

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С ПУСКОМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА ОСНОВЕ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОЛЕМ

Б.А. КОРОБЕЙНИКОВ, Д.И. СИДОРОВ, В.Г. БУРЛАК, Т.Ю. ДРАЙ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: d.i.sidoroff@gmail.com.*

Максимальная токовая защита является основой релейной защиты в современных электросетях. Однако, современные токовые защиты не лишены недостатков. Часто встречающееся на практике явление - насыщение магнитопровода измерительных трансформаторов, влечет за собой большие погрешности величин тока и напряжения во вторичных цепях, и, как следствие, некорректную работу реле. В статье предложена усовершенствованная максимальная токовая защита с пуском по напряжению с улучшенными характеристиками, основанная на применении многофазных трансформаторов с вращающимся полем. Применение однофазных трансформаторов с вращающимся полем позволяет минимизировать погрешность измерительных трансформаторов, а пусковой орган напряжения - повысить чувствительность максимальной токовой защиты. В ходе работы выполнено моделирование работы МТЗ с пуском по напряжению на основе ОТВП в программе MATLAB, а также экспериментально получены выходные сигналы.

Ключевые слова: реле тока, реле напряжения, трансформатор тока, трансформатор напряжения, вращающееся поле, релейная защита.

Релейная защита является одним из основных видов автоматики в энергосистемах. Основная задача средств релейной защиты – осуществление непрерывного контроля за состоянием всех элементов энергосистемы и реагирование на возникновение повреждений и ненормальных режимов. При возникновении повреждений релейная защита должна выявить поврежденный участок и отключить его от энергосистемы, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения.

Токовые релейные защиты являются основными для защиты электрических сетей всех уровней напряжения и основаны на использовании токовых реле. При этом для реализации токовых защит используются различные информационные признаки, которые формируются исходя из поставленных задач обеспечения надежной работы токовых реле в переходных режимах и при искажениях информации.

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты целесообразно применение дополнительного органа напряжения для запуска МТЗ [1, 2].

Принцип действия МТЗ с пуском по напряжению основан на том, что при возникновении КЗ происходит увеличение тока сверх определенного значения, что приводит к срабатыванию максимальных токовых реле. Для повышения чувствительности МТЗ и улучшения отстройки ее от токов нагрузки применяется пуск при помощи реле минимального напряжения. Защита действует на отключение только при условии срабатывания реле напряжения. Уставки реле напряжения выбираются так, чтобы реле не работало при минимальном уровне рабочего напряжения, не давая возможности защите действовать на отключение, даже если токовые реле замкнут свои контакты в результате перегрузки линии.

При КЗ напряжение сети понижается, и реле минимального напряжения срабатывают, разрешая защите действовать на отключение.

Однако, существует недостаток в современных защитах с пуском по напряжению.

На практике часто встречается насыщение магнитопровода измерительных трансформаторов, это приводит к искажению формы вторичного сигнала и, как следствие, к неправильной работе реле. Для компенсации и минимизации этого явления, предлагается применение МТЗ с пуском по напряжению на основе однофазных трансформаторов с вращающимся полем (ОТВП).

На рисунке 1 изображена схема устройства МТЗ с пуском по напряжению, на основе ОТВП.

Для осуществления МТЗ с пуском по напряжению, необходимо установить на линейное напряжение между любыми двумя фазами защищаемого присоединения измерительный орган напряжения на основе ОТВП (Зажимы 1''-2''). На фазах А и С устанавливаются измерительные органы тока на основе ОТВП (зажимы 1-2, 1'-2'). На фазу В измерительный орган не

устанавливается, т.к. однофазные замыкания в сетях среднего напряжения не являются короткими, и в этом нет необходимости.

Цифрами (3-6) на схеме обозначены первичные обмотки ОТВП. Сигнал со вторичных обмоток (L_a-L_f) ОТВП через многофазный выпрямитель (7) подается на логический орган сравнения (8), который может выполняться на микропроцессорной базе. Логический орган производит анализ полученных данных, и при совпадении параметров превышения максимального порога тока, и снижения напряжения меньше допустимого, подает сигнал на исполнительный орган реле (9), производящий отключение выключателя.

