

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2143>**Р. М. Машрапова¹, *Б. Е. Машрапов²**^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-5767>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>*e-mail: bokamashrapov@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЧЕК УСТАНОВКИ ГЕРКОНОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Констатируется необходимость построения защит параллельных линий электропередачи без использования металлоемких и дорогостоящих трансформаторов тока. Отмечено, что работы в этом направлении уже начаты, но отсутствуют исследования распределения магнитных полей вблизи фаз линий в различных режимах их работы. Представлена компьютерная модель двух параллельных линий, фазы которых закреплены на двухцепной опоре. Рассмотрено расположение проводов по вершинам треугольника, причем фазы А и С обеих линий закреплены симметрично относительно фазы В, и все три фазы первой и второй линий – относительно опоры. Описана методика проведения исследований влияния токов в фазах линий в различных режимах на индукцию магнитного поля в точка вблизи них. Даны результаты этих исследований при имитации трехфазных и двухфазных коротких замыканий, а так же при замыканиях в двух точках сети. Установлено, что в зависимости от точки установки геркона влияние указанных полей может как увеличивать суммарную индукцию вдоль его оси, так и уменьшать ее. На основе анализа полученных данных определены оптимальные точки для установки герконов при построении защит рассматриваемых линий электропередачи.

Ключевые слова: моделирование, магнитные поля, параллельные линии, геркон, катушка индуктивности, точка установки.

Введение

Параллельные линии электропередачи широко применяются для повышения пропускной способности и надежности электроснабжения потребителей. Для защиты этих линий от коротких замыканий уже сто лет применяется поперечная дифференциальная токовая направленная защита. За эти годы ее элементная база постоянно совершенствовалась, но принцип построения не изменился [1]. Она обладает высоким быстродействием, не реагирует на качания в сети, но имеет давно известные принципиальные недостатки. Это: невысокая в ряде случаев чувствительность, наличие мертвой зоны, использование цепей напряжения и возможные неправильные действия при двойных замыканиях на землю.

В последние три десятилетия появились новые принципы построения защиты двух параллельных линий [2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9], позволяющие одновременно устранить несколько из указанных недостатков, включая и цепи напряжения. Так в [2, с. 120] представлен алгоритм, основанный на приращениях средних значений токов в линиях для сетей с двусторонним питанием, а в [3, с. 1286] – на приращениях мгновенных значений токов, который может быть применен и в сетях с односторонним питанием. Для сетей с односторонним питанием также предложена защита, основанная на контроле угла сдвига фаз между током в режиме нагрузки и током в этой же фазе при КЗ [4, с. 87], а в [5] – вариант ее совершенствования, учитывающий возможность однофазного повторного включения поврежденной фазы линии. Защита в [6, с. 51] основана на вейвлет-преобразованиях, в [7, с. 3] – на контроле симметричных составляющих токов и наложенных сигналов, в [8, с. 2] – на использовании нечеткой логики, а в [9, с. 95] – контролируются волновые процессы в линиях. Однако все они основаны на использовании информации от традиционных металлоемких трансформаторов тока (ТТ), имеющих, к тому же, большие погрешности в переходных режимах и опасное для персонала напряжение на выводах вторичной обмотки при обрыве вторичных цепей.

О необходимости ухода от ТТ неоднократно упоминалось на международных конференциях [10; 11] и в публикациях в высокорейтинговых журналах [12; 13], причем эта задача называлась одной из принципиально нерешенных проблем энергетики. Работы в этом направлении уже ведутся, причем в качестве датчиков тока предлагается использовать магниточувствительные элементы: катушку Роговского, герконы и т.д. Что касается поперечной защиты параллельных линий электропередачи, то без ТТ ее предложено строить лишь в самое последнее время [13] на герконах для линий с односторонним питанием. Однако в [13] не рассмотрено влияние

на герконы магнитных полей, созданных токами в линиях в различных режимах. В данной работе сделана попытка частично восполнить этот пробел и представлены результаты исследований магнитных полей для расположения фаз линий, показанном в [13].

