



PS1 – S1-03



Использование дополнительного торможения ДЗЛ в переходных режимах для снижения требований к трансформаторам тока

О.И. БАГЛЕЙБТЕР, С. САБРАМАНИАН
ALSTOM Grid
Великобритания
oleg.bagleybter@alstom.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Дифференциальная защита линий, торможение в переходных режимах, требования к трансформаторам тока, математическое моделирование трансформаторов тока.

1 ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на появление таких многообещающих технологий как NCIT – нетрадиционные измерительные трансформаторы [1], можно предвидеть, что в ближайшие 5-10 лет основную массу трансформаторов тока (ТТ) на энергообъектах будут по-прежнему составлять традиционные электромагнитные ТТ с присущими им недостатками, такими как общая нелинейность характеристики и насыщение стали. Надежность любых защит, и дифференциальных в особенности, в значительной степени зависит от правильного выбора ТТ для их подключения. Теоретически, возможно выбрать ТТ таким образом, чтобы полностью исключить возможность насыщения в переходных режимах [2]. Для этого необходимо выполнить следующее условие:

$$V_x > \frac{I_s \cdot R_{\Sigma} \cdot (1 + X/R)}{1 - REM_{p.u.}}, \quad (1)$$

где

V_x - напряжение насыщения,

I_s - приведенный первичный ток (максимальный ток к.з., периодическая составляющая),

R_{Σ} - суммарная нагрузка на трансформатор тока, с учетом сопротивления вторичной обмотки самого ТТ и нулевого провода.

X/R - постоянная первичной сети,

$REM_{p.u.}$ - предельное значение остаточной намагниченности в относительных единицах.

Условие (1) представляет собой формулу 18 из [2] для случая, когда индуктивностью нагрузки можно пренебречь.

Наиболее часто для подключения устройств релейной защиты используются ТТ без воздушных зазоров классов Р, ТР, ТРХ по системе классификации IEC, а также ТТ классов С, К по системе классификации ANSI. Согласно [2] значение остаточной намагниченности для указанных типов ТТ может достигать 80%. При этом следует отметить, что единожды возникнув, остаточная намагниченность не исчезает в ходе нормальной эксплуатации ТТ. Для уменьшения остаточной намагниченности до значения 10% от saturation flux density необходимо приложить 60% от напряжения точки излома (knee-point voltage) [2], что практически невозможно при протекании токов нагрузки через ТТ.

Если принять постоянную первичной сети равной 20 (довольно часто встречающееся значение), получим следующее выражение:

$$V_x > \frac{I_s \cdot R_\Sigma \cdot 21}{1 - 0.8} = 105 \cdot I_s \cdot R_\Sigma.$$

Можно видеть, что необходимость учета апериодической составляющей тока к.з. и остаточной намагниченности приводит к весьма высоким требованиям к ТТ по сравнению с простым расчетом для симметричного тока к.з. и без остаточной намагниченности формула (1) задает коэффициент запаса 105. А между тем для мощных систем СВН можно встретить постоянную сети равную 65, что приведет коэффициент запаса 330.

Перед производителями микропроцессорных (МП) устройств защиты стоит непростая задача – с одной стороны, требования, предъявляемые производителем к ТТ для подключения своих защит, должны гарантировать их правильную работу в 100% случаев, с другой стороны, эти требования нельзя завышать сверх необходимости, поскольку это может привести к затруднениям при выборе ТТ и к излишним финансовым затратам. Известны различные методы снижения требований к трансформаторам тока, такие как разнообразные детекторы насыщения и алгоритмы восстановления первоначальной формы тока [3]. Помимо этих «реальных» методов существуют также методы «виртуальные», заключающиеся в выборе наиболее благоприятной для окончательного результата методики тестирования. Данная ситуация осложняется отсутствием единого подхода к тестированию совместимости устройств релейной защиты и трансформаторов тока. Попытка выработки такого подхода была предпринята в [4], однако до настоящего времени указанный документ не завершен.