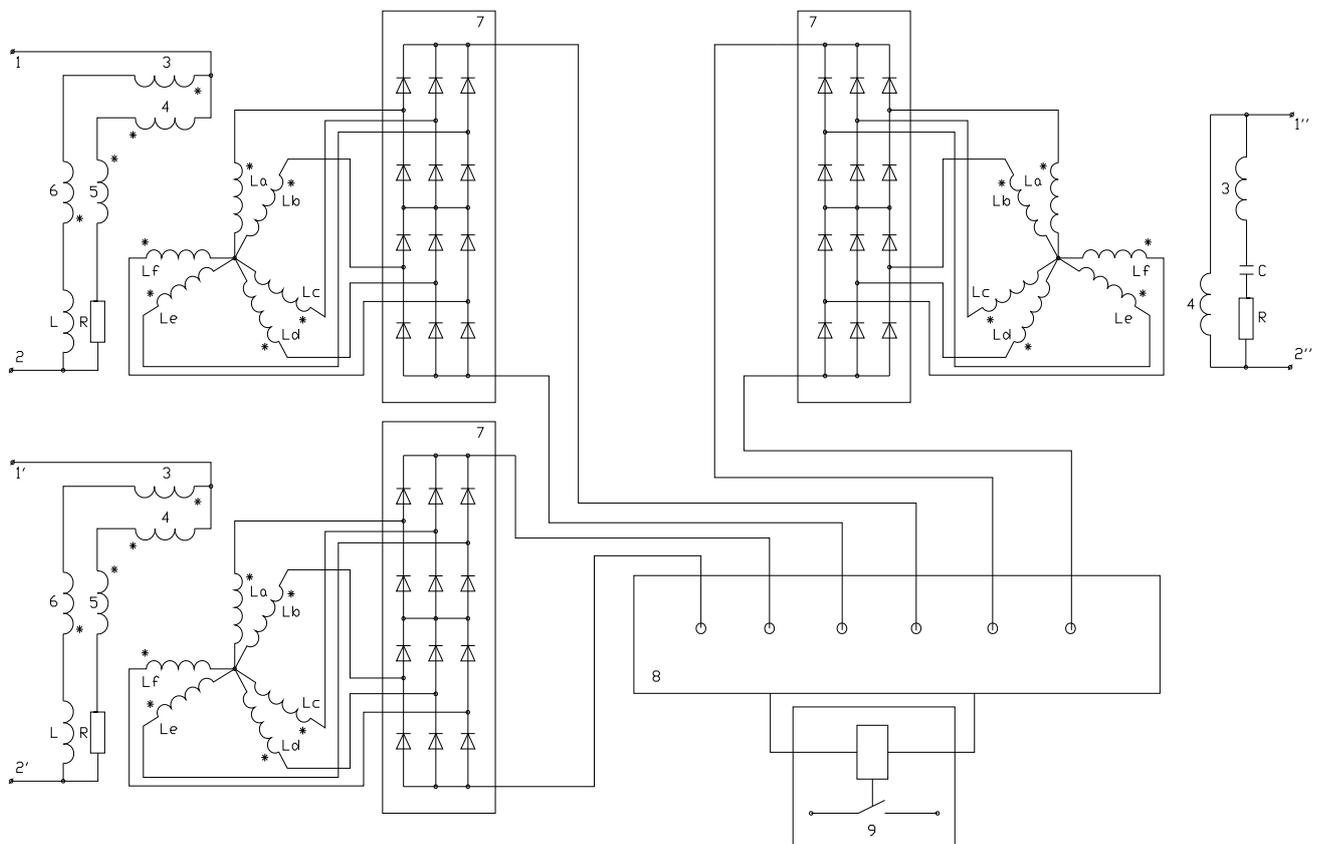


Рисунок 1 – Схема МТЗ с пуском по напряжению на основе ОТВП.

