

**НАПРАВЛЕННАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Г.А. ЗАХАРОВ, А.М. ОППАХОДЖАЕВ, Ж.И. ШЕВЧЕНКО, М.А. СООБЦОКОВ

*Кубанский государственный технологический университет
350002, Российская федерация, г. Краснодар, ул. Московская 2;
электронная почта: zakharovga@gmail.com*

Рассмотрены вопросы применения направленной токовой защиты в электрических сетях среднего напряжения 6-10 кВ, а также теоретические аспекты ее построения на основе преобразователей с вращающимся магнитным полем. Предложен вариант практической реализации ступени направленной токовой защиты с основными реагирующими органами, выполненными на основе однофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем оригинальной конструкции, произведен расчет основных характеристик срабатывания защиты для выбранной схемы. Основным результатом использования предложенной схемы защиты является улучшение ее технических характеристик по точности и быстродействию работы.

Ключевые слова: релейная защита, направленная токовая защита, орган контроля тока, орган направления мощности, преобразователи с вращающимся магнитным полем, однофазный трансформатор с вращающимся магнитным полем, измерительный трансформатор.

Применение направленных токовых защит в электрических сетях напряжением 6-10 кВ в настоящее время является довольно распространенным техническим решением. Прежде всего, ввиду развития распределенной генерации многими промышленными предприятиями, как правило, в виде собственных газопоршневых и газотурбинных электростанций (ЭСН) мощностью до 20 МВт с последующим включением их на параллельную работу с внешней электрической сетью энергосистемы.

На рисунке 1 представлена общая структурная схема направленной токовой защиты линии электропередач. Для схемы, подобной ЭСН, приведенной на рисунке, вне зависимости от работы электростанции с выдачей мощности в общую сеть или без нее, линии связи с энергосистемой являются линиями с двухсторонним питанием, и, следовательно, для них токовая защита от коротких замыканий (КЗ) должна быть выполнена с контролем направления мощности.