Материалы и методы

Для исследования влияния на герконы магнитных полей, созданных токами в обеих линиях использовалась программа Ansys Maxwell. Моделировалось расположение проводов представленное на рисунке 1 [13] (где A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 – фазы А, В, С первой и второй линий, соответственно). В режиме нагрузки токи во всех фазах линий, а при КЗ – только в поврежденных фазах, были равны 600 А. Это в дальнейшем позволит легко определять насколько велико влияние при любой кратности тока КЗ, считая, что величина индукции магнитного поля вдоль продольной оси геркона прямо пропорциональна величине тока, ее создающего.

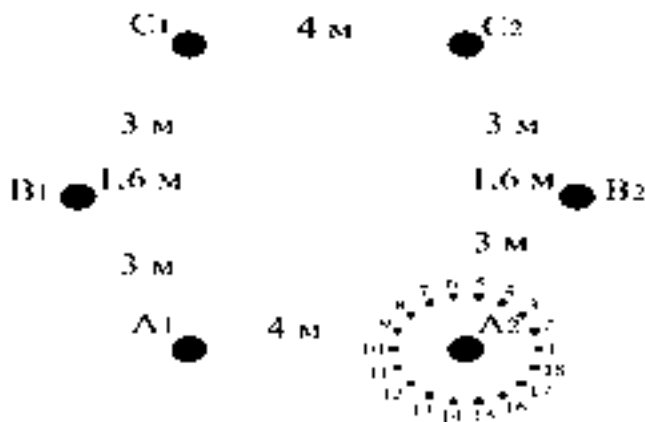


Рисунок 1 – Расположение фаз на двухцепной опоре и точки 1-18 закрепления КИ вблизи них при проведении исследований

В качестве датчика магнитного поля использовалась катушка индуктивности (КИ). Она устанавливалась поочередно вблизи фазы А и В второй линии. Исследования магнитных полей вблизи двух фаз достаточно, так как фазы линий расположены симметрично относительно опоры. КИ аналогично геркону в [13] закреплялась следующим образом: продольная ось по касательной к окружности описанной вокруг оси фазы, а центр тяжести

на этой окружности. Радиус окружности равен минимально допустимому расстоянию по технике безопасности (в нашем случае для линии 35 кВ это 40 см). КИ перемещалась по указанной окружности с шагом 20° , и в каждой точке (1-18) измерялась ЭДС.

В первую очередь в каждой точке определялось, какую ЭДС на выводах КИ наводит ток в фазе, вблизи которой она установлена. Для этого ток 600 А подавался только в фазу А (В), и измерялась ЭДС на выводах КИ (рисунок 2). Далее исследовалось как на величину ЭДС, наведенную током в фазе А (В) влияет наличие токов в двух других фазах в симметричном режиме. Для этого токи 600 А подавались во все три фазы второй линии. Затем ток 600 А подавался только в три фазы первой линии. ЭДС, измеренные на выводах КИ в этом режиме, позволяют оценить величину индукции магнитного поля, которая будет действовать вдоль оси геркона от токов, протекающих в первой линии при трехфазном КЗ и в режиме нагрузки (рисунок 3). Аналогично рассматривалось влияние токов двухфазного КЗ, протекающих в поврежденных фазах первой линии (рисунок 4).

