

внутреннем резонансе в системе «обмотка – изоляция» // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 38–43. 10. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Бучковський І.Р., Сабат М.Б. Распределение свободной составляющей нулевой последовательности внутренних перенапряжений вдоль обмотки соединенной в «треугольник» трансформатора или автотрансформатора распределительной сети при внутреннем резонансе в системе «обмотка – изоляция» // Новини енергетики. – 2010. – № 11. – С. 41–46. 11. Маліновський А.А., Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Никонец О.Л., Гуцин Є.Ю., Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустаткування з обмотками високої напруги за дослідними частотними характеристиками // Новини енергетики. – 2011. – № 5. – С. 34–39. 12. Маліновський А.А., Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Никонец О.Л., Гуцин Є.Ю. Методи моделювання втрат в трансформаторах за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення // Новини енергетики. – 2011. – № 11. – С. 36–43. 13. Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Никонец О.Л. Вплив режиму роботи трансформатора на частотні характеристики обмоток та їх частин // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. – № 707: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 15–21. 14. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Венгер Владимир П., Венгер Виктор П. Характеристики холостого хода трансформатора для частот свободной составляющей внутренних перенапряжений сети // Новини енергетики. – 2012. – № 2. – С. 43–48. 15. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р. Метод експериментального определения сопротивлений рассеивания частей обмотки высокого напряжения трансформатора // Новини енергетики. – 2012. – № 3. – С. 44–48

УДК 621.311

Ю.Л. Саенко, А.С. Попов

Государственное высшее учебное заведение
Приазовский государственный технический университет,
кафедра ЭПП

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ВАРЬИРОВАНИЯ ВЕБЕР-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

© Саенко Ю.Л., Попов А.С., 2012

Рассмотрено влияние погрешности представления вебер-амперной характеристики на результаты исследований феррорезонансных процессов. Оценено влияние варьирования характеристика намагничивания трансформаторов напряжения на диапазон существования феррорезонанса.

Ключові слова: феррорезонансний процес, трансформатор напруги, перенапруга, характеристика намагничивания.

The influence of infelicity of representation saturable characteristic on results of the investigation of ferroresonance processes is considered. The effect of varying of the magnetization characteristic of voltage transformer on the range of existence of ferroresonance is estimated.

Key words: ferroresonance processe, voltage transformer, overvoltage, magnetization characteristic.

Постановка задачи

Феррорезонанс является сложным и достаточно опасным электрическим явлением, которое может возникать в любой сети, содержащей емкость и нелинейную индуктивность. Многолетние исследования этой проблемы показали, что режим феррорезонанса может сопровождаться

значительными перенапряжениями и сверхтоками, причем классические меры борьбы с этими перенапряжениями оказываются неэффективными. В данной работе рассматриваются феррорезонансные процессы (ФРП) в сетях с изолированной нейтралью, где в роли нелинейной индуктивности выступают трансформаторы напряжения контроля изоляции (ТНКИ).

В условиях ограниченности применения экспериментальных подходов при исследовании ФРП на первый план выходит компьютерное моделирование этих процессов. При этом конечный результат определяется достоверностью исходных данных. Несмотря на достаточно высокий уровень развития существующих математических моделей, позволяющих учесть все многообразие факторов, основной проблемой при исследовании ФРП является отсутствие достоверной вебер-амперной характеристики трансформатора напряжения (ТН). С учетом этого, актуальным является разработка точных методов определения этой характеристики ТН, оценка влияния погрешности вебер-амперной характеристики на результаты моделирования, определение диапазона возможного изменения нелинейной индуктивности.

Анализ последних исследований и публикаций

В отечественной литературе достаточно мало подробных сведений о вебер-амперных характеристиках различных ТН. Некоторая информация приведена в [1], однако, отсутствие альтернативных данных не позволяет сравнить их с другими и оценить насколько могут различаться кривые намагничивания однотипных ТН. В вышеуказанном источнике также отсутствует информация о методике определения этих кривых – неясно были они получены экспериментальным или расчетным путем, что не позволяет судить о погрешности приведенных характеристик. Экспериментальное определение кривой намагничивания является более предпочтительным, поскольку при этом можно оценить погрешность измерения полученной кривой, и оценить диапазон ее изменения. Подробный анализ погрешностей при расчетном определении вебер-амперной характеристики выходит за рамки данной статьи, отметим лишь тот факт, что кривые намагничивания однотипной стали, приводимые в различных источниках, могут существенно различаться между собой, а значит соответствующим образом будут отличаться и вебер-амперные характеристики ТН. В качестве примера на рис. 1 показаны характеристики намагничивания электротехнической стали Э3414 из источников [2–4].

