Научная статья
УДК 621.313
https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-14-26
EDN HHAQZD

Моделирование и экспериментальные исследования работы пускового органа релейной защиты для повышения безопасности электрических сетей

Игорь Юрьевич Чака

Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Республика Беларусь, ew8rd@mail.ru

Аннотация. Особенностью существующих релейных защит линий электропередач (ЛЭП) является их срабатывание на уже возникшее повреждение в электрической сети, когда ток короткого замыкания уже действует на первичное оборудование и на параметры всей электрической сети, а при приближении на недопустимое расстояние к линии людей проходит через тело человека. На сегодняшний день не существует устройств релейной защиты, способных отключать ЛЭП до возникновения аварийного или ненормального режима работы линии: при приближении на недопустимое расстояние к ней людей, механизмов, деревьев. Рассмотрен практический вопрос создания принципиально нового пускового органа релейной защиты (ПОРЗ), основанного на измерении тока высокой частоты в фазных проводах ЛЭП. Выполнено математическое моделирование работы трехфазного и экспериментальное исследование однофазного ПОРЗ при возникновении аварийных и ненормальных режимов работы на участке ЛЭП длиной 50 м. Математическое моделирование было выполнено в программе MMANA GAL Basic V.3.0.0.30 для следующих режимов работы: нормального, аварийного (при однофазном, двухфазном и трехфазном коротких замыканиях), ненормального (обрыв провода любой фазы, приближение на недопустимое расстояние к проводам ЛЭП предметов, проводящих ток). В результате экспериментальных исследований определены количественные показатели изменения параметров генерируемого в фазный провод высокочастотного тока при коротких замыканиях, приближении к проводу проводящего предмета и обрыве провода, которые можно использовать в качестве входного сигнала для срабатывания разрабатываемого ПОРЗ. Создание нового ПОРЗ и его применение в терминалах релейной защиты ЛЭП позволит отключать как «классические» аварийные и ненормальные режимы работы линий, так и повреждения, связанные с приближением на недопустимое расстояние людей и предметов, проводящих электрический ток.

Ключевые слова: линия электропередач, математическое моделирование, короткое замыкание, резонансная частота, высокочастотный ток

Для цитирования: *Чака И. Ю.* Моделирование и экспериментальные исследования работы пускового органа релейной защиты для повышения безопасности электрических сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 2. С. 14–26. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-14-26. EDN HHAQZD.

Original article

Modeling and experimental research operation of the relay protection trigger to increase security electrical networks

Ihar Yu. Chaka

Belarusian State Agrarian Technical University,
Minsk, Republic of Belarus, ew8rd@mail.ru

Abstract. A special feature of the existing relay protections of power transmission lines (PTL) is their operation on an already existing damage in the electrical network, when the short-circuit current already acts on the primary equipment and on the parameters of the entire electrical network, and when approaching an unacceptable distance to the line of people passes through the human body. To date, there are no relay protection devices capable of shutting down PTL before an emergency or abnormal line operation occurs: when people, mechanisms, or trees approach it at an unacceptable distance. The practical issue of creating a fundamentally new relay protection trigger (RPT) based on

measuring high-frequency current in phase wires of PTL is considered. Mathematical modeling of three-phase operation and experimental study of single-phase relay protection triggers in case of emergency and abnormal operating modes on a 50 m long transmission line section were performed. Mathematical modeling was performed in the MMANA GAL Basic V.3.0.0.30 program for the following operating modes: normal, emergency (with single-phase, two-phase and three-phase short circuits), abnormal (interruption of any phase, approaching an unacceptable distance to PTL wires of current-carrying devices). As a result of experimental studies, quantitative indicators of changes in the parameters of the high-frequency current generated in the phase wire during short circuits, approaching the wire of a conducting object and wire breakage have been determined, which can be used as an input signal for triggering the developed circuit. The creation of a new RPT and its use in relay protection terminals of PLT will make it possible to disable both "classic" emergency and abnormal operating modes of lines, as well as damage caused by people and objects conducting electric current approaching an unacceptable distance.

Keywords: power line, mathematical modeling, short circuit, resonant frequency, high frequency current

For citation: Chaka I. Yu. Modeling and experimental research operation of the relay protection trigger to increase security electrical networks. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2025;2:14-26. (In Russ.). https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-2-14-26. EDN HHAQZD.

Введение

Данная статья является продолжением исследований по созданию нового пускового органа для терминалов релейной защиты линий электропередач (ЛЭП) [1]. *Целью данной работы* являются моделирование работы пускового органа релейной защиты (ПОРЗ) и экспериментальные исследования способности разрабатываемого ПОРЗ повысить безопасность (в части поражения людей электрическим током) в электрических сетях. Для выполнения данной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана модель работы устройств РЗА, содержащая разрабатываемый ПОРЗ с участком ЛЭП:

– для нормального режима работы;

– для аварийного режима при 1-, 2-, 3-фазных коротких замыканиях всех сочетаний;

– для ненормального режима работы – обрыв провода любой фазы;

– для возможного приближения на недопустимое расстояние к проводам ЛЭП проводящих ток предметов и людей к любой фазе.

2. Выполнен расчет моделей в программе MMANA GAL Basic V. 3.0.0.30.

3. На основании расчетов математических моделей составлена и проанализирована таблица изменения высокочастотного тока для каждой расчетной точки и выявлены минимальные значения изменения тока для корректного задания уставок защиты.

4. Выполнена практическая проверка возможности создания опытного образца ПОРЗ проведением лабораторных опытов по исследованию изменения параметров высокочастотного тока при различных режимах работы фазного провода, а также корректности работы электрической схемы на базе трансивера IcomIC-718, подключенного к проводу ЛЭП.

Математическое моделирование ПОРЗ

Методика проведения исследований основана на математическом моделировании в программе MMANA GAL Basic V. 3.0.0.30, которая позволяет рассчитывать системы висящих над землей проводов, подключенных к источникам высокой частоты, при помощи интегрального уравнения электрического поля (Electric-field integral equation (EIFE)) [2].

В качестве исходных результатов EIFE требует распределение токов в проводах ЛЭП. Для вычисления этого распределения все провода ЛЭП разбиваются на сегменты, в каждом из которых вычисляется как собственный (от источника) ток, так и наведенный ток от всех остальных сегментов [3].

Если разбить провод на n сегментов, то при вычислении распределения токов образуется квадратная матрица со стороной n (для каждого из n сегментов мы считаем n токов: один свой и все наведенные), поэтому время ее расчета и точность зависят от оперативной памяти персонального компьютера (ПК). Для расчета будет использован ПК с оперативной памятью 16 Гб, что соответствует системным требованиям для данной программы [4].