Благодаря многофазному исполнению вторичных обмоток и последующему выпрямлению снимаемого с них напряжения, в реле на основе ОТВП осуществляется коррекция вторичного сигнала, что позволяет скомпенсировать насыщение магнитопровода измерительных трансформаторов [3, 4].

Также, по сравнению с полупроводниковыми и микропроцессорными системами, реле на основе ОТВП обладает повышенной надежностью, помехоустойчивостью, не требует диагностического контроля, характеризуется высокой перегрузочной способностью и простотой конструкции. Отдельно следует отметить невысокую чувствительность устройства к погрешностям измерительных трансформаторов [3, 4].

На рисунке 2 приведены расчетные схемы измерительных органов тока и напряжения на основе ОТВП. На их основе были составлены математические модели с учетом взаимодействия первичных обмоток со вторичными, а также взаимодействия вторичных обмоток между собой, составлены матрицы активных сопротивлений и взаимной индуктивности. На основе полученных зависимостей были сформированы выходные параметры измерительных органов, а также составлена модель МТЗ с пуском по напряжению в программе MATLAB. Модель приведена на рисунке 3.

В верхней части рисунка 3 моделируется электрическая часть схемы. Элементы (PowerSystem) и (Systemreactance) имитируют источник питания, ключ (SC) имитирует короткое замыкание. Управляемый источник тока и насыщающийся трансформатор моделируют измерительный трансформатор тока. Блоки (State-Space) предназначены для решения систем уравнений, составленных по расчетным схемам на рисунке 2 для трансформатора тока и трансформатора напряжения.

Остальные блоки в нижней части схемы имитируют работу сглаживающего элемента, исполнительных органов реле тока и реле напряжения, а также логической части, выдающей окончательный сигнал на срабатывание защиты.

