

# Определение индукции магнитного поля снаружи оболочки трехфазного токопровода

<sup>1</sup>\*МАШРАПОВ Бауыржан Ерболович, PhD, ассоциированный профессор (доцент), bokamashrapov@mail.ru,

<sup>1</sup>МУСАЕВ Жасулан Бакытжанович, докторант, zhaslan.mail.ru@mail.ru,

<sup>1</sup>Торайгыров университет, Казахстан, 140008, Павлодар, ул. Ломова, 64,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Цель исследования – определить величины индукций магнитных полей, созданных токами в шинах комплектного трехфазного токопровода, действующих вдоль продольных осей катушек индуктивности, закрепленных снаружи оболочки этого токопровода. Описаны лабораторная установка и методика проведения экспериментов. Представлены результаты измерений индукций магнитного поля вокруг трех выпускаемых промышленностью России комплектных токопроводов на напряжение 10 кВ. Приведены результаты компьютерного моделирования этих магнитных полей и вокруг еще трех токопроводов на напряжение 10 кВ. Определены коэффициент экранирования оболочкой магнитного поля, созданного токами в шинах токопровода, а также поправочный коэффициент, учитывающий форму шин и, что ток в них переменный. Предложено рассчитывать индукцию магнитного поля, используя простейшую форму записи закона Био-Савара-Лапласа с введением указанных коэффициентов. Показано, что при построении защиты от коротких замыканий электроустановки с одиночным токопроводом целесообразно располагать катушки индуктивности напротив шин.

**Ключевые слова:** комплектный токопровод, магнитное поле, эксперимент, моделирование, катушка индуктивности, коэффициент экранирования, закон Био-Савара-Лапласа.

## Введение

В подавляющем большинстве случаев для получения информации о токах в шинах электроустановок для нужд релейной защиты используют металлоемкие трансформаторы тока [1, 2]. Однако из-за присущих им общеизвестных недостатков неоднократно поднимался вопрос о необходимости их замены [3, 4]. В качестве такой замены, как показал анализ публикаций и патентная проработка, могут быть использованы магниточувствительные элементы: катушка Роговского [5], катушка индуктивности (КИ) [6], герконы [7] и т.д. Однако какой из них окажется предпочтительнее, можно будет судить только после длительного опыта эксплуатации. На основе магниточувствительных элементов уже разработаны защиты для некоторых электроустановок [8, 9, 10]. При этом вопросы построения защиты для электроустановок с комплектными токопроводами с тремя фазами в одной оболочке не рассматривались. Мы предполагаем их строить на катушках индуктивности, закрепленных снаружи оболочки токопровода. Поэтому в данной работе исследованы магнитные поля, действующие на них.

**Исследование магнитного поля вокруг токопровода при протекании тока по его шинам** Известно [7], что индукцию магнитного поля,

созданного токами в фазах  $A, B, C$  электроустановки можно рассчитать, используя закон Био-Савара-Лапласа, по формуле:

$$B_{np} = B_A + B_B + B_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\cos \alpha_A}{h_A} I_A + \frac{\cos \alpha_B}{h_B} I_B + \frac{\cos \alpha_C}{h_C} I_C \right), \quad (1)$$

где  $B_A, B_B, B_C$  – индукции магнитных полей, созданных токами в фазах  $A, B, C$ ;  $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$  – углы между продольной осью КИ 14 и векторами индукций  $B_A, B_B, B_C$ ;  $h_A, h_B, h_C$  – расстояния от осей фаз  $A, B, C$  до центра тяжести КИ 14.

Однако в (1) не учитывается влияние на величину индукции оболочки токопровода и перегородки внутри нее, формы шины (она не бесконечно длинный и тонкий проводник) и что ток переменный, а не постоянный.

Для исследования этого влияния и определения величины индукции магнитного поля, действующей вдоль продольной оси КИ 14, была собрана лабораторная установка (рисунок 1). Она содержит регулятор напряжения 1 (РН) TSGC2-30KVA, подключенный первичной обмоткой к источнику переменного тока 2 (ИП), а вторичной – с помощью кабелей 3 к первичной обмотке нагрузочного трансформатора 4 (НТ). Вторичная обмотка трансформатора 4 с помощью кабелей 5, пропущенных через окна трансформаторов тока 6

