

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТРОЙКИ КОМПЕНСАЦИИ ЁМКОСТНОГО ТОКА

Иванов В.А., Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия

*Аннотация.* В данной работе оценивается влияние паразитных параметров КНП сети на величину расстройки компенсации ёмкостного тока. Реализована имитационная модель КНП сети, описывающая переходный процесс. На основе решения оптимизационной задачи рассчитываются параметры переходного процесса. Построен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.

**Ключевые слова:** компенсация ёмкостного тока, контур нулевой последовательности, паразитные параметры, расстройка компенсации ёмкостного тока.

Распределительные сети напряжением 6-35 кВ работают с изолированной от земли нейтралью. Данная особенность построения сетей сохраняет возможность их работы в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. Однако, со временем величина тока ОЗЗ возрастает, что приводит к возникновению электрической дуги в месте замыкания. Это вызывает необходимость компенсации токов однофазного замыкания на землю.

На практике компенсация токов ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью заключается в заземлении нейтрали сети через дугогасящий реактор (ДГР) [2]. Индуктивность ДГР подбирается таким образом, чтобы в контуре, образованном этой индуктивностью и суммарной емкостью фаз сети на землю, образовывался резонанс на промышленной частоте [3].

Степень компенсации ёмкостного тока ОЗЗ оценивается величиной, называемой расстройкой компенсации:

$$\vartheta = \frac{I_C - I_L}{I_C} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $I_C$  – емкостный ток сети,  $I_L$  – индуктивный компенсирующий ток ДГР. Устройства управления автоматикой должно поддерживать уровень расстройки равный нулю. По существующим требованиям [4] погрешность обеспечения требуемого тока ДГР не должна превышать 1 %, то есть ошибка определения величины расстройки не должна быть более 1 %.

Однако, на практике пользоваться формулой (1) для расчета расстройки не предоставляется возможным, так как невозможно точно измерить величину емкостного тока ОЗЗ. Поэтому применяют специальные способы определения расстройки компенсации, одним из которых является импульсный способ [5].

Импульсный способ основан на подключении в КНП сети источника возмущения через измерительную обмотку ДГР и оценки реакции КНП на это возмущение. В качестве источника возмущения выступает источник электродвижущей силы. Сгенерированное возмущение вызывает в КНП переходный процесс обмена энергией между индуктивностью ДГР и ёмкостью сети. После окончания переходного процесса оцениваются частота и коэффициент затухания свободных колебаний, которые определены параметрами контура нулевой последовательности и не зависят от причин, вызвавших эти колебания [5]. Величина расстройки в данном случае определяется следующим образом:

$$\vartheta = \left( 1 - \frac{\omega_{св}^2 + \delta^2}{\omega_{сети}^2} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $\omega_{сети}$  – промышленная частота сети,  $\delta$  – коэффициент затухания переходного процесса,  $\omega_{св}$  – частота свободных колебаний переходного процесса.

В работах [5, 6], в которых рассматривался импульсный метод определения расстройки компенсации, использовались идеализированные схемы замещения КНП, не учитывающие паразитные параметры. В связи с этим, в данной работе проводится анализ влияния паразитных параметров КНП на величину расстройки компенсации емкостного тока.

На рис. 1 изображена схема замещения КНП с учетом паразитных параметров.

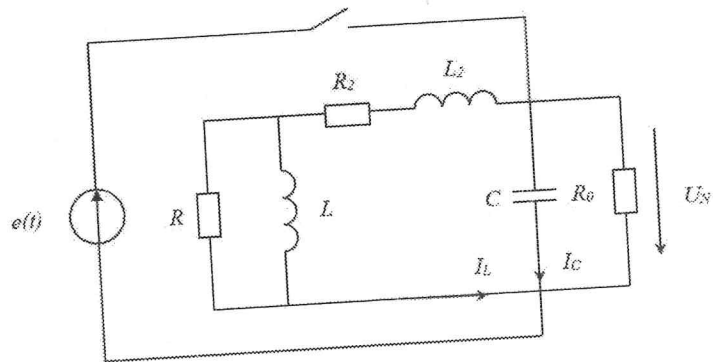


Рис. 1. Схема замещения КНП сети:  $e(t)$  – источник внешнего воздействия,  $L_2, R_2$  – индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмоток реактора,  $L, R$  – индуктивность намагничивания и сопротивление, соответствующее потерям в магнитопроводе,  $C$  – ёмкость сети относительно земли,  $R_0$  – сопротивление изоляции относительно земли

Измеряемое напряжение переходного процесса описывается выражением (3):

$$u(t) = U \cdot \sin(\omega_{св}t + \varphi) \cdot e^{-\delta t}, \quad (3)$$

где  $U$  – амплитуда измеряемого напряжения,  $\omega_{св}$  – частота свободных колебаний переходного процесса,  $\delta$  – коэффициент затухания переходного процесса,  $\varphi$  – начальная фаза колебаний.

Поиск параметров переходного процесса, осуществляется посредством решения оптимизационной задачи (4) по методу наименьших квадратов [5].

$$\sum_{i=0}^n (u(t_i) - U \cdot \sin(\omega_{св}t_i + \varphi) \cdot e^{-\delta t_i})^2 \rightarrow \min_m, \quad (4)$$

где  $n$  – количество доступных отсчетов;  $m = [U, \omega_{св}, \varphi, \delta]$  – вектор искомых параметров.

В данной работе начальное приближение параметров переходного процесса задается случайным образом. Диапазон изменения параметров представлен в табл. 1.

Таблица 1

Диапазон изменения параметров переходного процесса

Параметр	Диапазон изменения
$U$ , В	5...30
$\omega_{св}$ , рад/с	$40\pi \dots 200\pi$
$\varphi$ , рад	0... $2\pi$
$\delta$ , 1/с	5...100

В данной работе оценка величины расстройки компенсации ёмкостного тока осуществляется на основе имитационной модели КНП сети (рис. 1). Имитационная модель представляет собой функцию, на вход которой подаются параметры схемы замещения КНП сети (табл. 2). На выходе модели возвращаются действующие значения ёмкостного тока сети  $I_C$ , индуктивного тока ДГР  $I_L$  и вектор значений напряжения на нейтрали во время переходного процесса.

Таблица 2

Диапазоны значений параметров КНП сети

Параметр	Диапазон изменения
$L$ Гн	0.005...0.8
$R$ , Ом	1600...2400
$L_2$ , Гн	$10^{-4} \dots 10^{-2}$
$R_2$ , Ом	0.05...1.5
$C$ , Ф	$10^{-5} \dots 10^{-4}$
$R_0$ , Ом	1500...2300

После расчета переходного процесса в соответствие с выражением (4) рассчитываются параметры переходного процесса. Затем по выражениям (1) и (2) вычисляются значения расстройки компенсации.

Для наглядной оценки влияния паразитных параметров на величину расстройки компенсации на координатной плоскости по оси абсцисс отложены значения величины расстройки компенсации, рассчитанные через параметры переходного процесса (2), а по оси ординат отложена разность величин расстроек, рассчитанных по выражениям (1) и (2). Также на координатной плоскости изображены допустимые отклонения расстройки:  $\pm 1\%$ .

В ходе исследования в соответствии с выражением (3) было сгенерировано 500000 переходных процессов. На рис. 2 представлен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.

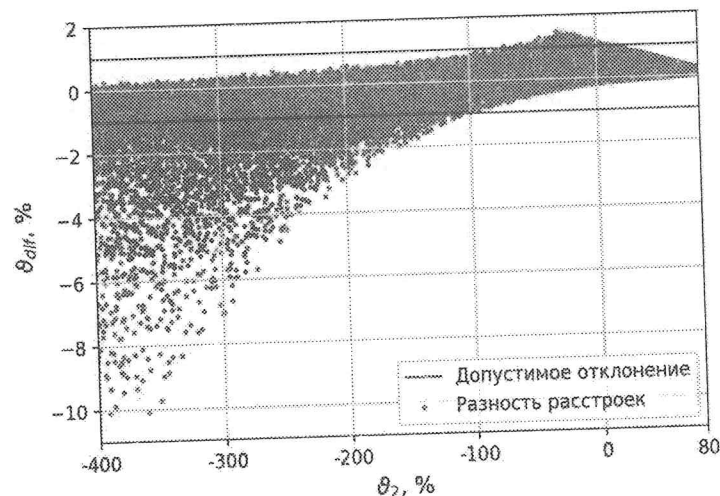


Рис. 1. График полученной зависимости, где  $\vartheta_2$  – расстройка, рассчитанная по формуле (2),  $\vartheta_{diff} = \vartheta_2 - \vartheta_1$  – разность расстроек,  $\vartheta_1$  – расстройка, рассчитанная по формуле (1) (истинная расстройка)

Из рис. 2 видно, что разность расстроек выходит за пределы допустимых отклонений. Можно сделать вывод, что наличие паразитных параметров в КНП сети затрудняет получение верной оценки величины расстройки компенсации.

#### Выводы

1. Реализована имитационная модель КНП распределительной сети с учётом паразитных параметров, описывающая переходный процесс.

2. Построен график зависимости ошибки определения величины расстройки от расстройки, рассчитанной через параметры переходного процесса.

3. Игнорирование паразитных параметров в КНП вносит ошибку определения величины расстройки, поэтому для повышения точности определения необходимо учитывать паразитные параметры в КНП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дементий Ю.А. Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях дис. ... канд. техн. наук. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, 2018 – 120 с.
2. Вайнштейн Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учеб. пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 108 с.
3. Соловьёв И.В. Совершенствование управления компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук. ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, 2014 – 226 с.
4. 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».
5. Дементий Ю. А. Элементы искусственного интеллекта в управлении компенсацией ёмкостного тока однофазного замыкания на землю / Ю. А. Дементий // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 38-43.
6. Козлов В.Н. О способах выполнения автоматики управления ДГР / В.Н. Козлов, М.И. Петров, И.В. Соловьёв // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 14-19.

#### Авторы:

**Дементий Юрий Анатольевич**, кандидат технических наук, руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 году. В 2018 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiyyu.a@gmail.com

**Иванов Василий Александрович**, студент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашияского государственного университета им. И.Н. Ульянова, технический исследователь ООО «Релематика». E-mail: ivanov.vasili.alek@gmail.com