

УДК 621.361.925

РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Дьяченко М.Д., к.т.н., доц., Бурлака В.В., ассист., Поднебенная С.К., асп.

Приазовский государственный технический университет

ул. Университетская, 7, 87500, г. Мариуполь, Украина

E-mail: signnet@azovsvet.com.ua

Предложен способ расширения динамического и частотного диапазона малогабаритных измерительных трансформаторов тока за счет применения в качестве нагрузки трансформатора тока специальной схемы - конвертора отрицательного сопротивления, позволяющего расширить диапазон измерений и улучшающий их частотную характеристику.

Ключевые слова: трансформатор тока, конвертор отрицательного сопротивления.

Введение. Главной особенностью цифровых устройств релейной защиты и автоматики является необходимость использования входных преобразователей сигнала ток-напряжение и напряжение-напряжение, в качестве которых обычно используют измерительные трансформаторы тока, напряжения, шунты, трансреакторы и пр. Они обеспечивают гальваническую развязку и выполняют соответствующее согласование сигналов по уровню.

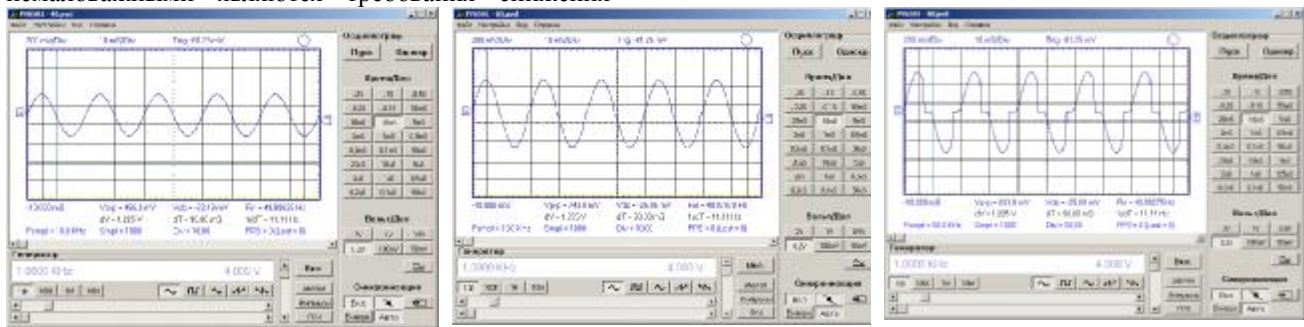
Устройства релейной защиты обычно действуют в условиях переходных процессов, которые сопровождаются резкими бросками тока, многократно превышающими установившиеся значения. В связи с этим, требования, предъявляемые к входным преобразователям, весьма противоречивы.

Помимо расширения рабочего частотного диапазона и гальванического разделения входных и выходных цепей, на сегодняшний день немаловажными являются требования снижения

массогабаритных показателей и себестоимости устройства цифровой защиты.

При нормальных условиях работы выходной сигнал трансформатора тока – вторичный ток, практически пропорционален первичному и сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю. Насыщение сердечника трансформатора, возникающее при первичных токах, превышающих номинальный, негативно влияет на точность работы устройств релейной защиты и автоматики, так как при этом происходит интенсивное рассеяние магнитного потока вне сердечника, что вызывает наведение токов индукции в близко расположенных цепях. Следствием насыщения сердечника является нарушение пропорциональной зависимости между первичным и вторичным токами, что проиллюстрировано на рис. 1.

Кроме того, насыщение сердечника может привести к его перегреву, вплоть до физического разрушения.



а) первичный ток 40 А

б) первичный ток 55 А

в) первичный ток 80 А

Рисунок 1 – Форма кривой вторичного тока при синусоидальном первичном токе

Анализ предыдущих исследований.

Преобразователи на основе шунтов имеют максимально широкий частотный диапазон, однако существование гальванической связи между входом и выходом требует дополнительной защиты от перенапряжений.

Преобразователи на основе трансформаторов обеспечивают гальваническую развязку цепей, однако расширение частотного диапазона в сторону низких частот возможно при увеличении индуктивности обмоток, что возможно при увеличении числа витков обмоток, а,

соответственно, и массогабаритных показателей трансформатора, и приводит к ухудшению характеристик в области высоких частот [1]. Кроме того, для обеспечения точности измерений необходимо, чтобы трансформаторы тока обладали малой погрешностью как при небольших величинах токов короткого замыкания.

