

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

В настоящее время политика любого государства в области энергетики направлена на экономию энергоресурсов. Наибольший потенциал повышения энергоэффективности в промышленности содержит в себе увеличение КПД электродвигателей переменного тока, которые потребляют примерно 60 % всей вырабатываемой электроэнергии. Одним из перспективных направлений в исследованиях, связанных с увеличением КПД стандартных асинхронных двигателей, является уменьшение добавочных потерь, не входящих в категорию потерь доступных прямому расчету, среди которых выделяют электрические, магнитные, механические и вентиляционные потери [1, 2]. При современном развитии техники добавочные потери не поддаются достаточно точному расчету с помощью инженерных методик. Основная часть этих потерь возникает из-за колебаний магнитной индукции в зубцах ротора и статора. Эти потери обычно равны 30 – 50 % потерь от всех потерь в железе двигателя, и их снижение приведет к значительному увлечению КПД машины. Для уменьшения добавочных потерь применяются разнообразные конструкторские решения, например, добавление промежуточного короткозамыкающего кольца или применение закрытых пазов. В то же время методики оценки добавочных потерь содержат некоторые допущения и не в полной мере учитывают отклонения конструктивных параметров, возникающие из-за несовершенства технологии производства. Поэтому после изготовления опытного образца необходимо проведение экспериментального определения величины добавочных потерь.

Существует множество методик, позволяющих экспериментально определить величину добавочных потерь в машине [2, 3, 4]. В большинстве случаев используются методы, описанные в промышленных стандартах. Стандарт ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009 [1] описывает следующие методики измерения добавочных потерь.

1.) Дифференциальный метод определения добавочных потерь (англ. «input-output test», «residual loss method»). Требуется измерения электрической мощности потребляемой машиной и механической мощности на выходе машины. Метод практически не включает теоретических допущений, однако требует проведения опыта нагрузки, согласно [1] с применением высокоточной измерительной техники.

2.) Испытания с вынутым ротором и обратным вращением поля (англ. reverse rotation test, Morgan test) не требуют измерения момента, однако предполагают наличие вспомогательного двигателя для вращения испытуемого двигателя со скольжением  $s = 2$ . В литературе, посвященной исследованию добавочных потерь, указывается на значительные допущения и погрешности этого метода [2].

3.) Испытания по схеме звезда (англ. eh-star method). Метод слабо описан в отечественной литературе и попал в МЭК - стандарт относительно недавно - в 2007 году. В литературе указывается на приемлемую точность данного метода и сходимость с результатами дифференциального метода [2].

Три метода, описанные выше, хорошо изучены, не требуют дорогостоящей аппаратуры, и дают приемлемую точность результатов. Другие существующие методы [3, 4, 5], не вошедшие в данный ГОСТ, уступают по одному или нескольким показателям, поэтому их применение обычно менее оправдано. Одной из причин ис-

пользования этих методов может быть невозможность или неоправданность, ввиду высокой стоимости и сложности наладки, применения достаточно точных средств измерения вращающего момента (согласно [1], необходим класс точности измерителя вращающего момента 0,2 или выше), которые требуются для реализации измерения дифференциальным методом. Наиболее используемыми из методов, входящих в стандарт, являются:

- 1) калориметрический метод;
- 2) метод короткого замыкания;
- 3) метод двух одинаковых машин.

*Калориметрический метод* позволяет производить измерение потерь по величине выделенного ими тепла [2]. Двигатель помещается в теплоизолированную камеру и подключается к нагрузке. Все тепло, которое выделяется во время работы двигателя, передается через тепловую связь на датчик, который, в свою очередь, переводит полученное тепло в величину потерь. Добавочные потери  $P_{ад}$  определяются путем выделения их из общего значения потерь  $P_d$ . Испытания проводятся в три этапа. На первом этапе двигатель является нагрузкой и приводится во вращение внешним устройством, таким образом происходит измерение потерь, вызванных трением ротора о воздух и потерь, создаваемых трением подшипников. На втором этапе двигатель работает на холостом ходу. Напряжение вирируется от 0 % до 120 % от номинала. Целью данного измерения является определение потерь в стали  $P_o$ . Они вычисляются как разность полученных потерь и механических потерь, определенных в предыдущем опыте. На третьем этапе двигатель работает под нагрузкой. Производится замер токов, сопротивлений обмоток (в горячем и холодном режиме) и потерь, выделяющихся во время испытания. Отдельно выделяют потери в роторе. Если в случае фазного ротора потери определяются так же, как и в статоре, то в короткозамкнутом роторе потери вычисляются по формуле:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_o) * s, \quad (1)$$