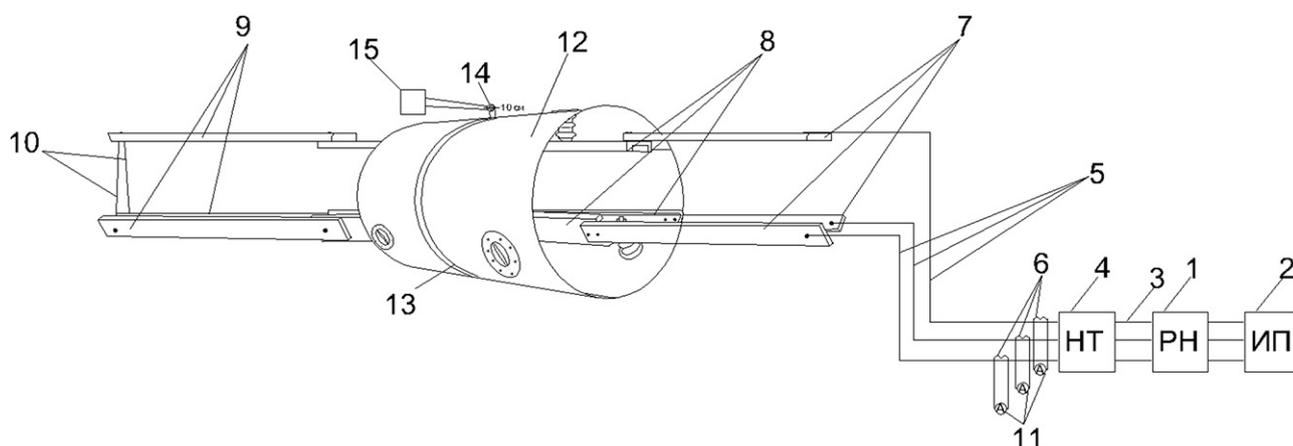


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для исследования электромагнитного поля снаружи КТ

(типа ТТЭ 125 с коэффициентом трансформации 4000/5), и дополнительных шин 7 подключена к токоведущим шинам 8 комплектного токопровода (в экспериментах использовались токопроводы типа ТЗК-СЭЩ-10-1600-81, ТЗКР-СЭЩ-10-1600-81 УХЛ). С противоположной стороны к шинам 8 подключены шины 9, концы которых закорочены кабелем 10. К вторичным обмоткам трансформаторов тока 6 подключены мультиметры 11 типа Fluke 87V. На оболочке 12 токопровода закреплен с возможностью перемещения хомут 13, на котором установлена КИ 14 (с проводом ПЭВ-2-0,14 и количеством витков 6700). К выводам КИ 14 подключен мультиметр 15 типа Fluke 87V.

При проведении экспериментов катушку индуктивности 14 устанавливают в заданной точке снаружи оболочки 12 токопровода на расстоянии 10 см от нее. При этом также обеспечивается возможность изменения угла  $\beta$  в плоскости поперечного сечения токопровода между продольной осью КИ 14 и прямой, проходящей через ее центр тяжести и пересекающей ось оболочки 12 под прямым углом. Затем в шины 8 подают ток от 200 до 600 А с шагом 200 А. При этом в зависимости от имитируемого вида короткого замыкания (двухфазного или трехфазного) ток подают в две или три шины 8. Фиксируют электродвижущую силу (ЭДС)  $E$ , наведенную на выводах КИ 14 при  $\beta = 0 \div 180^\circ$  (рисунок 2). Далее пересчитывают ЭДС в индукцию  $B$  по формуле [11]:

$$B = \frac{E}{2\pi f \omega S},$$

где  $f$  – частота переменного тока;  
 $\omega$  – число витков катушки индуктивности;  
 $S$  – сечение магнитопровода;  
 $\pi$  – постоянная,  $\pi = 3,14$ .

Перемещают КИ 14 по окружности, описанной вокруг токопровода, на 10 см и снова выполняют измерения. Повторяют указанные операции при каждом виде имитируемого короткого замыкания. Убирают перегородку, и снова выполняют

измерения в этих же точках. Затем измеряют индукцию при отсутствии оболочки 12 токопровода. Также были проведены эксперименты с шинами различной площади поперечного сечения и формы (швеллер, труба). На рисунках 3,а и 3,б (по окружности указаны точки закрепления КИ 14 на оболочке) представлены зависимости величины индукции  $B$  от точки расположения КИ 14 при двухфазном и трехфазном коротких замыканиях при наличии оболочки (продольная ось КИ располагалась по касательной к окружности, описанной вокруг оболочки токопровода).