Важным практическим результатом, полученном при моделировании ФРП, является определение границы существования феррорезонанса (области параметров сети, при которых возможен устойчивый феррорезонанс) и оценка эффективности мер подавления и предупреждения феррорезонанса. Другими словами, по результатам компьютерного моделирования определяется

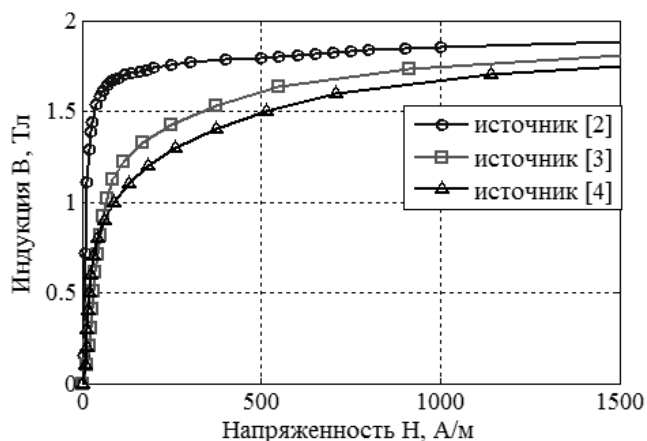


Рис. 1. Кривые намагничивания стали Э3414

диапазон емкостей сети для конкретного типа ТН, при котором устойчивый феррорезонанс является возможным.

В работах [5–6] рассмотрено влияние вида аппроксимирующей функции на точность представления вебер-амперной характеристики и результат расчета тока в нелинейной индуктивности. Полученные выводы позволяют сформулировать основные требования, предъявляемые к аппроксимирующей функции, однако вопрос влияния точности определения и представления вебер-амперной характеристики на область существования феррорезонанса не рассматривается.

В зарубежных источниках, например в [7–8] этот вопрос также рассмотрен не в полной мере. Полученные результаты подтверждают чувствительность феррорезонансных схем к параметрам цепи, однако они не дают конкретных решений для практических задач, и поэтому проблема учета возможного изменения кривой намагничивания при определении области существования феррорезонанса остается окончательно не решенной.

Целью работы является исследование феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью и ТНКИ с учетом возможного разброса кривой намагничивания ТН; оценка влияния погрешности представления вебер-амперной характеристики на изменение области существования феррорезонанса и требований к демпфирующим устройствам; определение реально возможного диапазона изменения кривой намагничивания. Результаты получены на примере сети 6 кВ с ТН типа НТМИ-6.

Результаты исследований.

В отличие от линейных цепей, в нелинейных цепях даже незначительные изменения в исходных данных могут приводить к существенным изменениям в полученных результатах. Особенно это проявляется на границе области существования феррорезонанса. Ниже более подробно рассмотрен один из вариантов возбуждения феррорезонанса в однофазной схеме, возникающий в результате коммутации емкости в цепи. На рис. 2 приведена схема, в которой после коммутации ключа K возбуждался феррорезонанс. На рис. 3 приведена вебер-амперная характеристика НТМИ-6 (кривая 1) и две кривых, отличающихся от заданной на +5 % (кривая 2) и -5 % (кривая 3), которые получены путем соответствующего увеличения и уменьшения потокосцепления при заданном токе намагничивания. Параметры цепи: $e = 6000 \cdot \sin(314 \cdot t)$ В, $C_1 = 0,36$ мкФ, $C_2 = 0,47$ мкФ, $R_{ТН} = 1,2$ кОм. Коммутация происходит в момент времени 1 с. Расчетные кривые тока в цепи для различных кривых намагничивания приведены на рис. 4, при этом рис. 4, а соответствует кривая 1, рис. 4, б соответствует кривая 2, рис. 4 в соответствует кривая 3. Более подробно остановимся на анализе полученных результатов.

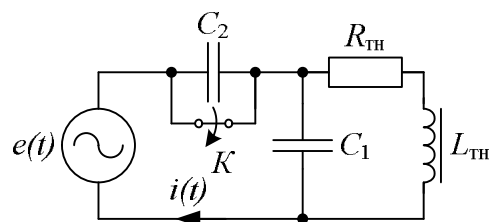


Рис. 2. Однофазная схема феррорезонансного контура

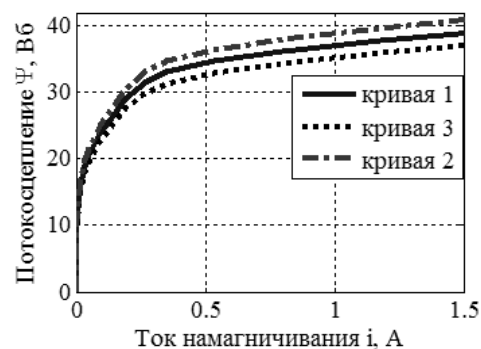


Рис. 3. Вебер-амперные характеристики ТН типа НТМИ-6

Процесс коммутации схемы для случая кривой 1 (рис. 4, а) сопровождался броском тока в цепи до 0,35 А и дальнейшим затухающим переходным процессом, на всем протяжении которого присутствуют составляющие с частотами 10, 30, 50, 70, 90 Гц, причем наиболее весомыми являются составляющие 10 и 50 Гц, амплитуды которых одинаковы.

Коммутация схемы для случая кривой 2 (рис. 4, б) возбуждала устойчивый феррорезонанс, который спустя 0,3 с. после возмущения переходил в периодические колебания. Гармонический анализ установившегося процесса показал наличие составляющих 25, 50, 75, 100, 125, 150 Гц, среди которых наиболее выражены составляющие 25, 50 и 100 Гц. Доля этих высших гармонических составляющих по отношению к основной частоте соответственно равна 134 и 68 %. Визуальный анализ кривой тока показывает его несимметрию относительно оси абсцисс, в результате чего амплитудное значение на положительной и отрицательной полуволне различны и равны 1,14 А и 1,93 А соответственно, что является следствием существования в спектре тока четных гармоник. Среднеквадратическое значение тока, рассчитанное за период 1 с от начала коммутации, в данном случае составило 0,66 А.

Процесс коммутации схемы для случая кривой 3 (рис. 4, в) возбуждал квазипериодический феррорезонанс. Максимальные значения амплитуд токов на положительной и отрицательной полуволне близки между собой и равны 1,6 А. В спектре тока присутствуют составляющие 10, 30, 50, 70, 90, 110 Гц, из которых наиболее выражена и соизмерима с промышленной составляющей является частота 10 Гц. Среднеквадратическое значение тока, рассчитанное за период 1 с. от начала коммутации, в данном случае составило 0,42 А.

Как видно из результатов, токи имеют существенные различия между собой, причем эта разница существенно больше 5 % (разница в исходных данных). Различие проявляется как в

величине тока в цепи, так и в характере протекающих процессов. Это еще раз подтверждает сложность и неоднозначность зависимости полученных результатов (области существования феррорезонанса) от погрешности представления кривой намагничивания. Также важно отметить следующий факт. Небольшое различие в параметрах цепи приводит к соответствующим различиям в начальных условиях, в результате чего, несмотря на то, что процесс коммутации во всех случаях был в один и тот же момент времени, начальные условия были разными. Этот факт в свою очередь в еще большей мере подчеркивает и без того существующую разницу в параметрах схемы и приводит к абсолютно новой задаче с новым решением.

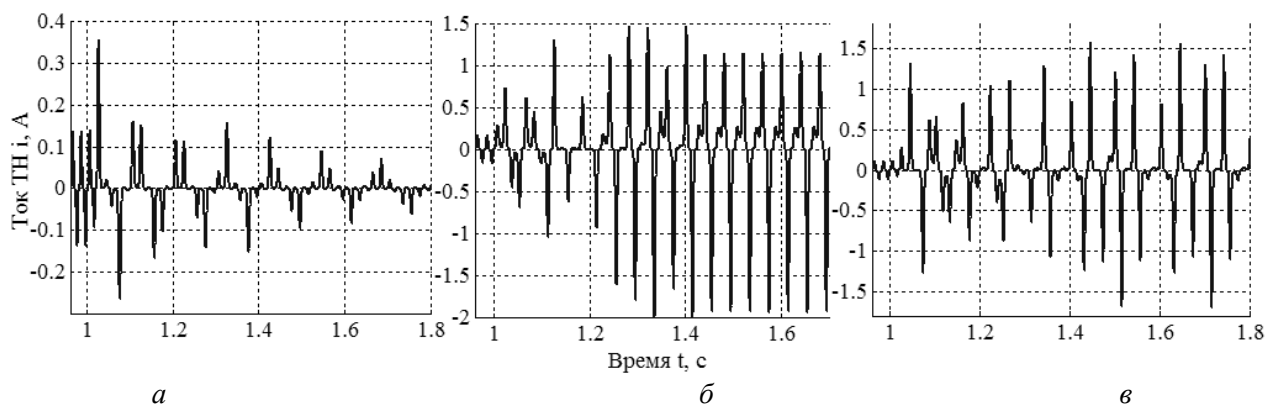


Рис. 4. Расчетные кривые токов при феррорезонансе с учетом варьирования кривой намагничивания с расчетом по характеристике 1 (а), характеристике 2 (б) и характеристике 3 (в)

Кривая 1 на рис. 3 представляет собой экспериментально определенную вебер-амперную характеристику. Эксперимент заключался в разряде конденсатора на ненагруженный ТН. При этом осциллографировался ток в обмотке, к которой подключался конденсатор и потокоцепление, как величина, пропорциональная напряжению на емкости интегрирующей RC цепочки, подключенной к дополнительной измерительной обмотке. При правильном подборе емкости и напряжения ее заряда можно получить достаточно глубокое насыщение стали. Этот метод является достаточно точным, в сравнении с другими экспериментальными. Основной проблемой определения вебер-амперной характеристики при намагничивании ТН управляемым источником напряжения, является искажение формы питающего напряжения при глубоком насыщении сердечника и ограниченная мощность этого источника. Поэтому не представляется возможным получить корректные данные в области насыщения трансформатора (при токах $150\text{--}200 i_{\text{ном}}$). В тоже время, именно эта часть кривой является наиболее важной при исследовании ФРП, поскольку феррорезонанс сопровождается значительным насыщением стали.

На первом этапе исследований была определена область существования феррорезонанса с параметрами экспериментально определенной кривой (рис. 3 кривая 1). Упрощенная схема замещения сети представлена на рис. 5. Схема замещения ТН, используемая при моделировании, изображена на рис. 6.

