

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

О.В. ЛЫМАРЬ, О.Г. ШИРОКОВ

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

Введение. Контроль качества электроэнергии в сетях с номинальным напряжением свыше 0,4 кВ требует, помимо применения специализированных измерителей показателей качества электроэнергии (ПКЭ), использования первичных масштабных преобразователей напряжения. Согласно РД 34.15.501-88 для этого должны применяться стандартные штатные трансформаторы напряжения (ТН), предназначенные для учета электроэнергии на промышленной частоте, частотные характеристики которых в настоящее время не нормируются и до конца не исследованы. Наряду с этим, в число нормируемых ГОСТ 13109-97 ПКЭ входят коэффициенты гармонических составляющих напряжений, допускаемая погрешность измерений которых в соответствии с ГОСТ 13109-97 нормируется следующим образом: относительная погрешность измерений при коэффициентах n -х гармонических составляющих более 1 % не должна превосходить 5 %; при меньших содержаниях гармоник абсолютная погрешность измерений должна быть не более 0,05 %. Учитывая, что погрешность измерений с помощью существующих измерителей ПКЭ в лучшем случае составляет, соответственно, 3 и 0,03 % [1], требования к неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ТН также оказываются на уровне 2-3 %, а искажения, вносимые ТН в синусоидальный сигнал, должны быть не более 0,02-0,03 %.

При анализе источников ухудшения ПКЭ существенными оказываются не только уровни гармоник, но и направления потоков мощности искажений, т. е. фазовые углы между одноименными гармониками тока и напряжения и, тем самым, фазо-частотные характеристики (ФЧХ) ТН. В существующих нормативных документах отсутствуют какие-либо нормы по этому поводу.

Существенно при этом, что характеристики индуктивных ТН могут оказаться неудовлетворительными из-за резонансов в области частот порядка 1 кГц, а емкостные ТН, применяемые на линиях 110 кВ и выше, заведомо непригодны для этих целей из-за узкой полосы пропускания, составляющей единицы герц. Расчетно-экспериментальные оценки частотных характеристик, выполненные в работе [2] для защитных обмоток, например, трансформаторов НОМ-6, показывают, что погрешность таких ТН на частоте 2 кГц по напряжению достигает минус 20 %, а по углу минус 30°, что явно не соответствует существующим потребностям при контроле и анализе качества электроэнергии.

Существует несколько работ, посвященных расчету частотных свойств ТН. При этом рассматривались как линейные схемы замещения ТН, так и их нелинейные модели [2-4]. Однако предложенные методы не прошли достаточной экспериментальной апробации на реальных объектах.

Таким образом, актуальной и требующей быстрого решения является задача нормирования и исследования частотных характеристик существующих и вновь разрабатываемых измерительных ТН, предназначенных для контроля качества электроэнергии.

Метод измерения частотных свойств ТН, используемых для контроля ПКЭ

В Российской Федерации разработан и включен в программы испытаний метод измерения частотных свойств ТН (решение научно-технической комиссии по метрологии и измерительной технике Госстандарта РФ, протокол № 17 от 15 декабря 1998 г.). Исследования по апробации данного метода проводились параллельно в УГТУ (г. Екатеринбург) и во ВНИИМС (г. Москва) [1].

Метод измерений состоит в сличении испытуемого ТН с эталонным делителем напряжения. Принципиальная схема испытательной установки представлена на рис. 1.