Ввиду отсутствия в лаборатории всех выпускаемых промышленностью комплектных токопроводов с тремя фазами в общей оболочке распределение магнитного поля для них было смоделировано в программе Ansys Maxwell. На рисунках 4,а и 4,б (точка «m» – место установки КИ 14) в качестве примера показано распреде-

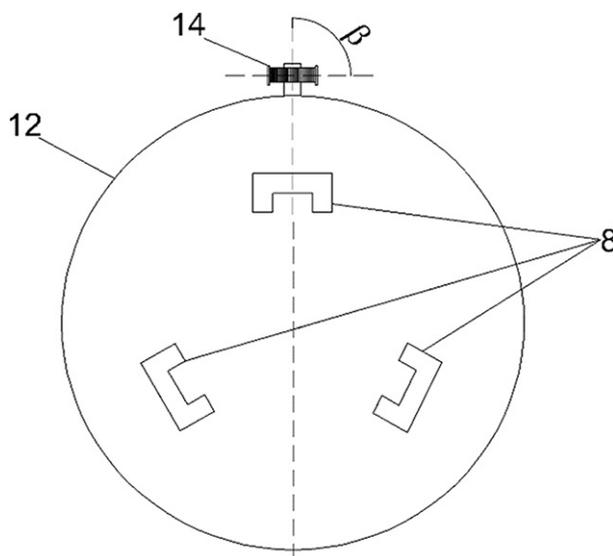


Рисунок 2 – Расположение КИ снаружи оболочки токопровода

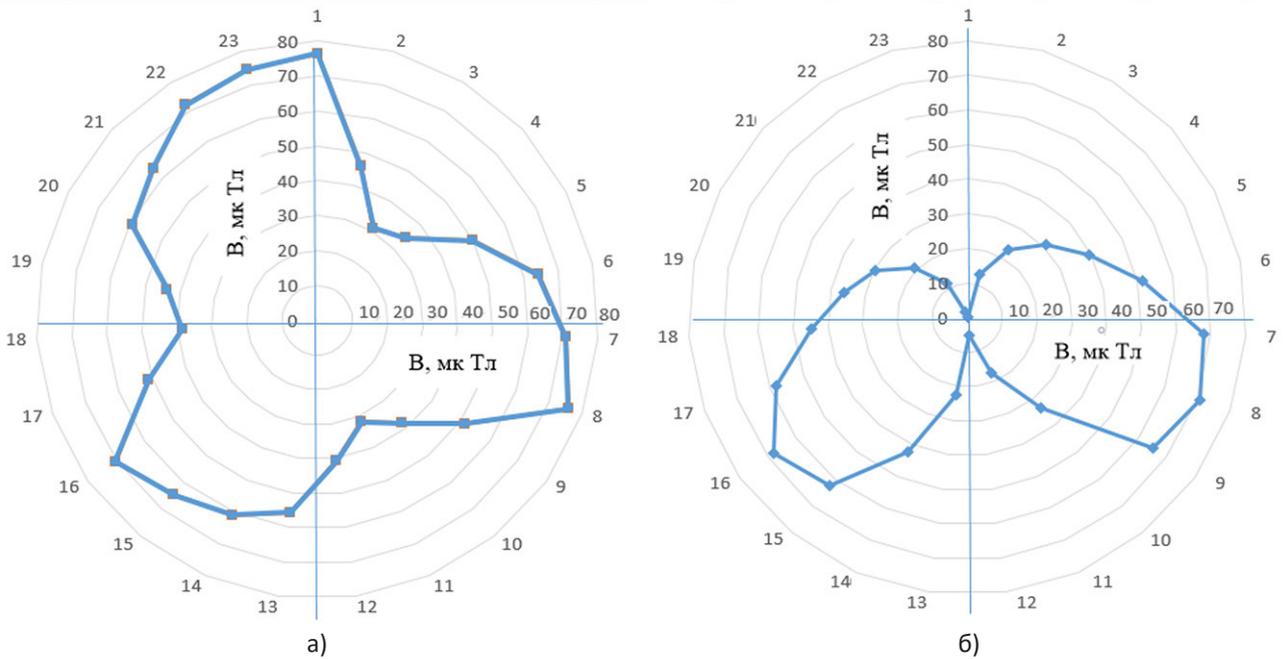


Рисунок 3 – График изменения индукции В вокруг оболочки токопровода на расстоянии 10 см от нее: а – при трехфазном КЗ; б – при двухфазном КЗ (ток в одной шине отсутствует)