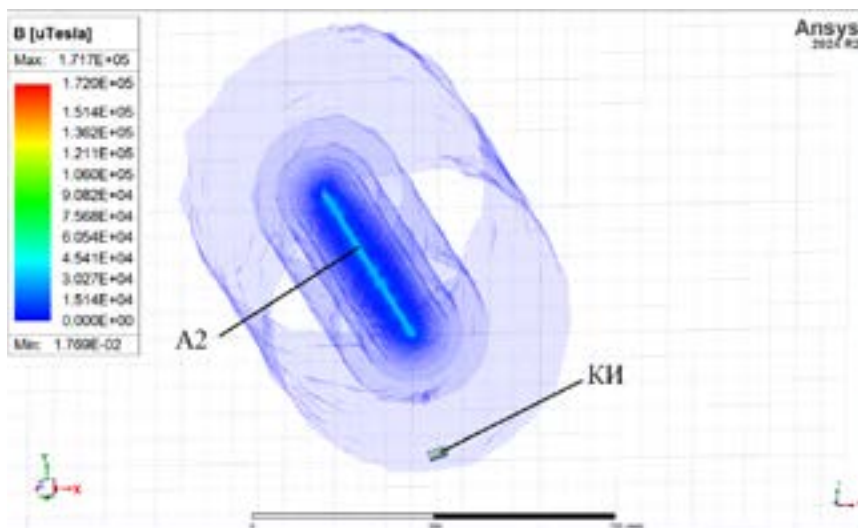


Рисунок 2 – Индукция магнитного поля, действующая вдоль оси КИ от тока в фазе А

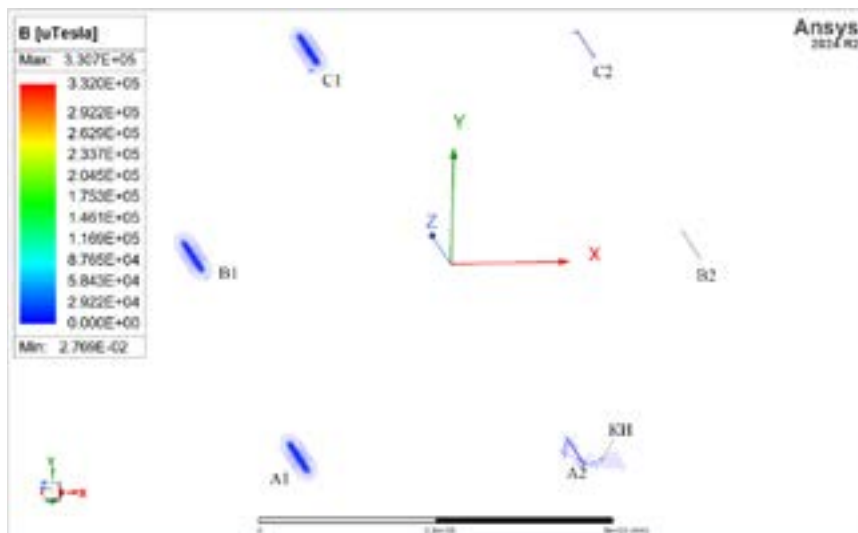


Рисунок 3 – Индукции магнитных полей, созданных токами в фазах A1, B1 и C1 первой линии, при расположении КИ вблизи A2

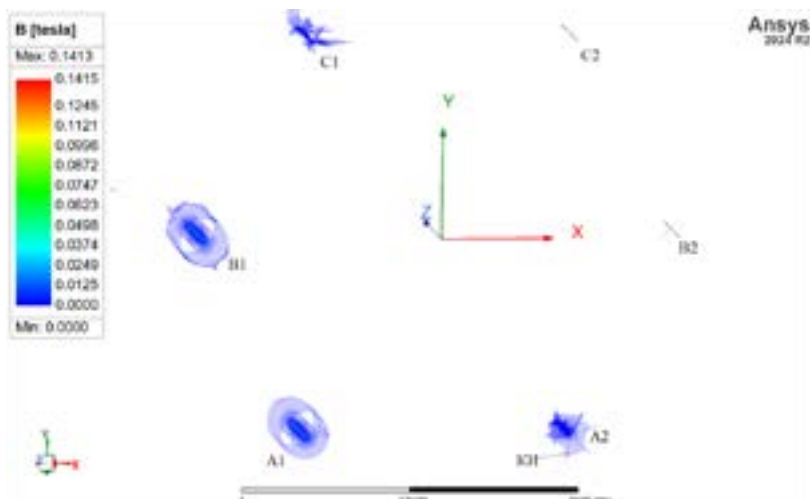


Рисунок 4 – Индукции магнитных полей, созданных токами в фазах A1 и B1 первой линии, при расположении КИ вблизи A2

Чтобы оценить насколько сильно влияют магнитные поля, созданные токами в двух поврежденных фазах второй линии при двухфазном КЗ, на индукцию магнитного поля в точке установки геркона вблизи неповрежденной фазы, токи 600 А подавались поочередно в каждые две фазы второй линии (рисунок 5).

