

Оценка интегральных параметров тока в нулевом проводе при соединении трансформаторов тока в схему «звезда».

Рыбалкин А.Д. 8 952 580 69 39

Аннотация: развитие технологий интеллектуальных электроэнергетических систем, так называемых «умных сетей» (Smart Grids), обостряет вопросы внедрения в релейную защиту (РЗ) и противоаварийную автоматику новых алгоритмов функционирования, позволяющих учитывать параметры свободных составляющих токов короткого замыкания (КЗ), которые ранее учитывались путём введения некоторых коэффициентов. В частности, в настоящее время расчёт уставок производится при не учёте свободных составляющих тока КЗ, а отстройка от влияния последних на подведённую к измерительному органу величину учитывается введением коэффициентов, на которые корректируется значение параметра срабатывания, вычисленное без учёта влияния свободных составляющих. Такой подход ведёт к такому изменению величин уставок при котором ухудшаются коэффициенты чувствительности, что в свою очередь снижает уровень технического совершенства защит. Последнее обстоятельство снижает конкурентноспособность изделий на мировых рынках.

Введение

Так как уставки релейной защиты принято определять в действующих величинах [1,2], то рассмотрим методы вычисления этого параметра.

Под действующим значением тока короткого замыкания для какого-либо момента времени процесса КЗ условно понимают среднеквадратичное значение тока за один период [3]. При таком определении остаётся открытым вопрос о выборе точки от которой производится отсчёт периода. В частности в [4] предложено поместить эту точку в центр периода, для которого находится действующее значение тока. Однако для быстродействующих измерительных органов (ИО) релейной защиты (РЗ) время замера меньше, чем один период промышленной частоты. Следовательно, такая постановка вопроса не может годиться для рассматриваемого случая. В этом случае период замера не может превышать время насыщения ТТ. Рассмотрим этот случай для тока короткого замыкания, описываемого формулой

$$i_1(t) = I_{1max} \cdot (\cos \varphi \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega t + \varphi)), \quad (1)$$

где I_{1max} -амплитуда вынужденной составляющей тока КЗ, φ - фаза короткого замыкания, T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей первичной цепи, ω - круговая частота вынужденной составляющей.

По определению действующее значение любой функции $f(x)$ вычисляется по формуле (2) [5].

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(x)]^2 dx} \quad (2)$$

где T - период функции $f(x)$. Следовательно, приведённая формула (2) выведена для применения при расчёте действующего значения периодической функции. Однако функция (1) не периодическая. Вместе с тем расчёт уставок РЗ производится по действующим значениям, вычисленным для периодической функции с периодом T . Следовательно, для расчёта величины действующего значения вторичного тока ТТ, целесообразно определить его не от периода к периоду, а непрерывно в окне наблюдений, ширина которого равна T .

Тогда действующее значение вторичного тока определится по известной [5] формуле, модифицированной таким образом, что за начало отсчёта можно было принять любой момент времени, обозначенный в формуле t_n , а за момент окончания t_k .

$$I_2(t_k) = \sqrt{f \int_{t_n}^{t_k} i_2^2(t) dt}, \quad (3)$$

где $f=1/T$, $I_2(t_k)$ -действующее значение вторичного тока в некоторый момент времени t_k , f - промышленная частота, $i_2(t)$ - мгновенные значения вторичного тока в моменты времени t .

При этом если разность $t_k - t_n$ превысит величину T , то значение t_n необходимо сдвинуть вправо на такое расстояние, что бы разность не превышала T . С учетом этого расчёт $I_2(t_k)$ допустимо выполнять для любого момента времени, а не только в моменты когда предыдущий период закончился, а следующий начался, как это сделано в [1]. Такое определение действующего значения особенно важно для микропроцессорных РЗ, так как они обрабатывают алгоритмы замеров ИО, применяя информацию в дискретной форме, то есть выборки размерность которых конечна. Обозначим первый элемент выборки, поступивший на вход ИО РЗ для общности рассуждений как $y_1=i_2(t_1)$, второй как $y_2=i_2(t_2)$, и так далее.

