



УДК 621.3
doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-8



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Способы измерения токов трехфазной ЛЭП

Ольга Николаевна Токарева

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
tokareva.alex2015@yandex.ru

Сергей Владимирович Голобоков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
golobokov_sv@mail.ru

Анна Алексеевна Тихомирова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
n.tihomirova2013@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются современные технологии измерения токов, которые применяются в системах. Представлен сравнительный анализ различных методов измерения токов.

Ключевые слова: токовый шунт, переменный электрический ток, бесконтактный метод измерения тока

Для цитирования: Токарева О. Н., Тихомирова А. А., Голобоков С. В. Способы измерения токов трехфазной ЛЭП // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(1). С. 1–5. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-8

Current measurement system for a three-phase power line

Ol'ga N. Tokareva

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
tokareva.alex2015@yandex.ru

Sergey V. Golobokov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
golobokov_sv@mail.ru

Anna A. Tikhomirova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
n.tihomirova2013@yandex.ru

Abstract. The article discusses modern current measurement technologies that are used in systems. A comparative analysis of various methods for measuring currents is presented.

Keywords: current shunt, alternating electric current, non-contact current measurement method

For citation: Tokareva O.N., Tikhomirova A.A., Golobokov S.V. Current measurement system for a three-phase power line. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2022;7(1):1–5. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-8

В настоящее время существуют два метода измерения токов в проводах высокого напряжения: контактные и бесконтактные. Контактные методы измерения требуют разрыва цепи провода и более трудоемкие в отношении монтажа, производства и обслуживания. Бесконтактный метод измерения позволяет обеспечивать монтаж без разрыва токнесущего провода, более прост при монтаже и эксплуатации. В современных системах в основном используются именно бесконтактные методы измерения тока в проводе.

Для бесконтактного измерения тока потенциально могут использоваться следующие типы:

- датчики Холла;
- катушка Роговского;
- трансформаторы тока.



Измерение тока с использованием датчика Холла. Датчик Холла – это измерительный преобразователь, который выдает выходное напряжение в зависимости от магнитного поля. Вокруг проводника с током образуется магнитное поле. Выходное напряжение датчика Холла пропорционально магнитному полю и следовательно – величине электрического тока. На рис. 1 показано измерение тока с использованием датчика Холла.

В процессе измерения тока в линиях электропередач (ЛЭП) его направление постоянно изменяется и приводит к изменению силовых линий магнитного поля. Выходное напряжение будет очень низким – порядка мВ и переменной полярности. Для повышения точности сигнал датчика Холла нужно увеличить до уровня 5 В.

Это делается с помощью усилителя с высоким коэффициентом усиления и очень низким уровнем шума. Кроме схемы усилителя датчик Холла требует дополнительных схем, так как это линейный преобразователь. Полученный сигнал нужно обрабатывать, хранить и передавать с ЛЭП с высоким напряжением в систему, потенциал которой равен нулю.

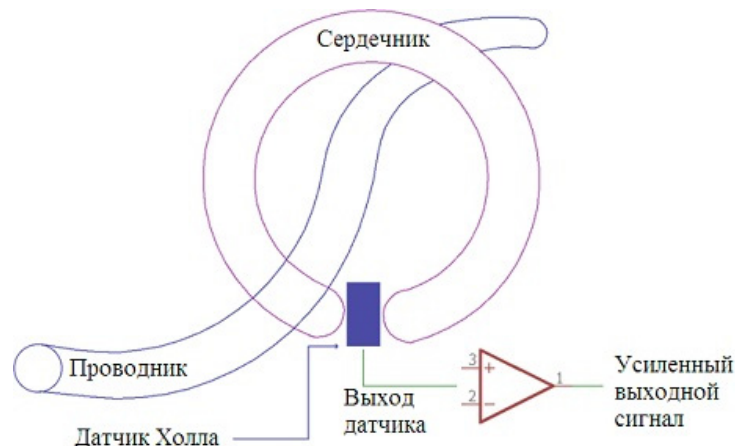


Рис. 1. Измерение тока с использованием датчика Холла

Преимущества датчика Холла:

- может использоваться на более высокой частоте;
- бесконтактный метод;
- может использоваться в суровых климатических условиях;
- высокая надежность.

Недостатки:

- сигнал датчика дрейфует и требует компенсации;
- требуется дополнительная схема для устойчивого выходного сигнала;
- высокая цена.

Измерение тока с помощью катушки Роговского. Катушка Роговского является датчиком переменной составляющей тока в проводнике и принципиально является катушкой без сердечника, располагаемой вокруг проводника с током. Конструкция катушки обеспечивает высокую защиту от внешних электромагнитных помех и высокую линейность выходного напряжения по отношению к измеряемому току.