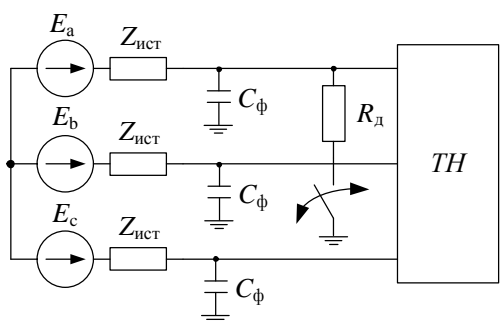


Рис. 5. Упрощенная схема замещения сети с изолированной нейтралью

Определение области существования феррорезонанса осуществлялось изменением параметров сети (фазной емкости). Моделировался режим отключения устойчивого однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), одно- или двукратное зажигание и погасание дуги с последующим устранением замыкания. Известно, что в такой ситуации ФРП, как правило, носит субгармонический характер [1, 9]. В случае если процесс не затухал в течение двух секунд, считалось, что феррорезонанс устойчивый.

Результаты показали, что на один комплект НТМИ-6 верхняя граница существования феррорезонанса при заданной кривой соответствует емкости сети 0,63 мкФ. Определение нижней границы феррорезонанса с использованием вышеуказанного подхода (устранение ОЗЗ) является некорректным. При емкостях $C_{\phi}=0,1$ мкФ и ниже устранение ОЗЗ не возбуждает субгармонический феррорезонанс, в то же время известно, что таких малых емкостях возможно появление феррорезонанса на высших гармонических составляющих [1, 9, 10]. Такие процессы возникают при включении холостых шин с ТН, подключении или отключении участка сети с малой суммарной емкостью, подключение ТН к холостым шинам и др.

Такой феррорезонанс может сопровождаться гораздо большими перенапряжениями, чем ФРП при ОЗЗ, однако, возникновение сверхтоков и повреждение ТН в этом случае, как правило, не наблюдается, что объясняется отсутствием составляющих пониженной частоты в спектре напряжения нулевой последовательности. В результате, границей существования феррорезонанса следует считать диапазон от минимально возможной емкости сети (емкости ненагруженных шин) до максимальной по условию существования субгармонического ФРП (0,63 мкФ). По сути, основное практическое значение имеет определение верхней границы области существования феррорезонанса, поэтому в дальнейшем определяется эта емкость.

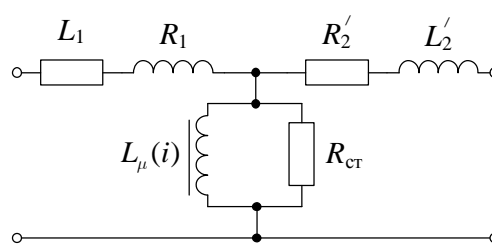


Рис. 6. Схема замещения ТН

Влияние параметров кривой намагничивания на область существования ФРП

На рис. 7 приведено семейство вебер-амперных характеристик, отличающихся от базовой (рис. 3 кривая 1) на $\pm 30\%$. Кривые получены путем соответствующего увеличения и уменьшения

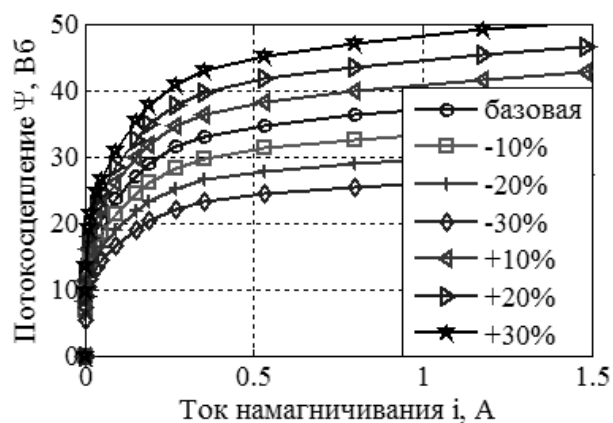


Рис. 7. Вебер-амперные характеристики ТН с учетом варьирования в диапазоне $\pm 30\%$ от базовой

потокосцепления при заданном токе намагничивания (по аналогии с рис. 3). На рис. 8 представлены области существования феррорезонанса для различных кривых намагничивания. Из результатов следует, что изменения кривых намагничивания приводят к соответственным изменениям области существования феррорезонанса, причем, чем ниже идет вебер-амперная характеристика, тем большая емкость соответствует верхней границе феррорезонанса.

Не менее важным и дискуссионным вопросом является корректное определение и учет индуктивности рассеивания ТН. Вебер-амперные характеристики, приведенные на рис. 7, представлены без учета индуктивности рассеивания. В области насыщения характеристика намагничивания трансформатора имеет наклон и не

параллельна оси абсцисс, а соответствующая этому диапазону динамическая индуктивность насыщения равна 3,8 Гн. Точное определение индуктивности рассеивания обмотки представляет собой достаточно сложную задачу. Приблизительно эту индуктивность можно оценить по результатам опыта КЗ трансформатора из условия равенства приведенных сопротивлений первичной и вторичной обмоток. Для обмотки высокого напряжения НТМИ-6 она оказалась равной 4,6 Гн. Несколько более точно индуктивность рассеивания можно оценить при экспериментах без сердечника, т.е. определить индуктивность исключительно обмотки. Нами было проведено это исследование и на основании метода вольтметра-амперметра измерено полное сопротивление обмотки, далее индуктивное сопротивление и индуктивность рассеивания. опыты проводились на промышленной частоте. В результате индуктивность рассеивания оказалась равной 4,3 Гн. Это значение было принято за базовое и все предыдущие результаты получены с его учетом. Известно, что в общем случае индуктивность рассеивания обмотки зависит от частоты, однако, с учетом того,

что процессы феррорезонанса сопровождаются относительно низкими частотами (до кГц), индуктивность рассеивания без существенной погрешности может быть принята постоянной.

