

**Авторы:**

к.т.н. Мальи А.П.,  
к.т.н. Шурупов А.А.,  
к.т.н. Дони Н.А.,  
Кошельков И.А.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

**Авторы:**

Malyi A.P.,  
Shurupov A.A.,  
Doni N.A.,  
Koshelkov I.A.  
EKRA Ltd., Cheboksary, Russia.

# РАСЧЁТ УСТАВКИ РЕЛЕ ТОКА УРОВ. ВЕРИФИКАЦИЯ УТОЧНЁННОЙ ФОРМУЛЫ ДЛЯ УЧЁТА ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ДЛИННОЙ ЛИНИИ CALCULATION OF SETTING FOR BREAKER FAILURE PROTECTION CURRENT RELAY. VERIFICATION OF THE CORRECTED FORMULA WHICH CONSIDERS THE OPEN-CIRCUIT CURRENT OF A LONG LINE

Аннотация: предложена уточнённая формула расчёта тока длинной линии в режиме холостого хода с учётом реактивных параметров линии. Результаты расчётов по предложенной формуле проверены на симуляторе энергосистемы RTDS. Формула используется при расчёте уставки реле тока устройства резервирования при отказе выключателя.

Ключевые слова: устройство резервирования при отказе выключателя, расчёт уставки, ток холостого хода длинной линии.

**Annotation:** the suggested formula for calculating open-circuit current of a long line taking into consideration reactive parameters of the line. The results of calculations with the suggested formula have been tested using RTDS simulating system. The formula can be applied to calculate the setting for breaker failure protection current relay.

**Keywords:** breaker failure protection, calculation of setting, open-circuit current of a long line.

Устройство резервирования при отказе выключателей (УРОВ) входит в состав автоматики выключателя и предназначено для быстрой и без излишних отключений ликвидации КЗ на присоединении в случае отказа выключателя при срабатывании защиты присоединения [1].

В цепях переменного тока каждого выключателя присоединения предусматриваются три специальных фазных реле тока (РТ) УРОВ, включённых по логической схеме ИЛИ, назначение которых – определить отказавший выключатель или вернуть пуск схемы УРОВ при отсутствии отказа выключателя [2, 3].

Уставка срабатывания реле тока УРОВ выбирается по возможности минимальной, так,

чтобы обеспечить требуемый коэффициент чувствительности при КЗ в конце зоны резервирования. Однако при этом ток срабатывания РТ должен быть отстроен от максимального тока длинной линии в режиме холостого хода (ХХ), например, после срабатывания защиты, отключения выключателя противоположного конца линии, отказа контролируемого выключателя и самопогасания дуги (рис. 1).

Схема на рис. 1 применима для анализа отказа выключателя в указанном режиме линий и с трёхфазными, и с пофазными выключателями.

В современной практике расчёта уставок ток линии в режиме ХХ принято считать чисто ёмкостным и рекомендуется рассчитывать

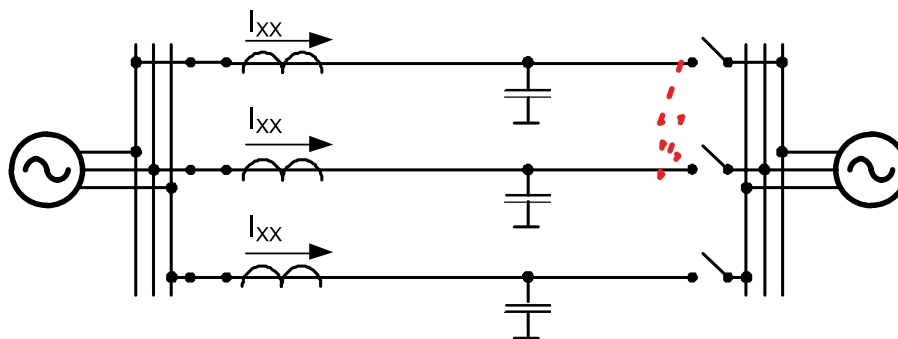


Рис. 1. Схема длинной линии в режиме ХХ при отказе выключателя



с учётом только ёмкостной проводимости линии [4].

В расчётном симметричном режиме холостого хода ёмкостная проводимость  $Y_{XX}$  линии равна:

$$Y_{XX} = b_l * l_l,$$

где  $b_l$  - удельная ёмкостная проводимость прямой последовательности линии;  
 $l_l$  - длина линии.