Использованный в настоящей работе алгоритм дополнительного торможения ДЗЛ в переходных режимах не является принципиально новым, достаточно вспомнить отечественные реле типа РНТ с быстронасыщающимися трансформаторами, стабильность которых в переходных режимах обеспечивалась загрузкой от апериодической составляющей тока небаланса [5]. Быстронасыщающиеся трансформаторы использовались также и в зарубежных реле дифференциальной защиты для получения переменного коэффициента торможения, в этом случае шунтирование апериодической составляющей рассматривалось лишь как дополнительное преимущество [6].

2 ДЗЛ С ПЕРЕХОДНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ

2.1 Алгоритм дополнительного торможения ДЗЛ в переходных режимах

Первоначальная идея переходного торможения заключалась в том, чтобы любое положительное приращение тормозного тока I_{BIAS} увеличивало ток срабатывания защиты $I_{DIFF.THR.}$, причем дополнительное торможение должно было накапливаться. Если же тормозной ток не увеличивается, то величина переходного торможения $I_{TR.BIAS}$ должна была затухать по экспоненциальному закону.

Однако первые же результаты тестирования на моделях показали, что данный алгоритм обладает существенным недостатком – возрастает время срабатывания ДЗЛ при замыканиях в зоне действия защиты. Причина заключается в том, что внутренние к.з. также приводят к увеличению тормозного тока и, соответственно, к загрузке защиты дополнительным торможением.

Для предотвращения замедления защиты был применен детектор внешних замыканий, основанный на отношении приращений дифференциального и тормозного токов [7].

При использовании указанного детектора положительное приращение тормозного тока используется для увеличения переходного торможения только в том случае, если это приращение вызвано внешним к.з. или резким увеличением нагрузки.

При насыщении ТТ переходное торможение перестает увеличиваться (появляется дифференциальный ток), однако к этому моменту уже должна быть накоплена некоторая величина $I_{TR.BIAS}$, которая позволяет достаточно загрузить защиту до следующего неискаженного участка кривой тока.

Для n -го отсчета в алгоритме ДЗЛ с учетом дополнительного переходного торможения $I_{TR.BIAS}$ можно записать:

$$I_{DIFF.TH.R.}(n) = SLOPE(I_{BIAS}(n)) + I_{TR.BIAS}(n), \quad (2)$$

где $I_{DIFF.TH.R.}(n)$ - ток срабатывания диф. защиты,

$SLOPE(I_{BIAS}(n))$ - стандартная характеристика торможения с двумя наклонными участками, используемая в терминале MiCOM P543-P546 (рис. 1).

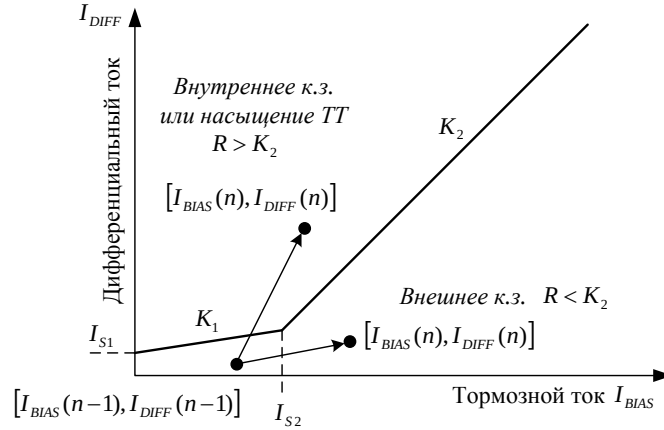


Рис. 1: Тормозная характеристика и принцип выявления внешних к.з.

Для определения переходного торможения $I_{TR.BIAS}$ рассчитываются приращения дифференциального и тормозного токов, а также отношение этих приращений R :

$$\Delta I_{DIFF}(n) = I_{DIFF}(n) - I_{DIFF}(n-1), \quad (3)$$

$$\Delta I_{BIAS}(n) = I_{BIAS}(n) - I_{BIAS}(n-1), \quad (4)$$

$$R = \Delta I_{DIFF}(n) / \Delta I_{BIAS}(n). \quad (5)$$

Переходное торможение вычисляется по следующему алгоритму:

$$\text{Если } R < K_i \text{ и } \Delta I_{BIAS}(n) > 0 \quad (6)$$

$$I_{TR.BIAS}(n) = D \cdot I_{TR.BIAS}(n-1) + S \cdot \Delta I_{BIAS}(n), \quad (7)$$