Основные погрешности моделирования связаны именно с разбиением проводов ЛЭП на сегменты (сегментацией), т. е. от количества сегментов и способа разбиения. Ток в каждом сегменте предполагается линейно изменяющимся. Если это условие не выполняется, то рассчитанное распределение токов будет неверным. Нарушение вышеуказанного условия может происходить, например, если длина сегмента более 0,1 длины волны [3]. На столь длинном сегменте линейная аппроксимация тока уже заметно отличается от реально существующего синусоидального распределения. Эта ошибка называется недостаточной плотностью сегментации. Также при расчете входного сопротивления и параметров ближних точек не учитываются потери в земле, это приводит к погрешности при расчетах импеданса проводов линии, подвешенных ниже 0,16λ. При построении математических моделей будет использована частота 13,099770 МГц, при этом длина волны [5]:

$$\lambda = \frac{C}{F} = \frac{299\,792\,458}{13\,099\,770} = 22{,}885,$$

где λ – длина волны, м; C – скорость света; F – частота, Гц.

Длина провода расчетного участка ЛЭП состав-

ляет 50 м, он разбивается на 400 сегментов, соответственно, длина одного сегмента равна 0,125 м, что при высоте подвеса проводов ЛЭП более 6 м [3] исключает данные погрешности:

$$0{,}1\lambda = 2{,}2885 \text{ м} > 0{,}125 \text{ м};$$

$$0{,}16\lambda = 0{,}3662 \text{ м} < 6 \text{ м}.$$

Модель для расчета работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), содержащая разрабатываемый ПОРЗ с участком ЛЭП для нормального режима работы, строится на основании следующих положений. Пусковой орган релейной защиты представляет собой три генератора синусоидального переменного тока с частотой колебаний 13,099770 МГц напряжением U = 10 В, рассчитанными на работу с нагрузкой 50 Ом [6], включенными в каждый фазный провод ЛЭП через разделительный конденсатор связи емкостью 4 400 пф [7]. Высокочастотные заградители (ВЧЗ) установлены по концам защищаемой ЛЭП и имеют, вместе с изоляторами, бесконечно большое сопротивление на частоте более 10 МГц и не учитываются [8]. Участок ЛЭП имеет длину 50 м, расстояние между проводами 1 м, высота подвеса над землей 6 м (рис. 1).

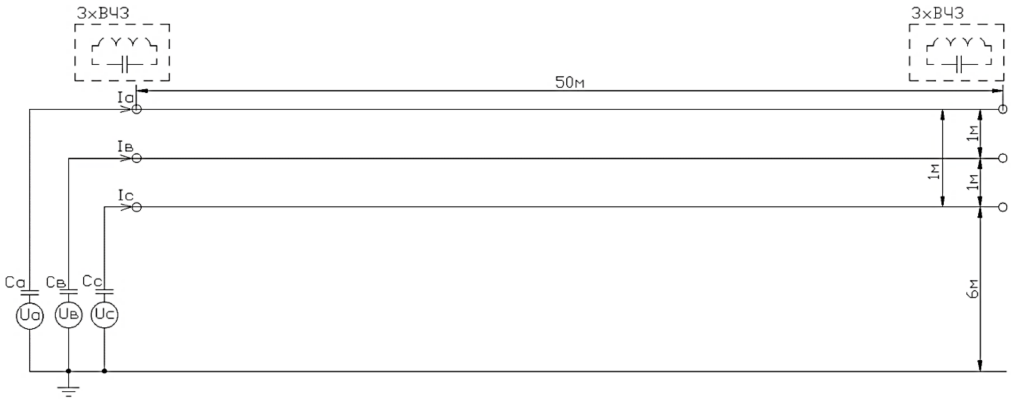
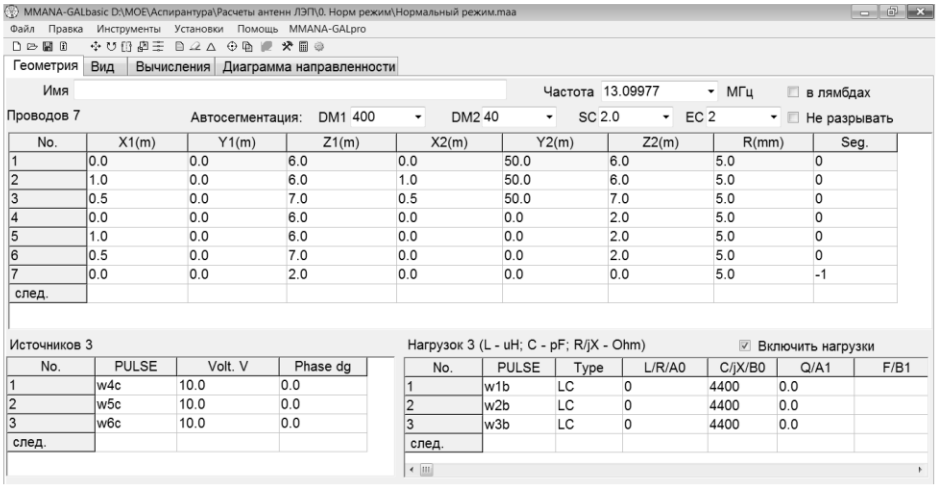


Рис. 1. Структурная схема участка ЛЭП: Со, Св, Сс – разделительные конденсаторы связи; Uо, Uв, Uс – напряжения, выдаваемые генераторами переменного тока; Iо, Iв, Iс – токи в фазных проводах

Fig. 1. Structural diagram of PTL section: Co, Св, Cc – coupling capacitors; Uo, Uв, Uc – voltages produced by alternating current generator; Io, Iв, Ic – currents in phase wires

Линия электропередач выполнена алюминиевым проводом АС 50/8 наружным диаметром 10 мм [9]. Земля под ЛЭП расположена в сельской местности (небольшая холмистость, средняя площадь заполнения лесными массивами, небольшие участки глинистых почв) и имеет диэлектрическую постоянную ε = 13, удельную проводимость J = 5 мСм/м [4].

Исходные данные при нормальном режиме работы участка ЛЭП представлены на рис. 2, результаты расчета нормального режима работы приведены на рис. 3.



No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.0	6.0	0.0	50.0	6.0	5.0	0
2	1.0	0.0	6.0	1.0	50.0	6.0	5.0	0
3	0.5	0.0	7.0	0.5	50.0	7.0	5.0	0
4	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	2.0	5.0	0
5	1.0	0.0	6.0	0.0	0.0	2.0	5.0	0
6	0.5	0.0	7.0	0.0	0.0	2.0	5.0	0
7	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	5.0	-1
след.								

No.	PULSE	Volt. V	Phase dg
1	w4c	10.0	0.0
2	w5c	10.0	0.0
3	w6c	10.0	0.0
след.			

No.	PULSE	Type	L/R/A0	C/jX/B0	Q/A1	F/B1
1	w1b	LC	0	4400	0.0	
2	w2b	LC	0	4400	0.0	
3	w3b	LC	0	4400	0.0	
след.						