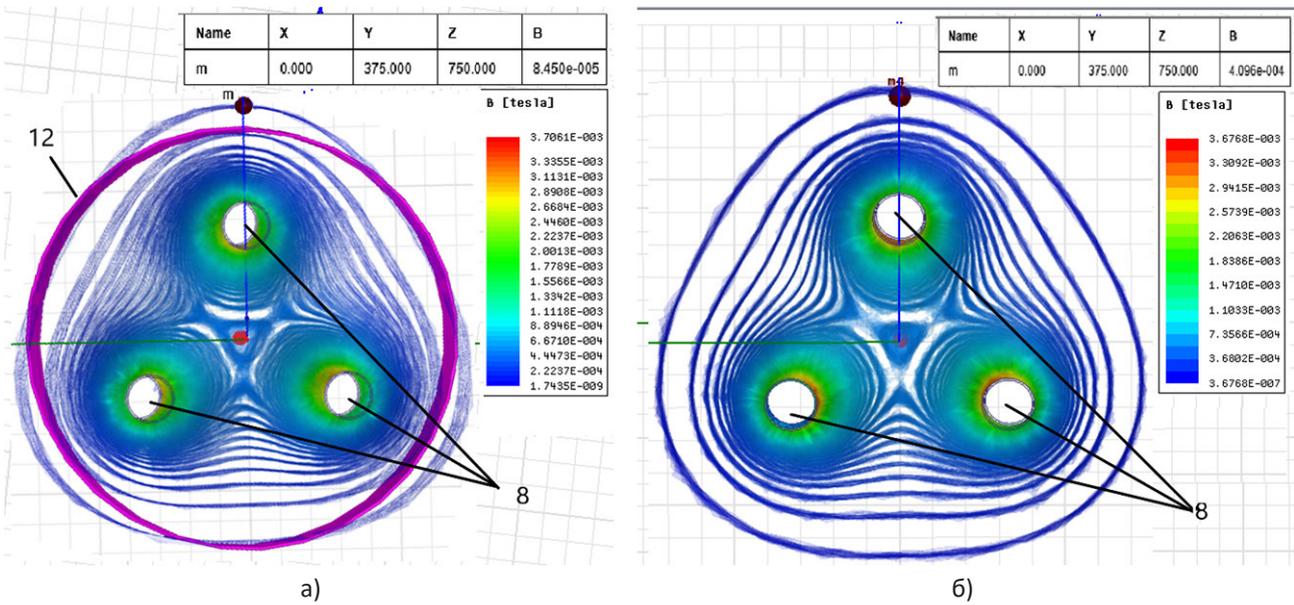


Рисунок 4 – Распределение магнитного поля вокруг шин токопровода при трехфазном КЗ при наличии оболочки (а) и без нее (б)

ление магнитного поля от токов в шинах 8 при моделировании имеющегося токопровода ТЗК-СЭЦ-10-1600-81 с оболочкой 12 и без нее.

Результаты экспериментов и моделирования показали:

1. Влиянием перегородки на величину индукции магнитного поля, действующего на КИ, можно пренебречь, так как оно составляет не более 3%,

что соизмеримо с погрешностями измерений.

2. Коэффициент экранирования (таблица) оболочкой магнитного поля, созданного токами в шинах токопровода,  $k_s = 0,14 \div 0,21$  в зависимости от ее диаметра и толщины стенки. Поэтому при расчете индукции вне оболочки правую часть в (1) необходимо умножить на  $k_s$ .

3. Наибольшие значения индукция магнитно-

Коэффициенты экранирования оболочкой токопровода магнитного поля, созданного токами в его шинах			
Внешний диаметр оболочки, мм	Толщина стенки 3 мм	Толщина стенки 4 мм	Толщина стенки 5 мм
623	$K_3 = 0,19$	$K_3 = 0,18$	$K_3 = 0,17$
700	$K_3 = 0,21$	$K_3 = 0,19$	$K_3 = 0,18$
706	$K_3 = 0,2$	$K_3 = 0,19$	$K_3 = 0,15$
890	$K_3 = 0,19$	$K_3 = 0,18$	$K_3 = 0,14$

го поля имеет в точках 1, 8, 16 (рисунок 3,а) напротив шин токопровода, причем из (1) видно, что ее величина пропорциональна токам в фазах,  $A, B$  и  $C$ , соответственно. Например, при закреплении КИ в точке 8  $h_B = h_C$ ,  $\alpha_B = \alpha_C$ , и индукция, действующая вдоль ее продольной оси, пропорциональна току только в фазе  $A$ . Аналогично при установке КИ 14 в точках 1 и 16 вдоль ее продольной оси действуют индукции, пропорциональные только токам в фазах  $B$  и  $C$ .