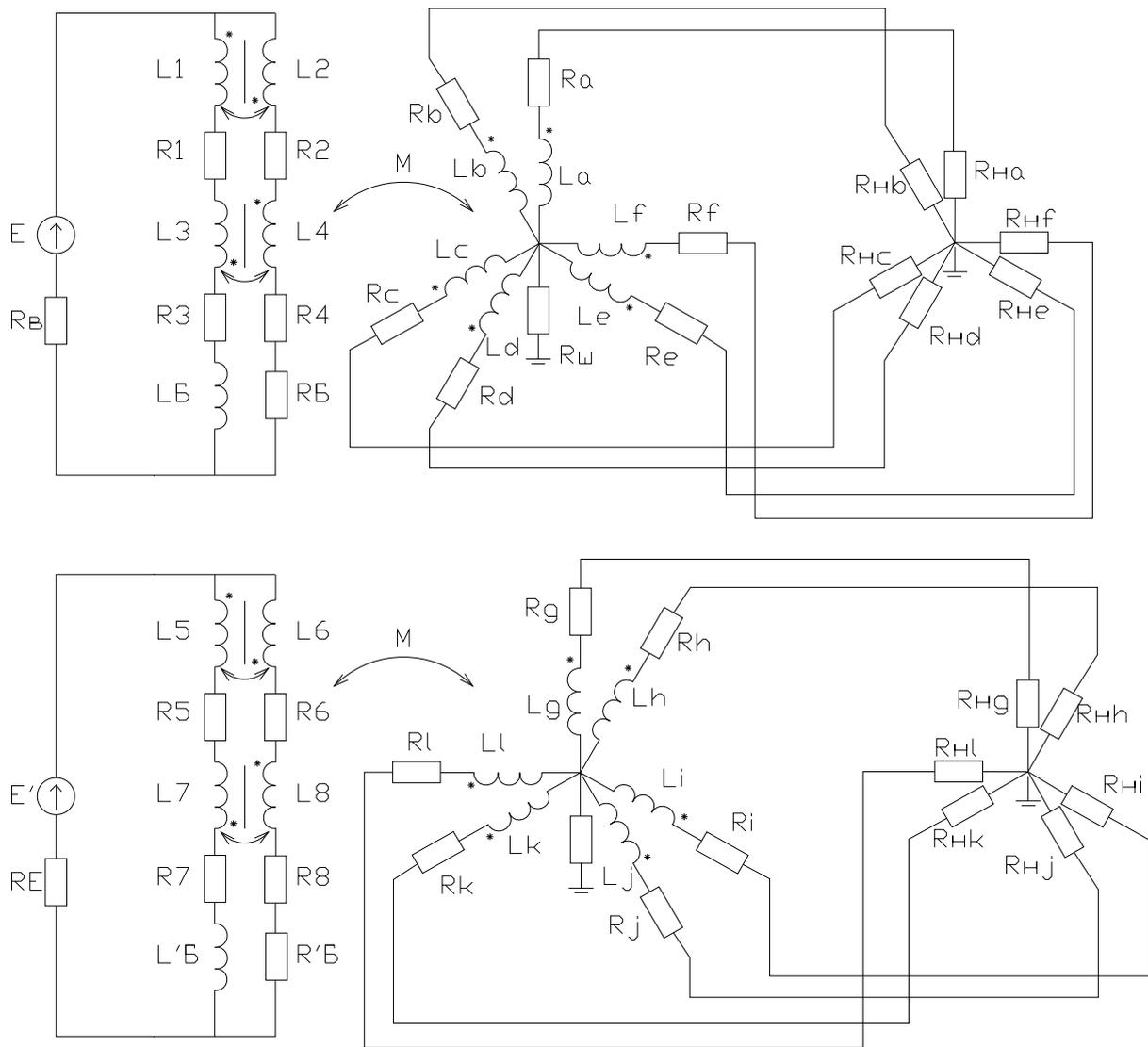


Рисунок 2 – Расчетные схемы измерительных органов тока и напряжения на основе ОТВП с шестифазной системой выходных обмоток.

