

Клименченко Андрей Александрович, студент 4 курс, факультет

«Автоматизации и информатики»

Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк

Купцов Максим Алексеевич, студент 4 курс, факультет «Автоматизации и информатики»

Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк

Зацепина Виолетта Иосифовна, научный руководитель,

Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк

САМОКАЛИБРУЮЩИЙСЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА

Аннотация: Статья посвящена разработке самокалибрующегося трансформатора для использования в качестве измерения электрических величин. Первичные обмотки такого трансформатора разделены на группы, чтобы обеспечить различные коэффициенты трансформации путем изменения их комбинаций в последовательно–параллельных соединениях. В соотношении 1/1 (5 А/5 А) трансформатор может быть откалиброван без какого-либо внешнего вмешательства. Незначительные погрешности достигаются путем модифицированного метода нулевого потока.

Ключевые слова: Трансформатор тока, коэффициент мощности, калибровка, точность, нулевой поток, соединения обмоток.

Annotation: The article is devoted to the development of a self-calibrating transformer for use as a measurement of electrical quantities. The primary windings of such a transformer are divided into groups to provide different transformation coefficients by changing their combinations in series-parallel connections. At a ratio

of 1/1 (5 A/5 A), the transformer can be calibrated without any external interference. Minor errors are achieved by a modified zero-flow method.

Keywords: Current transformer, power factor, calibration, accuracy, zero flow, winding connections.

Вступление

Высокоточные измерения тока необходимы в электрических сетях, главным образом для измерения потребления энергии у потребителей. Эти трансформаторы выполняют измерения, поэтому, с теоретической точки зрения, нет необходимости в их калибровке. Как безразмерная величина, коэффициент мощности может быть измерен с использованием методов, не требующих внешних вмешательств. Если трансформатор имеет отношение 1/1 (одинаковое количество витков для первичной и вторичной обмоток), то его погрешности можно определить только с помощью компаратора тока [5, с. 72]. Для других соотношений требуется специальный метод проектирования первичной обмотки, чтобы поддерживать ту же погрешность, которая была найдена в соотношении 1/1. Один из этих методов основан на трансформаторе, который имеет много первичных групп обмоток, которые могут быть повторно соединены в разные конфигурации [1, с. 23]. Одна из этих конфигураций должна иметь такое же количество витков, как и у вторичной обмотки (соотношение 1/1). Идея состоит в том, чтобы для всех конфигураций использовать одинаковое количество витков с одинаковыми токами, так что погрешности не зависят от первичного номинального тока. Этот метод приводит к процедуре самокалибровки. Для параллельных соединений важно, чтобы все группы имели одинаковое сопротивление, для гарантии, что ток равномерно распределится между всеми группами, сохраняя дисперсионные потоки постоянными [4, с. 101]. Другая проблема связана с равномерностью магнитного потока вдоль сердечника.

При использовании параллельных соединений существует неравномерная генерация тока между различными секторами параллельной обмотки, которые

изменяют распределение потоков сердечника [6, с. 61]. Этот эффект отсутствует при последовательном соединении, изменяя погрешность трансформатора при переходе от параллельного к последовательному. Если это изменение погрешности является значительным, необходимо использовать вспомогательные компенсирующие обмотки.

Общий дизайн

Цель данной работы состоит в том, чтобы получить трансформатор тока для измерения с коэф. мощности 1/1 и несколькими группами обмоток. В таких трансформаторах основным источником погрешностей является намагничивание сердечника. Предложено множество методов снижения его влияния. Большинство из них являются многоступенчатыми или основанными на нулевом потоке [2, с. 34]. Другие используют вспомогательные электронные устройства [2, с. 41]. Для этой работы была использована модификация двухтрансформаторного метода. Один трансформатор генерирует всю мощность, необходимую для внешней нагрузки и внутренних потерь, в то время как другой работает при нулевом магнитном потоке [3, с. 67]. Таким образом, второй трансформатор имеет очень низкие погрешности. На рис. 1 показана базовая модель используемого трансформатора тока. Z_1 и Z_2 представляют собой последовательные импедансы, а L_m , R_m - импеданс намагничивания. Первым источником погрешности является ток I_m (ток намагничивания). Этот ток уменьшает выходной ток I , вызывая отрицательные погрешности и приводя к фазовым сдвигам. Так же погрешности порождаются паразитными емкостями и магнитными потоками.

Величина намагничивающего тока, пренебрегая емкостными эффектами, равна

$$V_m = V_L + R_2 I + j\omega L_2 I \quad (1)$$

$$I_m = \frac{V_m}{R_m} + \frac{V_m}{j\omega L_m} \quad (2)$$

Затем для уменьшения I_m необходимо уменьшить напряжение V_m на намагничивающей ветви. Это зависит от величины нагрузки, подключенной на выходе. Чем больше нагрузка, тем выше напряжение; но даже при нулевой нагрузке некоторое значение V_m остается из-за падения напряжения на Z_2 . Метод нулевого потока требует внешнего источника для компенсации всех внешних и внутренних падений напряжения. Т1-измерительный трансформатор, а Т2 - вспомогательный. Оба имеют одну и ту же первичную обмотку (N_1). Резистор R является регулировочным элементом, а Z_L -внешним. Целью этого метода является обнуление V_3 , что может быть сделано в соответствии со следующими уравнениями:

$$V_3 = I_3(Z_L + R) - I_2R \quad (3)$$

$$N_2I_2 \cong N_3I_3 \quad (4)$$

Тогда для V_3 необходимо зафиксировать следующее соотношение:

$$N_2 = N_3 \frac{1}{1 + \frac{Z_L}{R}} \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что предложенный метод требует, чтобы Z_L имел тот же фазовый угол, что и R. Это невозможно в реальных условиях из-за импеданса обмотки 3 и блуждающих индуктивностей внешней цепи. Кроме того, существуют и другие проблемы, связанные с реализацией этого предложения. Трансформатор Т2 имеет индуктивную намагниченность, импеданс подключен параллельно R. Тогда уравнение (4) не может быть выполнено.

Для решения всех этих недостатков в данной работе предлагается новая компенсирующая схема. рис. 2 показывает это.

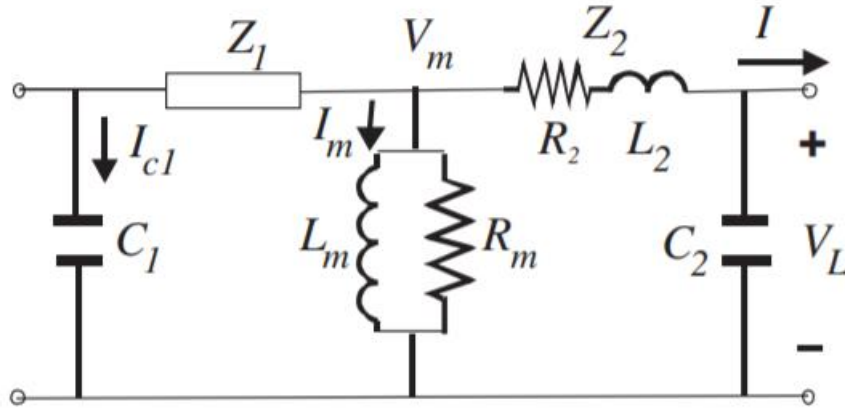


Рисунок 1. Модель трансформатора тока

Для компенсации фазовых сдвигов, создаваемых намагничивающей ветвью Т2 (R_m , L_m), последовательной индуктивностью Т1 (L_3) и, в конечном счете, индуктивной нагрузкой, добавляется конденсатор С. Третья обмотка была добавлена в Т1 для обнаружения нулевого потока. Она имеет такое же количество витков, как и другая вторичная обмотка (N_3). При достижении нулевого потока напряжение V_m обнуляется. Так как эта третья обмотка имеет некоторые взаимные индуктивности с первичной и вторичной обмоткой, внешний взаимный импеданс М был включен, чтобы компенсировать этот эффект. Величина М равна внутренней индуктивности трансформатора, но с противоположной полярностью. Принимая во внимание все эти нюансы, уравнение (5) стало

$$N_2 = N_3 \frac{1}{1 + \frac{Z_3 + Z_L}{Z}} \quad (6)$$

$$Z_3 = R_3 + j\omega(L_3 + L_m) \quad (7)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_m} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L_m}\right)} \quad (8)$$

Согласно (6), фазовый угол $Z_3 + Z_L$ должен быть таким же, как фазовый угол Z . Это приводит к

$$(R_L + R_3) \left(\frac{1}{\omega^2 L_m} - C \right) = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_m} \right) (L_L + L_3 + L_m) \quad (9)$$

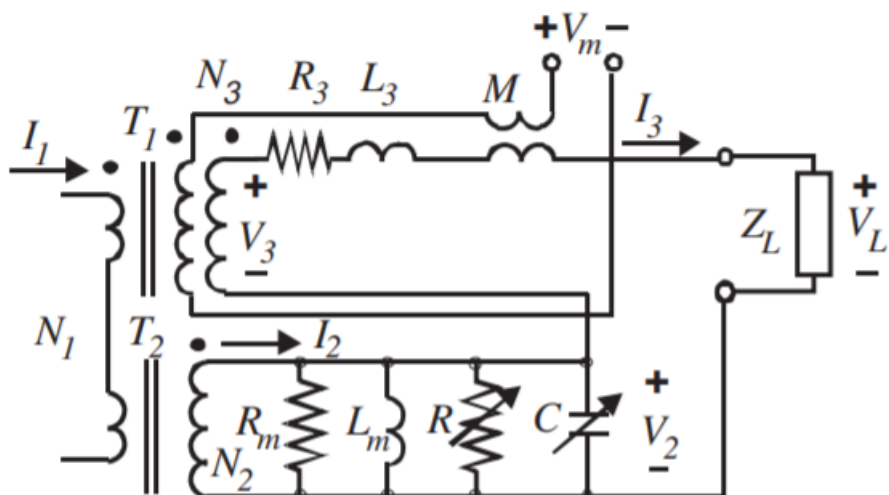


Рисунок 2. Схема предложенного метода

Таблица 1. Коэффициенты трансформатора и первичные номинальные токи

Параллельные соединения	Группы обмоток	Значение группы	Соотношение	Входной ток (А)
1	10	40	1	5
2	5	40	2	10
5	2	40	5	25
10	1	40	10	50
1	10	4	40	50
2	5	4	20	100
5	2	4	50	250
10	1	4	100	500
1	4	1	100	500
2	2	1	200	1000

где R_L и L_L -действительная и мнимая части Z_L . Это уравнение выполнено регулировкой C и R компенсации таким образом индуктивного поведения намагничивающей ветви T_2 и индуктивностей измерительного трансформатора и нагрузки. Уравнение (6) показывает, что N_2 должно быть меньше, чем N_3 .

Отношение между этими числами оборотов определяет мощность P рассеянную в R . Предполагая $R \approx R_m$,

$$P \cong V_3 I_3 \left(\frac{N_3}{N_2} - 1 \right) \quad (10)$$

Когда N_3/N_2 приближается к 1/1, мощность уменьшается, значение R увеличивается, а значение C уменьшается. Все эти условия полезны для достижения высокоточных результатов. В прототипе N_2 был зафиксирован на 0,25% ниже, чем N_3 , вместо 50%, первоначально предложенных в [3, с. 47].