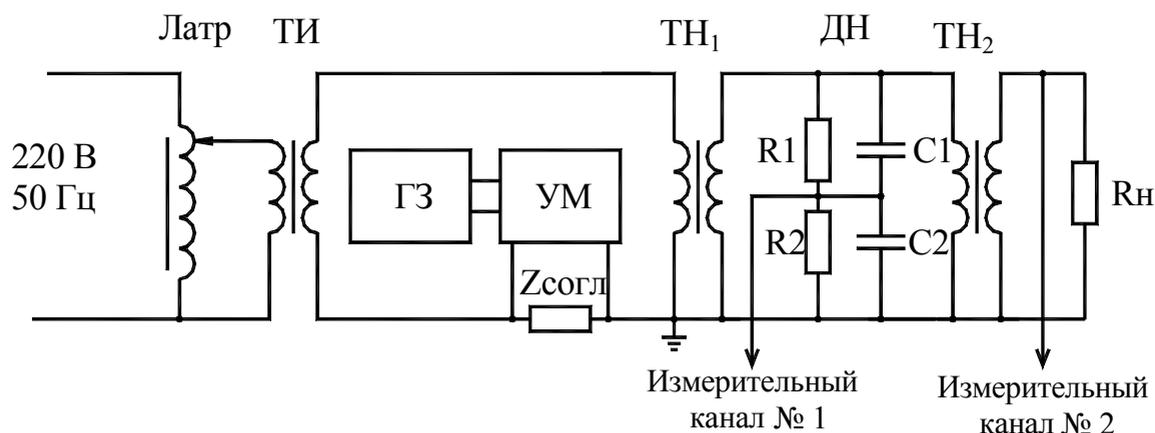


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования частотных характеристик ТН: ТИ – трансформатор изолирующий; ГЗ – звуковой генератор; УМ – усилитель мощности; ТН₁ – повышающий трансформатор, ТН₂ – исследуемый ТН; ДН – делитель напряжения; Z_{согл} – согласующее устройство; R_н – нагрузка исследуемого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

Схема позволяет подавать на вход исследуемого ТН синусоидальный сигнал основной частоты (с возможными искажениями, существующими в сети и привносимыми разделительным, регулирующим и повышающим трансформаторами) с наложением любой гармоник (при помощи ГЗ и УМ).

В установке УГТУ в качестве согласующего устройства Z_{согл} использовался резистивный шунт, в установке ВНИИМС – трансформатор.

На рис. 2 представлена гистограмма коэффициентов n -х гармонических составляющих испытательного напряжения при наложении сигнала 30-й гармоники на напряжение сети. На гистограмме наблюдаются два всплеска – в области низких частот и в окрестности накладываемой гармоники. Первый обусловлен искажениями формы кривой напряжения в сети, а также искажениями, вносимыми элементами силовой части испытательной установки. Второй связан с тем, что частота накладываемого сигнала не кратна частоте основного сигнала (имеет неканонический порядок) [1]. Аналогичный характер имели и напряжения на установке ВНИИМС с той лишь разницей, что в качестве повышающего трансформатора ТН₁ использовался более мощный, что обусловило меньшие искажения кривой в области низких частот – 3-я гармоника, например, не превышала 2 % в режиме холостого хода исследуемого ТН и 7,5 % при нагрузке 30 ВА. В УГТУ использовался регистратор-анализатор УРАН 100М. Во ВНИИМС коэффициенты гармоник измерялись прибором ЭРИС-КЭ.01, а фазовые углы гармоник – измерительно-вычислительным комплексом «ОМСК».

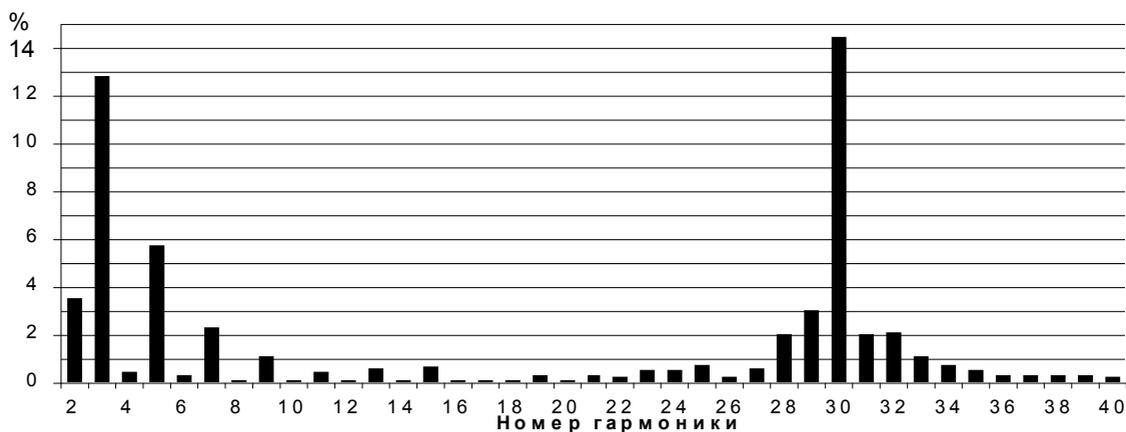


Рис. 2. Гистограмма коэффициентов n -х гармонических составляющих испытательного напряжения (частота накладываемой синусоиды 1500 Гц)

Погрешность испытуемого ТН характеризуется разностью результатов, зафиксированных по двум каналам:

$$\delta_{U_n} = K_{U_n(m)} - K_{U_n(d)}; \quad (1)$$

$$\delta_{\varphi_n} = \varphi_{n(m)} - \varphi_{n(d)}; \quad (2)$$

где δ_{U_n} – абсолютная 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; $K_{U_n(m)}$ и $K_{U_n(d)}$ – результаты измерений n -й гармонической составляющей напряжения по измерительным каналам, подключенным к ТН и делителю напряжения; $\varphi_{n(m)}$ и $\varphi_{n(d)}$ – то же для фазовых углов n -й гармонической составляющей напряжения.