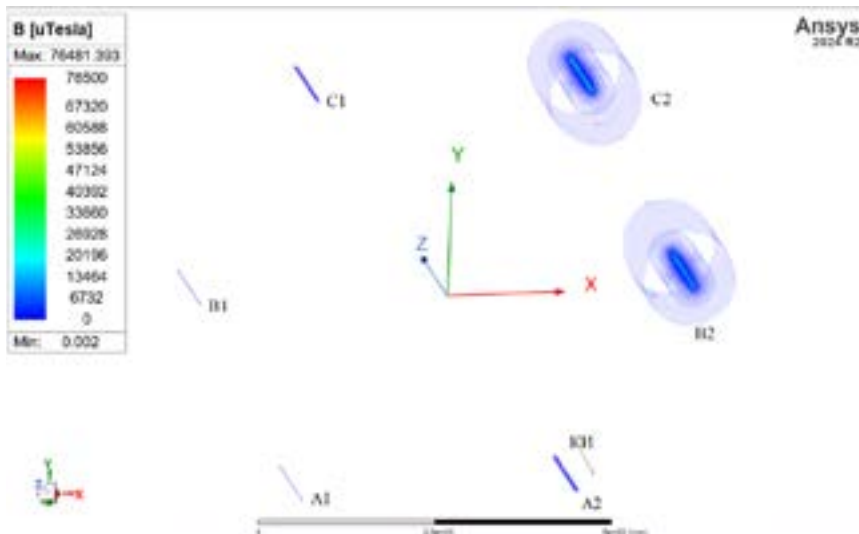


Рисунок 5 – Индукции магнитных полей, созданных токами в фазах В2 и С2 второй линии, при расположении КИ вблизи А2

Далее были измерены ЭДС на выводах КИ при двойном замыкании на землю, когда одна из точек находится в зоне каскадного действия, а другая на линии, отходящей от шин приемной подстанции. При этом рассматривался режим, когда выключатель поврежденной линии со стороны приемной подстанции отключился по сигналу от релейной защиты. Вариант, когда он еще включен, не рассматривается, так как в этом режиме токи протекают в двух фазах каждой из линий и соизмеримы с токами двухфазного КЗ, влияние которых рассмотрено выше. При моделировании токи 600 А подавались одновременно в одну фазу первой линии и в одну фазу (не одноименную) второй линии.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений ЭДС во всех указанных режимах сведены в Таблицы 1 и 2. В заголовках столбцов указаны фазы в которые подавались токи, например «A1C1» означает, что токи подавались в фазы А и С первой линии.

Таблица 1 – ЭДС, мВ, на выводах КИ при расположении ее вблизи фазы А2 в точках 1-18 в различных режимах работы линий