Этот метод требует ручной регулировки R и C . Это было бы неудобно для общего использования; но, поскольку основная цель этой работы состоит в том, чтобы использовать его только в калибровках очень высокой точности, время, необходимое для регулировки, не является проблемой. Регулировочная точка в основном зависит от нагрузки. Вариации сопротивлений обмотки из-за изменения температуры и намагничивания значений T_2 потребовали бы небольших изменений значений R - C .

Чтобы узнать, насколько близка регулировка R - C от идеальной точки (нулевой поток), используется третья обмотка T_1 . Фундаментальная составляющая напряжения V_m может быть легко связана с фундаментальной составляющей магнитного потока U , и это последнее значение с погрешностью трансформатора, по уравнению (2).

$$V_m = N_3 \omega \Phi \quad (11)$$

Регулировка R - C продолжается до тех пор, пока это напряжение не будет снижено до требуемого уровня, который зависит от допустимой максимальной погрешности.

Для предлагаемого трансформатора погрешности влияют также на вторичную и первичную обмотки. Поскольку погрешность трансформатора

(включая все источники погрешности) определяется в отношении 1/1, влияние паразитных емкостей является постоянным и не увеличивает неопределенность погрешность значения. Эти емкости неизменны для всех комбинаций первичной обмотки. Однако емкостные токи первичной обмотки изменяются при использовании различных соотношений из-за различных комбинаций соединений. Необходимо сохранить эти емкости в малых значениях, чтобы достичь низких погрешностей. Многие блуждающие емкостные токи не циркулируют через обмотки из-за емкости между ними. Измеряя емкости каждой обмотки, можно определить, что предел для паразитной емкости

$$I_{c1} \cong j12\omega C_c V_1 \quad (12)$$

где C_c -емкость между любыми двумя секторами обмотки, а V_1 - первичное напряжение. Когда все обмотки соединены параллельно, этот источник погрешностей становится незначительным.

Таблица 2. Измеренные погрешности

Соотношение	Первичная обмотка	Вторичная обмотка	Первичный ток (А)	Значение ошибки (10^{-6})
1	400	400	2,5	7,8
2	400	400	5	7,1
2	400	200	5	5,8
2	400	200	10	6,4
10	400	40	25	7,6
10	400	40	50	4,5
10	40	40	25	4,0
10	40	40	50	1,5

Экспериментальные результаты

Трансформатор калибровался в режиме самокалибровки (соотношение 1/1). Измеренные погрешности составили $7,1 \cdot 10^{-6}$ при номинальном токе и $7,8 \cdot 10^{-6}$ и при половине от номинального тока. Основное преимущество предложенного метода заключается в том, что эти погрешности сохраняются постоянными для других коэф. мощности при использовании одних и тех же групп обмоток (10·40). Поскольку значения погрешности известны, они были использованы для коррекции всех этапов калибровки, поэтому нет необходимости в использовании любого другого устройства, чтобы получить погрешности трансформатора при всех коэф. мощности.

Выводы

Предложен самокалибрующийся трансформатор тока. Погрешности этого трансформатора измеряются без каких-либо других. Он основан на принципе нулевого потока, изменяя коэф. мощности путем соединения первичных групп обмоток в разные конфигурации. Расчеты показывают, что основной причиной погрешности в прототипе является рассеянный магнитный поток, обусловленный отсутствием компенсирующих обмоток. Несмотря на этот недостаток, погрешность составляет всего $3 \cdot 10^{-6}$, что достаточно для стандартных калибровочных целей.

Библиографический список:

1. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник/ И.Н. Сидоров, А.А. Христинин, С.В. Скорняков. – М.: Радио и связь, 1989. – 384 с.
2. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоиздат, 1989. – С. 240.
3. Булычев А.В., Наволочный А.А. Релейная защита в распределительных сетях: Пособие для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2011. – С. 208.
4. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание.
5. Дорохин Е.Г., Дорохина Т.Н. Основы эксплуатации релейной защиты и

автоматики. Краснодар: ОАО «Издательство «Советская Кубань», 2006.

6. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – С. 549.