

# В ПОМОЩЬ ПРОИЗВОДСТВЕННИКУ

настука ви  
нженеров  
ет испытани  
вотою и та  
истории

## Об особенностях измерения малых омических сопротивлений обмоток электрооборудования со значительной собственной индуктивностью

БАЗАНОВ В.П., СПИРИН М.В., ТУРАЕВ В.А., БЕЗЧАСТНОВ Г.А., инженеры,  
Нижновэнерго — РАО «ЕЭС России»

Пыт эксплуатации электрооборудования показывает, что измерение омических сопротивлений машин и аппаратов, имеющих значительную индуктивность и малое омическое сопротивление (единицы — сотни миллиОм), сопряжено с рядом трудностей методического и метрологического характера. Эти трудности обусловлены значительным временем переходных процессов в обмотках контролируемого оборудования и сравнительно большой величиной энергии, запасаемой в магнитном поле данных обмоток при измерениях.

Измерение сопротивления постоянному току обычно производится двумя методами: амперметра — вольтметра и компенсационным с использованием одинарного (Уитсона) или двойного (Томсона) моста постоянного тока по двух- или четырехпроводной схеме подключения. Мости постоянного тока обеспечивают необходимую точность измерений, тогда как точность метода амперметра-вольтметра зависит от класса применяемых приборов, одновременности проведения отсчета показаний с двух приборов и точности вычислений итогового результата.

В Нижновэнерго, как правило, используются мости постоянного тока. Однако даже в этом случае несоблюдение определенных правил сборки измерительных схем и проведения измерений приводит к ошибкам при измерениях. Далее анализируются наиболее типичные ошибки при организации и проведении измерений, а также предлагаются способы их устранения.

### Методические ошибки

1. Отсутствие четкого критерия окончания переходного процесса, что может привести к преждевременному отсчету показаний приборов. В этом случае значение измеренного сопротивления будет несколько превышать истинную величину. Эта ошибка наиболее вероятна при больших значениях постоянной времени переходного процесса

$$\tau = L / R,$$

где  $L$  — индуктивность обмотки, Гн;  $R$  — сопротивление токовой цепи измерительной схемы, Ом.

Очевидно, что можно значительно сократить постоянную  $\tau$  (соответственно снизить вероятность ошибки при измерении), а также само время проведения из-

мерений. Для этого увеличивается параметр  $R$  путем введения дополнительного активного сопротивления в цепь источника постоянного тока измерительной схемы. При измерении омического сопротивления обмотки  $R_x$  в пределах десятых долей Ома и менее (множитель схемы моста 0,0001) ток в измерительной схеме допускается не более 1,5 А.

Если значение  $R_x$  достигает единиц Ома (множитель схемы моста 0,001), ток измерительной схемы допускается до 0,15 А. Питание измерительной схемы целесообразно осуществлять от аккумулятора 12 В с токоограничивающими резисторами, имеющими параметры 8 Ом, 20 Вт (предел измерений 0,0001) и 70 Ом, 2 Вт (предел измерений 0,001).

2. Недостаточно качественная подготовка схемы измеряемого объекта. Например, для снижения входной индуктивности измеряемой обмотки при соединении фаз в "звезду" и предотвращения появления возможного импульса высокого напряжения не всегда две другие обмотки (соединенные в "звезду") замыкаются на нейтраль. Если измерения производятся на одной из обмоток трансформатора, по тем же причинам обмотки других классов напряжения должны "закорачиваться". Эта мера в совокупности с предыдущей (пункт 1) позволяет заметно снизить постоянную времени переходного процесса и общее время измерений.

3. Некорректный вывод измерительной аппаратуры из схемы измерения, проявляющийся в отключении выключателем или штепсельным разъемом постоянного тока в цепи с большой индуктивностью без плавного снижения тока в цепи обмотки. При этом появляется импульс высокого напряжения на всех обмотках измеряемого оборудования, что может спровоцировать электротравму оператора, проводящего измерение, и повредить измерительный мост. Для плавного гашения тока до нуля (после измерения и отключения гальванометра моста) измеряемая обмотка должна замыкаться "накоротко", а затем следует отключать источник питания.

С целью автоматического замыкания тока в измеряемой обмотке удобно использовать полупроводниковый диод любого типа на ток не менее 1,5 А с допустимым обратным напряжением не менее 15 В. Во время измерений диод должен быть подключен параллельно измеряемой обмотке.

Полярность диода ориентируется встречно источнику питания. При этом наличие диода не сказывается на измерении омического сопротивления обмотки, а сама обмотка (при отключении источника питания) автоматически замыкается через диод. Кроме того, снимаются ограничения по порядку отключения источника питания.