иначе

$$I_{TR.BIAS}(n) = D \cdot I_{TR.BIAS}(n-1), \quad (8)$$

где

K_i - наклон тормозной характеристики (K_1 или K_2 в зависимости от положения точки $[I_{BIAS}(n), I_{DIFF}(n)]$ на характеристике),

S - масштабирующий коэффициент,

D - коэффициент затухания, $D < 1$.

Дифференциальный алгоритм в реле MiCOM P543-546 работает с частотой дискретизации 8 точек/период или 400 Гц при номинальной частоте системы 50 Гц.

Следовательно, по прошествии одного цикла (20 мс) переходное торможение уменьшается до D^8 от своего начального значения (если условие (6) не выполняется в течение указанного времени). В работе принята величина $D = 0.8$, тогда через 20 мс $D^8 = 0.1678$ или около 17% от начального значения. Столь быстрое затухание позволяет избежать замедления защиты при переходе замыкания из внешнего во внутреннее.

2.2 Проверка алгоритма переходного торможения на модели SIMULINK.

При внедрении и тестировании алгоритма переходного торможения ДЗЛ широко использовалась модель ТТ, разработанная авторами в среде MATLAB/SIMULINK® на основе теории гистерезиса Джайлса-Эзертона (Jiles-Atherton). Данная модель математически повторяет

широко известную реализацию ТТ в среде RTDS® и PSCAD® [8], но имеет большую гибкость в применении. На рис. 2 приведена схема подключения модели, внутренние соединения демонстрируются на рис. 3.

Используемая в работе модель ТТ имеет следующие электрические параметры: коэффициент трансформации $K_{ТТ} = 10/1$, номинальный вторичный ток 1А, напряжение точки излома $V_K = 160В$.

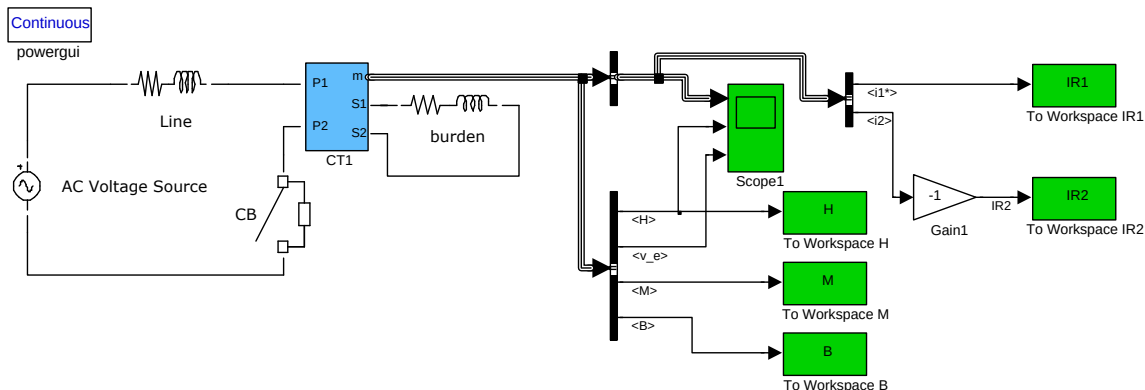


Рис. 2: Схема включения модели ТТ.

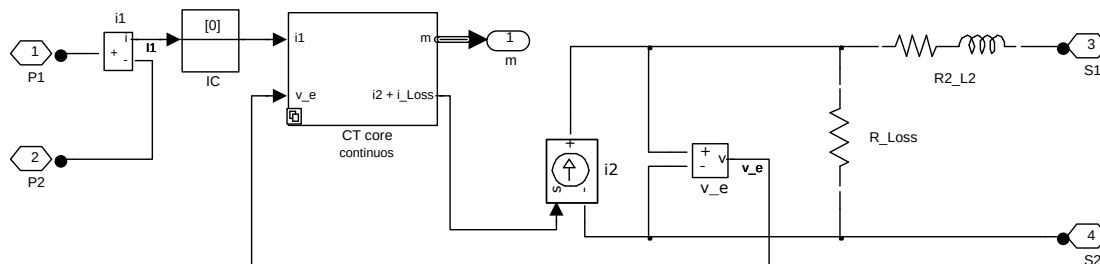


Рис. 3: Внутренние соединения модели ТТ.