На рис. 2 показана катушка Роговского с дополнительной схемой.

Выходное напряжение катушки Роговского пропорционально скорости изменения тока в проводнике. Дополнительная схема выполняет интегрирование сигнала. Напряжение на выходе интегратора будет пропорционально току в проводах ЛЭП.

Преимущества катушки Роговского:

- это хороший метод для обнаружения быстрого высокочастотного изменения тока;
- безопасная работа с точки зрения обращения с вторичной обмоткой;
- недорогое решение;
- гибкость в использовании благодаря конструкции с разомкнутым контуром.

Недостатки:

- подходит только для переменного тока;
- имеет более низкую чувствительность, чем трансформатор тока;
- необходимость внешнего питания датчика.

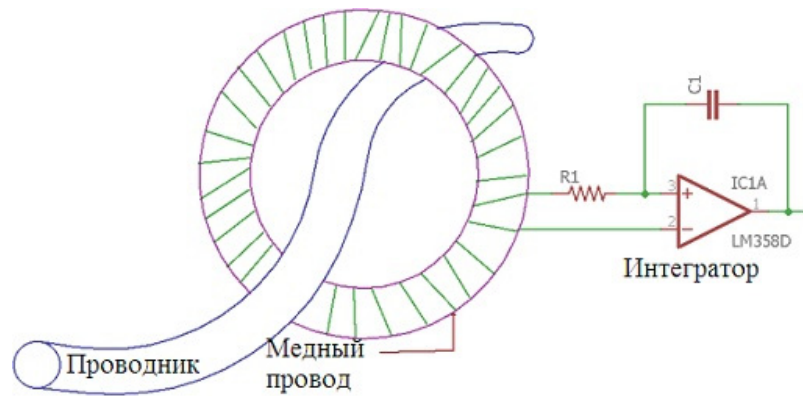


Рис. 2. Катушка Роговского с дополнительной схемой

Измерение тока с помощью трансформатора тока. Трансформаторы тока (ТТ) применяются также для измерений тока в установках высокого напряжения, в магистральных ЛЭП напряжение достигает сотен киловольт. ТТ – это промышленный трансформатор, который преобразует большое значение тока в проводах ЛЭП в намного меньшее значение. Измерение производится через выход вторичной катушки. ТТ выполняют с одной, двумя и более группами вторичных обмоток.

Одна используется для питания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), другая – для подключения средств учета и измерения. В настоящее время ТТ получили наибольшее распространение и являются основой информационного обеспечения систем РЗА всех уровней. Они также используются в системах коммерческого учета.

Преимущества ТТ:

- большая пропускная способность, больше, чем у других рассмотренных методов;
- не требует дополнительных схем.

Недостатки:

- требуется техническое обслуживание;
- из-за намагниченности возникает гистерезис;
- высокий первичный ток насыщает материалы ферритового сердечника.

Несмотря на все достоинства и длительный опыт эксплуатации, существующие измерительные системы на базе измерительных трансформаторов тока не соответствуют современным требованиям и тенденциям в электроэнергетике и обладают рядом серьезных недостатков.

Задача повышения точности измерения больших токов в электроэнергетике может быть решена применением шунтов. Сложность применения теории шунтов заключается во включении шунта в разрыв провода ЛЭП, работающего при сверхвысоких напряжениях. Шунт представляет собой резистор, включенный в разрыв провода ЛЭП. Вольтметр включается параллельно шунту, как показано на рис. 3.

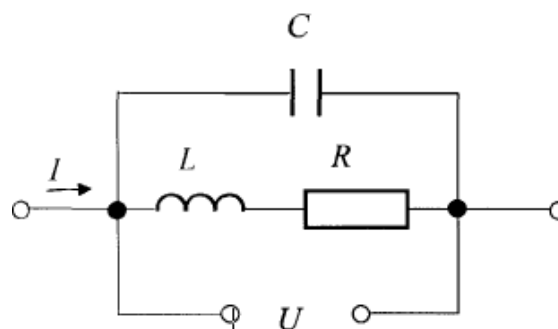


Рис. 3. Эквивалентная схема шунта в ЛЭП переменного тока

Распределение токов между вольтметром и шунтом:

$$\frac{I_p}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_p}, \quad (1)$$



где I_p – измеряемый ток в вольтметре; $I_{ш}$ – измеряемый ток в ЛЭП, проходящий через шунт; $R_{ш}$ – сопротивление шунта; R_p – сопротивление вольтметра.

Откуда ток в ЛЭП постоянного тока

$$I_{ш} = \frac{I_p R_p}{R_{ш}} = \frac{U_p}{R_{ш}}, \quad (2)$$

где $I_{ш}$ – измеряемый ток в ЛЭП.