В данном режиме (рис. 1) используется ёмкостная проводимость именно прямой последовательности линии, так как при холостом ходе однофазно включённой линии составляющие токов обратной и нулевой последовательности в токе линии отсутствуют. (В расчёте чувствительности РТ к току одной неотключённой фазы при КЗ на землю должна использоваться эквивалентная ёмкостная проводимость с учётом также ёмкостной проводимости нулевой последовательности).

Ёмкостный ток  $I_{XX}$  фазы холостой линии соответственно равен:

$$I_{XX} = U_\phi * Y_{XX} = U_\phi * b_l * l_l \quad (1)$$

где  $U_\phi$  - первичное напряжение фазы линии.

Формула (1) соответствует представлению длинной линии в виде только эквивалентной ёмкости, без учёта продольных активного  $r$  и индуктивного  $x$  сопротивлений и поперечной активной проводимости  $g$  линии. Это расчётное значение тока может отличаться от действительных токов линии, измеряемых защитой, особенно при достаточно большой длине линии.

Возможно уточнение расчётной формулы (1) на основе уравнений однородной линии с распределёнными параметрами при учёте дополнительно индуктивного сопротивления  $x$  линии и неучёте активного сопротивления  $r$  и активной проводимости  $g$  (длинной линии без потерь).

Расчётная схема длинной линии в режиме XX приведена на рис. 2, где длинная линия характеризуется длиной линии  $l$ , распределёнными параметрами

$r, x, b, g$  и волновыми параметрами  $Z$  и  $\gamma$ .

Общие уравнения для напряжения  $\underline{U}$  и тока  $\underline{I}$  длинной линии на расстоянии  $x$  от конца линии в зависимости от волновых параметров:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 ch \gamma x + \underline{I}_2 Z sh \gamma x,$$

$$\underline{I} = \underline{I}_2 ch \gamma x + \frac{\underline{U}_2}{Z} sh \gamma x,$$

где  $\underline{U}_2, \underline{I}_2$  - комплексные напряжение и ток в конце линии;

$\gamma = \alpha + j\beta$  - коэффициент распространения ( $\alpha$  - коэффициент затухания,  $\beta$  - коэффициент фазы);

$Z$  - волновое сопротивление.

Для напряжения  $\underline{U}_1$  и тока  $\underline{I}_1$  в начале линии длиной  $l$  эти уравнения примут вид:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 ch \gamma l + \underline{I}_2 Z sh \gamma l,$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 ch \gamma l + \frac{\underline{U}_2}{Z} sh \gamma l,$$

откуда при  $\underline{I}_2 = 0$  для холостого хода линии напряжение в начале линии равно:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 ch \gamma l,$$

и ток холостого хода в начале линии  $\underline{I}_{XX}$  равен:

$$\underline{I}_{XX} = \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{Z} sh \gamma l = \frac{\underline{U}_1}{Z ch \gamma l} sh \gamma l = \frac{\underline{U}_1}{Z} th \gamma l. \quad (2)$$

Формула (2) универсальна (учитывает все параметры длинной однородной линии), но неудобна для расчётов из-за использования в ней гиперболической функции комплексного переменного. Даже при наличии у расчётчика программы расчёта математических функций трудно выявить ошибку при вводе данных.

Эта формула может быть упрощена, если линию эквивалентировать линией без потерь, но с учётом продольного индуктивного сопротивления. Для линии без потерь коэффициент затухания  $\alpha$  равен нулю, и коэффициент распространения  $\gamma$  равен:

$$\gamma = j\beta,$$

откуда из (2), используя формулу Эйлера для  $e^{j\beta l}$ , получим:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{XX} &= \frac{\underline{U}_1}{Z} th(j\beta l) = \frac{\underline{U}_1}{Z} \frac{e^{j\beta l} - e^{-j\beta l}}{e^{j\beta l} + e^{-j\beta l}} = \\ &= \frac{\underline{U}_1}{Z} \frac{\cos(\beta l) + j \sin(\beta l) - (\cos(-\beta l) + j \sin(-\beta l))}{\cos(\beta l) + j \sin(\beta l) + (\cos(-\beta l) + j \sin(-\beta l))} = \\ &= j \frac{\underline{U}_1}{Z} \operatorname{tg} \beta l. \end{aligned} \quad (3)$$

Формула (3) достаточно проста, но так как при её выводе учтено удельное индуктивное сопротивление линии, она более точна, чем формула (1).