В [1] описана возможность удовлетворения требований, предъявляемых к входным преобразователям в результате включения трансформатора тока в цепь обратной связи

операционного усилителя, причем амплитудная и фазовая погрешности определяются сопротивлением цепи вторичной обмотки и индуктивностью намагничивания, а верхняя граничная частота в основном зависит от потерь в магнитопроводе и индуктивности рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока.

Еще одним из известных решений является схема, где цепь отрицательной обратной связи замыкается через третью обмотку трансформатора, что дает возможность значительно увеличить эквивалентную постоянную времени. При этом нижняя граница частотного диапазона существенно сдвигается в область малых значений.

Цель работы. Совершенствование входных малогабаритных измерительных преобразователей тока с расширенным динамическим и частотным диапазоном для малобюджетных цифровых устройств релейной защиты.

Материал и результаты исследований. Объектом исследования является малогабаритный измерительный трансформатор тока, упрощенная схема замещения которого приведена на рис. 2.

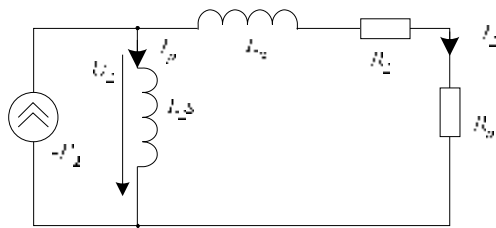


Рисунок 2 – Упрощенная схема замещения ТТ

Для расширения диапазона работы трансформатора тока, необходимо уменьшить величину магнитного потока, замыкающегося в сердечнике, что возможно при снижении напряжения U_2 . Этого можно достичь несколькими способами: в результате увеличения индуктивности L_2 или в результате уменьшения сопротивления Z_2 , в которое входят индуктивность рассеяния L_s , активное сопротивление вторичной обмотки R_2 и сопротивление нагрузки R_n , как показано на рис. 2.

Одним из вариантов уменьшения сопротивления выбранной цепи является использование конвертора отрицательного сопротивления (КОС) [2]. КОС, включенный во вторичную цепь, может скомпенсировать сопротивление Z_2 и свести общее сопротивление вторичной обмотки практически к нулю.

Запишем для схемы на рис. 2 уравнения для токов по 2-му закону Кирхгофа:

$$U_2 = I_2 \cdot Z_2; I_2 = \frac{U_2}{Z_2}; I_m = \frac{U_2}{L_2 s};$$

$$\begin{aligned} -I_1' &= I_2 + I_m = I_2 + \frac{U_2}{L_2 s} = \\ &= I_2 + \frac{I_2 \cdot Z_2}{L_2 s} = I_2 \cdot \left(1 + \frac{Z_2}{L_2 s} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Найдем передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{I_2}{I_1} = -\frac{W_1}{1 + \frac{Z_2}{L_2 s}}, \quad (2)$$

таким образом, когда $Z_2 \rightarrow 0$, $W(s) \rightarrow -\frac{W_1}{W_2}$

(передаточная функция идеального трансформатора).

На рис. 3 приведена схема включения КОС во вторичную обмотку трансформатора.

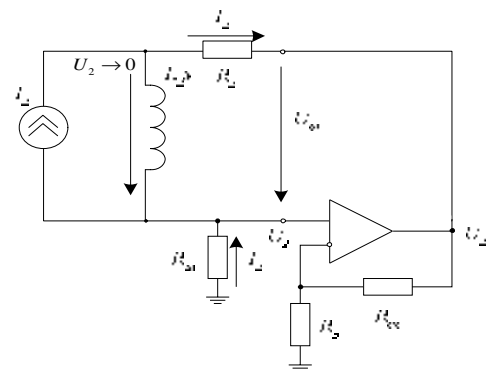


Рисунок 3 – Схема включения конвертора отрицательного сопротивления в цепь нагрузки

Так как считаем, что напряжение $U_2 \rightarrow 0$, то можно сказать, что $-I_1' = I_2$.