Для ЛЭП переменного тока формула принимает вид:

$$I_{ш} = \frac{U_p}{Z_{ш}} = \frac{U_p}{R_{ш} + jX_{ш}}, \quad (3)$$

Комплексное сопротивление шунта $Z_{ш}$ и его активное сопротивление $R_{ш}$ являются константами, поэтому падение напряжения пропорционально величине измеряемого тока $I_{ш}$, который проходит через провод ЛЭП. В реальных устройствах эти сопротивления не являются константами, что приводит к погрешностям измерений.

Во-первых, существует технологический разброс, отклонение конструктивных параметров и свойств применяемых материалов. Во-вторых, при протекании тока происходит нагрев и повышение активного сопротивления токоведущего мостика шунта. В-третьих, при изменении погодных условий, особенно влажности воздуха, изменяется реактивная составляющая комплексного сопротивления.

Все это приводит к появлению составляющих погрешностей измерения тока, причем в процессе эксплуатации наблюдается дрейф характеристик. Современный уровень технологии производства резисторов позволяет получить стабильность характеристик токового шунта на уровне 0,03 %. С учетом погрешностей устройств вторичной обработки сигнала относительная погрешность измерения тока составит 0,05 %.

Для контроля режимов работы ЛЭП промышленной сети в каждый из трех фазных проводов ЛЭП необходимо включить токовый шунт и систему вторичных преобразователей. Вторичный преобразователь выходной сигнал токового шунта в виде падения напряжения должен привести к одному из стандартных:

- токовый выход – 4–20 мА;
- напряжение постоянного тока – 0–5 В;
- цифровой код, например стандарта RS-485.

Таким образом, система измерения трехфазного тока будет иметь три измерительных модуля и три канала передачи данных, системный модуль, блок питания и модуль связи. Архитектура такой системы аналогична применяемым системам на основе измерительных ТТ.

Выводы

1. Измерительные системы на основе датчиков Холла в настоящее время получили широкое применение в мобильных приборах. По показателям точности датчики Холла уступают токовым шунтам.

2. Измерительные ТТ, несмотря на их повсеместное использование, по своим метрологическим характеристикам подошли к пределу. В дальнейшем они будут заменены другими типами измерительных преобразователей.

3. Катушки Роговского применяются в измерительной технике и устройствах автоматики. Их использование в электроэнергетике перспектив не имеет, в первую очередь ввиду сложной вторичной аппаратуры.

4. Наиболее перспективным направлением в электроэнергетике является применение токовых шунтов, обладающих высокими метрологическими характеристиками, технологичностью производства. Измерительные системы на основе токовых шунтов могут применяться в ЛЭП постоянного тока.

Список литературы

1. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы / пер. с польск. В. И. Тихонова и К. Б. Макидонского ; под ред. О. К. Хомерики. М. : Энергия, 1971. 352 с.



2. Isolated current and voltage transducers. Characteristics-Application- Calculation. 3-rd edition. LEM Components, CH24101 E/US, 05.04. URL: www.lem.com.
3. Акимов Н. Н., Ващуков Е. П., Прохоренко В. А. [и др.]. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА : справочник. М. ; Мн. : Беларусь, 2016. 591 с.
4. Горбунова И. С., Адамов О. М. Оптимизация тепловых режимов токового шунта // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2019») : сб. тр. науч.-техн. конф. (Пенза, 28–30 октября, 2019 г.). Пенза, 2019. С. 208–213.

References

1. Kobus A., Tushinskiy Ya. *Datchiki Kholla i magnitorezistory = Hall sensors and magnetoresistors*. Translated from Polish V.I. Tikhonov, K.B. Makidonskiy. Moscow: Energiya, 1971:352. (In Russ.)
2. *Isolated current and voltage transducers. Characteristics-Application- Calculation. 3-rd edition*. LEM Components, CH24101 E/US, 05.04. Available at: www.lem.com.
3. Akimov N.N., Vashchukov E.P., Prokhorenko V.A. [et al.]. *Rezistory, kondensatory, transformatory, drosseli, kommutatsionnye ustroystva REA: spravochnik = Resistors, capacitors, transformers, chokes, switching devices for REA: A handbook*. Moscow; Minsk: Belarus', 2016:591. (In Russ.)
4. Gorbunova I.S., Adamov O.M. Optimization of thermal conditions for the current shunt. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2019»): sb. tr. nauch.-tekhn. konf. (Penza, 28–30 oktyabrya, 2019 g.) = Methods, means and technologies for obtaining and processing measurement information (“Shlyandinsky Readings – 2019”): Proceedings of scientific and technical conference (Penza, October 28–30, 2019)*. Penza, 2019:208–213. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 10.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.04.2022

Принята к публикации / Accepted 05.05.2022