Тогда для тока КЗ по (1) представленного в непрерывной форме имеем

$$I_{Д}(t_{к}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_{н}}^{t_{к}} \left[I_{1\max} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right) \right]^2 dt} \quad (4)$$

Для упрощения дальнейшей работы с выражением (4) представим его в форме произведения двух корней, первый из которых не зависит от параметров T , T_1 , $t_{н}$, $t_{к}$ и равен $I_{Д1}(t_{к}) = I_{1\max} \sqrt{\frac{1}{T}}$, а второй равен

$$I_{Д2}(t_{к}) = \sqrt{\int_{t_{н}}^{t_{к}} \left[\left(e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right) \right]^2 dt} \quad (5)$$

Таким образом, для определения действующего значения тока КЗ имеем

$$I_{КЗ} = \quad , \quad (1)$$

где $i_{к}$ —мгновенное значение тока КЗ;
 T – период.

Общее выражение для тока КЗ весьма сложно, поэтому для упрощения вычисления действующего значения I_t принимают, что за рассматриваемый период обе его слагающие не изменяются, т. е. амплитуда периодической слагающей остается постоянной, а апериодическая слагающая в течение периода остается неизменной. Определение действующего значения тока КЗ для произвольного момента времени показано на рис. 2.5.

Действующее значение периодической составляющей за один период, в центре которого находится рассматриваемый момент времени, определяют из обычного соотношения для синусоидальной кривой:

$$I_{nt} = \frac{I_{nmt}}{\sqrt{2}}$$

так как периодический ток остается неизменным по амплитуде при $U_m = \text{const}$, то во время переходного процесса

$$I_{nt} = I_{n0} = I_{n\infty},$$

где I_{nt} – действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени t переходного процесса;

I_{n0} – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ ($t = 0$);

$I_{n\infty}$ – установившееся действующее значение периодической составляющей тока КЗ ($t = \infty$).

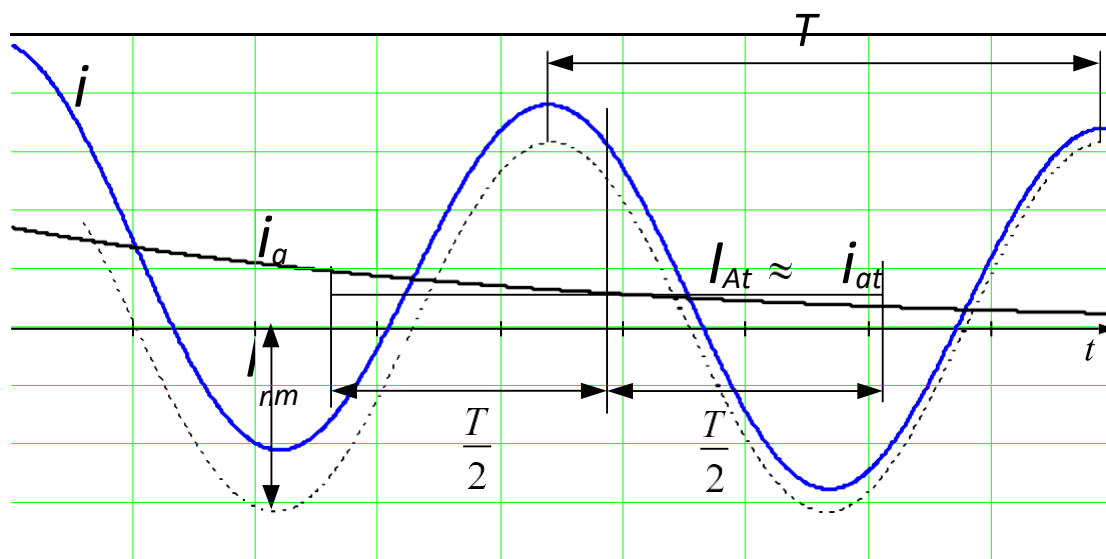


Рис. 1. Определение действующего значения тока КЗ для произвольного момента времени

Принципиально, что расчёт действующего значения по описанному выше алгоритму приведёт к существенному замедлению работы измерительных органов (ИО) РЗА, так как требует времени для сбора необходимого количества замеров. По этой причине представляется целесообразным рассмотреть альтернативные алгоритмы вычисления действующего значения тока КЗ, в которых расчёт производится при минимальном, но достаточном объёме выборки. Применительно к одиночному ТТ эта задача решена в [5].