Верификацию формулы (3) проведём сравнением результатов расчёта тока по формулам (3) и (1) с результатами расчёта тока холостого хода длинной линии на модели энергосистемы с помощью цифрового симулятора RTDS [5]. В программе последней заложена модель однородной линии, заданной удельными продольными сопротивлениями  $r', x'_l$  и удельным поперечным сопротивлением  $g'$ . Программа RTDS пренебрегает, однако, удельной активной проводимостью  $g'$  линии, что приемлемо для воздушной линии. Удельные параметры линии, принятые при расчёте,

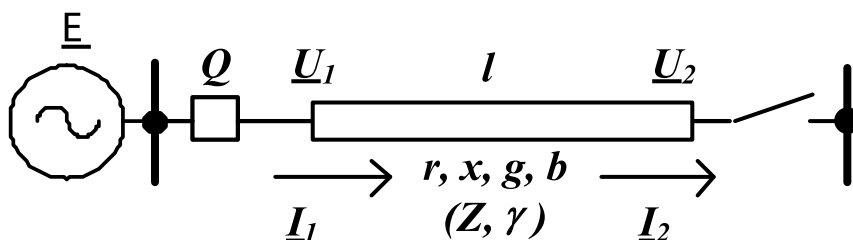


Рис. 2 Расчётная схема длинной линии в режиме XX



**Малый Альберт Петрович**  
В 1958 г. окончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 г.), старший научный сотрудник. Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА».



**Дони Николай Анатольевич**  
Дата рождения: 26.10.1946 г. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Директор по науке – заведующий отделом перспективных разработок. Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.

Табл. 1. Зависимость тока холостого хода I<sub>XX</sub> длинной линии в кА от её длины l в км

Расчётная формула		(1)	(3)	RTDS
Учтённые параметры линии		b	x, b	r, x, b
Длина линии l, 10 <sup>3</sup> км	0,1	0,1330	0,1338	0,1337
	0,2	0,2660	0,2722	0,272
	0,3	0,3990	0,4204	0,42
	0,4	0,5320	0,5850	0,5844
	0,5	0,6650	0,7755	0,7747
	0,6	0,7980	1,0069	1,006
	0,7	0,9310	1,3048	1,303
	0,8	1,0640	1,7189	1,715
	0,9	1,1970	2,3594	2,352
	1	1,330	3,5354	3,51

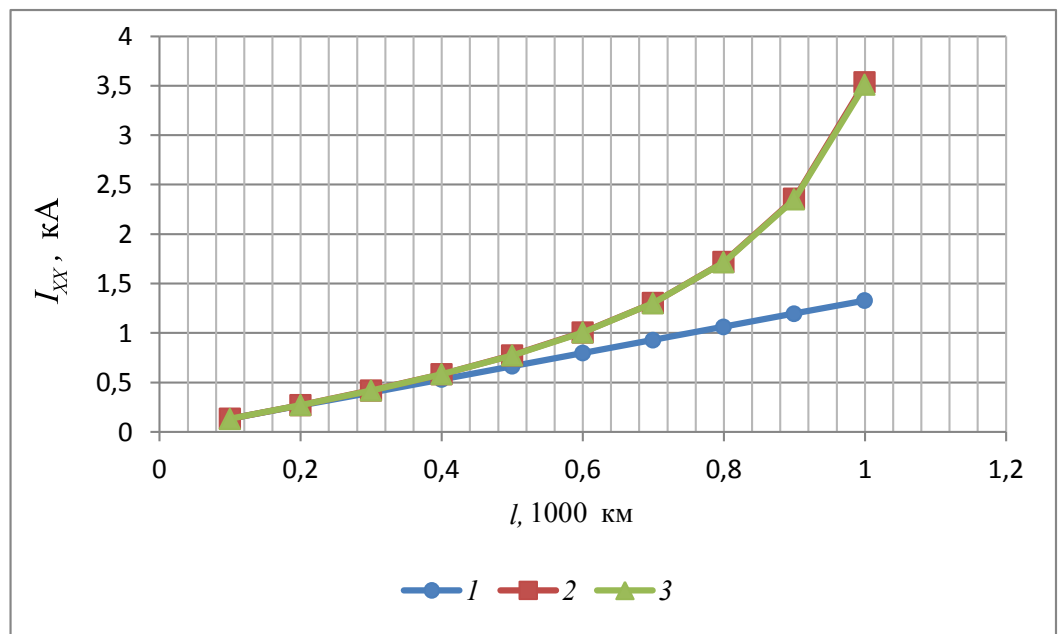


Рис. 3. Зависимость тока холостого хода длинной линии от её длины: 1 – формула (1); 2 – формула (3); 3 – RTDS

приведены в Приложении.