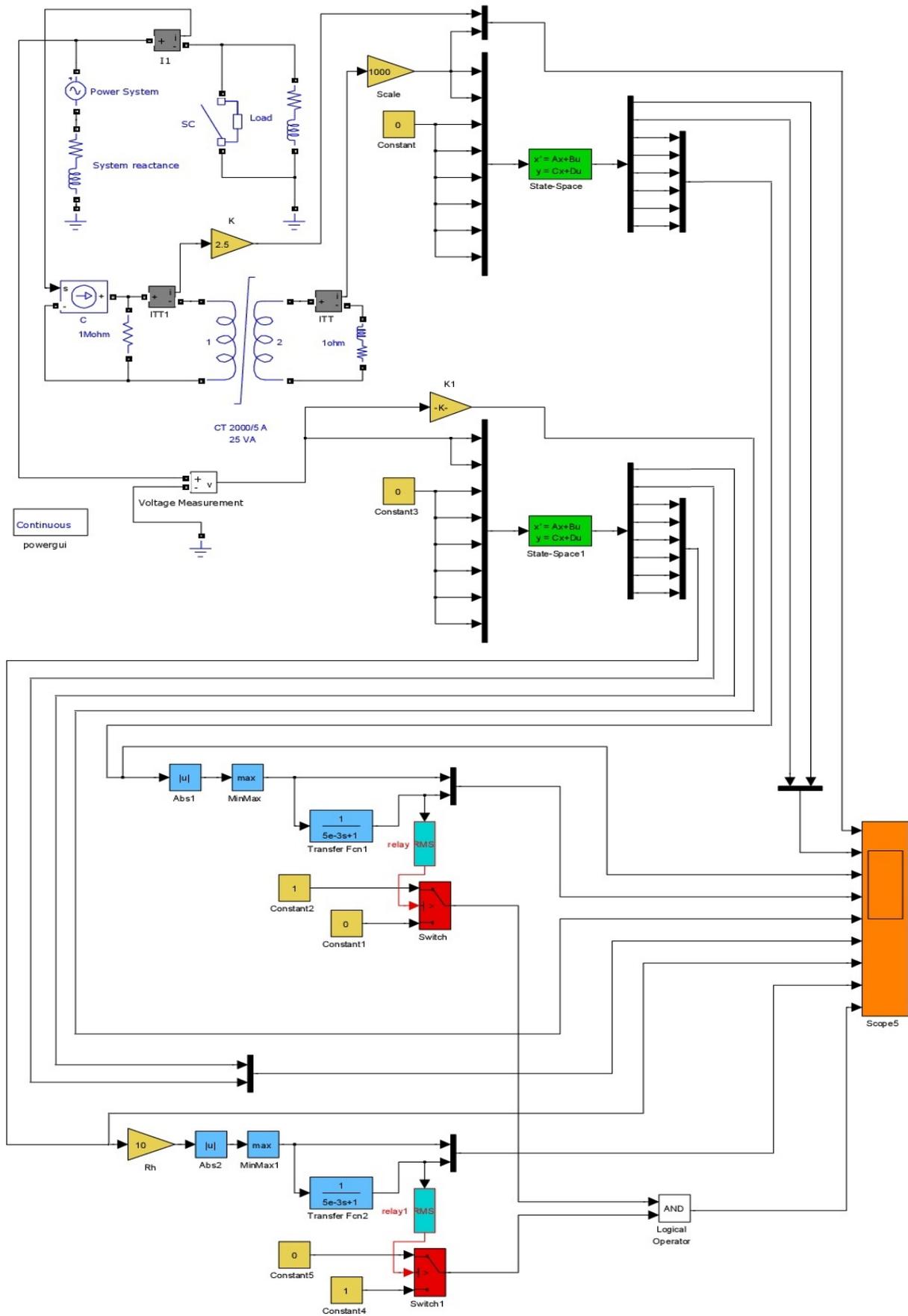


Рисунок 3 – Модель МТЗ с пуском по напряжению на основе ОТВП в программе MATLAB.

Работу предлагаемого реле можно представить в виде следующего алгоритма:

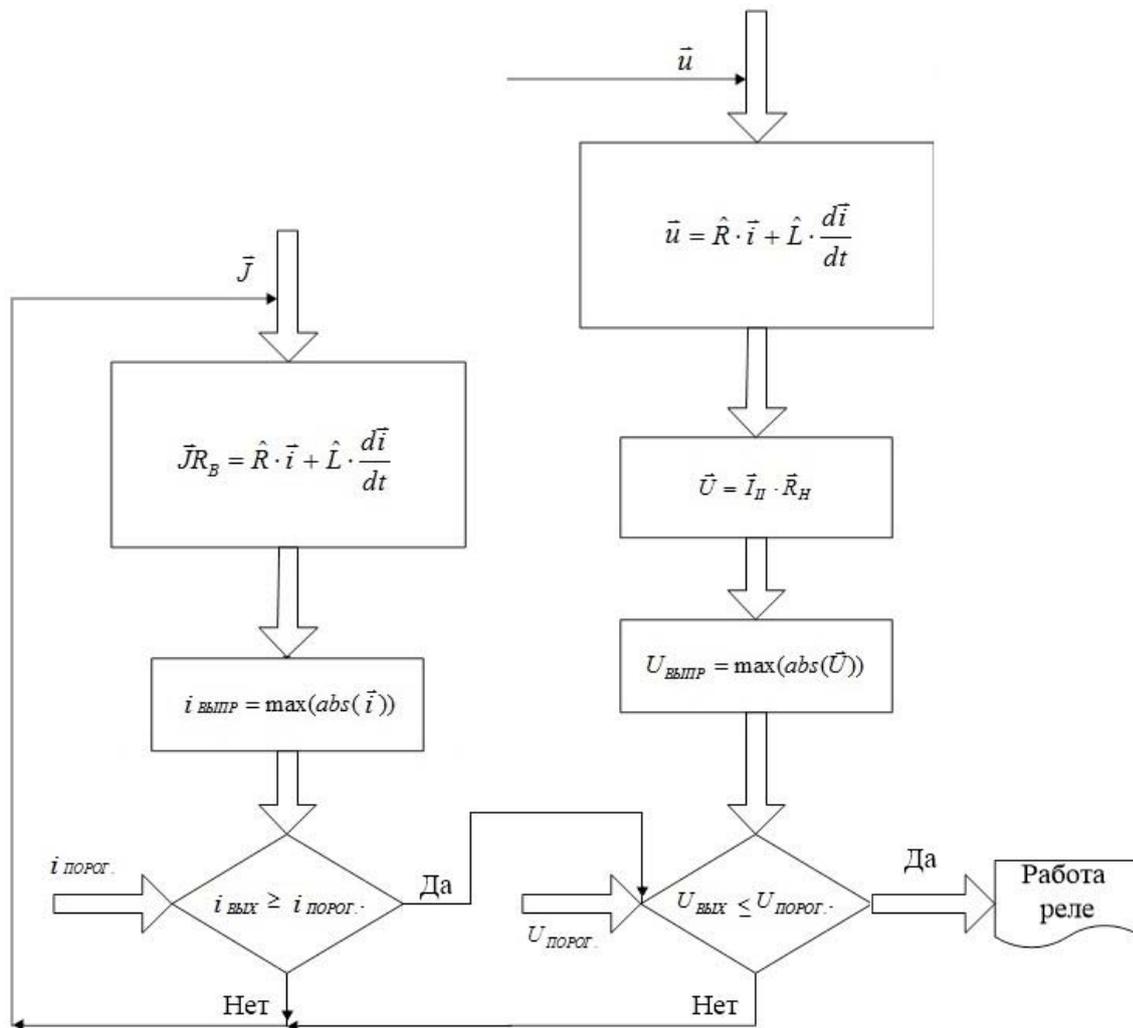


Рисунок 4 – Алгоритм работы МТЗ с пуском по напряжению на основе ОТВП.

Как видно из алгоритма работы защиты, выходной сигнал тока сравнивается с пороговым значением тока, и при его превышении, сигнал подается на второй элемент сравнения, который дает команду на срабатывание реле только тогда, когда выходное значение напряжения будет меньше порогового значения. В противном случае защита не работает.

Математическая модель токового реле представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 JR_B &= (L_1 + L_3 + L_B) \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_3 + R_B) i_1 - (M_{12} - M_{34}) \frac{di_2}{dt} + R_B i_2 + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_f}{dt}; \\
 JR_B &= (L_2 + L_4) \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_4 + R_B + R_B) i_2 - (M_{12} + M_{34}) \frac{di_1}{dt} + R_B i_1 + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_b}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_c}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_d}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_e}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_a \frac{di_a}{dt} + (R_a + R_{Ha}) i_a + (M_{1a} + M_{3a}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2a} + M_{4a}) \frac{di_2}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + \\
 &+ M_{ac} \frac{di_c}{dt} + M_{ad} \frac{di_d}{dt} + M_{ae} \frac{di_e}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_b \frac{di_b}{dt} + (R_a + R_{Hb}) i_b + (M_{1b} + M_{3b}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2b} + M_{4b}) \frac{di_2}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{bc} \frac{di_c}{dt} + M_{bd} \frac{di_d}{dt} + M_{be} \frac{di_e}{dt} + M_{bf} \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_c \frac{di_c}{dt} + (R_c + R_{Hc}) i_c + (M_{1c} + M_{3c}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2c} + M_{4c}) \frac{di_2}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{cb} \frac{di_b}{dt} + M_{cd} \frac{di_d}{dt} + M_{ce} \frac{di_e}{dt} + M_{cf} \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_d \frac{di_d}{dt} + (R_d + R_{Hd}) i_d + (M_{1d} + M_{3d}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2d} + M_{4d}) \frac{di_2}{dt} + M_{da} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{db} \frac{di_b}{dt} + M_{dc} \frac{di_c}{dt} + M_{de} \frac{di_e}{dt} + M_{df} \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_e \frac{di_e}{dt} + (R_e + R_{He}) i_e + (M_{1e} + M_{3e}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2e} + M_{4e}) \frac{di_2}{dt} + M_{ea} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{eb} \frac{di_b}{dt} + M_{ec} \frac{di_c}{dt} + M_{ed} \frac{di_d}{dt} + M_{ef} \frac{di_f}{dt}; \\
 0 &= L_f \frac{di_f}{dt} + (R_f + R_{Hf}) i_f + (M_{1f} + M_{3f}) \frac{di_1}{dt} + (M_{2f} + M_{4f}) \frac{di_2}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + \\
 &+ M_{fb} \frac{di_b}{dt} + M_{fc} \frac{di_c}{dt} + M_{fd} \frac{di_d}{dt} + M_{fe} \frac{di_e}{dt};
 \end{aligned}$$