Для неинвертирующего усилителя входное и выходное напряжения связаны следующим соотношением:

$$U_2 = -U_1 \cdot (1 + R_{in}/R_3). \quad (3)$$

Запишем выражение для $U_{\alpha\alpha}$, используя второй закон Кирхгофа:

$$U_{\alpha\alpha} = -I_2 \cdot R_o - I_2 \cdot R_o \cdot \frac{R_{in}}{R_3} + I_2 \cdot R_o,$$

$$U_{\alpha\alpha} = -I_2 \cdot R_o \cdot \frac{R_{in}}{R_3}.$$

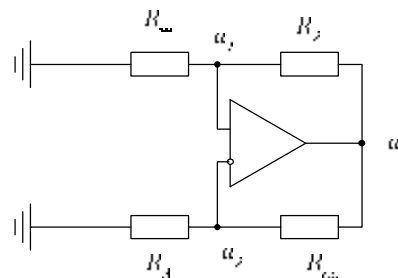


Рисунок 4 – Схема анализа устойчивости конвертора отрицательного сопротивления

Схему, приведенную на рис. 3, можно упрощенно представить в виде схемы на рис. 4.

Запишем выражения для u_1 и u_2 :

$$u_1 = u \cdot \frac{R_o}{R_2 + R_o}; \quad (4)$$

$$u_2 = u \cdot \frac{R_3}{R_{i\bar{n}} + R_3}. \quad (5)$$

Тогда для устойчивой работы схемы необходимо, чтобы выполнялось условие, $u_2 > u_1$:

$$u \cdot \frac{R_3}{R_{i\bar{n}} + R_3} > u \cdot \frac{R_o}{R_2 + R_o}. \quad (6)$$

Анализируя (6), можно прийти к выводу, что соотношение параметров конвертора отрицательного сопротивления должно удовлетворять следующему условию:

$$R_2 > \frac{R_{i\bar{n}} \cdot R_o}{R_3}. \quad (7)$$

Однако, учитывая некоторые особенности реальных операционных усилителей, выполнение условия (7) приведет к тому, что на выходе усилителя при отсутствии входного напряжения появится напряжение смещения $U_{\bar{n}}$, последствием чего станет подмагничивание трансформатора постоянным током.

Если считать, что идеальный операционный усилитель стремится к тому, чтобы приравнять напряжения на входах, то тогда напряжения u_2 и u_1 (рис. 4) будут отличаться на величину $U_{\bar{n}}$. Пусть $u_1 = u_2 + U_{\bar{n}}$, тогда

$$U_{\bar{n}} = u_2 \cdot \left(1 + \frac{R_{i\bar{n}}}{R_3}\right) = (u_2 + U_{\bar{n}}) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_o}\right). \quad (8)$$

Найдем зависимость тока во вторичной обмотке трансформатора от величины $U_{\bar{n}}$:

$$I_2 = \frac{U_{\bar{n}}}{R_2} \cdot (R_o R_{i\bar{n}} + R_o R_3) / (R_o R_{i\bar{n}} - R_2 R_3). \quad (9)$$

Таким образом, если сопоставить (7) и (9), видно, что чем точнее компенсация сопротивления, тем больший ток будет протекать через вторичную обмотку трансформатора. Снизить $U_{см}$ можно подстройкой внешним резистором, для подключения которого некоторые операционные усилители (например, 140УД7, 140УД8) имеют специальные выводы. Некоторые операционные усилители (например, 140УД17, 140УД25) имеют напряжение смещения $U_{\bar{n}}$, стремящееся к нулю, что позволяет их использовать без дополнительной компенсации.

В условиях использования операционных усилителей общего применения, одним из вариантов снижения влияния $U_{см}$ является установка фильтра постоянной составляющей тока, в качестве которого возможно использование конденсатора C_3 . Пример схемы для снижения $U_{\bar{n}}$

приведен на рис. 5. Параметры схемы, приведенной на рис. 5. $C_3 = 100$ мкФ, $R_3 = 100$ Ом, $R_4 = 11$ кОм, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 1$ кОм.

Достоинством схемы, приведенной на рис. 5, является и то, что в формировании выходного напряжения участвует всего один прецизионный резистор R_1 , резисторы цепи обратной связи конвертора отрицательного сопротивления не влияют на выходное напряжение.

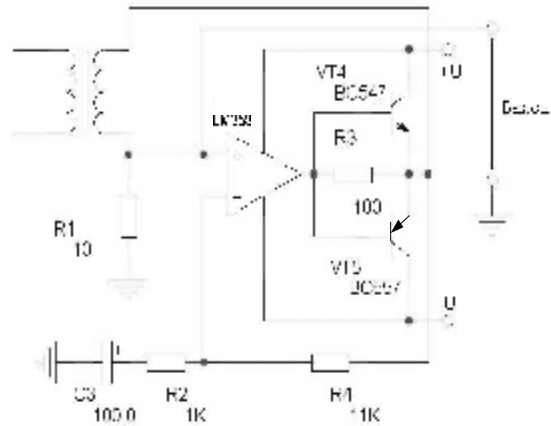


Рисунок 5 – Схема для снижения $U_{\bar{n}}$

Вместе с тем, данная схема чувствительна к нагрузке, однако поскольку современные АЦП, которые включаются после входных преобразователей, обладают большим входным сопротивлением, то недостатком это не является, а использование дополнительного усилительного каскада VT4-VT5 позволяет использовать маломощный операционный усилитель общего назначения.

Для питания схемы может быть использован источник, непосредственно питающий устройство релейной защиты. Поскольку потребление схемы в нормальном режиме зависит в большей степени от потребления операционного усилителя (усилитель LM358 потребляет ток порядка единиц мА), в режиме короткого замыкания потребление возрастает, однако время работы устройства релейной защиты в таком режиме обычно не превышает нескольких секунд. В результате штатный блок питания устройства вполне справляется с данной задачей.

В результате проведенных опытов, были сняты осциллограммы вторичных токов при протекании по первичной обмотке трансформатора тока синусоидальной формы, приведенные на рис. 6.

Таким образом, предложенная схема позволяет расширить диапазон измерений трансформатора тока более чем в 4 раза, что дает возможность использовать малогабаритные трансформаторы для цифровых устройств релейной защиты в условиях, когда расчетные входные токи значительно превышают номинальный входной ток

трансформатора тока. Позволяя тем самым снизить габариты всего устройства в целом, а так же и его стоимость.

Эффективность и практическая ценность разработанного схемного решения позволила авторам на его основе создать комплекс цифровых устройств релейной защиты различного назначения [3].

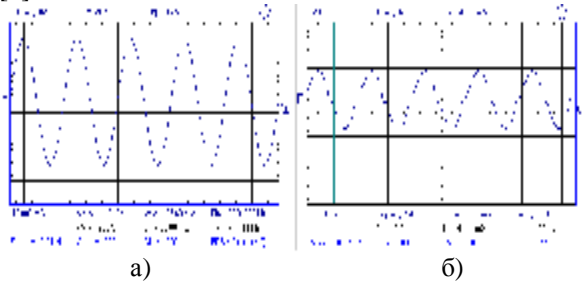


Рисунок 6 – Форма кривой вторичного тока при синусоидальном первичном токе: а) первичный ток 200 А, б) первичный ток 250 А

Выводы. Использование предложенного схемного решения позволяет расширить рабочий диапазон трансформаторов тока, что проявляется в меньшем искажении формы кривой вторичного тока. А это в конечном итоге позволяет применить дешевые малогабаритные трансформаторы тока, значительно снижая себестоимость цифровых устройств релейной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванин В.К. Релейная защита на элементах вычислительной техники, - 2е изд., перераб. и доп. / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1991 – 324 с.
2. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
3. www.signnet.azovsvet.com.ua

Стаття надійшла 12.03.10 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Жежеленко І. В.

РОЗШИРЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

*Дяченко М.Д., к.т.н., доц., Бурлака В.В., асист., Поднебенна С.К., асп.
Приазовський державний технічний університет, Україна
вул. Університетська, 7, 87500, м. Маріуполь
E-mail: signnet@azovsvet.com.ua*

Запропоновано метод підвищення динамічного діапазону та розширення робочого діапазону частот малогабаритних вимірювальних трансформаторів струму за рахунок використання спеціальної схеми – конвертора негативного опору, що дозволяє розширити діапазон вимірюваних струмів та покращити амплітудно-частотну характеристику каналу струму.

Ключові слова: трансформатор струму, конвертор негативного опору.

AMPLIFICATION MEASUREMENTS CURRENT TRANSFORMER'S DYNAMIC RANGE FOR RELAY PROTECTION DIGITAL DEVICES

*D'yachenko M.D., philosophy doctor, Burlaka V.V., assis., Podnebenaya S.K., asp.
Priazov state technical university
University str., 7, 87500, Mariupol, Ukraine
E-mail: signnet@azovsvet.com.ua*

A method of small-sized current transformer' dynamic range expansion by using a negative-impedance converter as its load is proposed. The result is improved frequency response, reduced phase shift and improved current measurement range.

Key words: current transformer, negative impedance converter (NIC).