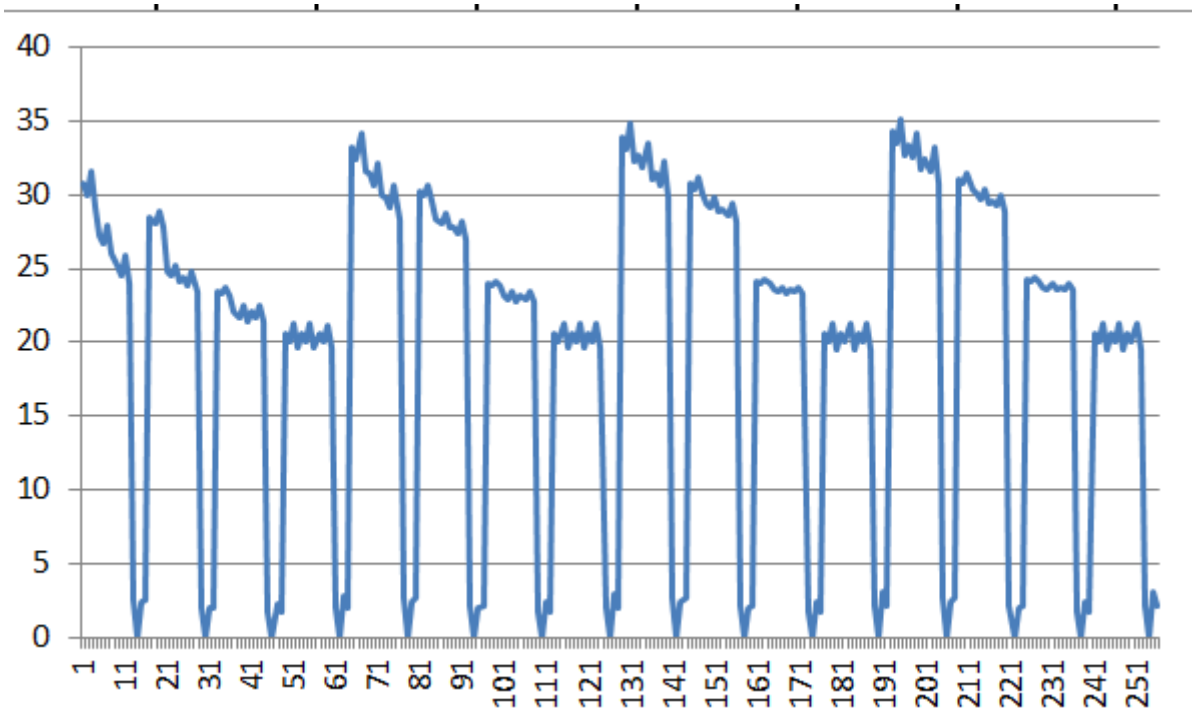
При соединении ТТ в схему «звезда» в нулевом проводе протекает ток нулевой последовательности, на величину которого реагируют ИО токовых направленных защит нулевой последовательности. Причиной появления тока небаланса в нулевом проводе являются не симметрия фазных токов, разброс параметров самих ТТ, насыщение одного или нескольких ТТ.

Разработка программы расчёта действующего значения тока в нейтрали схемы соединения трансформаторов тока «звезда».

Способ восстановления приведённого фазного тока ТТ, описанный в [29] обладает рядом преимуществ перед другими способами и по этой причине принят за основу при разработке алгоритма восстановления фазного приведённого первичного тока при соединении трансформаторов тока в схему «звезда» для РЗА 110-220 кВ. Вместе с тем наличие четвёртого провода, а именно нулевого предоставляет дополнительную информацию, которая может снизить количество приведённых операций при реализации этого алгоритма. Последнее обстоятельство снижает время восстановления, что важно в РЗА.

Теоретически при протекании по первичным обмоткам ТТ тока нагрузки, а так же при междуфазных замыканиях ток в нулевом проводе равен нулю. Он появляется только при замыканиях на землю.

Однако на практике даже при протекании тока нагрузки присутствует ток небаланса, величину которого необходимо уметь определять. Кроме того в связи с некоторой не симметрией фазных ЭДС и сопротивлений ток небаланса присутствует при междуфазных замыканиях. При замыканиях на землю ток в нулевом проводе содержит ток нулевой последовательности и так же ток небаланса.