//////	$C_{\phi}=0,47$ мкФ	(1,53 A)	+30%
//////	$C_{\phi}=0,51$ мкФ	(1,66 A)	+20%
//////	$C_{\phi}=0,57$ мкФ	(1,86 A)	+10%
//////	$C_{\phi}=0,63$ мкФ	(2,05 A)	Базовая кривая
//////	$C_{\phi}=0,7$ мкФ	(2,28 A)	-10%
//////	$C_{\phi}=0,78$ мкФ	(2,54 A)	-20%
//////	$C_{\phi}=0,83$ мкФ	(2,71 A)	-30%

Рис. 8. Область существования феррорезонанса с учетом варьирования вебер-амперной характеристики

Как было отмечено выше, процессы феррорезонанса сопровождаются значительным насыщением стали, а значит, на область существования феррорезонанса влияние оказывает результирующая индуктивность насыщения ТН, т.е. динамическая индуктивность насыщения сердечника и индуктивность рассеивания обмотки, которая равна $4,3+3,8=8,1$ Гн. Поэтому целесообразно оценить влияние этих параметров на область существования феррорезонанса. Расчеты производились в широком диапазоне изменения результирующей индуктивности насыщения ТН. Результаты, приведенные на рис. 9, показывают, уменьшение индуктивности ТН в области насыщения ведет к увеличению верхней границы области существования феррорезонанса, и наоборот.

//////	$C_{\phi}=0,51$ мкФ	(1,66 A)	$L_{\text{нас.тн}}=12,3$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,55$ мкФ	(1,79 A)	$L_{\text{нас.тн}}=10,9$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,6$ мкФ	(1,95 A)	$L_{\text{нас.тн}}=9,5$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,63$ мкФ	(2,05 A)	$L_{\text{нас.тн}}=8,1$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,71$ мкФ	(2,31 A)	$L_{\text{нас.тн}}=6,7$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,75$ мкФ	(2,44 A)	$L_{\text{нас.тн}}=5,3$ Гн
//////	$C_{\phi}=0,81$ мкФ	(2,64 A)	$L_{\text{нас.тн}}=3,8$ Гн

Рис. 9. Область существования феррорезонанса с базовой кривой намагничивания при варьировании результирующей индуктивности насыщения ТН

Было проанализировано влияние значения динамической индуктивности ТН в области «колена» кривой намагничивания (скорости изменения характеристики в области «колена») на область существования феррорезонанса. Исходные вебер-амперные характеристики изображены на рис. 10 и отличаются между собой лишь в области перегиба характеристики. Значительного влияния на область существования феррорезонанса в этом случае не выявлено. Отметим, что для кривой 2 характерно некоторое уменьшение верхней границы феррорезонанса, порядка 3 %, по сравнению с кривой 1, а для кривой 3 – незначительное расширение границы феррорезонанса, порядка 4 %.

Примечательным является тот факт, что параметры кривой намагничивания влияют не только на область существования феррорезонанса, но и определяют требования к демпфирующим устройствам. Наиболее известной и то же время дискуссионной мерой подавления феррорезонанса является подключение резистора 25 Ом в обмотку разомкнутого треугольника [9]. Известно, что любой феррорезонансный контур достаточно чувствителен к активным потерям, и при некоторой их величине устойчивые колебания становятся невозможными. Энергия, запасенная в нелинейной индуктивности при заданном потокосцеплении, определяется известным выражением:

$$W_L = \int_0^{\Psi} i \cdot d\Psi.$$

Энергия равна площади между осью ординат и кривой намагничивания, поэтому, чем ниже пойдет кривая намагничивания, тем большая энергия будет запасена в нелинейной индуктивности и тем большие активные потери необходимо ввести в контур для срыва устойчивых колебаний. Т.е. для срыва ФРП потребуется уменьшить величину резистора в обмотке разомкнутого треугольника. Результаты моделирования показали, что для базовой кривой намагничивания резистора 25 Ом достаточно для срыва феррорезонансных колебаний на всем диапазоне существования феррорезонанса. Для кривых, расположенных ниже номинал резистора следует уменьшить до величины 10–15 Ом для эффективного подавления феррорезонанса. С учетом возможного варьирования в сторону уменьшения результирующей индуктивности насыщения ТН, номинал демпфирующего резистора придется выбирать еще меньше. По известным причинам длительное подключение таких низкоомных резисторов не применяется.