Рис. 2. Исходные данные для нормального режима работы участка ЛЭП

Fig. 2. Initial data for normal operation of a power transmission line section

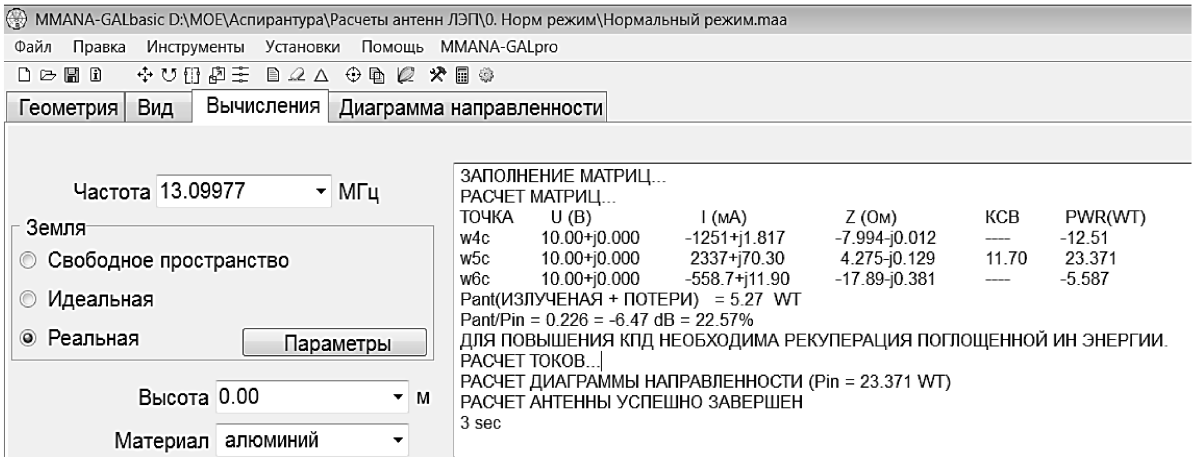


Рис. 3. Расчет нормального режима работы участка ЛЭП

Fig. 3. Calculation of the normal operating mode of a power transmission line section

Отрицательные значения активных составляющих полного сопротивления *Z* (см. рис. 3) проводов соответствующих фаз, а также их токов *I* и мощности *PWR* показывают на поглощение этими проводами энергии и ее направление обратно к генератору. Распределение высокочастотного тока в фазных проводах участка ЛЭП показано на рис. 4.

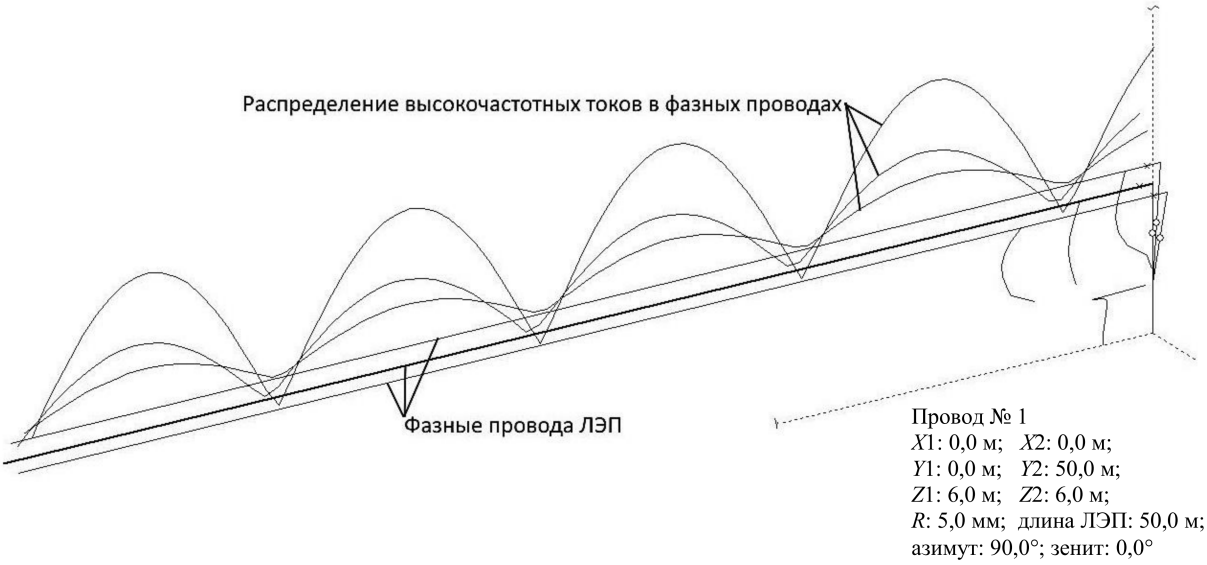


Рис. 4. Распределение высокочастотного тока в фазных проводах:
X, *Y*, *Z* – координаты провода ЛЭП; *R* – радиус провода ЛЭП

Fig. 4. High-frequency current distribution in phase wires:
X, *Y*, *Z* – coordinates of the power transmission line wire; *R* – radius of power transmission line wire

Таблица заполнения исходных данных в программе для 1-ф «A-N» короткого замыкания (КЗ) приведена на рис. 5.

Исходные данные для построения математической модели 1-ф КЗ «A-N» и следующих режимов соответствуют вышеописанным для нормального режима работы участка ЛЭП. Результаты расчета и распределение токов приведены на рис. 6, 7.

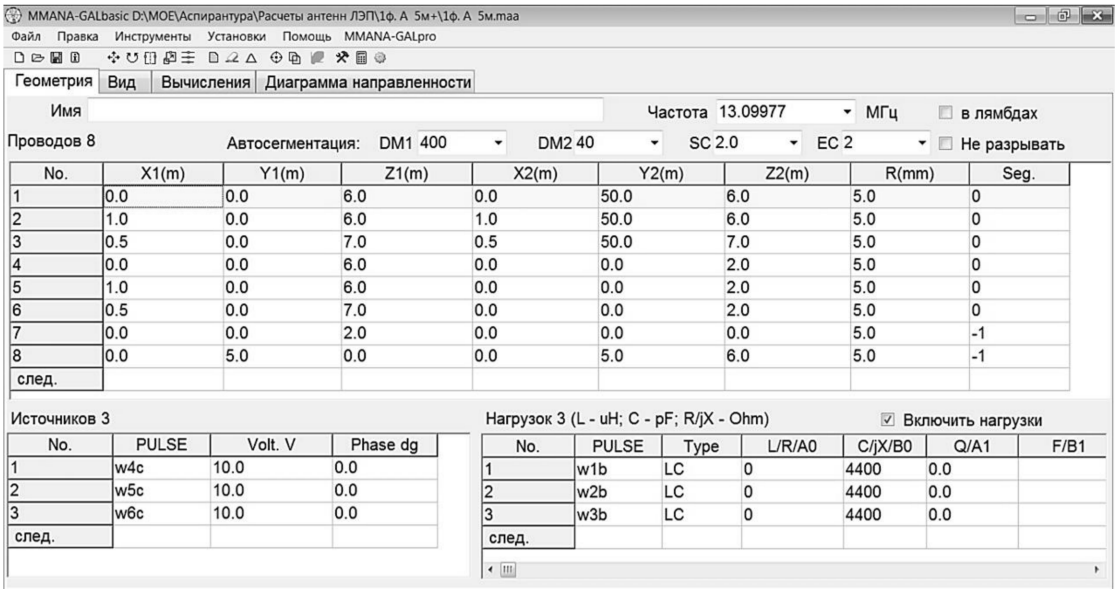


Рис. 5. Исходные данные для однофазного КЗ «A-N»