На рис. 4 наглядно показано насыщение трансформатора тока, ложное срабатывание ДЗЛ без переходного торможения и несрабатывание ДЗЛ с переходным торможением.

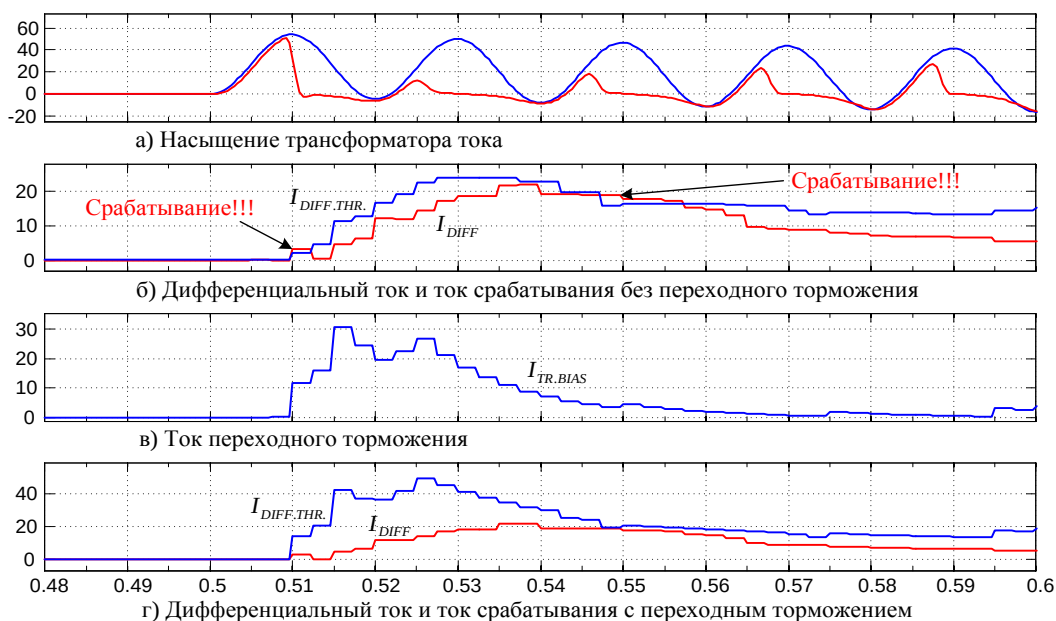


Рис. 4: Результаты моделирования реле ДЗЛ с переходным торможением.

Небольшое отличие измеренного тока от приведенного первичного на участках без насыщения объясняется реакцией «anti-aliasing» фильтра, использованного в модели реле.

После получения удовлетворительных результатов на модели в среде Simulink, алгоритм переходного торможения был реализован в программном обеспечении реле MiCOM P543-P546.

2.3 Тестирование реле на RTDS и определение требований к ТТ.

Окончательная проверка реле дифференциальной защиты линии с переходным торможением и определение требований к трансформаторам тока были проведены с помощью установки RTDS – Real Time Digital Simulation. Схема эксперимента включает в себя:

1. Защищаемую линию с задаваемыми параметрами тока к.з. (внешнего или внутреннего) и постоянной сети X/R .
2. Две модели трехфазного трансформатора тока с задаваемыми параметрами напряжения точки излома V_K и сопротивления нагрузки.
3. Реле MiCOM P543-P546, подключенные к моделям ТТ через цифро-аналоговые преобразователи и усилители.

Проверка стабильности при внешнем замыкании заключается в многократной имитации к.з. с заданными характеристиками и последовательном увеличении нагрузки ТТ до срабатывания одного из реле. Сопротивление нагрузки R_L (один провод) увеличивается ступенчато от 0.1 Ом до 16 Ом (всего 38 ступеней).