Верификация программы

Перед выполнением расчётов необходимо убедиться в том, что погрешность расчёта, состоящая как минимум из двух составляющих, а именно: из методической и погрешности округления не превышает допустимых значений.

Для оценки погрешности выполним расчёт при значениях коэффициентов кратности тока в фазах одинаковых и равных 20. Результат расчёта приведён на рис. 2.7.

*Действующее значение тока нейтрали * 10¹⁵: Ta=[1;5;10;25;50]*T, Phi[0,,,179 эл.гр.]*

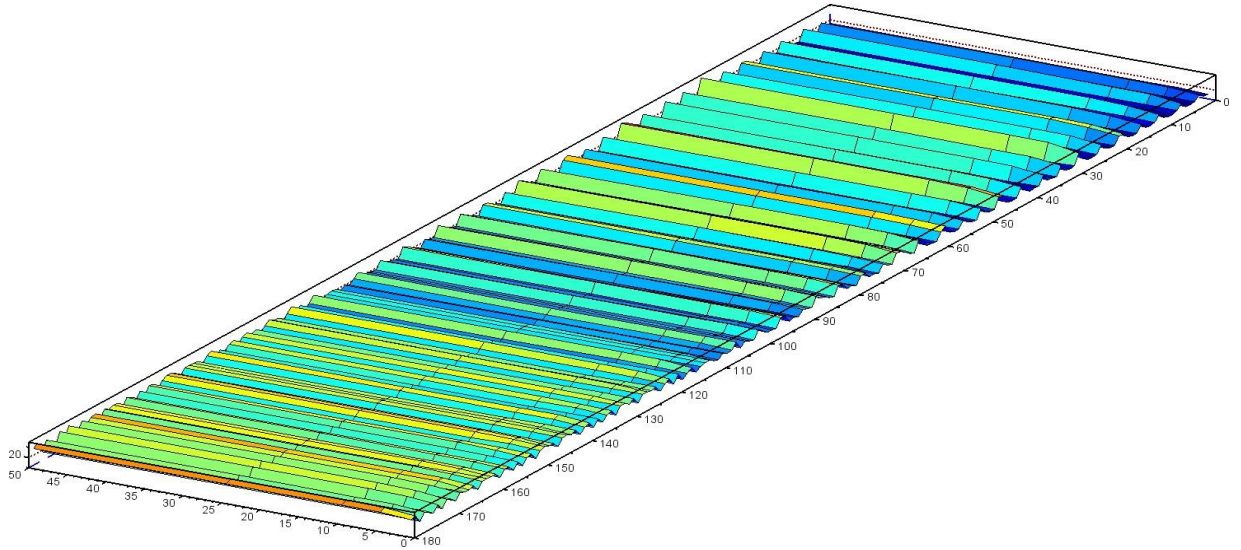


Рис. 2.7. Величина действующего значения тока в нейтральном проводесхемы «звезда».

Как видно из рис. 2.7 при равенстве коэффициентов 20 получаем величины погрешности порядка 10^{-14} . Проведённый расчёт показал, что программа обеспечивает качество расчёта с погрешностью не больше заданной. Это обстоятельство позволяет перейти к выполнению расчётов.

Расчёт тока в нейтрали схемы «звезда»

В соответствии с [002] допускается величина небаланса по току фаз до 20%. В свою очередь этот небаланс вызван разбросом фазных сопротивлений. При учёте этого обстоятельства ток в нулевом проводе можно определить задав величины кратности тока КЗ в разных фазах разными. Примем $K_a=20$, $K_b=19$, $K_c=21$. Результат расчёта для постоянных времени затухания от 0,004 с до 0,04 с для различных фаз короткого замыкания от 0 до 360 градусов приведён на рис. 2.8