№ точ-ки	A2	A2B2 C2	A1B1 C1	A1B1	A1C1	B1C1	A2B2	A2C2	B2C2	A2B1	A2C1	B2A1	B2C1	C2A1	C2B1
1	632,1	649,5	14,1	12,8	17,7	5,8	663,0	632,3	71,0	655,7	620,8	94,3	99,1	28,6	27,2
2	641,2	673,1	16,5	12,6	19,2	7,2	694,6	651,8	83,9	663,8	635,9	117,8	116,1	38,0	32,9
3	650,6	690,0	17,7	12,8	20,7	8,2	715,6	668,0	90,3	668,9	649,2	130,3	126,1	42,0	36,5
4	655,6	703,5	16,9	13,2	20,5	7,6	723,5	676,6	88,6	668,9	660,5	126,1	123,5	40,5	35,7
5	652,1	697,8	13,8	11,4	20,4	6,2	712,1	679,4	76,7	652,8	662,8	103,1	107,8	32,9	30,0
6	660,9	694,5	17,9	19,0	24,3	2,5	699,9	685,4	59,9	651,3	675,6	64,6	84,6	19,4	19,8
7	662,0	685,2	29,7	29,0	39,1	5,4	678,5	682,0	42,3	643,5	680,0	17,8	59,0	27,7	6,7
8	661,2	666,9	47,2	42,3	58,7	11,2	652,9	672,0	28,7	633,8	678,7	30,9	38,7	53,4	7,9
9	658,5	630,8	69,9	56,6	77,3	16,2	627,9	657,1	21,1	626,2	671,1	70,4	28,7	80,8	19,1
10	650,0	616,2	74,2	64,3	90,5	18,4	602,4	634,8	19,0	621,9	654,7	96,3	27,6	97,1	26,9
11	643,4	616,7	82,6	69,7	97,7	19,8	594,0	630,8	18,7	622,1	646,0	105,2	28,0	106,7	29,3
12	637,6	604,7	80,9	67,9	94,2	19,5	584,6	621,4	18,5	625,5	636,7	99,1	27,2	101,7	27,5
13	630,9	596,5	70,8	58,2	82,9	17,0	581,4	611,0	18,6	627,3	626,1	81,8	26,2	88,6	22,7
14	624,3	590,4	58,2	50,9	67,9	13,8	578,3	603,1	20,6	627,4	614,0	57,3	27,3	67,0	15,8
15	624,2	599,0	42,7	38,4	52,5	9,5	589,8	605,2	25,6	633,3	612,2	28,8	34,1	49,2	7,8
16	624,8	605,8	43,8	29,0	39,0	6,3	601,7	609,1	33,6	640,5	611,0	5,2	45,8	31,3	2,1
17	625,1	619,6	30,2	21,3	27,4	3,3	620,9	617,1	44,4	648,4	612,6	34,0	61,7	18,3	9,9
18	630,7	636,5	21,0	15,6	20,4	2,6	644,5	626,8	57,6	654,5	617,9	65,3	80,4	18,9	18,9

Таблица 2 – ЭДС, мВ, на выводах КИ при расположении ее вблизи фазы В2 в различных режимах работы линий

№ точ-ки	B2	A2B2 C2	A1B1 C1	A1B1	A1C1	B1C1	A2B2	A2C2	B2C2	A2B1	A2C1	B2A1	B2C1	C2A1	C2B1
1	627,2	606,6	4,3	6,7	0,1	6,6	601,8	0,1	605,3	43,8	41,4	610,8	610,0	41,2	48,9
2	632,3	622,8	9,3	4,7	8,0	10,8	597,1	34,9	626,6	39,5	27,7	609,0	618,2	63,3	66,9
3	630,5	617,6	15,2	4,0	15,5	14,0	584,3	68,7	646,6	23,5	23,6	609,5	623,6	85,2	85,4
4	639,7	643,4	20,7	5,5	22,0	17,5	595,3	99,3	677,3	22,8	29,7	617,1	638,8	108,7	106,1
5	636,7	649,4	24,6	7,2	26,9	19,9	581,5	122,5	699,9	24,5	36,9	624,2	650,4	125,8	121,3
6	650,3	678,5	25,1	7,5	28,9	20,9	564,8	132,9	719,6	26,0	40,3	639,7	669,2	139,7	128,4
7	652,7	670,8	24,7	6,1	27,9	21,2	604,5	124,8	721,0	25,9	37,0	644,5	671,4	129,5	124,2
8	658,4	679,5	19,4	5,2	21,7	16,4	629,8	97,0	715,8	25,2	29,7	660,7	682,2	108,6	107,0
9	665,9	677,8	11,5	4,9	11,8	15,0	651,8	53,3	697,6	33,6	26,6	672,5	686,4	78,2	81,9
10	666,6	675,5	2,9	9,2	0,1	10,0	679,4	0,0	680,0	53,9	47,3	683,5	685,2	46,9	56,2
11	648,8	657,8	9,8	13,9	11,5	2,9	668,3	53,1	635,2	76,5	76,9	680,1	664,6	26,1	35,3
12	654,0	673,2	19,2	18,6	22,2	5,0	718,5	97,2	622,8	105,5	108,5	679,8	658,9	29,8	28,6
13	651,8	669,7	23,8	21,0	27,7	6,9	721,3	124,8	605,2	122,5	128,9	672,3	644,6	38,1	28,1
14	648,3	660,0	24,9	21,4	29,1	7,9	711,4	132,7	593,3	125,2	134,8	662,8	633,4	40,5	28,1
15	638,3	648,5	22,7	20,1	26,7	7,2	698,6	122,3	583,4	119,1	126,2	647,9	620,7	36,8	27,2
16	630,1	629,9	18,5	17,4	21,9	5,6	670,3	99,2	580,0	102,6	108,4	632,6	612,1	29,7	26,4
17	636,1	625,6	13,1	14,3	15,5	3,5	656,2	68,6	583,2	84,0	85,6	630,8	615,8	23,8	29,1
18	627,9	611,2	6,8	9,6	7,9	2,5	627,5	34,9	592,1	64,5	62,8	618,0	609,2	27,5	37,3