При срабатывании любого из реле опыт прекращается, в качестве допустимой предельной нагрузки R_{lim} фиксируется сопротивление, предшествующее значению R_L при срабатывании.

Для внутренних к.з. критерием завершения опыта является отказ защиты либо превышение допустимого времени срабатывания.

Крайне важно проверить работу защиты во всем возможном диапазоне остаточной намагниченности ТТ. Для этого начальная намагниченность перед к.з. задается равной нулю и каждое замыкание имитируется шесть раз – три раза с положительной апериодической составляющей (остаточная намагниченность последовательно увеличивается от нуля до положительного максимума) и три раза с отрицательной апериодической составляющей (остаточная намагниченность последовательно уменьшается от положительного максимума до отрицательного максимума). Данный процесс показан на рис. 5 и рис. 6.

Для снижения влияния случайных факторов каждый опыт повторялся три раза, либо одновременно использовались три комплекта ДЗЛ (6 реле MiCOM P543-P546) включенные последовательно по токовым цепям.

Использовались следующие уставки реле ДЗЛ (см. рис. 1):

Начальное срабатывание	$I_{S1} = 0.2$ о.е.
Точка излома характеристики	$I_{S2} = 2$ о.е.
Наклон первого участка	$K_1 = 30\%$
Наклон второго участка	$K_2 = 100\%$ и 150%

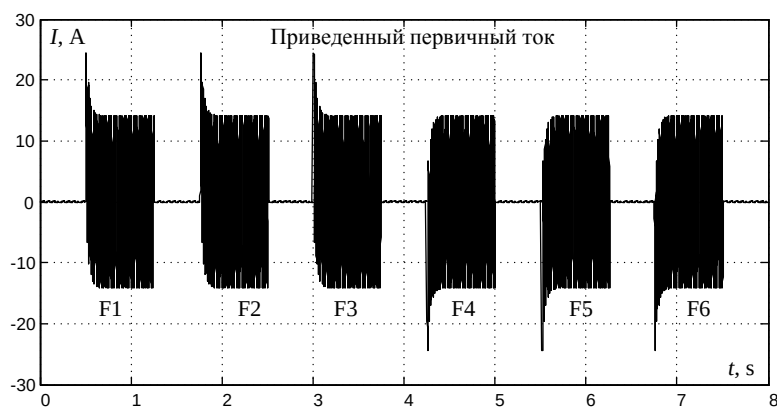


Рис. 5: Шестикратная имитация короткого замыкания.

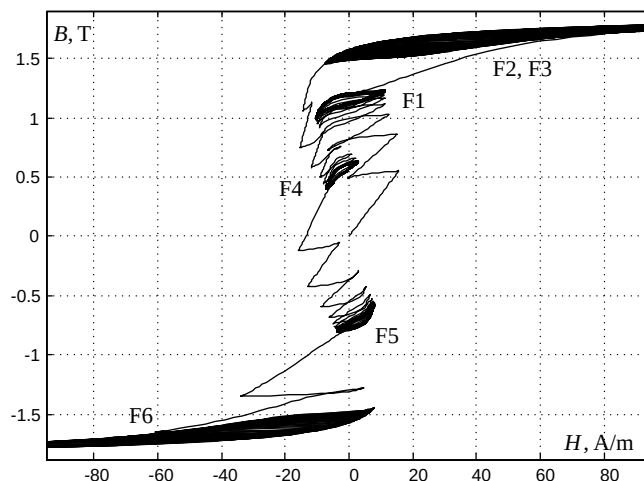


Рис. 6: Траектория движения точки B-H.

В работе приводятся результаты тестов для уставки $K_2 = 150\%$

В ходе тестирования были определены допустимые нагрузки ТТ R_{lim} для внешних и внутренних замыканий при различных сочетаниях следующих параметров:

1. Напряжение точки излома ТТ V_K : 40-320 В
2. Ток короткого замыкания I_f : 2-50 А втор.
3. Постоянная первичной сети X/R : 5-120
4. Вид короткого замыкания: А-Н, В-С, А-В-С
5. Момент включения на к.з. POW (point on wave): 0° - 150°

В общей сложности для уставки $K_2 = 150\%$ было проведено 3967 тестов с внешними замыканиями и 1915 тестов – с внутренними. Под одиночным тестом в данном случае понимается серия из 6-и замыканий, показанная на рис. 5.