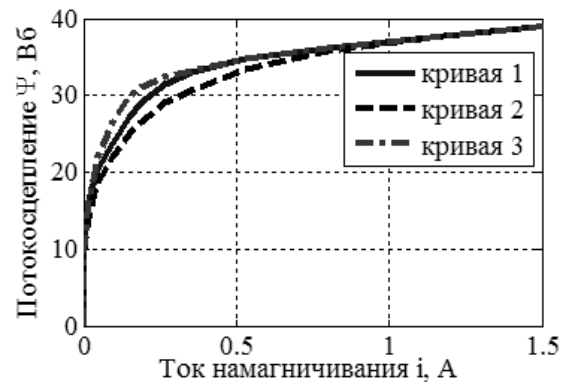


Рис. 10. Вебер-амперные характеристики с учетом варьирования динамической индуктивности в области «колена» кривой

Определение диапазона возможного изменения вебер-амперной характеристики

В первую очередь введем понятия стали с улучшенными и ухудшенными магнитными характеристиками. Вебер-амперные характеристики сердечника с улучшенными магнитными характеристиками располагаются выше, чем стали с ухудшенными магнитными характеристиками (см. рис. 7). Среди факторов, оказывающих влияние на принадлежность ТН к тому или иному типу, можно выделить следующие:

- различие в характеристиках намагничивания стали, обусловленное технологией изготовления. Характеристики однотипной стали, изготавливаемой на разных заводах или произведенных в различные годы, могут отличаться между собой, что в первую очередь обусловлено технологией выплавки и прокатки стали, количеством примесей и др. Эти различия, как правило, не превышают 5–10 %, в противном случае для изготовления ТН следовало бы вносить изменения в параметры магнитной системы;
- различие в вебер-амперных характеристиках сердечника, обусловленное некачественной заводской сборкой сердечника (речь идет о величине воздушных зазоров в углах и стыках магнитопровода) или обмотки (несоответствие требуемого числа витков с исходным). ТН с такой характеристикой будет иметь завышенный ток холостого хода. Подобные дефекты можно обнаружить и принять меры по их устранению во время приемосдаточных работ;
- магнитное старение стали [2]. Старение стали в процессе эксплуатации проявляется в увеличении активных потерь в сердечнике и в увеличении напряженности поля при одной и той же индукции, т.е. характеристика намагничивания магнитно постаревшей стали идет ниже исходной. Результирующие изменения от этого явления находятся в диапазоне 10–15% в сторону снижения кривой;
- изменения в вебер-амперной характеристике, обусловленные ремонтами ТН [11];
- межвитковые замыкания обмотки ВН в процессе эксплуатации.

Далее несколько более подробно остановимся на изменении вебер-амперных характеристик ТН, вызванных ремонтами ТН. По материалам [11] на рис. 11 изображены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для действующих значений ТН типа НТМИ-10 в зависимости от количества предшествующих ремонтов. На рисунке кривая 1 соответствует ТН без ремонтов, кривая 2 – ТН, прошедшему один ремонт, кривая 3 – ТН, прошедшему два ремонта, кривая 4 – ТН, прошедшему три ремонта, кривая 5 – ТН, прошедшему четыре ремонта. Из кривых следует, что ВАХ ТН идет тем ниже, чем большее число ремонтов он прошел. Соответствующим образом будут отличаться и вебер-амперные характеристики. Отметим, что для более корректного сравнения вебер-амперных

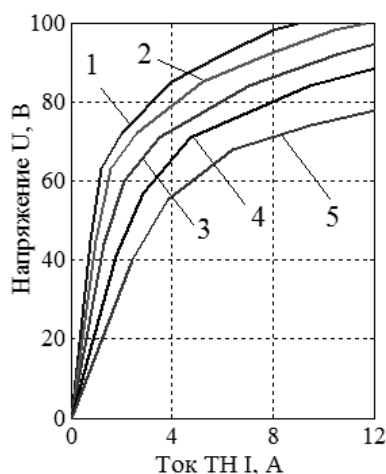


Рис. 11. ВАХ ТН по материалам [11] до и после прошедших ремонтов

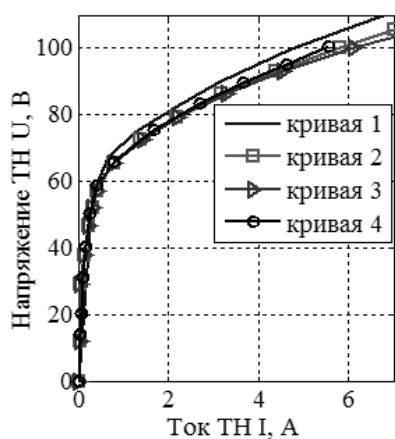


Рис. 12. ВАХ ТН до и после симулированных ремонтов

характеристик по ВАХ последние следует приводить для амплитудных значений, поскольку в них не учитывается активная составляющая тока х.х.