где: J – ток измерительного трансформатора тока;

$R1 - R4$ – активные сопротивления первичных обмоток ОТВП;

R_{Ni} – активные сопротивления нагрузок ОТВП;

M – взаимные индуктивности первичных и вторичных обмоток ОТВП.

Система уравнений для реле напряжения составляется аналогичным образом.

Выходные характеристики, снятые с осциллографа изображены на рисунке 5.

На шкалах отображаются, соответственно:

- первичные токи до и после насыщения трансформатора тока;
- токи первой и второй ветви первичной цепи;
- токи во вторичных цепях;
- действующее значение токов во вторичных цепях до и после сглаживания;
- напряжение в первичной цепи;
- первичный и вторичный ток на трансформаторе напряжения;
- напряжения вторичных ветвей трансформатора напряжения;
- действующие значения напряжения вторичных ветвей до и после сглаживания;
- логика срабатывания реле.

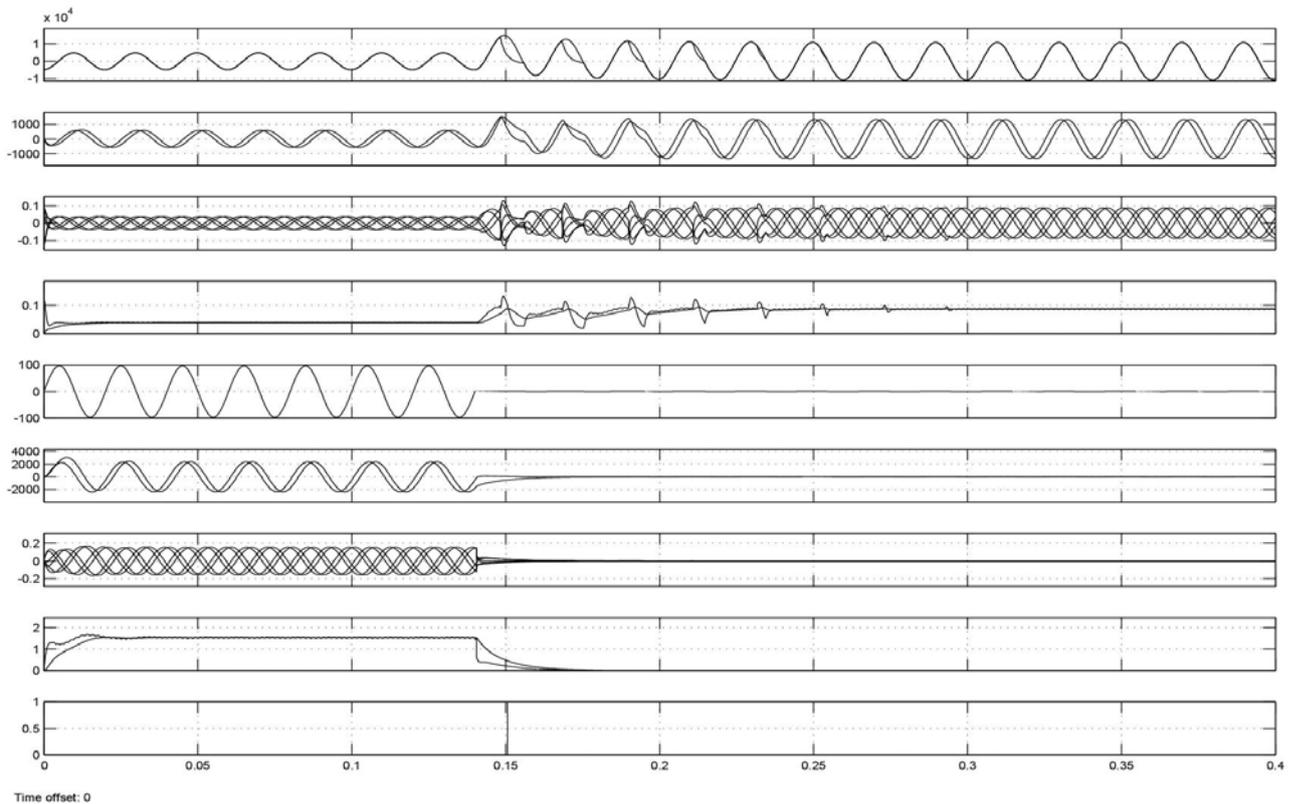


Рисунок 5 –Показания осциллографа.

Существующие токовые релейные защиты, построенные как на электромеханической, так и на микроэлектронной или микропроцессорной элементной базе имеют ряд принципиальных недостатков. Необходимо совершенствование токовых защит, как основы релейной защиты, с применением новых принципов и подходов, в частности с использованием устройств с вращающимися магнитными полями, позволяющих повысить надежность, чувствительность, быстродействие защиты вместе со снижением ее стоимости.

Исходя из вышесказанного, а также учитывая пониженную чувствительность предложенного устройства к погрешностям измерительных трансформаторов, целесообразно внедрение и применение максимальной токовой защиты с пуском по напряжению на основе однофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем для повышения надежности и чувствительности классических максимальных токовых защит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. Изд. 4-е перераб. и доп. М., Энергия, 1971, 624с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. - М.: Высшая школа, 2006. – 639с.