При моделировании линии в RTDS напряжение в начале линии принято номинальным, как и при расчёте по формулам (1) и (3). Это моделирует действие регуляторов напряжения в сети и соответствует внутреннему сопротивлению источника питания, равному нулю. Переменным параметром является длина линии.

Результаты расчёта и сравнения их с результатами моделирования приведены в таблице 1 и на рис. 3.

Как видно из табл. 1 и рис. 2, формула (1) даёт приемлемое приближение только для длины линии до 400 км, в то время как результаты расчёта по формуле (3) совпадают с результатами



**Шурупов**

**Алексей Александрович**

В 1973 г. окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г), старший научный сотрудник. Зав. отделом защиты подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



**Кошельков**

**Иван Александрович**

Руководитель группы моделирования отдела разработки подстанционного оборудования. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» в 2010 году. Присвоена степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

моделирования во всём диапазоне длин линии при расчётах до 1000 км.

**Заключение**

Сравнение расчётов тока холостого хода длинной линии по формуле (1), в которой линия представлена только распределённой ёмкостью, и по формуле (3) для линии без потерь с результатами моделирования линии на программно-аппаратном комплексе RTDS, модель линии в котором дополнительно учитывает продольное активное сопротивление линии, показывает большую точность формулы (3), которая может быть рекомендована для использования при расчёте уставки реле тока УРОВ.

**Литература**

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 6. Устройства резервирования при отказе выключателей 35-500 кВ. – М. – Л.: Энергия. – 1966. – 48 с.
2. Рубинчик В.А. Резервирование отключения коротких замыканий в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 120 с.
3. Малый А.П., Шурупов А.А., Дони Н.А., Кочкин Н.А., Карсаков В.Г. Выбор параметров локального микропроцессорного УРОВ // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – №1. – С. 68-72.
4. Разработка рекомендаций по расчёту и выбору параметров срабатывания защиты на микропроцессорной базе ВЛ 500-750 кВ. – М.: Энергосетьпроект, 11511тм-Т1. – 1983.
5. Real Time Digital Simulator for the Power Industry // RTDS Technologies Inc., Winnipeg, Manitoba, Canada, 2012. [Цифровое моделирование в режиме реального времени для энергетики; материалы фирмы производителя программно-аппаратного комплекса RTDS].

**Приложение**

Параметры элементов расчётной схемы и модели линии в RTDS:

Номинальное линейное напряжение системы – 525 кВ;

Сопротивление источника ЭДС (E, рис. 2) – 0 Ом.

Табл. П1. Удельные параметры линии (фазные)

Удельное активное сопротивление прямой последовательности $r'_1$ , Ом/км	0,018547
Удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности $x'_{L1}=j\omega L'_1$ , Ом/км	0,37661
Удельное ёмкостное сопротивление прямой последовательности $x'_{C1}=j\omega C'_1$ , МОм*км	0,2279
Удельное активное сопротивление нулевой последовательности $r'_0$ , Ом/км	0,3618376
Удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности $x'_{L0}$ , Ом/км	1,227747
Удельное ёмкостное сопротивление нулевой последовательности $x'_{C0}$ , МОм*км	0,34514

Волновые параметры прямой последовательности линии на основе данных табл. П1, использованные в формуле (3):

$$Z_l = \sqrt{j\omega L'_1 / (j\omega C'_1)} = \sqrt{0,37661 * 0,2279 * 10^6} = 293 \text{ Ом};$$

$$g_l = jb = \sqrt{j\omega L'_1 * j\omega C'_1} = j\sqrt{0,37661 / (0,2279 * 10^6)} = j1,286 * 10^{-3}, 1 / \text{км}.$$