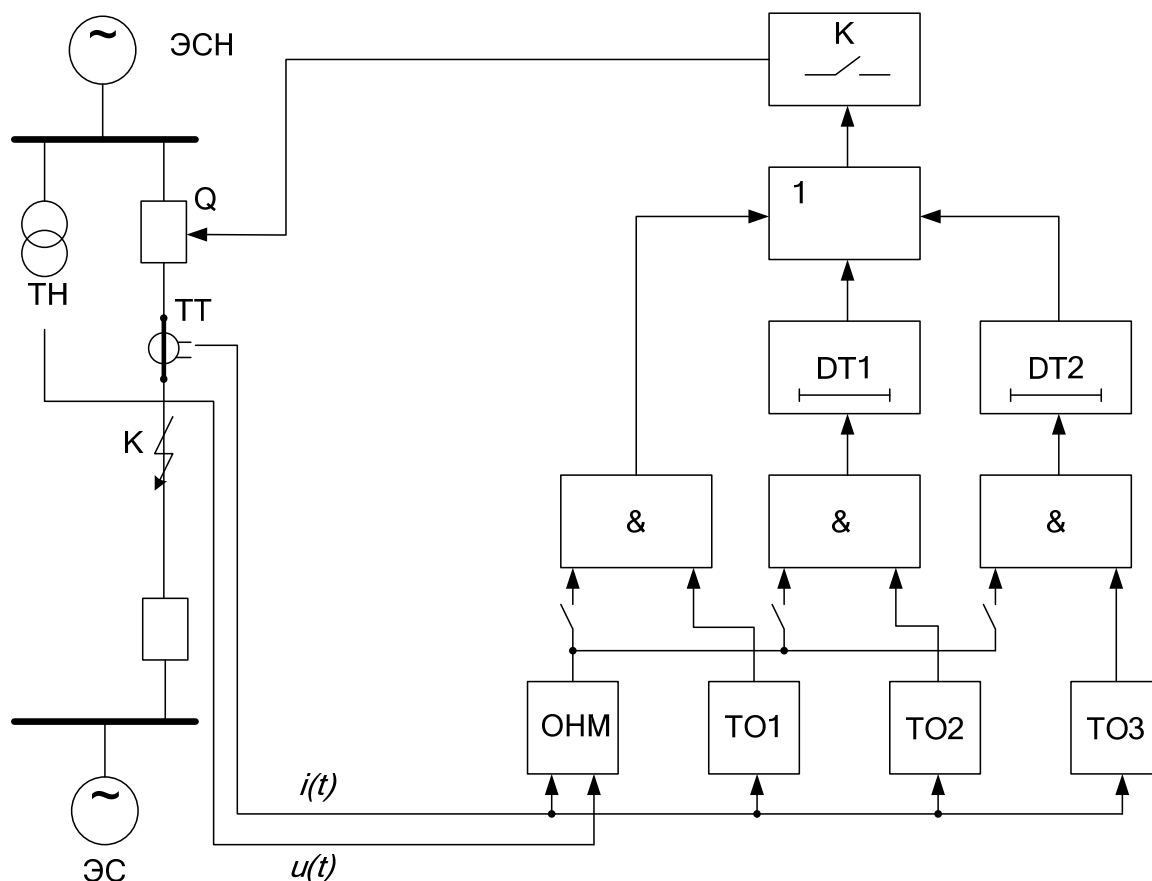


Рисунок 1 – Структурная схема трехступенчатой направленной токовой защиты линии

На данной схеме отражена структура трехступенчатой направленной защиты линии среднего напряжения с двухсторонним питанием. Основными реагирующими органами защиты являются токовые органы ТО1 – ТО2 (соответственно токовая отсечка без выдержки времени, максимальная токовая защита с выдержкой времени – 1 и 2 ступени), орган направления мощности ОНМ является основным разрешающим органом, контролирующим направление мощности КЗ. При этом для отдельных ступеней защиты ОНМ может быть не введен и контроль мощности КЗ не осуществляться.

В рассматриваемой защите ТО относятся к измерительным органам с одной контролируемой величиной (ток $i(t)$), ОНМ – измерительными органами с двумя контролируемыми величинами (ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$). Данные органы являются основными в составе направленной токовой защиты линии, от их собственных характеристик (точности, быстродействия), а также

взаимодействия напрямую зависит степень эффективности и уровень совершенства защиты.

Одним из вариантов реализации токовой направленной защиты линии, является ее выполнение на базе преобразователей с вращающимся магнитным полем (ПВМП). Построение данной защиты на основе однофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем (ОТВП) [2] позволяет технических преимуществ по быстродействию, точности работы, аналогичных описанным в [1, 3, 4] для отдельных реле тока, направления мощности, сопротивления.

Структурная схема, отображающая принципиальную реализацию ступени направленной токовой защиты, приведена на рисунке 2. Ее работа основывается на принципе сравнения абсолютных значений электрических величин. Устройство содержит датчик тока (ПВМП I), датчик напряжения (ПВМП U), выпрямители (В1, В2, В3), органы сравнения (ЧС1 и ЧС2), исполнительный орган (ИО).

К защите подводятся две электрические синусоидально изменяющиеся величины, значения которых в комплексном виде выражается, как \dot{U} , \dot{I} .

Область срабатывания ТО будет являться $|\dot{I}| \geq I_{\text{отд}}$, что также может быть представлено как:

$$|\dot{E}_3| = |k_5 \dot{I}| = U_{\text{отд}} \quad (1)$$

Область срабатывания ОНМ [3] будет определяться величиной $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I}$, значение которой может быть отложено на комплексной плоскости \underline{Z} . Датчиками тока и напряжения формируются электрические величины

$$\dot{E}_1 = k_1 \dot{U} + k_2 \dot{I} \text{ и } \dot{E}_2 = k_3 \dot{U} + k_4 \dot{I}.$$

Условием срабатывания ОНМ является:

$$|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|; \quad (2)$$

Или с учетом значений \dot{E}_1 , \dot{E}_2 и $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I}$:

$$|\underline{k}_1 \underline{Z} + \underline{k}_2| = |\underline{k}_3 \underline{Z} + \underline{k}_4|. \quad (3)$$