3. Патент РФ №2333562 Однофазный трансформатор вращающегося поля [Текст] / Б.А. Коробейников, Д.И. Сидоров. – Заявл. 4.06.2007. Оpubл. 10.09.2008.
4. Сидоров, Д.И. Реле тока на основе однофазного трансформатора 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. Chernobrovov N.V. Releynaya zashchita. Izd. 4-e pererab. i dop. M., Energiya, 1971, 624s.
2. Andreev V.A. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya. - M.: Vysshaya shkola, 2006. – 639s.
3. Patent RF №2333562 Odnofaznyy transformator vrashchayushchegosya polya [Tekst] / B.A. Korobeynikov, D.I. Sidorov. – Zayavl. 4.06.2007. Opubl. 10.09.2008.
4. Sidorov, D.I. Rele toka na osnove odnofaznogo transformatora 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

*THE MATHEMATICAL MODEL OF MAXIMUM CURRENT PROTECTION WITH
START-UP ON TENSION ON THE BASIS OF SINGLE-PHAZE TRANSFORMER
WITH ROTATING FIELD*

B.A. KOROBAYNIKOV, D.I. SIDOROV, V.G. BURLAK, T.YU. DRAY

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: d.i.sidoroff@gmail.com.*

The maximum current protection is the basis of relay protection in modern power networks. However, modern overcurrent protection is not without drawbacks. Frequently encountered in practice, the phenomenon of saturation of magnetic core transformers entails large errors of the values of current and voltage in the secondary circuit, and, as a result of incorrect operation. The article proposes an improved maximum current with start-up on tension with improved characteristics, based on the application of multi-phase transformer with rotating field. The use of single-phase transformer with rotating field allows to minimize the error of measuring transformers and inrush on voltage is to increase the sensitivity of the maximum current protection. The study modeled the MTZ work with start-up on tension based on OTVP in MATLAB software and also experimentally obtained output signals.

Key words: current relay, voltage relay, current transformer, voltage transformer, rotating field, relay protection.