Из таблиц видно, что в зависимости от точки расположения КИ изменяется и влияние токов в фазах В2 и С2 (А2 и С2) второй линии и токов в фазах первой линии на ЭДС на выводах КИ, установленной вблизи фазы А2 (В2). Так, наименьшее и наибольшее влияние токи в первой линии в трехфазном режиме оказывают на КИ, установленную вблизи фазы А (В) в точках 5 (точке 10) и 12 (точке 14), соответственно. При имитации двойного замыкания в фазах С2 и В1 это точки 16 и 3.

ЭДС на выводах КИ, и, следовательно, индукцию магнитного поля, в этих точках в различных режимах при любой величине тока можно определить путем умножения полученных ЭДС на кратность k рассматриваемого тока к 600 А. Для определения суммарной индукции в точке, считая в наихудшем случае, что индукции от токов в соседних фазах и соседней линии совпадают по фазе с индукцией магнитного поля от тока в фазе А2 (В2), можно просто сложить или вычесть ЭДС с учетом умножения на коэффициент k . Покажем это. Рассмотрим суммарную ЭДС, наведенную на КИ в точке 16 вблизи фазы А2 при трехфазном КЗ на шинах приемной подстанции. В этом режиме токи в обеих линиях одинаковы. Пусть они равны 3 кА. Тогда $k=5$, ЭДС от токов в фазах А2, В2, С2 $E_2=605,8 \times 5 = 3029$ мВ, а ЭДС от токов в фазах А1, В1, С1 $E_1=43,8 \times 5 = 219$ мВ. При этом суммарная ЭДС $E_2=3248$ мВ. Аналогично и для других режимов.

Анализ величин ЭДС в каждой точке в различных режимах показал, что оптимальными при расположении КИ вблизи фаз А2 и В2 являются точки 16 и 1, соответственно. Благодаря симметричному закреплению фаз (рис. 1) на опоре, симметрично располагаются и оптимальные точки для установки герконов. Тогда считая, что нумерация точек вблизи каждой фазы одинакова, то для фаз А1, В1, С1 и С2 оптимальными будут номера 7, 10, 12 и 4. Отметим, что при выборе уставок срабатывания герконов, установленных в этих точках, нужно будет рассматривать все режимы работы линий. Это объясняется тем, что токи в фазах могут влиять как в сторону уменьшения индукции вдоль оси геркона, так и в сторону ее увеличения. В результате может получиться так, что при одном виде повреждения индукция окажется недостаточной для срабатывания геркона, а в другом, в котором он не должен срабатывать – наоборот превышающей его индукцию срабатывания.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP22685154).

Выводы

Представленная модель, построенная в программе Ansys Maxwell позволяют исследовать магнитные поля вокруг двух параллельных линий,

закрепленных на двухцепной опоре, в различных режимах их работы. Анализ полученных результатов показал: а) наиболее оптимальными для установки герконов вблизи фаз А, В и С второй линии являются точки 16, 1 и 4, вблизи фаз А, В и С первой линии – 7, 10 и 12; б) при выборе уставок нужно рассматривать все виды повреждений на линиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Андреев, В. А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст]. – М. : Высшая школа, 2006. – 639 с.

2 **Gilany, M. I., Malik, O. P., Hope, G.S.** A digital technique for parallel transmission lines using a single relay at each end [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, Issue 1. – P. 118–123.

3 **Eissa, M. M., Malik, O. P.** A new digital directional transverse differential current protection technique [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, Issue 3. – P. 1285–1291.

