

МЕТОД И СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

О.Г. ШИРОКОВ, О.В. ЛЫМАРЬ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

При контроле показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в сетях напряжением выше 0,4 кВ используют, как правило, в качестве первичных измерительных преобразователей трансформаторы напряжения (ТН) с классами точности 0,5 и 1,0. По ГОСТ 13109-97 [1] допускается до замены таких ТН более точными производить контроль ПКЭ при погрешности измерений, в 1,5 раза превышающей установленные стандартом нормы. Однако это не решает проблему точности измерений ПКЭ в связи с тем, что частотные свойства этих ТН не нормируются и мало исследованы. Помимо технических, это создает и чисто формальные проблемы, поскольку в областях, подлежащих обязательному государственному контролю и надзору, применение неупрежденных средств измерения, типы которых не утверждены, недопустимо. В то же время, при анализе источников ухудшения ПКЭ существенными оказываются как уровни гармоник, так и направления потоков мощности искажений, т.е. фазовые углы между одноименными гармониками тока и напряжения, на которые могут влиять фазо-частотные характеристики (ФЧХ) ТН. В существующих стандартах отсутствуют какие-либо нормы по этому поводу.

Такая неопределенность может привести к наложению штрафных санкций на невиновного потребителя, или же эти санкции не будут соответствовать действительному вкладу данного потребителя в ухудшение ПКЭ. В любом случае, при отсутствии достоверных данных, теряет всякий смысл принцип экономического стимулирования потребителя к повышению качества электрической энергии в точках общего присоединения, что в конечном итоге может пагубно сказаться как на самой энергосистеме, так и на потребителях.

При гармонических измерениях основным требованием к ТН является требование к определенности его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ФЧХ. Если АЧХ и ФЧХ ТН будут стабильны, то этого уже достаточно для его использования в любых измерениях. Отличие в применении ТН с различными АЧХ и ФЧХ заключается лишь в соответствующем их учете при получении результатов измерения. Кроме АЧХ и ФЧХ необходимо также знать какие искажения вносит ТН в измеряемый сигнал [2, 3]. В дальнейшем под частотными свойствами ТН будут подразумеваться эти три параметра ТН.

Данная работа посвящена разработке и проверке на практике метода измерения частотных свойств ТН.

Определение требований к методу измерения частотных свойств ТН

Для решения задачи измерения частотных свойств ТН в РФ был разработан, а в 1998 г. включен в программы испытаний, метод измерения частотных свойств ТН [2]. Принципиальная схема установки для исследования частотных свойств ТН представлена на рис. 1.

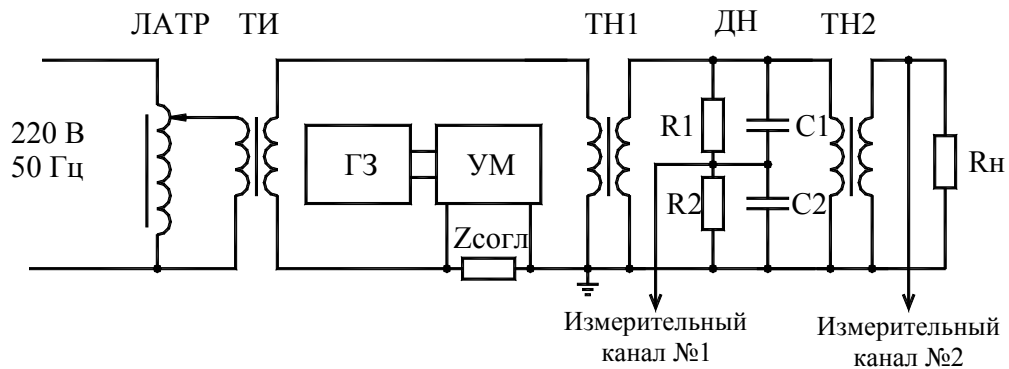


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования частотных свойств ТН: ТИ – трансформатор изолирующий; ГЗ – генератор звуковой; УМ – усилитель мощности; ТН1 – повышающий трансформатор, ТН2 – исследуемый ТН; ДН – делитель напряжения; $Z_{согл}$ – согласующее устройство; R_n – нагрузка исследуемого ТН

В [3] произведен анализ данного метода и выявлены его недостатки, вытекающие из принципа формирования испытательного напряжения. К ним можно добавить еще один недостаток - большая трудоемкость измерений. Она возникает из-за дополнительных настроек измерительной установки перед каждым измерением, связанных с необходимостью выставления с помощью ЛАТР-а напряжения основной частоты и задания с помощью усилителя мощности содержания накладываемой гармоник. Как итог, измерение частотных свойств одного ТН может потребовать значительного времени (а если исследования проводятся для нескольких вариантов вторичной нагрузки ТН, то оно во столько же раз и увеличивается), причем в самих результатах измерений возможно содержание субъективной погрешности.

Проведенные в [4] исследования доказали необходимость периодических проверок ТН. Следовательно, можно предположить, что со временем и частотные свойства ТН изменяются, что также требует проведения их периодических измерений. В связи с этим, в новый метод должна быть заложена возможность проверки ТН, которая, согласно [5], должна осуществляться с интервалом в 5 лет. Это позволит одновременно с измерением частотных свойств ТН выполнять его проверку.

На основании вышеизложенного можно определить основные требования к методу и средству измерения частотных свойств ТН:

- минимальное время измерений;
- производство измерений на номинальном напряжении ТН;
- возможность формирования спектра испытательного напряжения с различным содержанием гармоник с заданными амплитудами и фазами;
- минимальное содержание посторонних гармоник в испытательном напряжении;
- возможность проведения поверочных испытаний ТН на месте эксплуатации;
- минимальные массо-габаритные показатели измерительной установки;
- простота проведения измерений, что снижает требования к квалификации оператора.

Оптимальная реализация метода и средства измерения, удовлетворяющих указанным требованиям, возможна с помощью использования соответствующей информационно-измерительной системы (ИИС).

Метод и средство измерения частотных свойств ТН

Метод измерения частотных свойств состоит в сличении испытуемого ТН с эталонным делителем напряжения. Но, в отличие от существующего метода, в данном случае используется другой принцип формирования испытательного напряжения. Если в измерительной установке, представленной на рис. 1, испытательное напряжение формируется путем наложения одной из высших гармоник на напряжение сети при помощи согласующего устройства, то новый метод подразумевает автономную генерацию испытательного напряжения. Это позволяет генерировать моно или полигармонические испытательные напряжения, свободные от возможных искажений сетевого напряжения с различным содержанием гармоник заданных амплитуд и фазовых углов. Функциональная схема ИИС реализующая предлагаемый метод представлена на рис. 2.

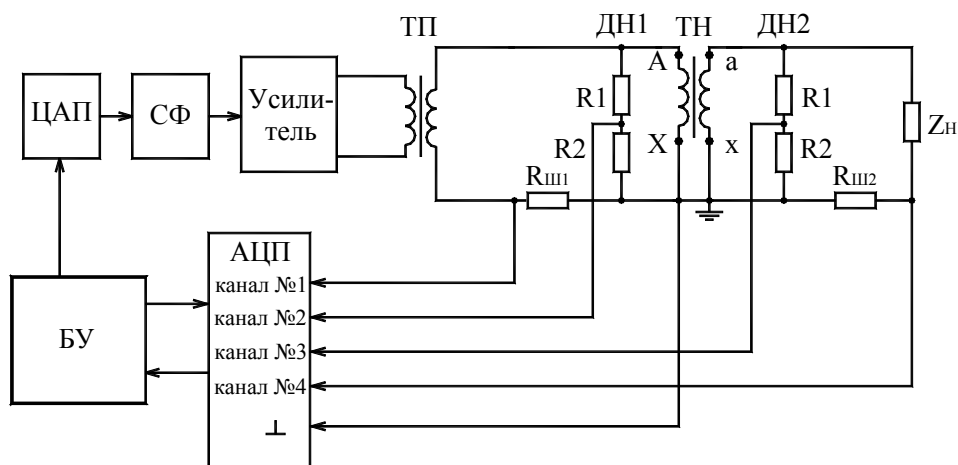


Рис.2. Функциональная схема ИИС для измерения частотных свойств ТН: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; СФ – сглаживающий фильтр; ТП – повышающий трансформатор; ДН 1, ДН 2– первый и второй делители напряжения; БУ – блок управления; $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ – первый и второй датчики тока (шунты); АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Блок управления (БУ) представляет собой микропроцессорное устройство (например, ПЭВМ), осуществляющее управление процессом измерения по соответствующему алгоритму. Сигнал испытательного напряжения формируется ЦАП. После фильтрации сглаживающим фильтром низких частот СФ он усиливается усилителем мощности и поступает на первичную обмотку повышающего трансформатора ТП. Испытательное напряжение с вторичной обмотки повышающего трансформатора ТП поступает на первый делитель напряжения ДН1 и испытуемый ТН. Испытательное напряжение регулируется БУ путем изменения уровня сигнала с ЦАП от минимального значения до максимального по определенному закону, например, линейному. По команде БУ, с помощью АЦП, осциллографируются сигналы с обоих датчиков тока и обоих делителей напряжения. Если в ходе измерений значение тока на первичной обмотке ТН превысит допустимое, что указывает на неисправность ТН, то процесс измерения прекращается и испытательное напряжение плавно снижается до нуля. Полученные данные записываются в БУ, где после их обработки производится построение частотных характеристик ТН. По данным осциллограмм сигналов на втором делителе напряжения ДН2 и втором датчике тока $R_{ш2}$ определяется значение вторичной нагрузки ТН.

Предлагаемое средство измерения в соответствии с [6] удовлетворяет всем признакам ИИС. Оно позволяет производить измерение частотных свойств ТН при двух видах испытательного напряжения:

1. Синусоидальном.
2. Полигармоническом, содержащем гармонику основной частоты и не только одну дополнительную гармонику, а несколько, с различным их сочетанием.

Апробация предлагаемого метода и средства измерения частотных свойств ТН

Для апробации предлагаемого метода была собрана ИИС, где в качестве ЦАП и АЦП использовались преобразователи звуковой карты ПЭВМ, а в качестве БУ применялась сама ПЭВМ.

Звуковая карта не является полноценным АЦП – хорошо передавая форму сигнала, она не приспособлена для измерения его амплитуды. Это связано с трудностями определения ее градуировочной характеристики, вытекающими из ряда объективных причин. Основной из них является наличие регулятора уровня линейного входа, что не позволяет определить точное значение измеряемой величины.

При производстве измерений частотных свойств ТН на полигармоническом испытательном напряжении эта проблема отсутствует, так как частотные свойства ТН определяются по относительному содержанию гармоник первичного и вторичного напряжений ТН. Относительное содержание гармоник (коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения) определяется по выражению [1]:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{m(n)}}{U_{m(1)}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $U_{m(n)}$ – амплитуда напряжения n-ой гармоники;

$U_{m(1)}$ – амплитуда напряжения основной частоты.

Амплитуды и фазы отдельных гармонических составляющих можно найти, подвергнув цифровой сигнал дискретному преобразованию Фурье, либо другим алгоритмам обработки (быстрого преобразования Фурье или алгоритму Герцеля).

Погрешность ТН определяется как:

$$\delta_{U_n} = \frac{K_{U(n)ДН2} - K_{U(n)ДН1}}{K_{U(n)ДН1}} \cdot 100, \quad (2)$$

$$\Delta_{\varphi_n} = \varphi_{(n)ДН2} - \varphi_{(n)ДН1}, \quad (3)$$

где δ_{U_n} – относительная погрешность ТН при измерении коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения;

Δ_{φ_n} – абсолютная погрешность ТН при измерении фазового угла n-й гармонической составляющей напряжения;

$K_{U(n)ДН2}$ и $K_{U(n)ДН1}$ – результаты измерений n-й гармонической составляющей напряжения по измерительным каналам, подключенным к второму и первому делителям напряжения;

$\varphi_{(n)ДН2}$ и $\varphi_{(n)ДН1}$ – то же для фазовых углов n-й гармонической составляющей напряжения.

Т.о., звуковая карта может быть использована для измерения частотных свойств ТН, но она не позволяет производить его поверку.

Для устранения влияния входного импеданса звуковой карты на делители напряжения использовалось согласующее устройство, выполненное на операционных усилителях с большим входным сопротивлением, включенных по схеме повторителя напряжения.

Для работы ИИС, в соответствии с предложенным алгоритмом, применялась программа “Harmonicas 3”, написанная на языке программирования Delphi 5. В виду наличия у звуковой карты только двух каналов АЦП пришлось отказаться от контроля первичного и вторичного токов ТН. Измерения проводились при частоте дискретизации ЦАП и АЦП в 96 кГц и разрядности 16 бит.

Усиление сигнала испытательного напряжения, поступающего с ЦАП, осуществлялось с помощью усилителя мощности, собранного по мостовой схеме, а в качестве повышающего трансформатора использовался ТН НОМ-10. В роли образцового делителя ДН1 выступал делитель с сопротивлениями $R1=8400$ кОм и $R2=400$ Ом, соответствующие параметры ДН2: $R1=28$ кОм и $R2=70$ Ом. Для измерения гармонического спектра испытательного напряжения применялся “Анализатор гармоник электрической сети 43250”, подключенный к вторичной обмотке испытуемого ТН.

Измерения частотных свойств ТН производились для ТН НОМ-6 У4 1983 года изготовления при двух режимах:

- на холостом ходу при испытательном напряжении в 2,5 и 5 кВ;
- при номинальной вторичной нагрузке с $\cos\phi=1$ и испытательном напряжении в 2,4 кВ и 4,8 кВ.

На рис. 3 представлены гистограммы коэффициентов n-х гармонических составляющих испытательного напряжения. Как видно из рисунка предлагаемый метод позволяет значительно снизить содержание посторонних гармоник в испытательном напряжении.

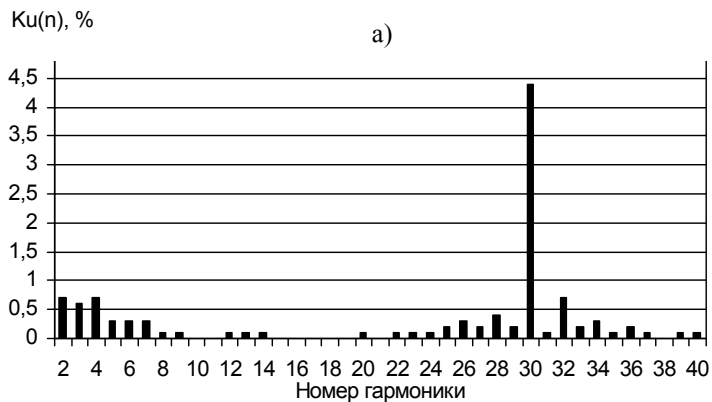
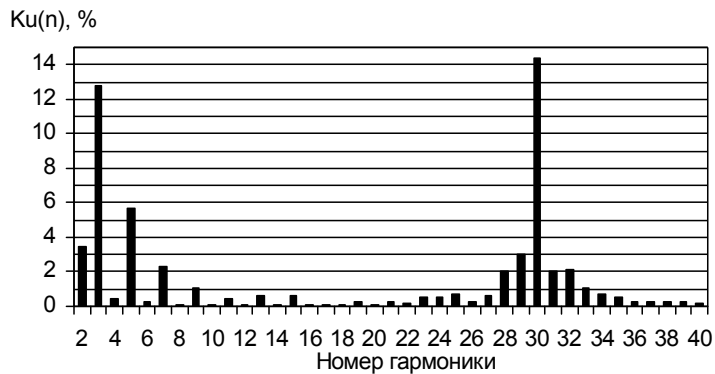


Рис. 3. Гистограммы коэффициентов n -х гармонических составляющих испытательного напряжения при наложении 30-й гармоники: а – при использовании измерительной установки, представленной на рис. 1; б – при использовании предлагаемого метода

На рис. 4 представлено окно программы “Harmonicas 3” с результатами измерения погрешностей по амплитуде (вверху) и углу (внизу) в соответствии с (2) и (3) на холостом ходу, на рис. 5 – при номинальной вторичной нагрузке. На графиках по оси абсцисс отложены номера гармоник