По результатам полученных ВАХ автор [11] делает вывод о том, что в результате проведения ремонтов ТН имеет место явление дрейфа магнитных характеристик намагничивания стали. На наш взгляд, существуют и другие причины изменения ВАХ. В лабораторных условиях нами была проведена имитация ремонта ТН. Трансформатор полностью разбирался и собирался. При этом измерялась вольт-амперная характеристика (ВАХ), а также вебер-амперная до и после ремонта. Всего было симулировано три ремонта. На рис. 12 представлены ВАХ для действующих значений до ремонта ТН (кривая 1), после первого ремонта (кривая 2), после второго ремонта (кривая 3), после третьего ремонта (кривая 4). Из результатов следует, что после первого ремонта кривая снизилась примерно на 5 %, что было обусловлено менее качественной сборкой сердечника, по сравнению с заводской. Дальнейшие ремонты не сказались на ВАХ и даже наоборот, кривая после третьего ремонта оказалась несколько выше, чем после первого ремонта. Это объясняется повышением качества сборки сердечника по мере накопления опыта. Измерение вебер-амперной характеристики также показало различие в кривых не более 5-7 % в сравнении с трансформатором до ремонта. Также необходимо отметить некоторое увеличение активной составляющей тока х.х. трансформатора после ремонтов, обусловленное механическими дефектами изоляции между пластинами и ростом токов Фуко.

По нашему мнению, снижение ВАХ в работе [11] обусловлено не только изменением магнитных свойств стали, но и прежде всего некачественной сборкой, а именно уменьшением количества железа от ремонта к ремонту. Другими словами после каждого ремонта неиспользованной оставалась некоторая часть пластин, суммарное число которых по мере прохождения

ремонтов росло. Это подтверждается визуальным сравнением ВАХ на рис. 11, из которых следует, что с ростом количества ремонтов имеет место снижение напряжение перегиба ВАХ, т.е. насыщение трансформатора происходит при меньшем напряжении. Это может быть обусловлено увеличением рабочей индукции ТН, что эквивалентно уменьшению сечения сердечника.

В наших экспериментах было исследовано 6 ТН различных лет выпуска, причем один из них не эксплуатировался и представлял собой лабораторный экспонат. В результате экспериментов было получено 18 вебер-амперных характеристик, различие между которыми не превосходило 10 %. Базовая вебер-амперная характеристика является усредненным результатом экспериментов.

Вероятность повреждения ТН с заниженной вебер-амперной характеристикой значительно выше, чем трансформаторов с нормальной или улучшенной характеристиками. Такой ТН может недопустимо насыщаться уже при линейном напряжении и выходить и строя в течение нескольких десятков минут устойчивого ОЗЗ. Характерным является опыт эксплуатации отремонтированных ТН [11], а именно прямо пропорциональная зависимость повреждаемости таких ТН от количества предшествующих ремонтов. Данная зависимость представлена в таблице [12].

Прямым следствием качества стали являются метрологические характеристики ТН. Очевидно, что чем ниже пойдет вебер-амперная характеристика трансформатора, тем выше будет ток холостого хода ТН, больше падение напряжения от этого тока на сопротивлении первичной

обмотки и хуже метрологические характеристики. В работе [13] приводятся результаты экспериментального исследования погрешностей новых ТН (которые не эксплуатировались), в зависимости от величины первичного напряжения. Данная зависимость приведена на рис. 13 кривая 1 и в диапазоне напряжения до $1,8 U_{ном}$ она представляет линейную зависимость, т.е. значительного насыщения и роста тока намагничивания с повышением напряжения не происходит. Соответственно можно констатировать, что испытуемый ТН обладает улучшенными магнитными характеристиками. В то же время следует отметить, что полученная зависимость не является абсолютным показателем качества стали, поскольку погрешность также зависит и от величины сопротивления обмотки.

Зависимость повреждаемости измерительных ТН от количества предшествующих повреждение и восстановительных ремонтов

Количество ремонтов	Не было	1 ремонт	2 ремонта	3 ремонта	4 ремонта	5 ремонтов
Поток отказов, 1/год	0,0483	0,2381	0,5263	0,7143	2,7907	4,4444

На основе базовой вебер-амперной характеристики и улучшенных характеристик стали в ходе моделирования были определены зависимости амплитудной погрешности ненагруженного ТН от напряжения. В расчетах учитывалось, что реальный коэффициент трансформации меньше паспортного, что достигается витковой коррекцией обмотки высокого напряжения. Истинный коэффициент трансформации равен 59,64, поэтому при малых токах намагничивания погрешность ТН положительна. Результаты, представленные кривыми 2–4 на рис. 13, показывает, что метрологические характеристики ТН с улучшенной сталью в диапазоне до $1,3 U_{ном}$ приближаются к результатам экспериментальных исследований. С учетом этого можно констатировать, что изменения вебер-амперной характеристики, по отношению к базовой, может быть как в сторону увеличения, так и уменьшения.

В проведенных исследованиях при моделировании была использована безгистерезисная модель ТН, что естественно внесло некоторую погрешность в результаты. В настоящее время разработан ряд математических моделей магнитных сердечников с учетом явления гистерезиса, например [14, 15], которые позволяют более точно представить нелинейную динамическую индуктивность ТН и потери в стали. Субгармонические ФРП характеризуются относительно глубоким насыщением стали, в котором восходящая и нисходящая петли гистерезиса практически совпадают с основной кривой намагничивания. Поэтому существенной погрешности, обусловленной неучетом гистерезиса, не будет. Пренебрежение дополнительными потерями в стали от гистерезиса приведет к незначительному расширению области существования феррорезонанса, т.е. к некоторой перестраховке, что является допустимым.