Fig. 5. Initial data for single-phase SC “A-N”

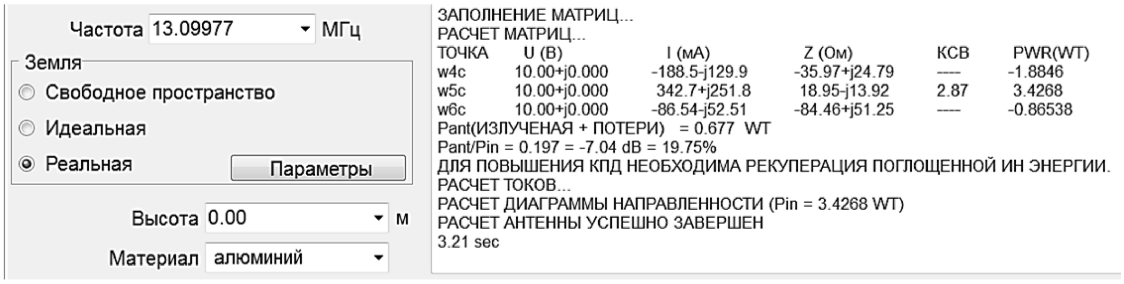


Рис. 6. Расчет однофазного КЗ «A-N»

Fig. 6. Calculation of a single-phase SC “A-N”

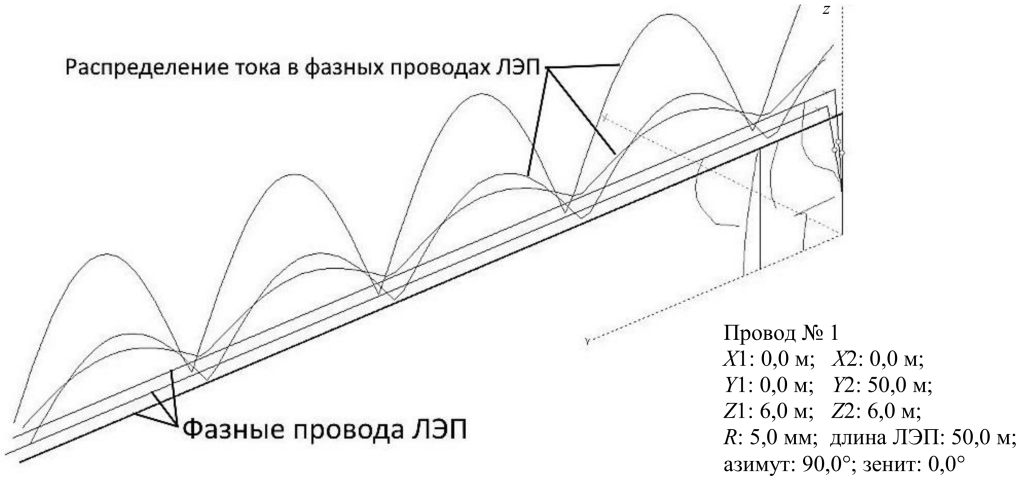


Рис. 7. Распределение высокочастотного тока при однофазном КЗ «A-N»

Fig. 7. High-frequency current distribution in single phase SC “A-N”

Результаты расчетов полного сопротивления и изменения высокочастотного тока для каждой расчетной точки математических моделей сведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчетов математических моделей

Results of mathematical models calculations

№ режима	Вид режима	Расстояние, м	*Z* фаз, Ом	Токи фаз, мА
1	Нормальный режим	50	–7,994 – *j*0,012* 4,275 – *j*0,129 –17,89 – *j*0,381	–1 251 + *j*1,817 2 337 + *j*70,30 –558,7 + *j*11,90
2	1-ф КЗ на землю фазы «А»	5	–35,97 + *j*24,79 18,95 – *j*13,92 –84,46 + *j*51,25	–188,5 – *j*129,9 342,7 + *j*251,8 –86,54 – *j*52,51
3	1-ф КЗ на землю фазы «В»	25	54,04 – *j*49,69 –28,17 + *j*28,19 135,7 – *j*102,4	100,3 + *j*92,19 –177,4 – *j*177,5 46,97 + *j*35,44
4	1-ф КЗ на землю фазы «С»	37	–14,45 + *j*19,66 7,316 – *j*10,70 –33,27 + *j*42,73	–242,7 – *j*330,2 435,2 + *j*636,8 –113,4 – *j*145,7
5	2-ф КЗ фаз «А-В»	11	–7,699 + *j*8,487 3,979 – *j*4,668 –17,62 + *j*18,69	–586,3 – *j*646,4 1 058 + *j*1 241 –267,1 – *j*283,3
6	2-ф КЗ фаз «В-С»	30	–5,906 + *j*34,46 2,617 – *j*18,43 –14,20 + *j*75,23	–48,33 – *j*281,9 75,54 + *j*531,9 –24,22 – *j*128,4
7	2-ф КЗ фаз «С-А»	40	–6,774 + *j*18,48 3,336 – *j*10,03 –16,18 + *j*41,76	–174,8 – *j*477,0 298,5 + *j*897,5 –80,68 – *j*208,2
8	3-ф КЗ фаз «А-В-С»	45	–7,805 + *j*4,117 4,105 – *j*2,331 –17,64 + *j*8,866	–1 002 – *j*528,7 1 842 + *j*1 046 –452,6 – *j*227,5
9	Обрыв фазы А	10	171,6 – *j*2 300 101,3 + *j*855,7 100,6 – *j*1 832	0,322 + *j*4,323 1,365 – *j*11,52 0,299 + *j*5,443
10	Обрыв фазы «В»	15	255,3 – *j*611,8 –118,0 + *j*340,4 925,8 – *j*1 464	5,809 + *j*13,92 –9,090 – *j*26,23 3,085 + *j*4,879
11	Обрыв фазы «С»	43	–9,800 – *j*531,5 31,66 + *j*372,7 4 407 – *j*6 067	–0,347 + *j*18,81 2,262 – *j*26,64 0,784 + *j*1,079
12	Приближение к фазе «А»	5	–27,66 + *j*6,686 14,70 – *j*4,075 –62,28 + *j*12,73	–341,5 – *j*82,55 631,6 + *j*175,0 –154,1 – *j*31,51
13	Приближение к фазе «В»	20	–13,13 + *j*2,514 6,965 – *j*1,582 –29,47 + *j*5,149	–734,6 – *j*140,6 1 365 + *j*310,1 –329,3 – *j*57,53
14	Приближение к фазе «С»	50	–6,153 – *j*2,915 3,336 + *j*1,438 –13,61 – *j*6,862	–1 327 + *j*628,8 2 528 – *j*1 089 –585,7 + *j*2 952

* *j* – показатель мнимой части комплексного числа.