4 **Forcan, M., Stojanović, Z.** An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs [Text] // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 137. – P. 86–95.

5 **Forcan, M., Stojanović, Z.** Transverse differential protection scheme for double-circuit lines with single-pole tripping and reclosing [Text] // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2019. – Vol. 30. – e12152.

6 **Osman, A. H., Malik, O. P.** Protection of parallel transmission lines using wavelet transform [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, Issue 1. – P. 49–55.

7 **Li, W., Wang, X., Li, Z., Du, D.** A combined phase selector element based on the superimposed sequence components for parallel lines on the same tower [Text] // In: Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Hong Kong, 2013. – P. 1–6.

8 **Jena, P., Pradhan, A. K.** Solution to directional relaying for double circuit line [Text] // In: International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS). – Bhubaneswar, 2011. – P. 1–6.

9 **Zhang, G., Shu, H., Lopes, F.V., Liao, Y.** Single-ended travelling wave-based protection scheme for double-circuit transmission lines [Text] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 98. – P. 93–105.

10 **Дьяков, А. Ф., Ишкин, В. Х., Мамиконянц, Л. Г., Семенов, В. А.** Электроэнергетика мира в начале XXI столетия (по матер. 39-й сессии СИГРЭ, Париж) [Текст] // Энергетика за рубежом. – М.: ЗАО Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», 2004. – Вып. 4–5. – 176 с.

11 **Kojić, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design [Text] // CIGRE Session 46. – B3–101. – 2016.

12 **Goryunov, V., Kletsel, M., Mashrapov, B., Mussayev, Zh., Talipov, O.** Resource-saving current protections for electrical installations with isolated phase busducts [Text] // Alexandria Engineering Journal, 2021. – Vol. 61, Issue 8 – P. 6061–6069.

13 **Kletsel, M. Ya., Mashrapov, B. E., Mashrapova, R. M.** Reed switch protection of double-circuit lines without current and voltage transformers [Text] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems – 2023. – Vol. 154 – 109457.

REFERENCE

1 **Andreev, V.A.** Relejnaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply systems] [Text]. – M. : Vysshaya shkola, 2006. – 639 p.

2 **Gilany, M. I., Malik, O. P., Hope, G.S.** A digital technique for parallel transmission lines using a single relay at each end [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, Issue 1. – P. 118–123.

3 **Eissa, M. M., Malik, O. P.** A new digital directional transverse differential current protection technique [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, Issue 3. – P. 1285–1291.

4 **Forcan, M., Stojanović, Z.** An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs [Text] // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 137. – P. 86–95.

5 **Forcan, M., Stojanović, Z.** Transverse differential protection scheme for double-circuit lines with single-pole tripping and reclosing [Text] // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2019. – Vol. 30. – e12152.

6 **Osman, A. H., Malik, O. P.** Protection of parallel transmission lines using wavelet transform [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, Issue 1. – P. 49–55.

7 **Li, W., Wang, X., Li, Z., Du, D.** A combined phase selector element based on the superimposed sequence components for parallel lines on the same tower [Text] // In: Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Hong Kong, 2013. – P. 1–6.

8 **Jena, P., Pradhan, A. K.** Solution to directional relaying for double circuit line [Text] // In: International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS). – Bhubaneswar, 2011. – P. 1–6.

9 **Zhang, G., Shu, H., Lopes, F.V., Liao, Y.** Single-ended travelling wave-based protection scheme for double-circuit transmission lines [Text] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 98. – P. 93–105.

10 **Diakov, A.F, Ishkin, V.Kh, Mamikonians, L.G, Semenov, V.A.** Elektroenergetika mira v nachale XXI stoletii (po mater 39-i sessii SIGRE Parizh) [Electric power industry of the world at the beginning of the XXI century (based on the materials of the 39th session of CIGRE, Paris)] [Text] // Energy Abroad. – M. : CJSC Scientific and technical firm “Energoprogress”, 2004. – Issue 4–5. – 176 p.

11 **Kojić, L. A.** Non-conventional instrument transformers for improved substation design [Text] // CIGRE Session 46. – B3–101. – 2016.

