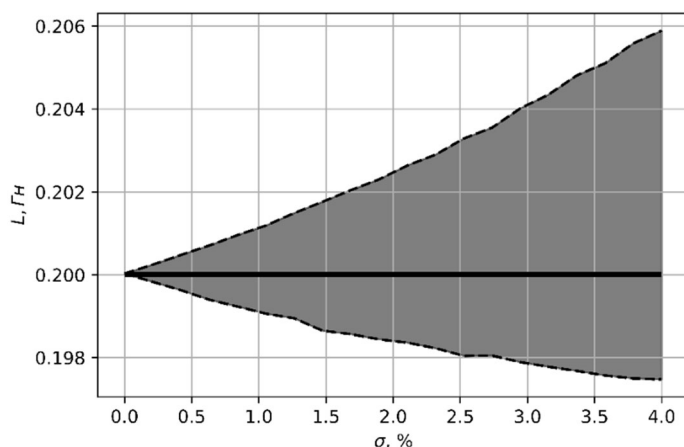


Рис. 9. Доверительный интервал L , определяемой из решения системы (4), от величины относительного стандартного отклонения шума;

$$\delta = 120 \text{ с}^{-1}; f_{\text{св}} = 80 \text{ Гц}, L = 0,2 \text{ Гн}$$

Определение индуктивности на реальном объекте. На рис. 10 показаны: затухающие ток и напряжение реактора, толстая линия – индуктивность, рассчитанная по формуле (5), тонкая пунктирная линия – индуктивность, рассчитанная по методу наименьших квадратов (МНК).

Таким образом, можно сделать следующие рекомендации по практическому применению разработанных методов:

- метод вычисления индуктивности по МНК следует применять, когда наблюдается сильное влияние шума и нет ограничений на вычислительную мощность устройств;

- метод вычисления индуктивности по двум отсчётам следует использовать во всех остальных случаях.

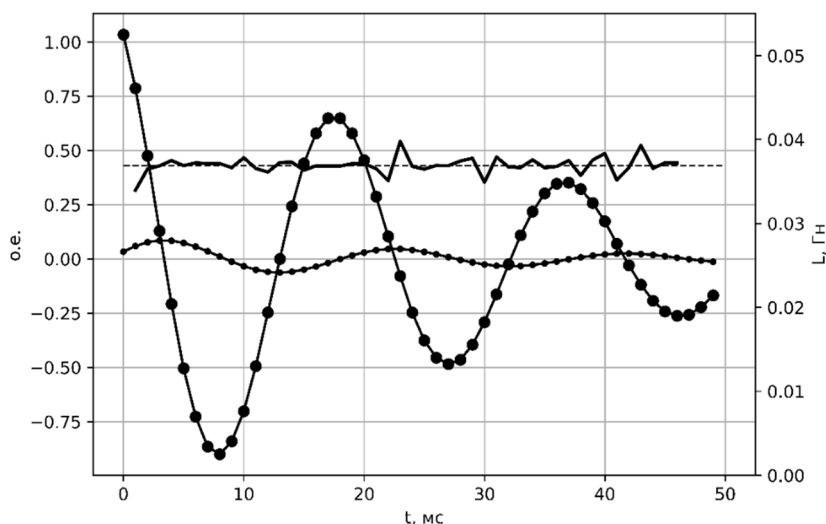


Рис. 10. Реальная осциллограмма и рассчитанная индуктивность

Выводы. 1. Предложен метод определения индуктивности ДГР, основанный на использовании мгновенных значений тока и напряжения реактора. Составлена система уравнений, решением которой является индуктивность реактора. Значения производных, используемые в системе, аппроксимированы с помощью несимметричной разностной производной. Проанализировано влияние коэффициента несимметрии разностной производной на точность определения индуктивности. Проведён анализ зависимости относительной ошибки определения индуктивности от коэффициента затухания и частоты свободных колебаний переходного процесса.

2. Проанализировано влияние шума на точность метода определения индуктивности. Построены доверительные интервалы для значений индуктивности в зависимости от значения относительного шума.

3. Предложен метод, основанный на решении переопределённой системы уравнений. Проанализирована эффективность метода на математической модели зашумленного сигнала. Точность данного метода менее чувствительна к наличию шума в сигнале по сравнению с аналогичным показателем при использовании метода расчёта индуктивности по двум отсчётам.

4. Предложены рекомендации по практическому применению разработанных методов для определения и оценки индуктивности реактора. Метод вычисления индуктивности по методу наименьших квадратов следует применять, когда сигнал зашумлен и нет ограничений на вычислительные мощности используемых устройств. Во всех остальных случаях целесообразно применение метода вычисления индуктивности по двум отсчётам.

Литература

1. Ванштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118 с.

2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

3. Дементий Ю.А., Николаев К.П. Определение индуктивности дугогасящего реактора в базе мгновенных величин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. С. 343–348.

4. Дементий Ю.А., Шорников Е.В. Совершенствование методов и алгоритмов настройки плунжерных ДГР: обзор методов и постановка задачи // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 255–261.

5. Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. 2-е изд. М.: Физ. фак-т Моск. ун-та, 2004. 44 с.

6. Соловьёв И.В. Совершенствование управления компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2014. 226 с.

7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 735 с.

8. Черников А.А. Компенсация ёмкостных токов в сетях с незаземлённой нейтралью. М.: Энергия, 1974. 96 с.