2.4 Обработка результатов тестирования на RTDS.

Результатом работы установки RTDS является большой массив данных, который обрабатывается автоматически в системе MATLAB.

Следует отметить, что благодаря детектору внешних замыканий критичным для реле является только режим внешнего к.з., т.е. переходное торможение не замедляет работу реле при внутренних к.з.

По величине предельной нагрузки R_{lim} для внешних к.з. рассчитывается безразмерный коэффициент K , который позволяет оценивать применимость произвольного ТТ для конкретных условий.

$$K = \frac{V_K}{I_n \cdot (2 \cdot R_{lim} + 0.5)}, \quad (9)$$

где

V_K - заданное в тесте напряжение точки излома ТТ,

I_n - номинальный вторичный ток ТТ (1А),

$(2 \cdot R_{lim} + 0.5)$ - полное сопротивление нагрузки ТТ с учетом нулевого провода и внутреннего сопротивления вторичной обмотки (фиксированное значение 0.5Ом).

В реальных условиях максимальный ток к.з. I_f и постоянная сети X/R определяются расчетным путем, в то время как вид к.з. и POW может быть различным для каждого замыкания. Поэтому для каждого фиксированного сочетания $[I_f, X/R]$ выбирается наибольшее значение коэффициента K при всех видах к.з. и углах POW (наихудший случай). В результате была получена матрица из 56 значений коэффициента K для проверенных сочетаний $[I_f, X/R]$.

После проведения двумерной аппроксимации с помощью оптимизационных процедур MATLAB было получено следующее выражение (включает запас 10%):

$$K = 1.1 \cdot A(I_f) \cdot B(X/R), \quad (10)$$

где $A(I_f)$ и $B(X/R)$ определяются графически по рис. 7 и рис. 8.

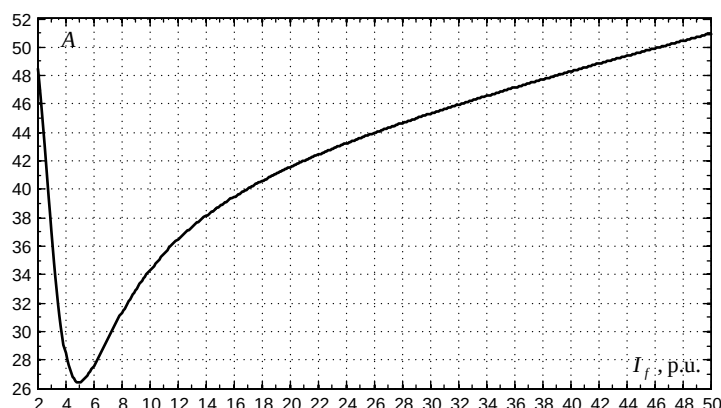


Рис. 7: График для определения коэффициента A .

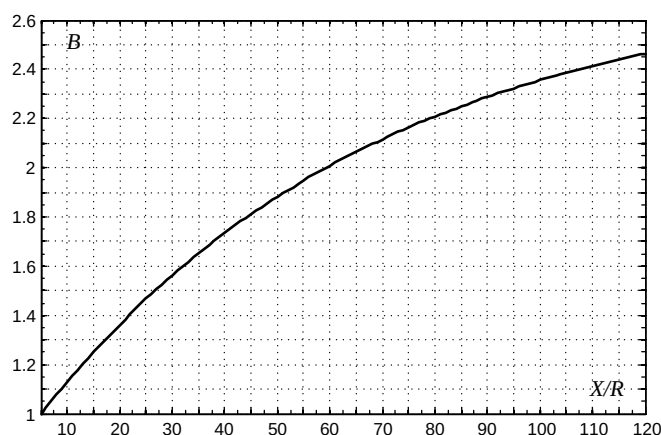


Рис. 8: График для определения коэффициента B .