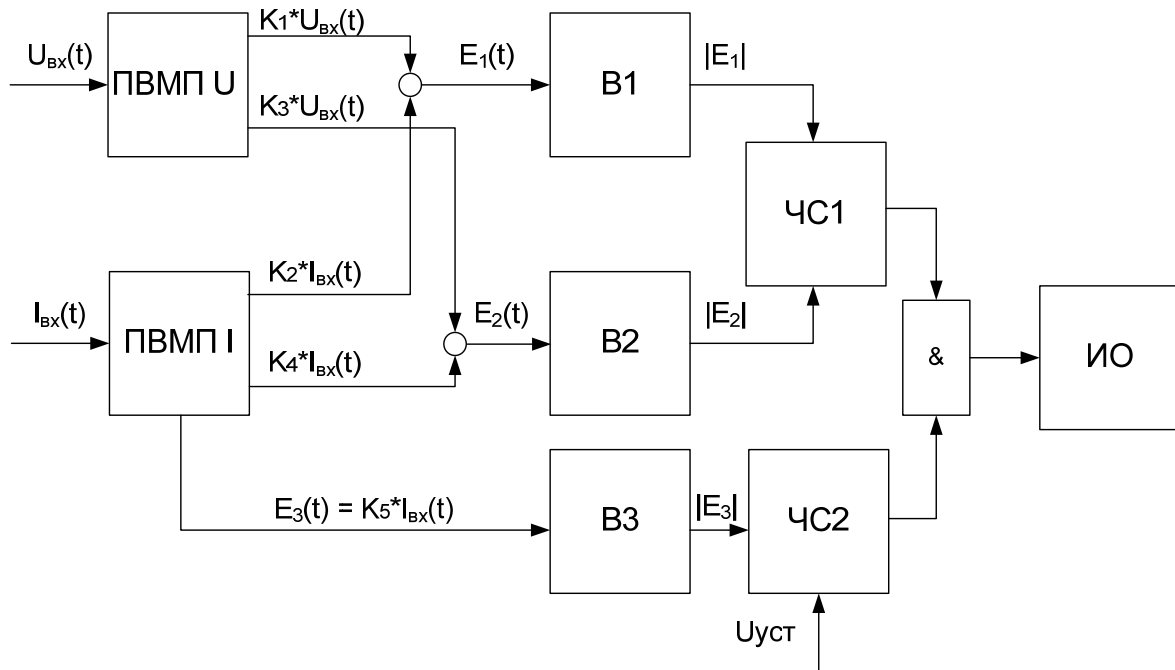


Рисунок 2 – Структурная схема ступени направленной токовой защиты на основе ПВМП

Постоянные комплексные коэффициенты в выражениях (1) и (3) $\underline{k}_1 = k_1 e^{i\varphi_1}, \underline{k}_2 = k_2 e^{i\varphi_2}, \underline{k}_3 = k_3 e^{i\varphi_3}, \underline{k}_4 = k_4 e^{i\varphi_4}, \underline{k}_5 = k_5 e^{i\varphi_5}$ формируемые пространственным расположением и электрическим соединением групп вторичных многофазных обмоток. Модули коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 учитывают преобразование входных величин по амплитуде, значения аргументов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – по фазе. Коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 пропорциональны количеству витков вторичных обмоток ПВМП, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – определяются пространственным сдвигом вторичных обмоток ПВМП относительно первичных на магнитопроводе.

Характеристикой срабатывания ОНМ в комплексной плоскости сопротивлений будет иметь вид прямой линии, проходящей через начало координат (рисунок 2 [3]):

$$X = \left(\frac{\cos(\varphi_3 - \varphi_4) - \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - \sin(\varphi_3 - \varphi_4)} \right) \cdot R \quad (4)$$

Наклон характеристики срабатывания к действительной оси будет определять уставку срабатывания ОНМ, выражение для которой может быть получено путем алгебраических преобразований (3) и (4) [3]:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos(\varphi_3 - \varphi_4) - \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - \sin(\varphi_3 - \varphi_4)} \right) \quad (5)$$

Примем следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= \alpha \\ \varphi_3 - \varphi_4 &= \beta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Выполнив подстановку (6) в (5) можно получить окончательное значение для уставки ОНМ:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} \right) = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (7)$$

Условием срабатывания направленной МТЗ на основе ПВМП является одновременное срабатывание ТО и ОНМ в составе защиты.