9. Brenna M., De Berardinis E., Delli Carpini L., Paulon P. et al. Petersen Coil Regulators Analysis Using a Real-Time Digital Simulator. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1479–1488.

ДЕМЕНТИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, руководитель группы, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (dementiy.yu.a@gmail.com).

НИКОЛАЕВ КИРИЛЛ ПЕТРОВИЧ – техник-исследователь, ООО «Релематика», Россия, Чебоксары (nikolaev.kirill.p@mail.ru).

ГАЛИМЗЯНОВ РУСТЕМ РАШАТОВИЧ – заместитель главного инженера по основным сетям, Филиал «Казанские электрические сети» АО «Сетевая компания», Россия, Казань (galimzyanovrr@gridcom-rt.ru).

Yuri A. DEMENTIY, Kirill P. NIKOLAEV, Rustem R. GALIMZYANOV
PARAMETRIC IDENTIFICATION OF ARC-SUPPRESSION REACTOR
IN THE BASIS OF INSTANTANEOUS VALUES

Key words: arc suppression reactor, determination of reactor inductance, instantaneous basis, analysis of noise influence.

Single-phase earth faults occur in 6–35 kV distribution networks. One of the devices designed to eliminate earth faults is the arc suppression reactor. The inductance of the reactor is set in resonance with the capacitance of the network, which results in the suppression of the capacitive component of the current.

A method of determining the inductance of a reactor using instantaneous values of current and voltage is proposed. A differential equation linking the measured quantities is derived. The equation is written for two moments of time, and a system from which the expression for the reactor inductance is derived. Numerical approximation of the derivatives by means of the asymmetric difference derivative was carried out. The mathematical model of the reactor was composed. The influence of the asymmetry coefficient and the main parameters of the considered transients on the accuracy of determining the reactor inductance was analyzed.

The influence of noise on the accuracy of determining the inductance of the reactor was considered. The influence of the main parameters of the considered transients on the stability of the method to noise is analyzed. The confidence intervals of the calculated inductance for different values of relative noise are constructed.

An upgraded method for determining the detuning based on the solution of an overdetermined system of equations is proposed. The robustness of the upgraded method to the influence of noise was analyzed. The modernized method has shown to be more robust to

the influence of noise in comparison with the method based on solving a system consisting of equations written for two moments of time.

A test of the methods on a real oscillogram of current and voltage is described. Recommendations on the practical application of the developed methods are offered. The upgraded method is appropriate when there is a high influence of noise and no limitations on the computing power of devices, the method of calculating the inductance by two readings should be used in all other cases.

References

1. Vanshtein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Rezhimy zazemleniya neutrali v elektricheskikh sistemakh* [Neutral grounding modes in electrical systems]. Tomsk, 2006, 118 p.
2. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika. 9-e izd.* [Probability theory and mathematical statistics. 9th ed.]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 479 p.
3. Dementii Yu.A., Nikolaev K.P. *Opreделение induktivnosti dugogasyashchego reaktora v baze mgnovennykh velichin* [Determination of the inductance of an arc-extinguishing reactor in the basis of instantaneous quantities]. In: *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Russ. Sci. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash Univesity Publ., 2012, pp. 343–348.
4. Dementii Yu.A., Shornikov E.V. *Sovershenstvovanie metodov i algoritmov nastroiки plungernykh DGR: obzor metodov i postanovka zadachi* [Improvement of methods and algorithms for setting plunger DGR: an overview of methods and problem statement]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 3rd Int. Sci. Conf. «Problems and prospects of development of energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash Univesity Publ., 2019, pp. 255–261.
5. Mitin I.V., Rusakov V.S. *Analiz i obrabotka eksperimental'nykh dannyykh. 2-e izd.* [Analysis and processing of experimental data. 2nd ed.]. Moscow, Moscow University Publ., 2004, 44 p.
6. Solov'ev I.V. *Sovershenstvovanie upravleniya kompensatsiei emkostnykh tokov zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the management of compensation of capacitive currents of ground fault in distribution electrical networks. Cand. Diss.]. Cheboksary, 2014, 226 p.
7. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki. 5-e izd.* [Equations of mathematical physics. 5th ed.]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 735 p.
8. Chernikov A.A. *Kompensatsiya emkostnykh tokov v setyakh s nezazemlennoi neutral'yu* [Compensation of capacitive currents in networks with ungrounded neutral]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 96 p.
9. Brenna M., De Berardinis E., Delli Carpini L., Paulon P. et al. Petersen Coil Regulators Analysis Using a Real-Time Digital Simulator. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1479–1488.

YURI A. DEMENTIY – Candidate of Technical Sciences, Head of the Group, Relematika LLC, Russia, Cheboksary (dementiy.yu.a@gmail.com).

KIRILL P. NIKOLAEV – Technician-Researcher, Relematika LLC, Russia, Cheboksary (nikolaev.kirill.p@mail.ru).

RUSTEM R. GALIMZYANOV – Deputy Chief Engineer for Basic Networks, Kazan Electric Networks Branch, Grid Company JSC, Russia, Kazan (galimzyanovrr@gridcom-rt.ru).

Формат цитирования: Дементий Ю.А., Николаев К.П., Галимзянов Р.Р. Параметрическая идентификация дугогасящего реактора в базе мгновенных величин // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 53–63. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-53-63.