*Действующее значение тока нейтрали: Ta=[0.2*T,,,2.0*T], Phi[0,,,359 эл.гр.]*

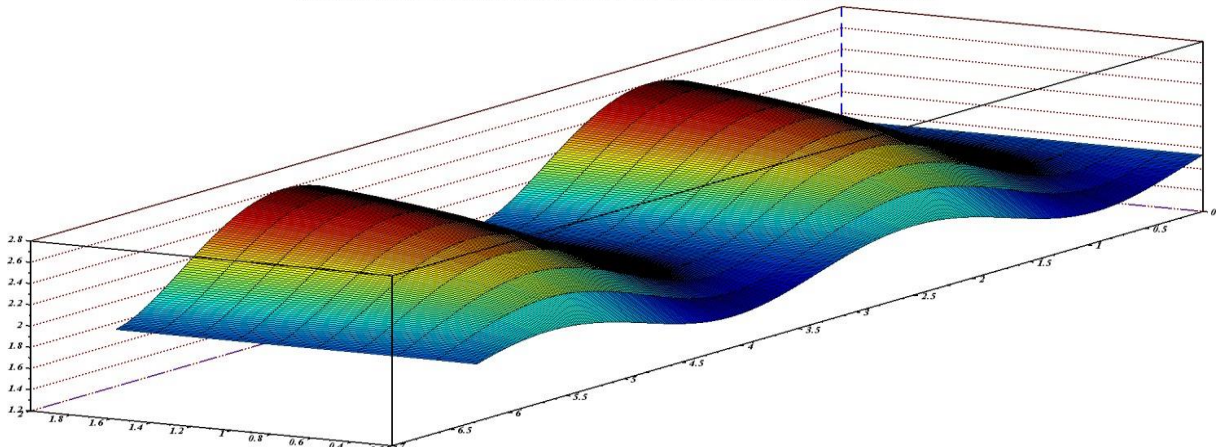


Рис. 2.8. Зависимость действующего значения тока нейтрального (4-го) провода группы трансформаторов тока при указанных выше условиях.

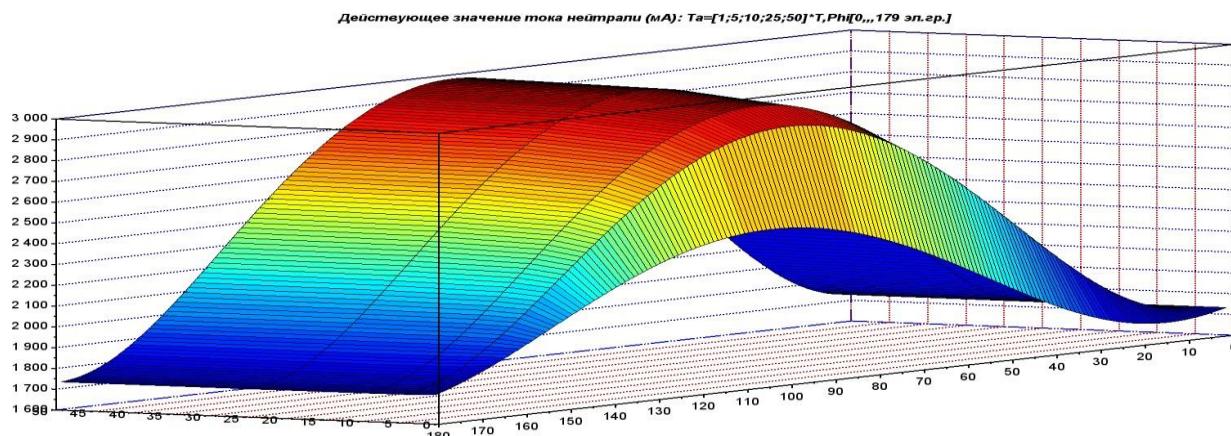


Рис. 2.9. Зависимость действующего значения тока нейтрального (4-го) провода группы трансформаторов тока при изменении фазы от 0 до 180 градусов.

В связи с тем, что исследуемый ток зависит от пяти параметров можно предложить аппроксимирующее выражение, которое позволит выполнить в случае возникновения такой необходимости расчёт без применения ЭВМ по формуле, обеспечивающей погрешность не больше заданной.

Искомая интерполяционная функция имеет вид:

$$Y_{расч} = F(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = a_0 + \sum_{i=2}^5 (a_{1i} * x_i + a_{2i} * x_i^2 + a_{3i} * x_i^3) \quad (1)$$

Коэффициенты $a_{1i}, a_{2i}; i = 1..5$, находились по методу наименьших квадратов (МНК) из условия минимизации функции:

$$\min \sum_{k=1}^N (F_k - Y_k)^2, \quad (2)$$

где N – количество точек интерполяции.