Рассмотренный метод направлен на решение двух задач:

1) измерение характеристик при значимых уровнях искажений измеряемого напряжения для выявления возможных резонансов или влияния межвитковых и межобмоточных емкостей в области высоких частот;

2) выявление искажений, вносимых ТН в синусоидальный сигнал (т. е. измерения тех же характеристик при малых уровнях искажений входного сигнала), которые могут быть обусловлены нелинейностью кривой намагничивания сердечника (петлей гистерезиса) и проявляются в основном при низких частотах.

Анализ существующего метода измерения частотных свойств ТН, используемых для контроля ПКЭ

Принцип формирования испытательного напряжения путем наложения одной гармоники на другую, примененный в рассматриваемом методе, давно используется при испытании электрооборудования значительной мощности на помехоустойчивость [5], поэтому реализация метода не вызывает затруднений, что было также подтверждено и на практике [1]. В то же время, возможность решения задач, на которые ориентирован метод, вызывает сомнения в связи с присущими ему недостатками:

1) при решении первой задачи отсутствует возможность измерения АЧХ и ФЧХ ТН во всем диапазоне испытательного напряжения, вплоть до номинального;

2) рассматриваемый метод подразумевает производство измерений частотных характеристик ТН при испытательном напряжении, содержащем гармонику основной частоты и одну из высших гармоник, фаза между которыми изменяется случайным образом, так как ЗГ никак не синхронизирован с сетевым напряжением;

3) в испытательном напряжении, на котором производятся измерения частотных свойств ТН, могут присутствовать посторонние гармоники, проникшие из сети и генерируемые повышающим трансформатором, что может отразиться на точности результатов измерения.

Если последний недостаток можно частично устранить путем применения фильтров для предотвращения проникновения гармоник из сети и более мощного повышающего трансформатора, то первые два из отмеченных недостатков являются следствием самого метода и не могут быть устранены путем его доработки. Остановимся на них более подробно.

Считается, что при гармонических измерениях основным требованием к ТН является требование к определенности его АЧХ [6]. Рассматриваемый метод подразумевает измерение АЧХ и ФЧХ ТН только при «значимых уровнях искажений измеряемого напряжения», что позволяет решить лишь часть первой задачи. И хотя данная статья и рассматриваемый метод ориентированы на решение проблемы измерения ПКЭ, необходимо помнить, что полные АЧХ и ФЧХ ТН необходимы при определении точности работы устройств релейной защиты и автоматики [2]. Таким образом, невозможность измерения АЧХ и ФЧХ ТН в большом диапазоне испытательного напряжения в значительной мере ограничивает возможности решения первой задачи с помощью рассматриваемого метода.

Если первая задача для частного случая решается с помощью анализируемого метода, то отсутствие возможности варьирования фазы между гармониками промышленной частоты и накладываемой, делает невозможным решение второй задачи. Это связано с тем, что от фазы гармоники в значительной мере зависит форма испытательного напряжения. Для примера, на рис. 3 приведены формы кривой напряжения, содержащей гармонику промышленной частоты и третью гармонику (значение которой составляет 15 % от гармоники промышленной частоты), с фазой третьей гармоники в 0 и 180 град. Как видно из рис. 3, амплитуда испытательного напряжения при изменении фазы третьей гармоники в пределах от 0 до 180 град. изменяется приблизительно в пределах двойной амплитуды третьей гармоники (30 %). Из этого следует, что при фазе третьей гармоники в диапазоне от 0 до 180 град. ТН будет работать в разных областях кривой намагничивания, в связи с чем результаты измерения также могут различаться.

Для более детального исследования частотных характеристик ТН, представляется необходимым проводить дополнительные исследования при испытательном напряжении, содержащем несколько накладываемых гармоник, что позволит выявить влияние этих гармоник друг на друга при трансформации.

Подводя итог всему вышесказанному, необходимо отметить тот факт, что результаты измерения АЧХ ТН, выполненные по рассмотренному методу [1] (во всех исследованных случаях какой-либо зависимости коэффициентов трансформации от частоты при передаче гармоник напряжения обнаружено не было), значительно отличаются не только от расчетных [2], но и косвенно противоречат данным СИГРЭ [6] (см. рис. 4), что только подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований в этой области, основанных на применении более совершенных методов измерения частотных свойств ТН.