### Метрологические ошибки

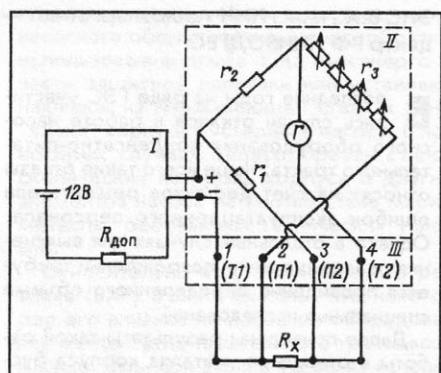
1. Использование двухпроводной схемы измерения с последующим вычитанием из результата измерения значения сопротивления соединительных проводов. В этом случае не учитываются переходные сопротивления контактов подключения соединительных проводов. При измерении малых омических сопротивлений влияние контактных переходов на результат измерения велико.

Имеют место случаи, когда ошибочно применяют "четырехпроводную" схему измерения, используя два провода, к средней части которых припаиваются по одному контактному зажиму для подключения к выводам измеряемых обмоток, а на концы — оконцеватели с целью подсоединения к выводам моста. Собранная на этой оснастке схема (хотя и имеет формально четыре провода) фактически не отличается от двухпроводной с присущими ей недостатками. Итак, для измерений следует использовать четырехпроводную схему, в которой каждый из четырех проводов должен быть самостоятельным.

2. Применение проводов максимального сечения для попытки исключить влияние соединительных проводов. При этом осложняется сборка измерительной схемы и появляется вероятность повреждения приборных выводов мостов. Покажем роль и степень влияния соединительных проводов на примере проведения измерений мостами Р333 и Р4833.

На рисунке показана упрощенная схема указанных мостов при измерениях с внешним источником питания, из которой видно, что токовый провод, подключаемый к выводу 1(Т1), является внешним по отношению к измерительной части схемы, поэтому его сопротивление не влияет на результат измерения.

Потенциальный провод к выводу 2(П1) входит непосредственно в настроечное плечо моста. Однако его сопротивление в сравнении с сопротивлением настроечно-



Принципиальная электрическая схема измерения с помощью мостов Р333, Р4833 и внешнего источника питания:

I — цепь внешнего источника питания; II — упрощенная электрическая схема измерительных мостов; III — выводы мостов

Номер провода	Требования к проводу
1(Т1)	Удобный в работе, механически прочный. Сопротивление не лимитируется. Гибкий, изолированный, жгутально медный сечением 4 $\text{мм}^2$ .
2(П1)	То же, что и для провода 1(Т1). Рекомендуется применение контактной струбцины для подключения к оборудованию. При измерении сопротивлений порядка долей миллиОм должны выполняться определенные условия*.
3(П2)	Сопротивление провода не более 0,005 Ом (медь сечением 10 $\text{мм}^2$ , длиной до 3 м). Необходима лабораторная калибровка провода по значению фактического сопротивления. Обязательно применение контактной струбцины для подключения к оборудованию.
4(Т2)	То же, что и для провода 1(Т1).

**Примечание.** \* Для обеспечения метрологических гарантий измерения необходимо задействовать максимальное число регистров настроичного плача моста. Если же  $R_x = 0,0001 + 0,0009$  Ом, настройка моста производится лишь на первом регистре. В этом случае требования к проводам от выводов 2(П1) и 3(П2) одинаковы.

го плеча, достигающим единиц килоОм, незначительно. Чтобы влияние этого провода на результаты измерений было минимальным, необходимо выбирать такой режим измерения при котором использовалось бы максимальное число регистров настроичного плеча моста.

Когда мост настроен, провод от вывода 4(Т2) током не обтекается, так как он включен в цепь гальванометра моста (т. е. в диагональ настроенного моста), поэтому его сопротивление также неискажает результаты измерений.

Следует отметить, что результат измерения напрямую зависит от потенциаль-

ного провода, подключаемого к выводу 3(П2). В точке подсоединения этого провода суммируются три сопротивления: самого провода, контактных переходов и измеряемое.

По этой причине при измерении обмоток машин и трансформаторов, соединенных в "звезду", провод от вывода 3(П2) надо подключать к нейтрали обмоток. Пофазное же переключение схемы измерения необходимо производить соответствующим переносом проводов 1(Т1) и 2(П1). Требования к проводам измерительной схемы приведены в таблице.

3. Подключение под один зажим вывода оборудования потенциального и токового проводов (соответственно попарно). Такой прием "обесценивает" четырехпроводную схему измерения, превращая ее в эквивалент двухпроводной схемы.

Для исключения погрешностей двухпроводной схемы точки подключения токовых и потенциальных проводов необходимо выполнять раздельно, соблюдая последовательность подключения к выводам оборудования: 1(Т1)—2(П1) — измеряемая обмотка — 3(П2)—4(Т2).

4. Применение аккумуляторов малой емкости (менее 20 А · ч) или изношенных аккумуляторов для питания измерительных схем, приводящее к ошибкам в измерениях, так как не обеспечивается стабильность этого процесса. Для питания схемы измерения удобно и целесообразно применять бортовые автомобильные аккумуляторы с указанными токоограничивающими резисторами.

Если учсть перечисленные ошибки, значительно сократится время измерений, повысится качество, а также безопасность и культура их производства. В связи с этим в Нижнекамскэнерго выпущена и применяется "Методика измерений омических сопротивлений трансформаторов и генераторов".