В данном устройстве, в отличие промышленных образцов аналогичных защит, где роль датчика тока выполняет трансреактор (ТР), а датчиков напряжения трансформатор (ТН), использованы ПВМП. Защита данной конструкции имеет явное преимущество над существующими направленными МТЗ, так как при выполнении вторичных обмоток ПВМП на большое число фаз и выпрямлении снимаемого с них вторичного многофазного сигнала, достигается стабильное, с низким коэффициентом пульсации, выпрямленное напряжение, что повышает надежность работы ЧС1 и ЧС2, которые, в свою очередь, могут быть реализованы на любой элементной базе: электромеханической (надежность повышается путем устранения дребезга якоря реле), полупроводниковой (уменьшением интеграции полупроводниковых элементов в схему реле) или микропроцессорной (вследствие определения посредством самих ПВМП информационных

признаков – амплитуды сигналов, а также восстановления сигнала при насыщении измерительного трансформатора тока) [3].

В качестве примера практической реализации направленной максимальной токовой защиты линии электропередач с применением ОТВП может являться схема, представленная на рисунке 3.

В состав устройства входят два датчика в виде ОТВП: для тока – ОТВП(I) и для напряжения – ОТВП(U). Оба данных датчика выполнены по четырехобмоточной схеме ОТВП [2] с балластными резистором и дросселем, и отличаются друг от друга только параметрами их составных элементов.

Работа устройства, представленного на рисунке 3, осуществляется следующим образом. От первичных измерительных преобразователей тока и напряжения ТТ и ТН на входы устройства поступают сигналы $i(t)$ и $u(t)$. Вызываемый ими в первичных обмотках ток наводит в магнитопроводах устройства вращающиеся магнитные поля и соответственно систему многофазных ЭДС во вторичных обмотках.