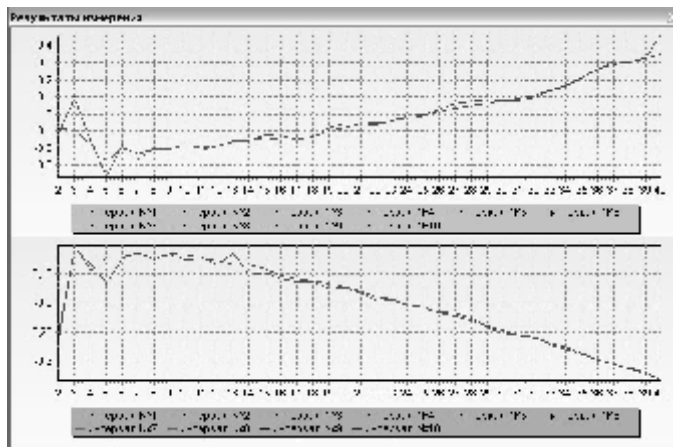


Рис. 4. Амплитудная и угловая погрешности ТН НОМ-6 У4 на холостом ходу

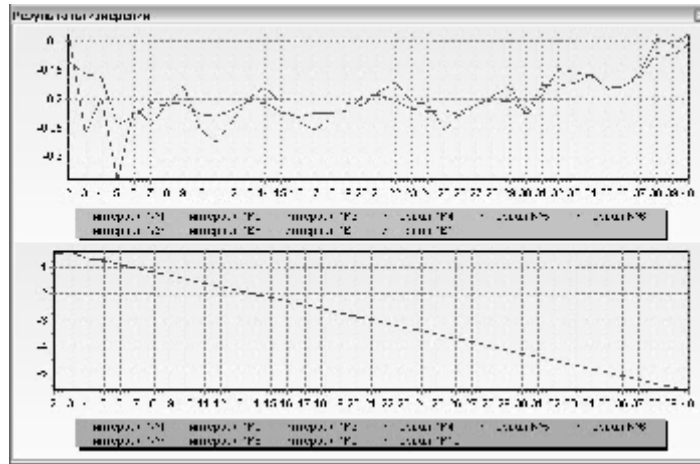


Рис. 5. Амплитудная и угловая погрешности ТН НОМ-6 У4 при номинальной нагрузке с $\cos\varphi = 1$

Проведенные исследования подтверждают возможность практической реализации предлагаемого автоматизированного метода измерения частотных свойств ТН. Вероятно, что при использовании специализированных ЦАП и АЦП еще более уменьшится содержание посторонних гармоник в испытательном сигнале и возрастет точность измерений.

Выводы

1. Использование нового принципа формирования испытательного напряжения позволяет избавиться от отмеченных в [3] недостатков.
2. Автоматизация измерений частотных свойств ТН значительно сокращает время измерений и их трудоемкость.
3. Выполненные эксперименты подтверждают работоспособность предлагаемого метода и средства измерения частотных свойств ТН.

Список литературы

1. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– Взамен ГОСТ 13109-87; Введен 01.01.99.– Минск: Белстандарт, 1998.– 31 с.
2. Метод измерений частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля ПКЭ. — В кн.: Метрологическое обеспечение электрических измерений в электроэнергетике / В. Н. Ярославский, Н. А. Боярин, А. А. Алексеев и др. – М.: ВНИИМС, 2000.
3. Лымарь О.В., Широков О.Г. Анализ существующего метода измерения частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля показателей качества электроэнергии.//Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого.– 2004.– №1.– С. 41-46.
4. Ярославский В.Н., Гамазов Ю.А. Об организации периодической поверки измерительных трансформаторов. // Электротехника. – 2000. – № 9. – С. 44-48.
5. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.– Взамен ГОСТ 1983-89; Введ. 01.03.03.– Минск.: Белстандарт, 2003.– 30 с.
6. ГОСТ 26.203-81. Комплексы измерительно-вычислительные. Признаки классификации. Общие требования.– Введ. 01.01.82.– М.: Изд-во стандартов, 1988.– 10 с.

Получено 24.06.2005 г.