Для оценки чувствительности ПОРЗ рассчитывается изменение активной и реактивной составляющих высокочастотного тока всех фаз, а также угла между вектором полного тока каждой фазы относительно нормального режима работы для каждой математической модели. В соответствии с табл. 2 для режима № 2:

$$\Delta_{2A}^{R} = \left| I_{A1}^{R} - I_{A2}^{R} \right|; \quad (1)$$

$$\Delta_{2A}^{X} = \left| I_{A1}^{X} - I_{A2}^{X} \right|; \quad (2)$$

$$\Delta_{2B}^{R} = \left| I_{B1}^{R} - I_{B2}^{R} \right|;$$

$$\Delta_{2B}^{X} = \left| I_{B1}^{X} - I_{B2}^{X} \right|;$$

$$\Delta_{2C}^{R} = \left| I_{C1}^{R} - I_{C2}^{R} \right|;$$

$$\Delta_{2C}^{X} = \left| I_{C1}^{X} - I_{C2}^{X} \right|,$$

где Δ_{2A}^{R}, Δ_{2B}^{R}, Δ_{2C}^{R} – изменения активных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для второго режима относительного нормального режима работы; Δ_{2A}^{X}, Δ_{2B}^{X}, Δ_{2C}^{X} – изменения реактивных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для второго режима относительного нормального режима работы; I_{A1}^{R}, I_{B1}^{R}, I_{C1}^{R} – значения активных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для нормального режима работы; I_{A1}^{X}, I_{B1}^{X}, I_{C1}^{X} – значения реактивных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для нормального режима работы; I_{A2}^{R}, I_{B2}^{R}, I_{C2}^{R} – значения активных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для второго режима работы; I_{A2}^{X}, I_{B2}^{X}, I_{C2}^{X} – значения реактивных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно для второго режима работы.

Для второго режима рассчитаем суммарное отклонение активной и реактивной составляющих и полное отклонение значений всех токов:

$$\Delta_{2\Sigma}^{R} = \Delta_{2A}^{R} + \Delta_{2B}^{R} + \Delta_{2C}^{R};$$

$$\Delta_{2\Sigma}^{X} = \Delta_{2A}^{X} + \Delta_{2B}^{X} + \Delta_{2C}^{X};$$

$$\Delta_{2\Sigma} = \Delta_{2\Sigma}^{R} + \Delta_{2\Sigma}^{X}, \quad (3)$$

где $\Delta_{2\Sigma}^{R}$, $\Delta_{2\Sigma}^{X}$ и $\Delta_{2\Sigma}$ – суммарные изменения активных и реактивных составляющих высокочастотного тока в фазах «А», «В», «С» соответственно и полное отклонение значений всех токов для второго режима.

Так как вектор напряжения генераторов не имеет комплексной составляющей и совпадает с вектором положительной активной составляющей тока, то углы между током и напряжением трех фаз для нормального режима работы

$$\varphi_{A1} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{A1}^{X}}{I_{A1}^{R}} \right);$$

$$\varphi_{B1} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{B1}^{X}}{I_{B1}^{R}} \right);$$

$$\varphi_{C1} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{C1}^{X}}{I_{C1}^{R}} \right).$$

Углы между током и напряжением трех фаз для режима № 2:

$$\varphi_{A2} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{A2}^{X}}{I_{A2}^{R}} \right);$$

$$\varphi_{B2} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{B2}^{X}}{I_{B2}^{R}} \right);$$

$$\varphi_{C2} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{C2}^{X}}{I_{C2}^{R}} \right).$$

Изменение углов между током и напряжением каждой фазы для режима № 2 относительного нормального режима работы:

$$\Delta\varphi_{A2} = \left| \varphi_{A1} - \varphi_{A2} \right|;$$

$$\Delta\varphi_{B2} = \left| \varphi_{B1} - \varphi_{B2} \right|;$$

$$\Delta\varphi_{C2} = \left| \varphi_{C1} - \varphi_{C2} \right|.$$

Суммарное изменение между током и напряжением всех фаз для второго режима относительного нормального режима работы:

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \Delta\varphi_{A2} + \Delta\varphi_{B2} + \Delta\varphi_{C2}.$$

Расчет выполняется для всех режимов, результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Анализ активной и реактивной составляющих токов

Analysis of active and reactive currents

№ режима	Отклонение токов относительно нормального режима № 1, мА								
	Δ_A^R	Δ_B^R	Δ_C^R	Δ_A^X	Δ_B^X	Δ_C^X	Δ_Σ^R	Δ_Σ^X	Δ_Σ
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1 062,5	1 994,3	471,46	131,717	181,5	64,41	3 528,26	377,627	3 905,887
3	1 351,3	2 514,4	604,97	90,373	247,8	23,54	4 470,67	361,713	4 832,383
4	1 008,8	1 901,8	444,6	332,017	566,5	157,6	3 355,2	1 056,117	4 411,317
5	664,7	1 279	290,9	648,217	1 170,7	295,2	2 234,6	2 114,117	4 348,717
6	1 202,67	2 261,46	533,78	283,717	461,6	140,3	3 997,91	885,617	4 883,527
7	1 076,2	2 038,5	477,32	478,817	827,2	220,1	3 592,02	1 526,117	5 118,137
8	249	495	105,4	530,517	975,7	239,4	849,4	1 745,617	2 595,017
9	1 251,322	2 335,635	558,299	2,506	81,82	6,457	4 145,256	90,783	4 236,039
10	1 256,809	2 346,09	561,085	12,103	96,53	7,021	4 163,984	115,654	4 279,638
11	1 250,653	2 334,738	558,784	16,993	96,94	10,82	4 144,175	124,754	4 268,929
12	909,5	1 705,4	403,9	84,367	104,7	43,41	3 018,8	232,477	3 251,277
13	516,4	702	228,7	142,417	239,8	69,43	1 447,1	451,647	1 898,747
14	76	191	27,7	626,983	1 159,3	283,3	294,7	2 069,583	2 364,283

Расчет изменения активной и реактивной составляющих высокочастотного тока всех фаз, а также угла между вектором полного тока каждой фазы относительно нормального режима работы для каждой математической модели (см. табл. 2, 3) показывает, что проектируемый ПОРЗ реагирует на все виды повреждений, т. е. происходит рассогласование «антенны-линии» с выходным каскадом генератора.

Таблица 3

Table 3

Анализ изменения углов между током и напряжением, град

Analysis of the change in angles between current and voltage, deg

№ режима	φ_A	φ_B	φ_C	$\Delta\varphi_A$	$\Delta\varphi_B$	$\Delta\varphi_C$	$\Delta\varphi_\Sigma$
1	–0,083	1,723	–1,220	0	0	0	0
2	34,571	34,583	32,468	34,654	34,583	32,468	101,706
3	42,587	45,016	37,035	42,670	43,293	38,255	124,219
4	53,740	55,650	52,105	53,823	53,927	53,326	161,077
5	47,791	49,551	46,685	47,874	47,828	47,906	143,608
6	80,271	81,916	79,317	80,354	80,193	80,538	241,086
7	69,874	71,603	68,818	69,957	69,880	70,038	209,876
8	27,818	29,590	26,686	27,901	27,867	27,906	83,675
9	85,740	–83,242	86,855	85,823	84,965	88,075	258,864
10	67,348	70,886	57,694	67,431	69,163	58,914	195,509
11	–88,943	–85,146	53,997	88,859	86,869	55,218	230,947
12	13,589	15,486	11,556	13,672	13,763	12,776	40,212
13	10,835	10,739	9,909	10,918	9,016	11,129	31,064
14	–25,353	–23,305	–26,748	25,270	25,028	25,528	75,827

Таким образом, защита с разрабатываемым ПОРЗ имеет абсолютную селективность и чувствительность в зоне ограниченной ВЧ-заградителями. Суммарно величина изменения высокочастотных токов имеет наименьшее значение 1 898,747 мА, наибольше значение 5 118,137 мА. Суммарно величина изменения углов между током и напряжением имеет наименьшее значение 31,064721°, наибольше значение 258,864875°. Уставка ПОРЗ для срабатывания защиты рассчитывается исходя из следующих моментов:

1. Погрешность установившегося значения выходной мощности оконечного каскада трансивера icom 718 составляет 2 % (и, соответственно, 4 % по току, Δ_{718}) [6].

2. Погрешность измерения тока при помощи датчика тока на базе цифрового осциллографа составляет в установившемся режиме 3 %, Δ_O [10].

3. ВЧЗ установлены по концам защищаемой ЛЭП и имеют, вместе с изоляторами, бесконечно большое сопротивление на частоте 13,099770 МГц (выше 10 МГц) и не оказывают значительного влияния на резонансное сопротивление [8].

4. Дополнительная погрешность, обусловленная погрешностью задания уставок, изменениями параметров оборудования (определяемая как коэффициент надежности срабатывания для высокочастотных защит), $\Delta_Д$ принимается, по [11], 15 %. Тогда суммарная погрешность измерений Δ_T:

$$\Delta_T = 3\Delta_{718} + 3\Delta_O + \Delta_Д = 40\ \%.$$

5. Исходя из п. 4 коэффициент запаса $K_{зап}$ = 1,4.

Тогда для данного участка ЛЭП уставки по высокочастотному току

$$I_{уст} = \frac{\Delta_\Sigma^{min}}{K_{зап}}; \quad (4)$$

$$\varphi_{уст} = \frac{\varphi_\Sigma^{min}}{K_{зап}}, \quad (5)$$

где $I_{уст}$ – уставка по изменению тока для ПОРЗ, мА; $\varphi_{уст}$ – уставка по изменению угла тока для ПОРЗ, град; Δ_Σ^{min} – минимальные значения отклонения значения тока, мА; φ_Σ^{min} – минимальные значения отклонения угла тока, град.

Тогда

$$I_{уст} = \frac{1\,898,747}{1,4} = 1\,356,248\ мА;$$

$$\varphi_{уст} = \frac{31,064721}{1,4} = 22,189°.$$

Защита, содержащая разрабатываемый ПОРЗ, отключит данный участок ЛЭП при превышении этих величин, что свидетельствует об аварийном или ненормальном режиме работы участка ЛЭП.

Экспериментальные исследования ПОРЗ

Опытный образец ПОРЗ представляет собой три однотипных генератора синусоидального переменного тока высокой частоты. Для проверки корректности работы электрической схемы проводится исследование одного силового генератора на базе трансивера Icom IC-718 (заводской № 13942, год выпуска 2011, свидетельство о регистрации в «БелГИЭ» № 14-14/22-011 от 25.05.2022) и цифрового двухканального USB-осциллографа ISDS 205A с персональным компьютером. При проведении опыта для нормального режима работы меняется частота генератора от 11 до 14 МГц для поиска резонансной частоты, в дальнейшем частота не меняется. Для обеспечения требуемой стабильности частоты до ±0,5 ppm применен высокостабильный опорный кварцевый генератор Icom CR-338. Структурная схема опытного образца ПОРЗ, подключенного к фазному проводу ЛЭП, приведена на рис. 8.

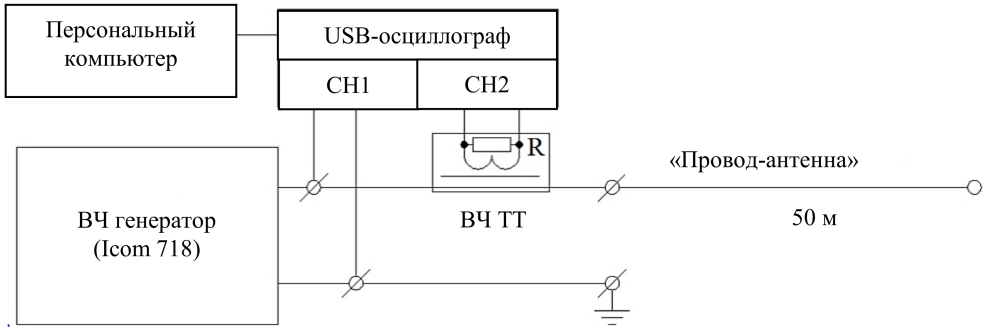


Рис. 8. Схема подключения оборудования для эксперимента:
CH1, CH2 – каналы; R – безындукционный резистор; ВЧ ТТ – высокочастотный трансформатор тока

Fig. 8. Connection diagram of the equipment for the experiment:
CH1, CH2 – channels; R – non-inductive resistor; ВЧ ТТ – high-frequency current transformer

В качестве провода одной фазы участка ЛЭП используется свободновисящий алюминиевый провод длиной 50 м диаметром 10 мм, подвешенный на высоте 6 м над поверхностью земли между деревьями через фарфоровые изоляторы. Канал CH2 подключен через высокочастотный трансформатор тока, нагруженный на безындукционный резистор R. Канал CH1 подключен напрямую к входу ПОРЗ.

В соответствии со схемой на рис. 8 производится подключение оборудования для проведения экспериментов. После подачи напряжения высокой частоты от Icom 718 сканируется диапазон частот от 11 до 14 МГц для поиска резонансной частоты. Резонансная частота определяется по отсутствию

реактивной составляющей высокочастотного тока и, соответственно, отсутствию фазового сдвига между напряжением (CH1) и током (CH2), что видно по осциллограмме на рис. 9 (резонансная частота – 11,9637 МГц).

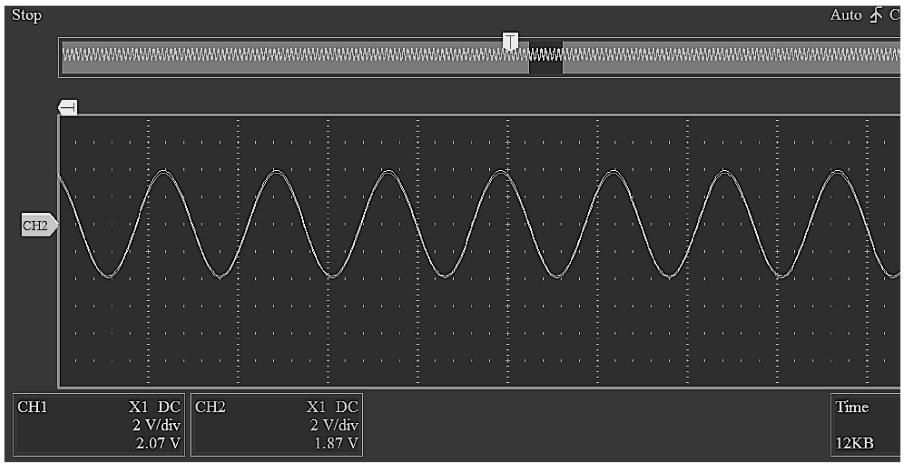


Рис. 9. Осциллограмма для нормального режима

Fig. 9. Normal mode oscillogram

Амплитудное значение высокочастотного тока составит 321,700 мА, с углом фазового сдвига 0,006°. Затем рассчитываются амплитудные значения активной и реактивной составляющих тока:

$$I_R = I\Delta\cos\varphi; \quad (6)$$

$$I_X = I\Delta\sin\varphi; \quad (7)$$

$$I_R = 321{,}7\Delta\cos(0{,}006) = 321{,}700 \text{ мА};$$

$$I_X = 321{,}7\Delta\sin(0{,}006) = 0{,}032 \text{ мА},$$

где I – амплитудное значение высокочастотного тока, мА; I_R – амплитудное значение активной составляющей тока, мА; I_X – амплитудное значение реактивной составляющей тока, мА.

Для создания короткого замыкания и опыта приближения на расстояние 1 м к «проводу-антенне» используется медный проводник сечением 2,5 мм^2, закрепленный на изоляторе. Второй конец проводника заземлен при помощи штыревого одиночного заземлителя диаметром 10 мм на глубину 1 м. Расстояние до точки КЗ – 5 м. Осциллограмма данного опыта приведена на рис. 10.

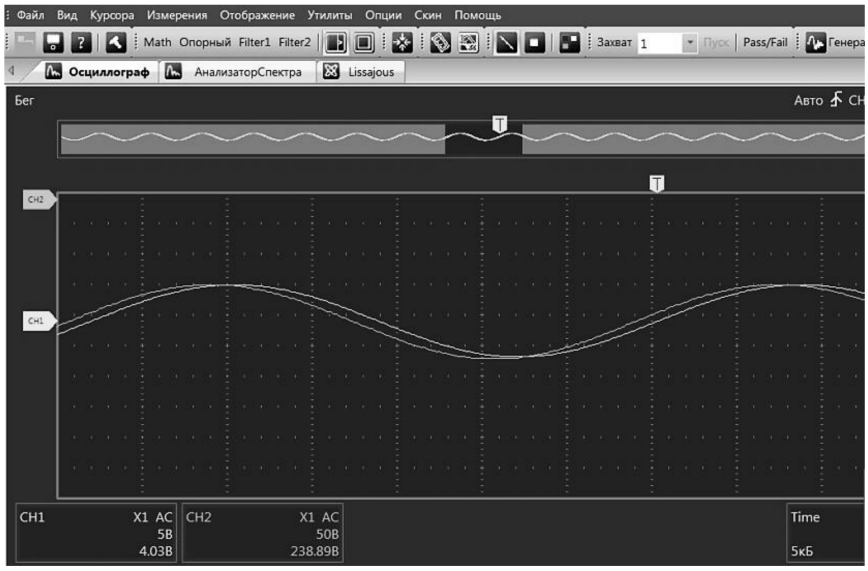


Рис. 10. Осциллограмма для опыта КЗ на расстоянии 5 м

Fig. 10. Oscillogram for SC experience at 5 m distance

Амплитудное значение высокочастотного тока составит 219,154 мА, с углом фазового сдвига 22,617°. По (6), (7) рассчитываются значения активной и реактивной составляющих, а по (1)–(3) рассчитывается изменение активной, реактивной составляющих высокочастотного тока и полное отклонение значений всех токов. Результаты 23-х опытов, а также расчеты значений активной и реактивной составляющих высокочастотного тока и их изменений относительно нормального режима работы ПОРЗ сведены в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты и расчеты экспериментальных исследований ПОРЗ

Results and calculations of RPT experimental studies

№ режима	Опыт	Расстояние, м	I, мА	φ, град	I_R, мА	I_X, мА	Δ^R, мА	Δ^X, мА	Δ_Σ, мА
1	Нормальный режим	50	321,7	0,006	321,7	0,032	0	0	0
2	КЗ	5	219,154	–22,617	202,300	–84,280	119,400	84,312	203,712
3		10	210,108	–24,096	191,800	–85,780	129,900	85,812	215,712
4		15	120,117	–26,066	107,900	–52,780	213,800	52,812	266,612
5		20	207,725	–2,669	207,500	–9,673	114,200	9,705	123,905
6		25	135,264	–41,886	1 000	90,310	221,000	90,342	311,342
7		30	206,498	1,766	206,400	6,362	115,300	6,330	121,630
8		35	190,746	–30,054	165,100	–95,530	156,600	95,562	252,162
9		40	106,259	–20,470	99,550	–37,160	222,150	37,192	259,342
10		45	235,390	–3,300	235,000	–13,550	86,700	13,582	100,282
11		50	136,199	18,972	128,800	44,280	192,900	44,248	237,148
12	Приближение	5	278,401	–26,059	250,100	–122,300	71,600	122,332	193,932
13		10	237,102	–13,552	230,500	–55,560	91,200	55,592	146,792
14		15	165,054	–22,491	152,500	–63,140	169,200	63,172	232,372
15		20	213,218	–0,754	213,200	–2,806	108,500	2,838	111,338
16		25	164,258	–31,065	140,700	–84,760	181,000	84,792	265,792
17		30	226,028	–2,576	225,800	–10,160	95,900	10,192	106,092
18		35	219,803	–19,807	206,800	–74,480	114,900	74,512	189,412
19		40	142,429	–15,871	137,000	–38,950	184,700	38,982	223,682
20		45	133,703	–0,354	133,700	–0,827	188,000	0,859	188,859
21		50	243,538	–13,306	237,000	–56,050	84,700	56,082	140,782
22	Обрыв фазы	15	218,772	–67,831	82,550	–202,600	239,150	202,632	441,782
23		35	40,112	5,605	39,920	3,918	281,780	3,886	285,666

Расчет изменения активной и реактивной составляющих высокочастотного тока относительно нормального режима работы для каждого опыта (см. табл. 4) показывает, что проектируемый ПОРЗ реагирует на повреждения на всем протяжении провода ЛЭП, т. е. происходит рассогласование «антенны-линии» с выходным каскадом Icom718. Суммарно величина изменения высокочастотных токов имеет наименьшее значение 100,282 мА, наибольше значение 311,342 мА.

Результаты экспериментов показывают, что изменение угла сдвига фаз между векторами тока и напряжения в опытах № 7, 10, 15, 17, 20 имеют несущественное значение, сопоставимое с погрешностью измерительных приборов и ПОРЗ, что связано с использованием в качестве ПОРЗ одного генератора и экспериментального участка ЛЭП длиной 50 м. Наличие таких точек с минимальным изменением углов будет проанализировано при проведении производственной проверки ПОРЗ с тремя генераторами и реальной ЛЭП.

Заключение

В результате математического моделирования работы трехфазного пускового органа релейной защиты при возникновении аварийных и ненормальных режимов работы в линиях электропередачи была определена наименьшая суммарная величина изменения высокочастотных токов 1 898,747 мА. Суммарно величина изменения углов между током и напряжением имеет наименьшее значение 31,064721°, что позволяет задать уставки на срабатывание ПОРЗ по величине тока и углу сдвига фазы тока.

В результате экспериментальных исследований работы однофазного пускового органа релейной защиты при возникновении аварийных и ненормаль-

ных режимов работы в линиях электропередачи была определена наименьшая величина изменения высокочастотных токов 100,282 мА. Изменение угла сдвига фаз между векторами тока и напряжения в пяти опытах имеют несущественное значение, поэтому уставку можно задать только по величине тока.

Таким образом, настроенные в резонанс «антенны-провода» воздушной ЛЭП изменяют свои параметры для высокочастотного тока генераторов при аварийных и ненормальных режимах работы, что позволяет использовать в современных микропроцессорных терминалах релейной защиты принципиально новый ПОРЗ.

Список источников

1. Чака И. Ю., Збродыга В. М. Об использовании высокочастотного тока в терминалах релейной защиты линий электропередач // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 16, 17 октября 2024 г.): в 2-х ч. Минск: Изд-во БГАТУ, 2024. Ч. 1. С. 263–265.

2. Дифференциальная и интегральная формы системы уравнений Максвелла. URL: https://phys.bspu.by/static/lib/phys/bmstu/tom3/ch7/texthtml/ch7_1_text.htm (дата обращения: 30.01.2024).

3. Описание базовой программы MMANA-GAL. URL: http://gal-ana.de/basicmm/ru (дата обращения: 17.02.2024).

4. Гончаренко И. В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. М.: ИП Радио Софт, Журн. «Радио», 2002. 80 с.

5. Гвоздев Н. И. Электромагнитные волны и антенны. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 320 с.

6. Тихонов А. Н. Радиоволны и их технологии. М.: Высшая школа, 2014. 240 с.

7. СТО 56947007-33.060.40.134 2012. Типовые технические решения по системам ВЧ связи. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. 61 с.

8. Расчет индуктивного сопротивления // Калькулятор индуктивного сопротивления катушки. URL: https://www.chipdip.by/calc/inductor-resistance (дата обращения: 30.03.2024).

9. ТКП339-2022 (33240). Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Минск: Минэнерго, 2022. 619 с.

10. Инструкция по эксплуатации цифровых осциллографов InstruStar серии ISDS205. InstruStar Electronic Technology, 2019. 8 с.

11. Будаев М. И. Высокочастотные защиты линий 110-220 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 112 с.

References

1. Chaka I. Yu., Zbrodyga V. M. Ob ispol'zovanii vysokochastotnogo toka v terminalah relejnoj zashchity linij elektroperedach [On the use of high-frequency current in relay protection terminals of power lines]. *Tekhnicheskoe i kadrovoe obespechenie innovacionnyh tekhnologij v sel'skom hozyajstve: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Minsk, 16-17 oktyabrya 2024 g.): v 2-h chastyah*. Minsk, Izd-vo BGATU, 2024. Part 1. Pp. 263-265.

2. *Differencial'naya i integral'naya formy sistemy uravnenij Maksvella* [Differential and integral forms of Maxwell's system of equations]. Available at: https://phys.bspu.by/static/lib/phys/bmstu/tom3/ch7/texthtml/ch7_1_text.htm (accessed: 30.01.2024).

3. *Opisanie bazovoj programmy MMANA-GAL* [Description of the basic program MMANA-GAL]. Available at: http://gal-ana.de/basicmm/ru (accessed: 17.02.2024).

4. Goncharenko I. V. *Komp'yuternoe modelirovanie antenn. Vse o programme MMANA* [Computer simulation of antennas. All about the MMANA program]. Moscow, IP Radio Soft, Zhurnal «Radio» Publ., 2002. 80 p.

5. Gvozdev N. I. *Elektromagnitnye volny i antenny* [Electromagnetic waves and antennas]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2008. 320 p.

6. Tikhonov A. N. *Radiovolny i ikh tekhnologii* [Radio waves and their technologies]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2014. 240 p.

7. *STO 56947007-33.060.40.134 2012. Tipovye tekhnicheskie resheniya po sistemam VCh svyazi* [STO 56947007-33.060.40.134 2012. Typical technical solutions for HF communication systems]. Moscow, OAO «FSK EES» Publ., 2012. 61 p.

8. Raschet induktivnogo soprotivleniya [Calculation of inductive resistance]. *Kal'kulyator induktivnogo soprotivleniya katushki*. Available at: https://www.chipdip.by/calc/inductor-resistance (accessed: 30.03.2024).

9. *TKP339-2022 (33240). Elektroustanovki na napryazhenie do 750 kV* [TKP339-2022 (33240). Electrical installations for voltage up to 750 kV]. Minsk, Minenergo Publ., 2022. 619 p.

10. *Instrukciya po ekspluatacii cifrovyh oscillografov InstruStar serii ISDS205* [Instruction manual for digital oscilloscopes Instructor ISDS205 series]. InstruStar Electronic Technology, 2019. 8 p.

11. Budaev M. I. *Vysokochastotnye zashchity linij 110-220 kV* [High-frequency protection of 110-220 kV lines]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 112 p.

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 26.03.2025
The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 26.03.2025

Информация об авторе / Information about the author

Игорь Юрьевич Чака – аспирант кафедры электроснабжения и электротехники; Белорусский государственный аграрный технический университет; ew8rd@mail.ru

Ihar Yu. Chaka – Postgraduate Student of the Department of Electrical Supply and Electrical Engineering; Belarusian State Agrarian Technical University; ew8rd@mail.ru