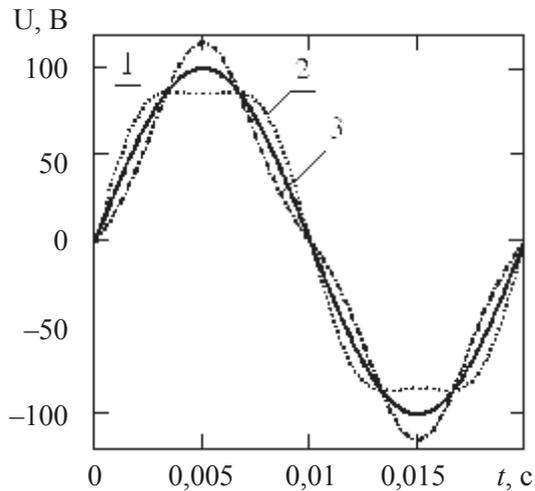


Рис. 3. Форма кривой напряжения при различном значении фазы третьей гармоники: 1 – третья гармоника отсутствует; 2 – фаза третьей гармоники равна 0 град.; 3 – фаза третьей гармоники равна 180 град.

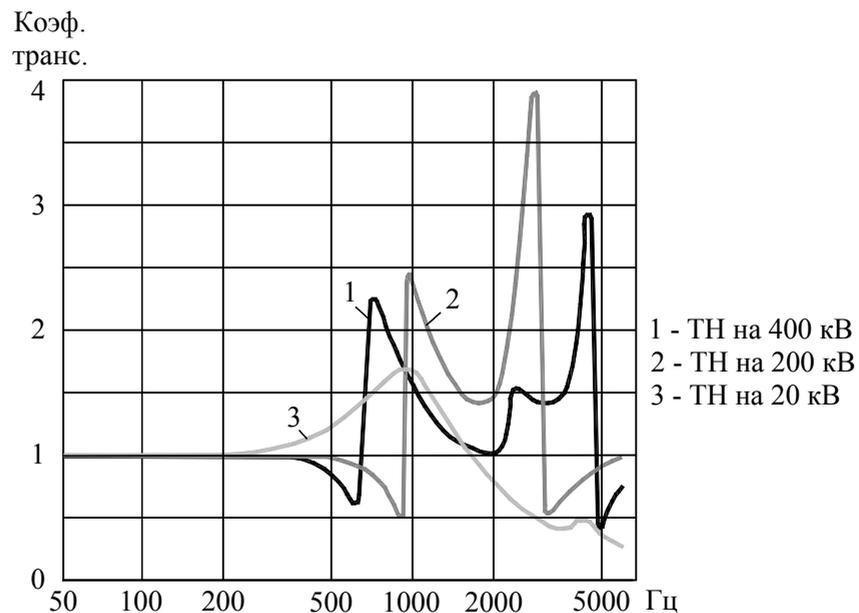


Рис. 4. АЧХ магнитных ТН по данным СИГРЭ

Выводы

1. Рассмотренный метод имеет ряд существенных недостатков, не позволяющих в полной мере выявить влияние ТН на результаты измерения показателей несинусоидальности напряжения.

2. В связи с отсутствием возможности доработки рассмотренного метода измерения частотных свойств ТН, с целью исключения отмеченных недостатков, необходим более совершенный метод измерения частотных свойств ТН.

Список литературы

1. Ярославский В.Н., Боярин Н.А., Алексеев А.А. и др. Метод измерений частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля ПКЭ. В кн.: Метрологическое обеспечение электрических измерений в электроэнергетике. – М.: ВНИ-ИМС, 2000.
2. Булычев А.В., Ванин В.К. Частотные характеристики трансформаторов напряжения для защиты генераторов // Энергетика. – 1988. – № 11. – С. 33-39.

3. Горский А.Н., Русин Ю.С. Анализ искажений, передаваемых во вторичную обмотку трансформатора напряжения несинусоидальной формы //Изв. вузов. Сер. Электромеханика. – 1991. – № 9. – С. 98-99.
4. Расулов Т.М., Быков О.Ю., Везиров О.Ю. Методика расчета погрешности измерительного трансформатора напряжения при несинусоидальном напряжении //Электротехника. – 1982. – № 11. – С. 54-56.
5. ГОСТ 29280-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 42 с.
6. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах /Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 170-173.

Получено 04.03.2004 г.