На рис. 7 можно наблюдать интересный эффект – в области малых токов (< 5 о.е.) коэффициент A достигает весьма высоких значений. Данный эффект объясняется высокой чувствительностью тормозной характеристики в указанном диапазоне токов. На практике это не должно приводить к увеличенным требованиям к ТТ, поскольку малое значение тока к.з., как правило, сопровождается низкой постоянной сети X/R .

Окончательное выражение для проверки применимости произвольного ТТ с напряжением точки излома V_K выглядит следующим образом:

$$V_K \geq K \cdot I_n \cdot R_{\Sigma}. \quad (11)$$

Пример проверки ТТ:

Максимальный ток к.з. $I_f = 30$ кА, постоянная сети $X/R = 25$, $K_{ТТ} = 3000/5$, полное сопротивление нагрузки $R_{\Sigma} = 30$ Ом. По графикам на рис. 7 и рис. 8 определяем $A = 34.5$, $B = 1.44$. Следовательно, минимальное допустимое напряжение точки излома ТТ равно $1.1 \cdot 34.5 \cdot 1.44 \cdot 5 \cdot 3 = 820$ В.

$$V_K \geq 820 \text{ В.}$$

2.5 Сравнение с существующими требованиями к ТТ

Существующие требования к ТТ для продольной дифференциальной защиты MiCOM P543-P546 (без переходного торможения) записываются следующим образом:

Если $(I_f \cdot X/R) \leq 1000$:

$$K = \max(65, 40 + 0.07 \cdot (I_f \cdot X/R)),$$

Если $1000 < (I_f \cdot X/R) \leq 1600$:

$$K = 107.$$

В таблице 1 приводится сравнение существующих и новых требований к ТТ для нескольких комбинаций тока к.з. и постоянной первичной сети.

I_f , о.е.	X/R	K без переходного торможения	K с переходным торможением	Эффект %
5	5	65	29	-55%
10	10	65	43	-34%
20	20	68	63	-7%
30	30	103	78	-24%
40	40	107	92	-14%
40	65	---	110	---

Табл. 1: Сравнение существующих и новых требований к ТТ для реле ДЗЛ MiCOM P543-P546.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм дополнительного торможения в переходных режимах. Указанный алгоритм позволяет существенно повысить надежность несрабатывания реле при внешних коротких замыканиях. Приведены результаты проверки алгоритма на моделях трансформатора тока и реле в среде MATLAB/SIMULINK®.

Также в работе детально описывается методика тестирования продольной дифференциальной защиты на системе RTDS®, используемая компанией ALSTOM GRID для определения требований к трансформаторам тока. Показаны результаты применения этой методики и практический эффект от внедрения алгоритма дополнительного торможения в переходных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Richards S., Chatrefou D., Tholomier D., Gilles F. Нетрадиционные решения по измерительным трансформаторам – практика применения шин обработки данных IEC 61850-9.2 // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Сборник докладов международной научно-технической конференции. – М.: НИП «Научно-инженерное информационное агентство», 2009, с. 282-290.
- [2] IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. IEEE Std C37.110-2007.
- [3] Kang Y.C., Yun J.S., Lee B.E., Kang S.H., Jang S.I., Kim Y.G. Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm // IET Gener. Transm. Distrib., 2008, 2, (1), pp. 100–109.
- [4] Coordination of Relays and Conventional Current Transformers. CIGRE Report, CIGRE_B5.02 Draft 10a, August 2005.
- [5] Овчинников В.В. Реле РНТ в схемах дифференциальных защит. Библиотека электромонтера. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [6] Sonneman, WK, A high speed differential relay for generator protection // Trans. AIEE, 59, 1940, pp. 608-612.
- [7] Pradeep K.G., Tarlochan S.S. Current Differential Protection Relays. US Patent Application Publication No.: US 2009/0009181 A1, 2008.
- [8] Annakkage U. D., McLaren P. G., Dirks E., Jayasinghe R. P., Parker A. D. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis // IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.15, No.1, 2000, pp. 57-61.