4. Для учета формы шины и что ток переменный, правую часть в (1) необходимо разделить на поправочный коэффициент  $k_{np} = 1,4$ .

### Выводы

1. При построении устройств защиты одиночного токопровода катушки индуктивности удобно располагать напротив фаз  $A, B, C$ , так как в этих точках индукция магнитного поля имеет наибольшее значение и пропорциональна току в соответствующей фазе.

2. Для расчета величины индукции магнитного поля, созданного токами в шинах токопроводов марки ТЗК и ТЗКР, можно пользоваться законом Био-Савара-Лапласа, но с введением экспериментально полученных поправочного коэффициента  $k_{np} = 1,4$  и коэффициента экранирования  $k_3 = 0,14 \div 0,22$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем / А.М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976. – 559 с.
2. Беркович М.А. Основы техники релейных защит / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
3. Дьяков А.Ф. Электроэнергетика мира в начале XXI столетия (по материалам 39-й сессии СИГРЭ, Париж) / Дьяков А.Ф. и др. // Энергетика за рубежом. – 2004. – № 4-5.
4. Кожович Л.А., Бишоп М.Т. Современная релейная защита на базе катушки Роговского. Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем: Сборник докладов конференции, CIGRE. Москва, 2009.
5. Данилов А. Современные промышленные датчики тока / А. Данилов // Современная электроника. – 2004. – № 10. – С. 26-35.
6. Сирота И.М. Схемы индукционного измерения токов в трехфазных цепях высокого напряжения // Электричество. – 1967. – № 4. – С. 22-24.
7. Клецель М.Я., Мусин В.В. О построении на герконах защит высоковольтных установок без трансформаторов тока // Электротехника. 1987. № 4. С. 11-13.
8. Силаев Ю.М. Способы и средства поиска повреждений в электросетях 6-35 кВ / Ю.М. Силаев. – М.: Информэнерго. – 1973. – 32 с.
9. Сирота И.М., Шурин И.М. Фильтры симметричных составляющих в цепях с дистанционными датчиками // Электричество. – 1971. – № 11. – С. 26-31.
10. Клецель М.Я., Мусин В.В. Выбор тока срабатывания максимальной токовой защиты без трансформаторов тока на герконах // Промышленная энергетика. – 1990. – № 4. – С. 32-36.
11. Kletsel M., Borodenco V., Barukin A., Kaltayev A., Mashrapova R. Constructive features of resource-saving reed relay protection and measurement devices // REV ROUM SCI TECH-EL, 2019. № 4, P. 309-315.

### Үш фазалы ток өткізгіштің сыртқы қабығындағы магнит өрісінің индукциясын анықтау

<sup>1</sup>\*МАШРАПОВ Бауыржан Ерболұлы, PhD, қауымдастырылған профессор (доцент), bokamashrapov@mail.ru,

<sup>1</sup>МҰСАЕВ Жасұлан Бақытжанұлы, докторант, zhaslan.mail.ru@mail.ru,

<sup>1</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан, 140008, Павлодар, Ломов көшесі, 64,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Зерттеудің мақсаты-осы ток өткізгіштің сыртынан бекітілген индуктор катушкаларының бойлық осьтері бойымен жұмыс істейтін үш фазалы ток тізбегінің шиналарындағы токтармен құрылған магнит өрістерінің индукция шамаларын анықтау. Зертханалық қондырғы және эксперименттер жүргізу әдістемесі сипатталған. Ресей өнеркәсібі шығарған 10 кВ кернеуге арналған үш толық ток өткізгіштің айна-

ласындағы магнит өрісінің индукциясын өлшеу нәтижелері ұсынылған. Осы магнит өрістерін компьютерлік модельдеудің нәтижелері және 10 кВ кернеуге арналған тағы үш ток өткізгіштің айналасында келтірілген. Ток өткізгіштің шиналарындағы токтармен құрылған магнит өрісінің қабығымен экрандау коэффициенті, сондай-ақ шиналардың пішінін және олардағы токтың өзгермелі екенін ескеретін түзету коэффициенті анықталған. Көрсетілген коэффициенттерді енгізе отырып, био-Савар-Лаплас Заңын жазудың қарапайым формасын қолдана отырып, магнит өрісінің индукциясын есептеу ұсынылады. Бір ток өткізгіші бар электр қондырғысының қысқа тұйықталуынан қорғаныс құру кезінде шиналарға қарама-қарсы индукторларды орналастырған жөн.