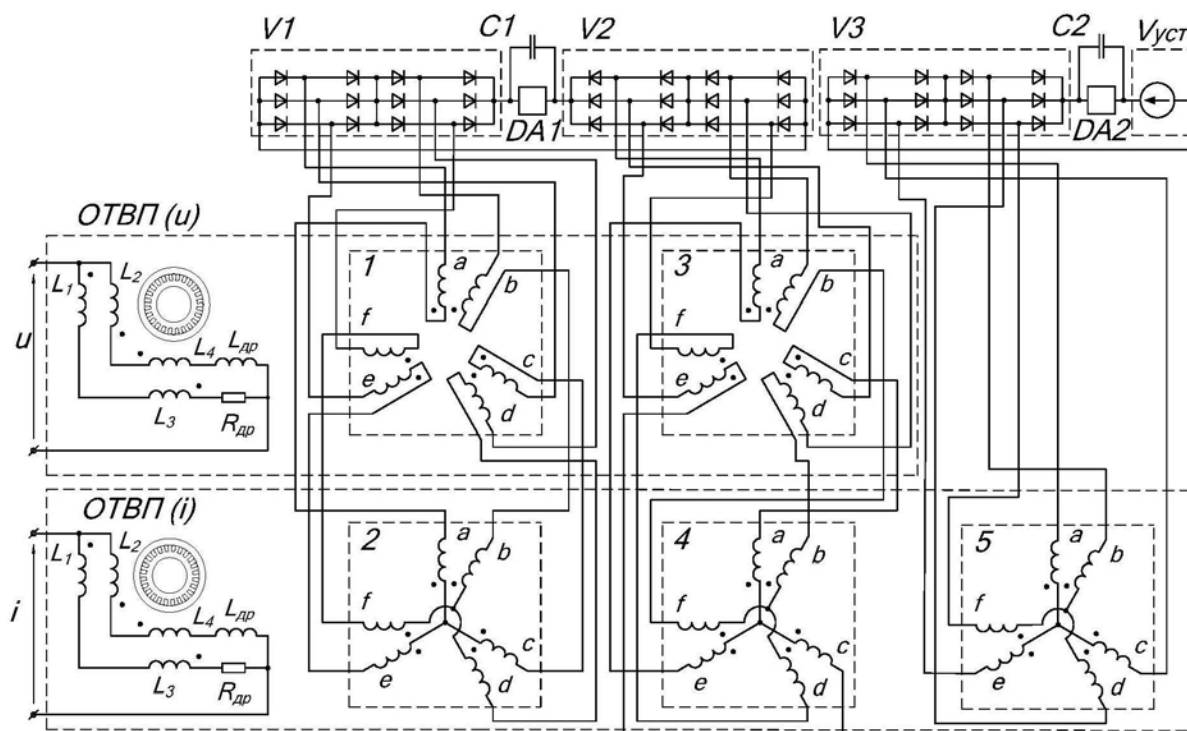


Рисунок 3 – Принципиальная схема ступени направленной токовой защиты на основе ОТВП

Для данного устройства принята шестифазная схема вторичных обмоток как оптимальная по степени трудоемкости изготовления и уровню пульсации напряжения при последующем выпрямлении, со следующим сдвигами между смежными фазами: 0° , 30° , 120° , 150° , 240° , 270° .

Датчик тока ОТВП(I) имеет три группы вторичных обмоток 2, 4, 5; датчик напряжения ОТВП(U) – две группы вторичных обмоток 1, 3. Обмотки 1, 2, 3, 4 своим пространственным сдвигом на магнитопроводах и взаимным соединением служат для формирования требуемой характеристики направления мощности, обмотка 5 – для формирования требуемой уставки по току.

В качестве выходных элементов реле направления мощности и реле тока в составе устройства служат нуль-индикаторы $DA1$ и $DA2$, на основании их совместного срабатывания определяется факт срабатывания устройства в целом. Для устранения незначительных пульсаций сравниваемых ими напряжений, параллельно нуль-индикаторам включены сглаживающие фильтры $C1$ и $C2$.

Так как вторичные обмотки ОТВП работают в режиме близком к холостому ходу, то для них, при использовании первичных четырехобмоточных схем ОТВП без учета их активных сопротивлений, можно записать следующие выражения [1].

Для датчика напряжения ОТВП(U):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{aU} &= (0,569 + j0,04) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{4^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{bU} &= (0,513 + j0,249) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{-26^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{cU} &= (-0,249 - j0,513) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{-116^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{dU} &= (-0,472 - j0,319) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{-146^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{eU} &= (-0,319 + j0,472) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{124^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{fU} &= (-0,04 + j0,569) \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} = 0,57e^{135^{\circ}j} \cdot k_{mU} \cdot \dot{U} \end{aligned} \right\} (8)$$

Для датчика тока ОТВП(I):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{aI} &= (0,25 + j0,25) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{45^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \cdot \dot{U} \\ \dot{E}_{bI} &= (0,342 + j0,092) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{15^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \\ \dot{E}_{cI} &= (0,092 - j0,342) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{-75^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \\ \dot{E}_{dI} &= (-0,092 - j0,342) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{-105^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \\ \dot{E}_{eI} &= (-0,342 + j0,092) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{165^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \\ \dot{E}_{fI} &= (-0,25 + j0,25) \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} = 0,354e^{135^\circ j} \cdot \omega \cdot k_{mI} \cdot L \cdot \dot{I} \end{aligned} \right\} (9)$$

Из систем (8) и (9) можно получить значения постоянных комплексных коэффициентов для схемы направленной токовой защиты на основе ОТВП (рисунок 3):

$$\left. \begin{aligned} \underline{k}_1 &= 0,57e^{(4^\circ + n_1 \cdot \Delta\varphi)j} \cdot k_{1mU} \\ \underline{k}_2 &= 0,354e^{(45^\circ + n_2 \cdot \Delta\varphi)j} \cdot \omega \cdot k_{2mI} \cdot L \\ \underline{k}_3 &= 0,57e^{(4^\circ + n_3 \cdot \Delta\varphi)j} \cdot k_{3mU} \\ \underline{k}_4 &= 0,354e^{(45^\circ + n_4 \cdot \Delta\varphi)j} \cdot \omega \cdot k_{4mI} \cdot L \\ \underline{k}_5 &= 0,354e^{(45^\circ + n_5 \cdot \Delta\varphi)j} \cdot \omega \cdot k_{5mI} \cdot L \end{aligned} \right\}, (10)$$

где $\Delta\varphi$ – это значение пазового шага магнитопроводов ОТВП(U) и ОТВП(I) (для шестифазных ОТВП $\Delta\varphi = 15^\circ$), n - номер паза расположения обмотки фазы a .

