

Научная статья
УДК 631.158:658.345

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОРОГА СРАБАТЫВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ

Валерий Александрович Безик, Антон Михайлович Никитин
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. В настоящее время широко применяются устройства защитного отключения, которые защищают от поражения электрическим током при прикосновении человека или животных к устройствам, находящимся под напряжением, а так же данное устройство позволяет выявлять токи утечки и несимметрию напряжения питания. Схожими по защитным свойствам являются устройства, предназначенные для защиты электрических сетей от неполнофазных режимов работы, поэтому нами предлагается объединить два устройства в одно более совершенное комбинированное устройство с улучшенными характеристиками. Исследование комбинированного устройства защиты от опасных и вредных факторов вызванных токами утечки и несимметрией электрической сети, а так же определение времени срабатывания (быстродействия) комбинированного устройства защиты в зависимости от режима работы электрической сети, является целью исследований. Эксперимент производили по следующему сценарию: снижали напряжение на одной из фаз, при этом производили замеры напряжения при котором срабатывает комбинированное устройство защиты, кроме того изменяли значения тока утечки в экспериментальной сети и так же производили замеры напряжения при котором срабатывает комбинированное устройство защиты. План проведения эксперимента предполагал снижение напряжения в одной из фаз и измерение напряжения срабатывания, а также изменение величины утечки по току и одновременное измерение напряжения срабатывания. В результате проведённых лабораторных испытаний комбинированного устройства защиты электроустановок было установлено, что разброс напряжения срабатывания изменяется в незначительных пределах при изменении тока утечки.

Ключевые слова: устройство защитного отключения, неполнофазный режим, ток утечки, напряжение срабатывания, несимметрия напряжения, комбинированное устройство защиты, разброс напряжения, время срабатывания, защиты электрических сетей.

Для цитирования: Безик В.А., Никитин А.Н. Результаты экспериментальных исследований порога срабатывания комбинированного устройства защиты // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 1 (107). С. 62-67.

Original article

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE ACTUATION THRESHOLD OF THE COMBINED PROTECTION DEVICE

Valery A. Bezik, Anton M. Nikitin
Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. Currently, protective shutdown devices are widely used, which protects against electric shock when a person or animals touch devices that are under voltage, as well as this device allows you to detect leakage currents and power supply voltage asymmetry. The devices designed to protect electrical networks from non-phase operation modes are similar in protective properties, therefore we propose to combine two devices into one more advanced combined device with improved characteristics. The purpose of the research is to investigate the combined protection device against dangerous and harmful factors caused by leakage currents and asymmetry of the electrical network, as well as the determination of the response time (speed) of the combined protection device depending on the operating mode of the electrical network. The experiment was performed according to the following scenario: the voltage at one of the phases was reduced, while measurements were made of the voltage at which the combined protection device was activated, in addition, the values of the leakage current in the experimental network were changed and the voltage, at which the combined protection device was activated, was also measured. The plan of the experiment involved reducing the voltage in one of the phases and measuring the actuation voltage, as well as changing the amount of current leakage and simultaneously measuring the actuation voltage. As a result of laboratory tests of the combined protection device for electrical installations, it was found that variation of the actuation voltage varies slightly with a change in the leakage current.

Key word: protective shutdown device, incomplete phase mode, leakage current, actuation voltage, voltage asymmetry, combined protection device, voltage spread, actuation time, protection of electrical networks.

For citation: Bezik V.A., Nikitin A.M. The results of experimental researches of the actuation threshold of the combined protection device // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. 1 (107): 62-67.

Введение. Применение устройств защитного отключения, которые защищают при прикосновении человека к устройствам находящимся под напряжением от поражения электрическим током, позволяет выявлять токи утечки и несимметрию напряжения питания, в настоящее время широко распростра-

нены и повсеместно используются для систем защиты электрических сетей. Количество аварийных режимов в системах электроснабжения высоко, среди них большую долю составляют аварийные режимы, вызванные несимметрией напряжения питающей сети. Данный аварийный режим негативно влияет не только на один вид электроприемников, а оказывает пагубное влияние на всю энергосистему в целом, что ведет в свою очередь к снижению надежности энергетической системы и качества электроэнергии, потерям, как экономическим, так и энергетическим и быстрому выходу из строя электрооборудования. Для повышения надежности системы электроснабжения, снижения потерь электроэнергии и защиты электрооборудования нами предлагается объединить устройства защитного отключения и устройство защиты от неполнофазных режимов работы электрической сети. Учитывая их схожие свойства по принципу защиты электрической цепи, в одно комбинированное устройство защиты с улучшенными параметрами защиты энергетической системы от несимметричных режимов и токов утечки.

Цель исследования: экспериментальное исследование порога срабатывания комбинированного устройства защиты от несимметричных режимов и токов утечки.

Методика исследований. Предлагаемое комбинированное устройство защиты представлено на рисунке 1а (внешний вид), электрическая схема комбинированного устройства представлена на рисунке 1б. Комбинированное устройство защиты включает в себя непосредственно устройство защитного отключения (УЗО), конденсаторы C1, C2 и C3, токоограничительный резистор R1 и стабилизаторы V1 и V2.

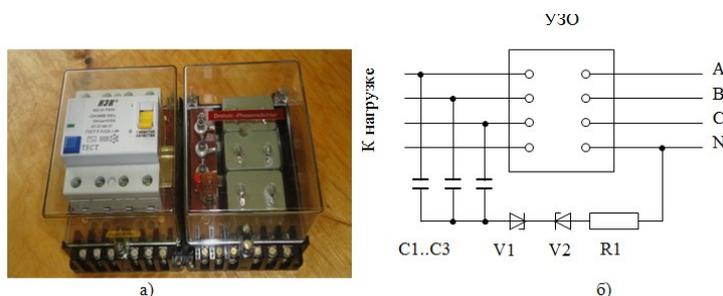


Рисунок 1 - Внешний вид (а) и электрическая схема (б) комбинированного устройства защиты

Предлагаемое комбинированное устройство защиты, включающее в себя по сути два защитных аппарата, одновременно позволяет защищать электрическую сеть от несимметричных режимов и токов утечки.

При исследовании предлагаемого комбинированного устройства защиты (А1) был добавлен автотрансформатор (Т1) с помощью которого менялась величина подаваемого напряжения на комбинированное устройство защиты. В качестве нагрузки использовался реостат (R1) с возможностью ступенчатого изменения нагрузки, а так же токоограничивающие резистор (R2) и реостат (R3) предназначенный для создания токов утечки. Измерения тока нагрузки и тока утечки производились с помощью двух амперметров (РА1, РА2), с помощью вольтметра (PV1) измеряли изменения напряжения на комбинированном устройстве защиты.

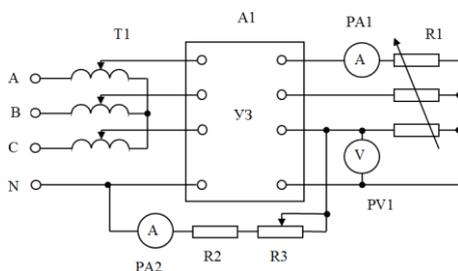


Рисунок 2 - Схема лабораторной установки

Эксперимент разделили на три этапа: первый этап заключался в изменении напряжения одной из фаз с помощью автотрансформатора Т1 (снижение величины напряжения), для измерения напряжения срабатывания U_{cp} комбинированного устройства защиты А1 в фазе с пониженным напряжением (для остальных фаз так же менялись уровни напряжения и производились соответствующие измерения); второй этап заключался в ступенчатом изменении токов утечки с помощью регулировочного реостата с шагом 2,5 мА в диапазоне от 2,5 до 27,5 мА, в каждой из фаз. Кроме замеров тока на этом этапе, производились замеры напряжения в каждой фазе и измерялась величина среднего значения напряжения U_{cp} ; третий этап эксперимента заключался в имитации утечки тока сразу из двух фаз с шагом величины утечки 5 мА в диапазоне от 5 до 25 мА.

Результаты измерения и их обсуждение. Результаты проведенных испытаний приведены ниже в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Результаты измерений порога срабатывания при изменении напряжения в одной фазе

№ эксперимента	Ток утечки в фазе, I, mA	Напряжение в фазе, U, B	Напряжение срабатывания U_1, B
1	0	150	86
2	2,5	150	87
3	5	150	86,7
4	7,5	150	85,8
5	10	150	85,5
6	12,5	150	84,7
7	15	150	84,1
8	17,5	150	84,1
9	20	150	83,9
10	22,5	150	83,6
11	25	150	83,4
12	27,5	150	83,1
13	30	150	83,0

Обозначим величины: $U(B)$, $U_1(B)$, $I(mA)$ через Y , Y_1 , и X .

$$I=X; U=Y; U_1=Y_1,$$

$$X = \frac{I(mA)}{1(mA)}, \quad Y = \frac{U}{1(B)}, \quad Y_1 = \frac{U_1}{1(B)}; \quad (1)$$

Таблица 2 - Результаты измерений порога срабатывания при изменении напряжения в двух фазах

№ эксперимента	Напряжение в фазах А, В, U, B	Ток утечки в фазах, I, mA	Напряжение срабатывания U_1, B
1	145	10	87,0
2	145	15	86,8
3	145	20	86,7
4	145	25	86,1
5	145	30	85,9
6	140	10	85,8
7	140	15	85,4
8	140	20	85,0
9	140	25	84,8
10	140	30	84,4
11	135	10	83,8
12	135	15	83,2
13	135	20	82,7
14	135	25	82,6
15	135	30	82,0
16	130	10	81,9
17	130	15	81,8
18	130	20	81,6
19	130	25	81,5
20	130	30	81,3

Таблица 3 - Обобщенные экспериментальные данные

№ эксперимента	Y	X	Y ₁
	Ток утечки в одной фазе		
1	150	0	86
2	150	2,5	87
3	150	5	86,7
4	150	7,5	85,8
5	150	10	85,5
6	150	12,5	84,7
7	150	15	84,1
8	150	17,5	84,1
9	150	20	83,9
10	150	22,5	83,6
11	150	25	83,4

Продолжение таблицы 3

№ эксперимента	У	Х	У1
Ток утечки в одной фазе			
12	150	27,5	83,1
13	150	30	83,0
Ток утечки в двух фазах			
14	145	10	87,0
15	145	15	86,8
16	145	20	86,7
17	145	25	86,1
18	145	30	85,9
19	140	10	85,8
20	140	15	85,4
21	140	20	85,0
22	140	25	84,8
23	140	30	84,4
24	135	10	83,8
25	135	15	83,2
26	135	20	82,7
27	135	25	82,6
28	135	30	82,0
29	130	10	81,9
30	130	15	81,8
31	130	20	81,6
32	130	25	81,5
33	130	30	81,3

Зададимся доверительной надежностью эксперимента для корректного предоставления результатов полученных измерений в результате испытаний комбинированного устройства защиты от несимметричных режимов и токов утечки в электрической сети.

Принимаем величину доверительной вероятности α равной 0,95, зная её значение, определим границы доверительного интервала по следующей формуле:

$$P\left(\bar{x} - \frac{t_{\gamma} S}{\sqrt{n}}\right) < \alpha < \bar{x} + \frac{t_{\gamma} S}{\sqrt{n}} = \gamma = 2 \int_0^{t_{\gamma}} S(t, n) dt \quad (2)$$

где $S(t; n)$ - плотность распределения Стьюдента;

n - объём выборки;

$k=n-1$ - число степеней свободы;

$T = \frac{\bar{x} - \alpha}{S / \sqrt{n}}$ - случайная величина, имеющая распределение Стьюдента.

После произведенных расчетов получаем границы доверительного интервала α в пределах от 83,1 до 83,4, при этом напряжение срабатывания комбинированного устройства защиты было вычислено с помощью метода фазных координат и составляло 83,2 В.

Для дальнейшего исследования представим его в виде устройства без внутренней структуры имеющего только входные и выходные контакты. Процессы внутри комбинированного устройства защиты как происходили, так и будут происходить, но для наблюдателя они будут скрыты, причем основные величины на входных и выходных контактах можно измерять. Задача на данном этапе заключается в построении экспериментальной модели из множества измеренных величин на входных и выходных контактах комбинированного устройства защиты. Для построения экспериментальной модели воспользуемся регрессионным анализом, который заключается в определении наиболее важных факторов влияющих на зависимую переменную.

Анализируя данные полученные в результате эксперимента, предположим, что они изменяются согласно линейной гипотезе. Это означает что выход комбинированного устройства защиты Y_1 (величина напряжения срабатывания устройства) зависит от входа комбинированного устройства защиты X (величина тока утечки), тогда линейная гипотеза будет выглядеть следующим образом:

$$Y_1 = A_1 X + A_0, \quad (3)$$

где A_1, A_0 - подлежащие определению параметры регрессионного уравнения.

Согласно, полученных данных по регрессионному уравнению нами производилась оценка адекватности полученной регрессионной модели с помощью метода наименьших квадратов.

Искомая линия регрессии с помощью метода наименьших квадратов, в нашем случае представлена прямой линией, должна располагаться между экспериментальных точек, полученных в результате эксперимента так, чтобы сумма квадратов всех расстояний полученных точек от линии была минимальна. Данное условие можно выразить с помощью следующего соотношения:

$$b^2_1 + b^2_2 + b^2_3 + b^2_4 \rightarrow \min \tag{4}$$

Оценка адекватности производится по остаточному рассеиванию, то есть по остаточной сумме квадратов расстояний экспериментальных точек от линии регрессии.

С помощью программы Microsoft Excel можно рассчитать уравнение регрессии для многофакторного эксперимента в пределах от 1 до 36, по следующему выражению:

$$Y_I = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots, A_NX_N, \tag{5}$$

где N – количество факторов.

Применяя обобщенные экспериментальные данные из таблицы 3, в виде единого экспериментального массива, получим таблицу результатов регрессионного анализа.

Таблица 4 - Результаты регрессионного анализа

Регрессионная статистика							
Множественный R	0,886964						
R-квадрат	0,779065						
Нормированный R-квадрат	0,750199						
Стандартная ошибка	3,69362						
Наблюдения	19						
Дисперсионный анализ		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия		2	688,2112	344,1556	26,741	8,19E-06	
Остаток		16	206,7257	12,8141			
Итого		18	894,8368				

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	78,5311	109,2209	7,365796	1,88E-06	556,9931	1016,72	557,8931	1016,72
150	2,0350	0,290395	7,322006	2,05E-06	1,530606	2,7194	1,4406	2,7194
86,9	-12,5317	1,816875	-7,3409	1,95E-06	-16,1713	-8,8921	-16,1713	-8,8921

Полученное нами уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$X = 2,03Y - 12,5Y_1 + 786,3 \tag{6}$$

Уравнение регрессии с учетом принятых обозначений:

$$I = -2,02 U - 12,4U_1 + 78,5 \tag{7}$$

Заключение. В результате проведенных лабораторных испытаний комбинированного устройства защиты электроустановок было установлено, что разброс напряжения срабатывания изменяется в незначительных пределах при изменении тока утечки. Для повышения надежности системы электроснабжения, снижения потерь электроэнергии и защиты электрооборудования нами предлагается объединить устройства защитного отключения и устройство защиты от неполнофазных режимов работы электрической сети. Учитывая их схожие свойства по принципу защиты электрической цепи, в одно комбинированное устройство защиты с улучшенными параметрами защиты энергетической системы от несимметричных режимов и токов утечки.

Проведенные испытания комбинированного устройства защиты электрической цепи подтверждают вышесказанное и показывают следующие результаты экспериментальных исследований: разброс результатов измерений напряжения обратной последовательности находится в пределах от 87 до 81,4 В, при изменении тока утечки в пределах 2,5 - 27,5 мА; полученный коэффициент корреляции при однофазной утечке тока равен 0,99 и 0,886 при двухфазной утечке тока из сети, коэффициент детерминации равен 0,981 и 0,779 соответственно; при однофазной утечке и при двухфазной утечке тока из сети зафиксирован весьма значимый коэффициент регрессии, что в свою очередь говорит о точ-

ности полученных данных. Испытания комбинированного устройства защиты электроустановок показали его эффективность при возникновении аварийных режимов в электрических сетях, что позволяет повысить безопасность и надежность энергосистемы в целом.

Список источников

1. Возможности и приоритеты развития агропромышленного комплекса Брянской области / С.М. Сычѳв, А.О. Храмченкова, А.А. Кузьмицкая и др. // Аграрная наука. 2022. № 9. С. 84-91.
2. Ториков В.Е., Подобай Н.В. Анализ и перспективы развития экономики Брянской области // Агроконсультант. 2017. № 4. С. 45-48.
3. Дьяченко О.В., Бельченко С.А., Белоус И.Н. Материально-техническая база сельского хозяйства - основа развития аграрного сектора России (на примере Брянской области) // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2016. № 6. С. 27-31.
4. Арсланов Н.А., Орлов А.В. УЗО: виды и сферы применения // Наука через призму времени. 2020. № 12 (45). С. 43-44.
5. Помогаев Ю.М., Лакомов И.В. Классификация и характеристики устройств защитного отключения (УЗО) // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практ. конф., Воронеж, 29–30 апреля 2021 года. Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 92-102.
6. Зацаринная И.А., Ранних А.П., Фоменков Д.В. Анализ эффективности функционирования УЗО // Приднепровский научный вестник. 2024. Т. 4, № 3. С. 143-146.
7. Волкова У.С., Рязанов Д.Ю., Яхутль Б.Р. Надежность срабатывания УЗО // Внедрение передового опыта и практическое применение результатов инновационных исследований: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 20 мая 2022 года. Ч. 1. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2022. С. 13-16.
8. Зацаринная И.А., Мищенко В.Р. Критерии оценки работоспособности УЗО // Становление и развитие новой парадигмы инновационной науки в условиях современного общества: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Самара, 25 февраля 2023 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2023. С. 14-16.
9. Ключев Р.В., Соколов А.А., Силаев В.И. Разработка устройства для защиты трехфазных агрегатов от неполнофазных режимов работы // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. докладов II Всерос. науч.-практ. конф., Владикавказ, 12–14 мая 2020 года. Ч. II. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2021. С. 136-138.
10. Устройство для защиты трехфазной электроустановки от неполнофазного режима: пат. 2785005 Рос. Федерация: С1, МПК Н02Н 7/09 / Карандаев А.С., Сарлыбаев А.А., Любимов И.В. и др.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет. № 2022120727; заявл. 28.07.2022; опубл. 01.12.2022.

Информация об авторах:

В.А. Безик – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

А.М. Никитин – кандидат технических наук, доцент, заведующий электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, a.m.nikitin32@mail.ru

Information about the authors:

V.A. Bezik – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University.

A.M. Nikitin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Bryansk State Agrarian University, a.m.nikitin32@mail.ru.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.10.2024, одобрена после рецензирования 27.01.2025, принята к публикации 29.01.2025.

The article was submitted 12.10.2024, approved after reviewing 27.01.2025, accepted for publication 29.01.2025.

© Безик В.А., Никитин А.М.