Для каждой точки интерполяции может быть посчитана относительная погрешность

$$\Delta_k = \frac{|Y - Y_{расч}|}{Y} * 100\% \quad (3)$$

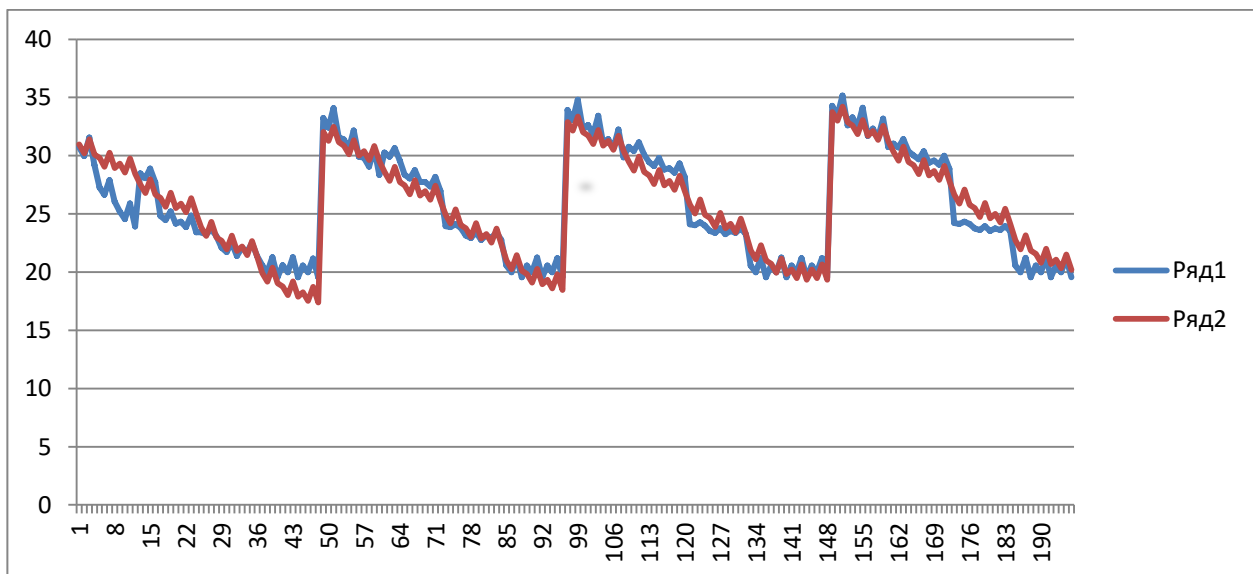
Для исходных данных

1. Постоянная времени затухания изменяется дискретно и имеет следующие значения: 0,04 с, 0,1 с, 0,15 с и 0,2 с.
2. Фаза КЗ изменяется от 0 до 90 градусов,
3. Момент насыщения ТТ изменяется от 0,004 с до 0,02 с.
4. Не симметрия фазы В относительно фазы А изменяется до 5% ,
5. Не симметрия фазы С относительно фазы А изменяется до 5% .

Аппроксимирующее выражение имеет вид

a11	a12	a13	a14	a15	a0	a21	a22	a23
18,37	-0,110	-319,49	-0,450	-12,70	167,11	-3,76	-0,00014	9031,00

При этом погрешность достигает недопустимо больших значений, а именно



Литература.

1. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
2. Подгорный Э.В., Рыбалкин А.Д., Нудельман Г.С. Характеристики токов, подводимых к измерительным органам защит нулевой последовательности. Электротехника, 1987, № 5, с. 42-48
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.- М.: Энергия. 1970.-520 стр.
4. Бессонов А.А. Теоретические основы электротехники. Издание четвёртое. М. Высшая школа. 1964.
5. Рыбалкин А.Д. Нагай В.И., Рыбалкин Д.А, Дудкова Ю.Ю. Оценка интегральных параметров вторичного тока трансформатора тока до первого насыщения. РЗА №2 (39) 2020 г.
6.
 - 1.
 - 2.
 3. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: Сборник научных трудов НПП «ЭКРА». Выпуск V. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2016. – С. 55-65.
 4. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 29-31.