12 **Goryunov, V., Kletsel, M., Mashrapov, B., Mussayev, Zh., Talipov O.** Resource-saving current protections for electrical installations with isolated phase busducts [Text] // Alexandria Engineering Journal, 2021. – Vol. 61, Issue 8 – P. 6061–6069.

13 **Kletsel, M. Ya., Mashrapov, B. E., Mashrapova, R. M.** Reed switch protection of double-circuit lines without current and voltage transformers [Text] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems – 2023. – Vol. 154. – 109457.

Поступило в редакцию 04.12.25.

Поступило с исправлениями 10.02.26.

Принято в печать 29.05.26.

*Р. М. Маширапова¹, *Б. Е. Маширапов²*

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
04.12.25 ж. баспаға түсті.

10.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

29.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІ ПАРАЛЛЕЛЬ ЖЕЛІНІҢ ҚОРҒАНЫСЫН ҚҰРУҒА АРНАЛҒАН ГЕРКОНДАРДЫ ОРНАТУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ НҮҚТЕЛЕРІН АНЫҚТАУ

Параллель электр жеткізу желілерін металл сыйымдылығы жоғары және қымбат ток трансформаторларын қолданбай тиімді қорғау құрылғыларын құрудың өзекті қажеттілігі айқындалған. Бұл бағыттағы жұмыстар басталғанымен, желі фазалары маңындағы магнит өрістерінің әртүрлі жұмыс режимдеріндегі таралуын зерттеу жеткіліксіз екені атап өтілген. Екі параллель желінің

компьютерлік моделі ұсынылған, мұнда олардың фазалары екі тізбекті тірекке бекітілген. Сымдардың орналасуы үшбұрыштың төбелері бойынша қарастырылған: екі желінің А және С фазалары В фазасына қатысты симметриялы, ал бірінші және екінші желінің барлық үш фазасы тірекке қатысты симметриялы орналастырылған. Желі фазаларындағы токтардың әртүрлі жұмыс режимдерінде олардың маңындағы нүктелердегі магнит өрісінің индукциясына әсерін зерттеу әдістемесі толық сипатталған. Үш фазалы және екі фазалы қысқа тұйықталуларды, сондай-ақ желінің екі нүктесіндегі тұйықталуларды модельдеу нәтижелері нақты келтірілген. Зерттеу нәтижесінде геркон орнату нүктесіне байланысты магнит өрістерінің әсері оның осі бойындағы жиынтық индукцияны арттыруы да, төмендетуі де мүмкін екені анықталды. Алынған деректерді талдау негізінде қарастырылып отырған электр жеткізу желілерінің қорғанысын құру кезінде геркондарды орнатудың ең оңтайлы нүктелері дәл анықталды.

Кілтті сөздер: Модельдеу, магниттік өрістер, параллель желілер, геркон, индуктивтік катушка, орнату нүктесі.

R. M. Mashrapova¹, *B. E. Mashrapov²

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 04.12.25.

Received in revised form 10.02.26.

Accepted for publication 29.05.26.

DETERMINATION OF OPTIMAL REED SWITCH INSTALLATION POINTS FOR CONSTRUCTING PROTECTION OF TWO PARALLEL LINES

The necessity of developing protection systems for parallel transmission lines without using bulky and expensive current transformers is substantiated. Although initial work in this direction has begun, studies on the distribution of magnetic fields near line phases under various operating conditions remain insufficient. A computer model of two parallel transmission lines mounted on a double-circuit tower is presented. The conductors are arranged at the vertices of a triangle, where phases A and C of both lines are symmetrically positioned relative to phase B, and all six phases are symmetrically arranged with respect to the tower structure. A methodology for studying the influence of phase currents in different

operating modes on the magnetic-flux density at points near the conductors is described. Results are provided for simulated three-phase and two-phase short circuits, as well as faults occurring at two points of the network. It is established that, depending on the reed switch installation point, the resulting magnetic field may either increase or decrease the total induction along the switch's axis. Based on a detailed analysis of the obtained data, optimal installation points for reed switches in protection schemes for the considered parallel transmission lines have been determined.

Keywords: double-circuit lines, magnetic fields; modeling; reed switch; inductive coil; installation point.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz