Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com

О ТЕОРИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Н.В.КИНШТ, Н.Н.ПЕТРУНЬКО, Д.В.ЧУБЧИК
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г.Владивосток)

For an estimation of a technical condition of the transformer it is energetically favorable to focus energy at diagnostics in a narrow spectral range, for example, SFRA method. It is enough to estimate parameters of an equivalent circuit with the concentrated parameters. The analysis of a problem about circuits of connection of windings of the transformer at diagnostics is carried out.

Спектральные методы диагностики исстари применяются для оценки целостности и качества изготовления различных изделий и механических конструкций. Достаточно вспомнить легкое постукивание гончарных изделий как элементарный способ их проверки на отсутствие трещин, или же представить железнодорожника с длинным молотком, проверяющего реборды вагонных колес. "Чистота" и тон звука надежно свидетельствовали об отсутствии или наличии дефектов, а также, в ряде случаев, – о качестве изготовления товара. Другим традиционным спектральным способом оценки качества функционирования механического устройства является анализ шумов, издаваемых им при естественном функционировании. В этой связи спектральные методы можно условно разделить на пассивные и активные по методу воздействия на диагностируемый объект.

Известен пассивный спектральный метод диагностики трансформаторов как механической системы - регистрация и интерпретация собственных акустических шумов трансформатора. Особенностью его является возбуждение колебаний в его конструкциях (и, специально отметим, в дефектах) с частотой сети и, следовательно, ее гармониками. Все колебания, не совпадающие с частотами гармоник, автоматически подавляются, или, во всяком случае, не поддерживаются. Плюсы этой идеи состоят в том, что, во-первых, в дефекты накачивается энергия в течение всего времени наблюдения; во-вторых, исследуется техническое состояние трансформатора под нагрузкой. Однако каждый (механический) дефект имеет свои резонансные частоты, и маловероятно, что они совпадают с гармониками промышленной частоты, даже если учитывать естественный технологический дрейф промышленной частоты, составляющий доли процента. Спектр резонансных частот дефектов может простираться до сотен кГц, однако, реально этим методом можно пытаться регистрировать дефекты с собственными частотами менее 1 кГц.

Активные спектральные методы заключаются в импульсном возбуждении свободных колебаний в конструкции трансформатора и выявлении дефектов через их резонансные свойства. Здесь имеется в виду, в первую очередь, диагностика обмотки трансформатора и его магнитопровода. Этот импульс может подаваться в виде электрического импульса (метод НВИ) или механического удара. Во втором случае в качестве отклика могут использоваться как акустические методы, так и регистрироваться наводимые за счет остаточной намагниченности магнитопровода в обмотках импульсные э.д.с. Поскольку остаточная намагниченность магнитопровода имеет случайный характер, результаты диагностирования могут иметь значительный разброс. Метод анализа таких колебаний хорош тем, что каждый механический дефект, получая импульс энергии, возбуждает колебания на своей собственной частоте, что позволяет эффективно классифицировать дефекты.

Метод низковольтных импульсов (НВИ) заключается в том, что на одну из обмоток расшинованного трансформатора подается короткий прямоугольный зондирующий импульс низкого напряжения величиной около 100-600 В, длительностью около 1 мкс и одновременно наблюдается ток на измерительных шунтах, подключенных к другим обмоткам. Таким образом, исследуется переходный процесс, возникающий в обмотках как реакция на воздействие прямоугольного импульса. Предварительно производится паспортизация реакции исправного (или нового) трансформатора на НВИ. Такие измерения проводятся регулярно во время эксплуатации трансформатора и, во всяком случае, после случая КЗ. Сравнение по определенной методике осциллограмм, записанных до КЗ (нормограмм) и после КЗ (дефектограмм) позволяет оценить состояние трансформатора. Изменения в осциллограммах свидетельствуют о появлении электрических или механических повреждений. Обработка этих осциллограмм с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) дает возможность оценивать изменение спектральных характеристик сигнала и откликов.

Произведем ориентировочную энергетическую оценку такого метода. Для расчета примем, что напряжение, поданное на вход трансформатора как диагностируемого объекта, равно U = 500 В. Предположим далее, что пиковый ток, вызванный поданным напряжением, равен I = 500 А (эта оценка заведомо завышена, однако примем ее, как оценку номинального тока трансформатора). Так как время действия импульса задано - $t = 10^{-6}$ с, то полную энергию его можно оценить как:

$$Э = U\,I\,t = 500 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 0.25 \text{ Дж.}$$

(Заметим, что энергия, рассеиваемая лампой карманного фонарика при напряжении 3 В и токе 0.33 А за 1 с, равна 1 Дж. Вместе с тем для сравнения отметим, что только мощность потерь холостого хода силового

трансформатора может достигать величин порядка 100 кВт.). Продолжая энергетический анализ метода НВИ, обратим внимание на то, что у короткого импульса широкий и, грубо говоря, достаточно равномерный спектральный состав, т.е. эта расчетная энергия почти равномерно распределена в интервале частот от 0 до 1 Мгц. Очевидно, что удельная энергия на единицу частотного диапазона при этом оказывается весьма малой.

Недостатки импульсных методов очевидны.

- Это, во-первых, кратковременность воздействия, т.е. сравнительно малая энергия, направленная на возбуждение процессов в дефектах, а учитывая широкий спектр воздействия, то и малая удельная энергия (на единицу частотного диапазона).
- Далее, необходимость при обработке откликов обрабатывать отклик как функцию времени, т.е. осциллограммы переходных процессов. Здесь приходится рассматривать такие отклики, как правило, как некий обобщенный образ.
- Кроме того, подаваемый импульс существенным образом демпфируется (срезаются высокие частоты). На механическую конструкцию непосредственным образом воздействует не высококачественный, имеющий крутые фронты, электрический импульс подаваемого НВИ, а некий, неконтролируемый более "мягкий" импульс тока в обмотке, что существенно затрудняет формально-математическую обработку результатов. Спектр этого "мягкого" импульса тока существенно у́же спектра исходного импульса напряжения, теоретически он определяется электрическими параметрами системы обмоток трансформатора, и диагностическое силовое воздействие его на дефектные элементы или фрагменты конструкции снижается. При механическом же воздействии демпфирующее влияние оказывает масло и, конечно, место введения этого механического импульса.

Следует еще специально остановиться на энергии, требуемой для диагностирования. Механические дефекты образуются и развиваются, как правило, при (многократных) ударных воздействиях. Существенным фактором является также то, что проявляться эти дефекты могут также преимущественно при "накачке" в них достаточной энергии, поскольку необходимо преодолевать трение покоя. Кроме того, во всех упомянутых методах следует считаться с тем, что энергетические воздействия на дефекты существенно демпфируются, в частности, неоднородностью изоляции и наличием трансформаторного масла.

Отсюда следует, что при диагностировании механических дефектов желательно ввести в диагностируемую конструкцию повышенную дозу энергии и на этой основе получать ясный и достоверный отклик. (Сам по себе этот факт тривиален. Использование вибростендов для оценки

технического состояния, выявления и прогнозирования механических дефектов общеизвестно. Очевидно, что, массогабаритные показатели силовых трансформаторов, не позволяют применять вибростенды для их диагностики).

Таким образом, имея в виду диагностику силовых трансформаторов, как стационарных объектов, и организацию их диагностики с помощью переносного диагностического оборудования, следует стремиться выявлять дефекты при повышенных энергетических потоках, связанных с проявлением этих дефектов. Энергетически выгодно сосредотачивать энергию при диагностике в узком спектральном диапазоне, ориентируясь на резонансные отклики потенциальных дефектов.

В последнее время внимание специалистов привлекает способ диагностики обмоток и магнитопроводов трансформаторов, основанный на анализе частотных характеристик обмоток (SFRA - sweep frequency response analysis) при специальных схемах включения. С энергетической точки зрения этот метод обладает несомненными достоинствами. Экспериментатор, имея генератор сигналов, частота которых произвольно может изменяться в широком диапазоне, имеет возможность не только получать общий вид характеристики, но и избирательно производить «накачку» энергии в предполагаемые дефекты, используя наиболее информативные частоты (диапазоны частот) и диагностические признаки, получая, в конечном итоге, наиболее точную и конкретную диагностическую информацию.

Собственно идея этого метода базируется на интуитивно верном научном фундаменте, поскольку аварийные деформации обмоток трансформаторов изменяют их электрические параметры – индуктивности и емкости. Каждый из витков обмотки имеет свою собственную индуктивность и емкость, а также взаимные индуктивности с другими витками и обмотками трансформатора. Различные схемы включения трансформатора представляют собой сочетания экспериментов холостого хода и короткого замыкания при вариации частоты входного напряжения. Однако в целом подробный анализ частотных характеристик трансформатора представляет собой сложную вычислительную задачу даже для исправного трансформатора. Деформации отдельных витков обмотки вносят в схемную модель обмотки дополнительные сложности. Поэтому практическое применение метода SFRA, как правило, связано с накоплением значительной статистики дефектов трансформатора и интерпретацией этого массива данных на основе какого-либо алгоритма распознавания образов. Такие базы данных являются собственностью фирм, которые их создали, и не могут служить материалом для свободного анализа специалистами. Свойства измеряемых характеристик затруднительно непосредственно ассоциировать с конкретными дефектами

В этой связи необходима разработка удобных теоретических моделей диагностики обмоток трансформатора. Эти модели должны быть основой для выделения наиболее существенных диагностических признаков и универсальных алгоритмов обработки результатов SFRA – экспериментов. Начиная с 1970-х годов разрабатывалась и сформировалась теория диагностики электрических цепей (в том числе - при участии авторов настоящей статьи). Эта теория успешно применялись к различным задачам диагностики.

Отметим, что традиционный язык описания процессов в трансформаторе основан на моделях с сосредоточенными параметрами. Рассмотрим, к примеру, структуру самой простой модели трехфазного трансформатора, имеющего 6 обмоток. Представляется целесообразным строить модель от простого к сложному, выделяя отдельные фрагменты, отражающие качественно различные стороны физических явлений (и дефектов), происходящих в трансформаторе.

Каждая обмотка характеризуется собственными параметрами: индуктивностью, емкостью на землю и резистивным сопротивлением. Магнитопровод характеризуется своими магнитными свойствами и потерями в нем. В принципе в общетеоретических описаниях возможно считать эти параметры как сосредоточенными, так и распределенными. Однако в качестве первого шага имеет смысл остановиться на особенностях модели с сосредоточенными параметрами.

Резистивное сопротивление обмоток трансформатора зависит от частоты, причем характер этой зависимости хорошо изучен. Зная сопротивление обмоток постоянному току и его аналитическую зависимость от частоты, нетрудно использовать эти данные при дальнейшем анализе.

Магнитные свойства магнитопровода как массива ферромагнетика при попытке применить метод SFRA, в принципе, могут иметь некоторый разброс, определяемый состоянием остаточной намагниченности отдельных стержней магнитопровода. Однако динамические магнитные свойства различных стержней магнитопровода, повидимому, в целом задаются начальной областью петли гистерезиса.

Потери в исправном магнитопроводе элементарно оцениваются, если известны токи в обмотках, намагничивающие соответствующие стержни магнитопровода. Что же касается дефектов в магнитопроводе – короткозамкнутых путей по его листам, то они представляют отдельный интерес и такие возможности могут отражаться отдельным элементом модели. Впрочем, это необязательно: при обнаружении повышенных потерь в магнитопроводе по результатам диагностических экспериментов и численного анализа нетрудно сделать соответствующие выводы о техническом состоянии магнитопровода. Более того, в некоторых случаях

можно сделать конструктивные предположения относительно формы короткозамкнутых контуров в магнитопроводе.