Результаты моделирования получены с учетом возможной несимметрии емкостей по фазам, отклонения напряжения источника питания от номинального значения, несимметрии кривых намагничивания. Наибольшее влияние оказывает величина напряжения питания. Его увеличение и уменьшение ведет к соответствующим изменениям в области существования феррорезонанса в пределах 10 %. При воспроизведении вебер-амперной характеристики использована кусочно-линейная аппроксимация 18-ю отрезками.

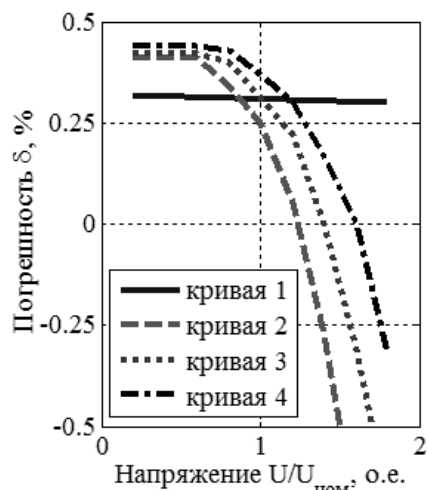


Рис. 13. Погрешности ТН при различных вебер-амперных характеристиках

Выводы

1. Феррорезонансные схемы являются достаточно чувствительными к исходным данным. Расчеты показали, что при базовой вебер-амперной характеристике верхняя граница существования феррорезонанса эквивалентна емкости 0,63 мкФ. Снижение характеристики на 30 % расширяет область феррорезонанса до 0,83 мкФ, в то время как поднятие характеристики намагничивания на 30 % сужает область феррорезонанса до 0,47 мкФ. В результате имеем примерно линейную зависимость между погрешностью исходных данных и полученными результатами, что обусловлено линейностью ТН в области насыщения. Другими словами погрешность в 10 % в исходных данных приводит к соответствующей погрешности 10 % в полученных результатах. Однако это касается прежде всего субгармонических ФРП, сопровождающихся значительным насыщением ТН.

2. Реально возможный диапазон изменения вебер-амперной характеристики метрологически исправного ТН колеблется в пределах 15–20 %, по отношению к базовой кривой. Диапазон возможного изменения результирующей индуктивности насыщения ТН колеблется в диапазоне 20–30 % по отношению к базовому значению (8,1 Гн) и обусловлен прежде всего возможным различием в динамической индуктивности насыщения трансформатора.

3. Более точную информацию о возможном диапазоне изменения вебер-амперной характеристики можно получить путем обследования большего количества однотипных ТН. Также внимание следует уделить разработке более точных методов определения вебер-амперных характеристик.

1. Заболотников А.П. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ / А.П. Заболотников, К.П. Кадомская, А.А. Тихонов. – Новосибирск, 1993. – 158 с. 2. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин. М.: Энергия, 1974. – 237 с. 3. Преображенский А.А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский. – М.: Высш. шк., 1972. – 288 с. 4. Молотилев Б.В. Холоднокатанные электротехнические стали / Б.В. Молотилев, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с. 5. Журахівський А.В. Оцінка використання апроксимуючих функцій для дослідження феррорезонансних процесів в електричних мережах / А.В. Журахівський, Ю.А. Кенс, Р.В. Медінський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 1. – 2000. – С. 29–34. 6. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Медінський Р.В. Вплив апроксимації вебер-амперної характеристики на результати розрахунку струму в нелінійній індуктивності // Технічна електродинаміка. – 2000. – № 6. – С. 64–69. 7. Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum. Sensitivity of ferroresonance simulations to model parameters and initial conditions // 20-th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). – 2010. – P. 1–6. 8. Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum, Hamid A. Toliyat. Impacts of Hysteresis and Magnetic Couplings on the Stability Domain of Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Three-Leg Transformers // IEEE Transactions on energy conversion. – 2011. – Vol. 26. – No 2. – P. 581–592. 9. Виштинбеєв А.В., К.П. Кадомская, Хныков В.А. Повышение надежности электрических сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ // Электрические станции. – 2002. – №3. – С. 47–51. 10. D. A. N. Jacobson. Examples of ferroresonance in a high voltage power system // In Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2003. – Vol. 2. – P. 1206–1212. 11. Ганус О.І. Підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.14.02 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2008. – 20 с. 12. Ганус А.И. Говоров Ф.П., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ на характер поврежденных трансформаторов напряжения // Электрика. – 2006. – № 5. – С. 28–31. 13. Раскулов Р.Ф. Трансформаторы напряжения 3–35 кВ. Метрологические функции первичны // Новости электротехники. – 2006. – № 6(42). 14. Afshin Rezaei-Zare, Reza Iravani, Majid Sanaye-Pasand, Hossein Mohseni, Shahrokh Farhangi. An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer // IEEE transactions on power delivery. – 2008. – Vol. 23. – No 3. – P. 1448–1456. 15. Andreas D. Theocharis, John Miliadis-Argitis, Thomas Zacharias. Three-phase transformer model including magnetic hysteresis and eddy currents effects // IEEE transactions on power delivery. – 2009. – Vol. 24. – No 3. – P. 1284–1294.