С учетом условий (1) и (7) уставки срабатывания направленной токовой защиты на основе ОТВП можно представить как:

- для ТО: $U_{\dot{o}\dot{o}\dot{o}} = 0,354 \cdot \omega \cdot k_{5mI} \cdot L \cdot I_{\dot{o}\dot{o}\dot{o}}$.

- для ОНМ: при $n_2 = n_3 = n_4 = 0$, $\varphi = -41^\circ + 0,5 \cdot n_1 \cdot \Delta\varphi$.

Таким образом, для получения защиты с уставками: $I_{ycm} = 10A$; $\varphi = 124^\circ$, при первичных параметрах ОТВП $L_I = 0,9$ мГн, $k_{5mI} = 5$, необходимо выбрать вторичные параметры: $U_{ycm} = 5$ В; $n_1 = 22$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробейников Б.А. Дистанционный орган релейной защиты на основе преобразователей с вращающимся магнитным полем / Коробейников Б.А., Захаров Г.А., Радионов В.М. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №3, 2013. С. 68–72.

2. Патент 2333562 РФ. Однофазный трансформатор вращающегося поля [Текст]/ Б.А. Коробейников, Д.И. Сидоров (РФ). – 5 с.

3. Коробейников Б.А. Фазочувствительный орган релейной защиты на основе трансформаторов с вращающимся магнитным полем/ Б.А. Коробейников, Д.И. Сидоров, В.М. Радионов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 4. С. 28-31.

4. Коробейников Б.А. Реле тока на основе трансформаторов с вращающимся магнитным полем/ Б.А. Коробейников, Д.И. Сидоров, Д.А. Литягин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 2. С. 67-69.

REFERENCES

1. Korobeynikov B.A. Distantcionnyy organ releynoy zashchity na osnove preobrazovateley s vrashchayushchimsya magnitnym polem / Korobeynikov B.A., Zakharov G.A., Radionov V.M. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. №3, 2013. S. 68–72.

2. Patent 2333562 RF. Odnofaznyy transformator vrashchayushchegosya polya [Tekst]/ B.A. Korobeynikov, D.I. Sidorov (RF). – 5 s.

3. Korobeynikov B.A. Fazochuvstvitelnyy organ releynoy zashchity na osnove transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem/ B.A. Korobeynikov, D.I. Sidorov, V.M. Radionov // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2010. № 4. S. 28-31.

4. Korobeynikov B.A. Rele toka na osnove transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem/ B.A. Korobeynikov, D.I. Sidorov, D.A. Lityagin // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2010. № 2. S. 67-69.

*DIRECTIONAL OVERCURRENT PROTECTION
OF ELECTRICITY LINES OF MEDIUM VOLTAGE BASED
ON CONVERTER WITH A ROTATING MAGNETIC FIELD*

**G.A. ZAKHAROV, A.M. OPKAKHODZHAEV,
ZH.I. SHEVCHENKO, M.A. SOOBTSOKOV**

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350002,
e-mail: zakharovga@gmail.com*

The problems of application of directional overcurrent protection in electrical networks of medium voltage 6-10 kV, as well as theoretical aspects of its construction based on converters with a rotating magnetic field. A variant of the practical implementation stage directional overcurrent protection with basic reacting devices formed on the basis of single-phase transformers with rotating magnetic field of the original design, a calculation of basic protection tripping characteristics for the selected scheme. The main result of the use of the proposed scheme is to improve the protection of its specifications in terms of accuracy and speed of work.

Key words: relay protection, directional overcurrent protection, current control device, the direction of the power control device, converters with a rotating magnetic field, a single-phase transformer with a rotating magnetic field, measuring transformer.