**Кілт сөздер:** толық ток сымы, магнит өрісі, эксперимент, модельдеу, индуктор, экрандау коэффициенті, био-Савар-Лаплас заңы.

#### **Determination of the Magnetic Field Induction Outside the Shell of a Three-Phase Current Line**

<sup>1\*</sup>MASHRAPOV Bauyrzhan, PhD, Associate Professor, bokamashrapov@mail.ru,

<sup>1</sup>MUSAEV Zhasulan, doctoral student, zhaslan.mail.ru@mail.ru,

<sup>1</sup>Toraighyrov University, Kazakhstan, 140008, Pavlodar, Lomov Street, 64,

\*corresponding author.

**Abstract.** The aim of the study is to determine the values of magnetic field inductions made by currents in the tires of a complete three-phase current line acting along the longitudinal axes of inductor coils fixed outside the shell of this current wire. The laboratory setup and the method of conducting experiments are described. There are presented the results of the magnetic measuring field inductions around three current wires by 10 kV produced by the Russian industry. The results are given the computer modeling of these magnetic fields and three more current conductors around at a voltage of 10 kV. There is determined the coefficient of shielding by the shell of the magnetic field created by currents in busbars of the current wire and the correction factor which take into account the shape of the tires and that the current in them is variable. It is proposed to calculate the magnetic field induction using the simplest form of the Biot-Savard-Laplace law with the introduction of these coefficients. It is shown that when the protection constructing against short circuits from electrical installation with a single current wire, it is advisable to place the inductor coils opposite the tires.

**Keywords:** complete current line, magnetic field, experiment, simulation, inductor, shielding coefficient, Bio-Savard-Laplace law.

#### REFERENCES

1. Fedoseev A.M. Relejnaya zashchita elektricheskikh sistem / A.M. Fedoseev. – Moscow: Energiya, 1976. – 559 p.
2. Berkovich M.A. Osnovy tekhniki relejnyh zashchit / M.A. Berkovich, V.V. Molchanov, V.A. Semenov. – Moscow: Energoatomizdat, 1984. – 232 p.
3. D'yakov A.F. Elektroenergetika mira v nachale HHI stoletiya (po materialam 39-j sessii SIGRE, Parizh) / D'yakov A.F i dr. // Energetika za rubezhom. – 2004. – № 4-5.
4. Kozhovich L.A., Bishop M.T. Sovremennaya relejnaya zashchita na baze katushki Rogovskogo. Sovremennyye napravleniya razvitiya relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem: Sbornik dokladov konferencii, CIGRE. Moscow, 2009.
5. Danilov A. Sovremennyye promyshlennyye datchiki toka / A. Danilov // Sovremennaya elektronika. – 2004. – no. 10. – pp. 26-35.
6. Sirota I.M. Skhemy indukcionnogo izmereniya tokov v trekhfaznyh cepyah vysokogo napryazheniya // Elektrichestvo. – 1967. – no. 4. – pp. 22-24.
7. Klecel' M.Ya., Musin V.V. O postroenii na gerkonah zashchit vysokovol'tnyh ustanovok bez transformatorov toka // Elektrotehnika. 1987. no. 4. pp. 11-13.
8. Silaev Yu.M. Sposoby i sredstva poiska povrezhdenij v elektrosetyah 6-35 kV / Yu.M. Silaev. – Moscow: Informenergo. – 1973. – 32 p.
9. Sirota I.M., Shurin I.M. Fil'try simmetrichnyh sostavlyayushchih v cepyah s distancionnymi datchikami // Elektrichestvo. – 1971. – no. 11. – pp. 26-31.
10. Klecel' M.Ya., Musin V.V. Vybora toka s rabatyvaniya maksimal'noj tokovoj zashchity bez transformatorov toka na gerkonah // Promyshlennaya energetika. – 1990. – no. 4. – pp. 32-36.
11. Kletsel M., Borodenko V., Barukin A., Kaltayev A., Mashrapova R. Constructive features of resource-saving reed relay protection and measurement devices // REV ROUM SCI TECH-EL, 2019. no. 4, pp. 309-315.