Каждая обмотка характеризуется индуктивностью, а пара обмоток – взаимной индуктивностью (Рис.1). Кроме того, обмотки характеризуются емкостью на землю и взаимными емкостями (Рис.2).

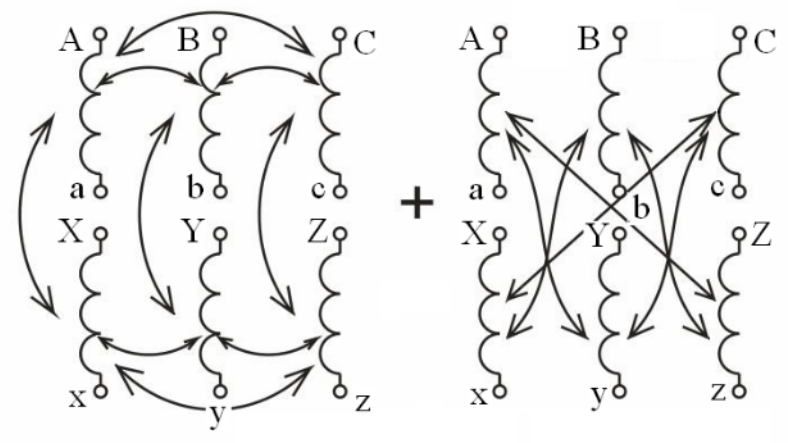


Рис. 1. Взаимные индуктивности в трехфазном трансформаторе

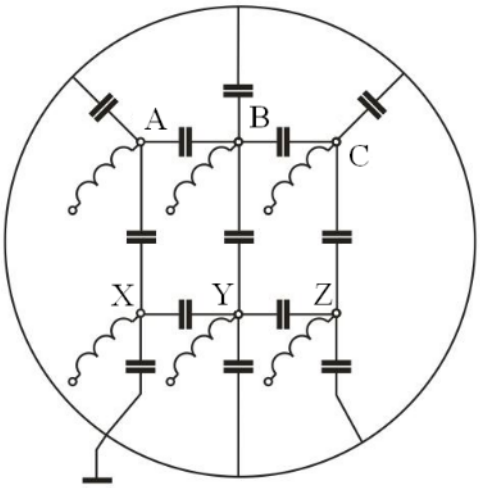


Рис.2. Простая емкостная схема замещения трехфазного трансформатора

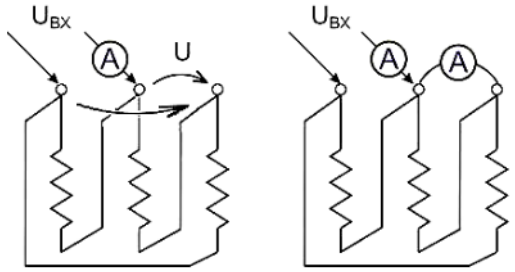
Существенно упрощает задачу тот факт, что на низких частотах можно пренебречь емкостными параметрами обмоток, а на высоких частотах имеется возможность рассматривать идеальные емкостные схемы замещения обмоток. На средних частотах, когда одновременно проявляют себя индуктивные и емкостные параметры, в принципе необходимо использовать схемы с распределенными параметрами. Задача существенно усложняется. Вместе с тем на средних частотах проявляются важные и очень интересные резонансные явления. Здесь же заметим, что даже не прибегая к модели трансформатора с распределенными параметрами, мы сталкиваемся здесь с весьма громоздкой моделью, теоретически корректного описания которой с анализом резонансных явлений в настоящее время не построено. Однако ясно, что обоснование

диагностической ценности этой информации представляет значительный интерес.

Резюмируя сказанное, отметим, что если определить значения перечисленных выше сосредоточенных параметров, то они в совокупности позволили бы специалистам с достаточной уверенностью оценивать техническое состояние трансформатора. Специально заметим, что подробность диагностирования параметров обмоток и магнитопровода находящегося в эксплуатации трансформатора не так уж необходима, как может показаться на первый взгляд. Специалистам достаточно решить лишь вопросы о возможности дальнейшей нормальной эксплуатации трансформатора либо о необходимости привлечения более подробных диагностических процедур. Что же касается ремонтного диагностирования, связанного с работами на выведенном из эксплуатации заведомо неисправном трансформаторе, то это уже другая (и организационно более простая) задача.

Отдельным вопросом стоит задача о схемах соединения обмоток трансформатора, подачи на вход схемы диагностического воздействия и измерениях при диагностическом обследовании. Задача наиболее проста, если схема соединения трансформатора Y_0/Y_0, т.е. имеется доступ к выводам всех обмоток по отдельности. Самая сложная зависимость между измеряемыми параметрами и параметрами обмоток при соединении обмоток Δ/Δ. Эти схемы соединения включают в себя различные комбинации холостого хода и короткого замыкания выводов. На основе измерений напряжений и токов можно рассчитать искомые параметры.

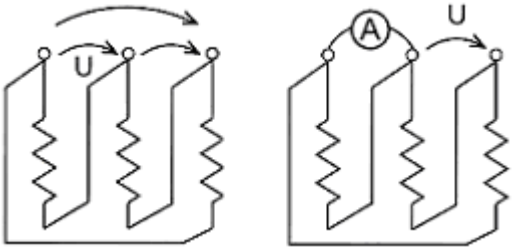
Группу обмоток, на которые подается диагностическое входное напряжение, будем условно называть активной, в противном случае – назыв ть пассивной. Рассмотрим, для примера, вариант соединения обмоток трансформатора треугольником. Схемы измерений в «активном» треугольнике приведены на рис. 3. Здесь видно, что имеется 3 варианта подачи входного напряжения на пару зажимов обмоток (рис.3.а), при этом в каждом их вариантов возможно измерение 1 тока и 2 напряжения на присоединенных подключениях. В каждом из рассмотренных вариантов имеется возможность подключать свободный зажим к одному из полюсов подаваемого напряжения, закорачивая одну из обмоток (рис.3б),



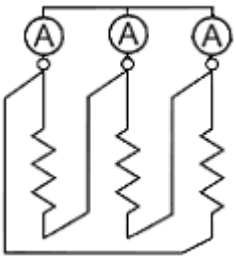
а) б)

Рис.3 Схемы измерений в «активном» треугольнике

измеряя при этом 2 тока. Наконец, получим 9 схемных вариантов включения «активного» треугольника, при этом в нем может быть произведено 21 измерение.



а) б)



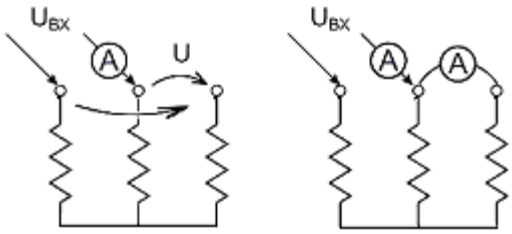
в)

Рис.4 Схемы измерений в «пассивном» треугольнике

Схем соединения «пассивного» треугольника всего 5: а) холостой ход, б) 3 2-хфазных коротких замыкания и в) 3-хфазное короткое замыкание. Здесь всего возможно 3 измерения в режиме напряжения ХХ, по 2 измерения (напряжение + ток) в режиме 2-хфазного КЗ и 2 (или 3) измерения тока в режиме полного КЗ. Итого можно произвести 12 измерений.

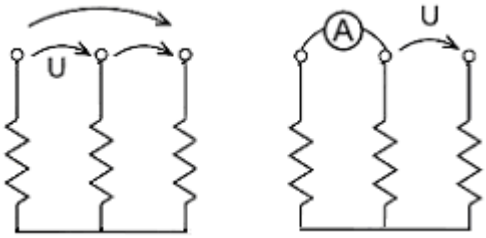
Итак, при соединении обмоток трансформатора Δ/Δ получаем принципиальную возможность собрать 9 «активных» схем, считая активную обмотку первичной, при этом иметь 5 вариантов включения пассивной – вторичной обмотки, и, в довершение всего, симметрично произвести все эти эксперименты при обратном включении. Окончательно получаем 90 различных схем соединения и возможность произвести измерения более 200 различных токов и напряжений.

Отметим, что при соединении обмоток звездой (как с нулевым проводом, так и без него) перечисление схем подачи диагностического воздействия и схем измерений аналогично описанному выше и не представляет труда. Так, в «активной» звезде без нулевого провода (рис. 5) схемы внешних измерений аналогичны схемам «активного» треугольника (рис. 3), и в «пассивной» звезде без нулевого провода (рис. 6) схемы внешних измерений аналогичны схемам «пассивного» треугольника (рис. 2).

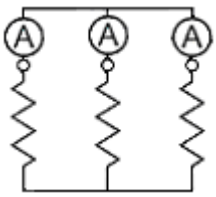


а) б)

Рис.5 Схемы измерений в «активной» звезде без нулевого провода



а) б)

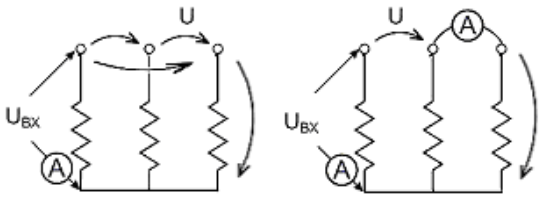


в)

Рис.6 Схемы измерений в «пассивной» звезде без нулевого провода

Естественно, что интерпретация этих измерений будет отличаться от интерпретации измерений, выполненных для обмоток, собранных по схеме треугольника.

Ясно, что наибольшие возможности для диагностики предоставляются, когда имеется доступ к нулевому проводу (нейтральной точке) звезды. Дополнительно к вариантам, перечисленным выше, для «активной» звезды без нулевого провода возможно еще 5 принципиально различных схем измерения (рис.7 а-д). Так, к примеру, если предположить, что измеряются лишь модули токов и напряжений (нетрудно это ограничение снять, измеряя как модули, так и фазы параметров), то в этом случае для схемы а) имеем 5 дискрет измерений, для схем б), в), г) – 4 дискреты, для схемы д) – 3 дискреты, итого – 20. Учитывая трехкратную перестановку фаз, всего (дополнительно к схеме рис.5) получим возможность произвести 60 измерений параметров.



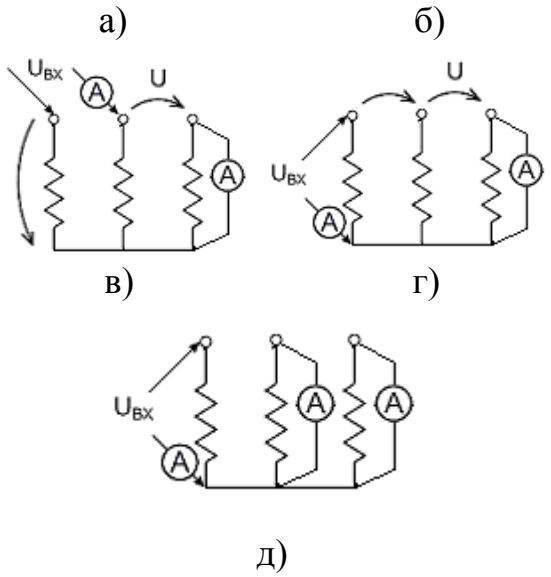
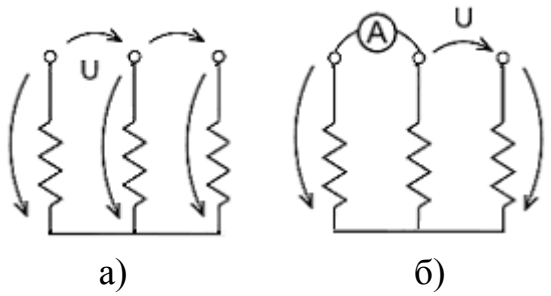


Рис.7 Дополнительные схемы измерений в «активной» звезде с нулевым проводом

Для «пассивной» звезды с нулевым проводом, как явствует из рис.6, получим также возможность произвести 60 измерений параметров. Ясно, что комбинации только дополнительных схем измерений (не забывая о возможности обратного включения трансформатора) потенциально дают (формально) уже несколько тысяч дискрет информации.

Если речь идет о двухобмоточном трехфазном трансформаторе, то относительно внешних 6 (или 7) зажимов он характеризуется матрицей из 36 комплекснозначных параметров; если же детализировать схемы замещения обмоток и их связей (индуктивных и емкостных), то количество независимых параметров заметно возрастет. Поскольку в практических задачах диагностики объективно участвуют погрешности измерений, то избыточность измерений весьма желательна. Специально заметим, что здесь же открываются возможности диагностики состояния сердечника трансформатора, поскольку в различных схемах измерений разные стержни магнитопровода оказываются в различных режимах, что позволяет делать, по крайней мере, качественные выводы о его техническом состоянии .



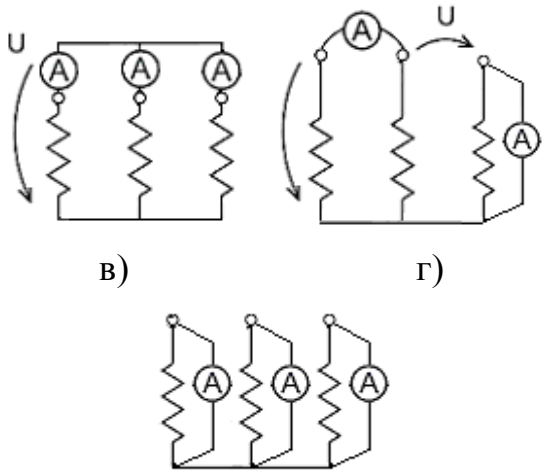


Рис.8 Дополнительные схемы измерений в «пассивной» звезде с нулевым проводом

Прокомментируем результаты. Во-первых, при автоматизированных измерениях нет технических проблем запрограммировать соответствующие коммутации и измерения. Во-вторых, очевидно, что не все измерения независимы друг от друга, и необходимое минимальное множество измерений можно проанализировать. В-третьих, имеющаяся избыточность измерений открывает перспективу повышения достоверности результатов диагностики. Ясно, что для обработки этого множества экспериментов необходимо создать соответствующее программное обеспечение. Простейшие необходимые расчетные формулы для каждой из схем включения нетрудно привести, однако и здесь есть поле для дальнейшего подробного анализа.

Проведение измерений на высоких частотах, когда можно пренебречь индуктивными сопротивлениями, приводит к более простым схемам замещения, но технологически требует большей корректности при коммутациях и измерениях.

Выводы.

1. Для достаточно уверенной оценки технического состояния трансформатора, находящегося в эксплуатации, необходимо оценить параметры схемы замещения с сосредоточенными параметрами.

2. Такие параметры возможно получить на основе экспериментов на постоянном токе и двух частотах – промышленной и высокой.

3. На средних частотах одновременно проявляют себя индуктивные и емкостные параметры. Теоретически корректного описания этих режимов работы с анализом резонансных явлений в настоящее время не построено.

4. Анализ и обоснование диагностической ценности информации о частотных характеристиках в широком диапазоне частот представляет

значительный интерес. В настоящее время этот анализ может производиться исключительно на феноменологических принципах и связан с накоплением значительной статистики дефектов трансформатора и интерпретацией этого массива данных на основе неких алгоритмов распознавания образов.

Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com