где  $s = 1 - (p * n/f)$ ,  $P_1$  – потребляемая двигателем мощность,  $P_s$  – потери в обмотке статора,  $P_o$  – потери в стали

На основании данных эксперимента добавочные потери вычисляют по формуле:

$$P_{ад} = P_d - P_{\Sigma} = P_d - P_s - P_r - P_o - P_{мех} \quad (2)$$

С физической точки зрения это точный опыт, так как происходит прямое измерение потерь. Также плюсом является то, что для этого испытания не требуются датчик момента и датчик скорости: точность результатов зависит главным образом от точности измерения выделенного тепла. Отрицательной стороной данного метода является дороговизна оборудования и большой промежуток времени, требующийся для проведения испытаний (главным образом из-за необходимости достижения теплового равновесия).

*Метод короткого замыкания (метод тарированной машины постоянного тока)* предполагает, что добавочные потери сводятся к добавочным потерям, возникающим при питании якоря постоянным током. Ротор асинхронного двигателя приводится во вращение от вспомогательного двигателя постоянного тока, потери которого известны. Одна из обмоток асинхронного двигателя возбуждается постоянным током, а другая замыкается накоротко (рисунок а).

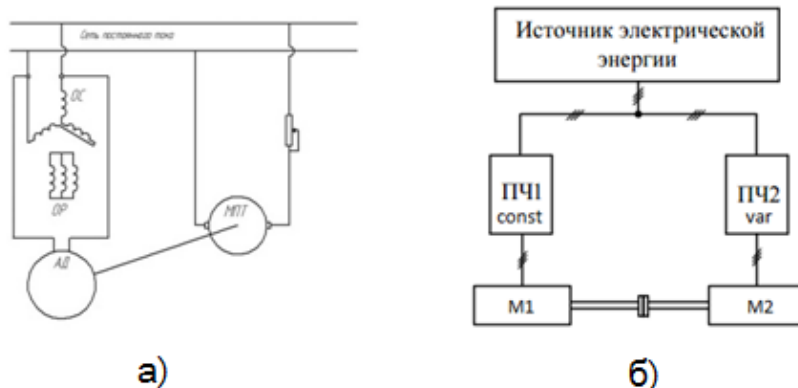


Рис.; а – Схема испытания методом короткого замыкания;

б – схема испытаний асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки с использованием двух преобразователей с возможностью рекуперации энергии в сеть [6]

Обычно постоянный ток пропускается по обмотке статора. В этом случае, как и в рабочем режиме, намагничивающий ток течет по статорной обмотке. Вычитая из потребляемой вспомогательным двигателем мощности его потери и пренебрегая малыми потерями в железе мы найдем:

$$P = P_{\text{мех}} + P_s = P_R + P_L + P_{\text{ад}} + P_s, \quad (3)$$

где  $P_R$  – потери на трение;  $P_L$  – потери на вентиляцию (вычисляются отдельно);  $P$  – мощности на валу двигателя (вычисляются отдельно);  $P_s$  – потери, вызванные протеканием постоянного тока;  $P_{\text{ад}}$  – добавочные потери.

Нужно отметить, что в данном методе не учитываются добавочные потери, вызванные наличием зубцов, тогда как величина потерь, создаваемых полными токами вследствие отсутствия главного поля, получается завышенной. Однако, как показывает практика, сходимость данного метода с дифференциальным методом оказывается приемлемой. Метод прост в применении и не требует дорогостоящего оборудования. Точность зависит от точности определения КПД вспомогательного двигателя постоянного тока, которая обычно не очень велика.

**Метод двух одинаковых машин (метод взаимной нагрузки).** Два двигателя M1 и M2, механически связанные, подключают к источникам трехфазного напряжения, один из которых способен менять частоту питания (рис. б). На двигатель M1 подается ток, а двигатель M2 переводят в генераторный режим за счет уменьшения частоты питания. Начинать опыт необходимо с частоты, при которой ток в двигателе M1 равен 150 % от номинального значения. Постепенно увеличивая частоту питания M2, двигатель M1 переводят в генераторный режим, а генератор M2 – в двигательный. Опыт следует завершить, когда ток питания двигателя будет равен 150% от номинального значения. Во время испытания следует производить замеры токов, напряжений, входных и выходных мощностей и сопротивлений обмоток (в холодном и горячем виде). Также нужно отметить, что перед началом испытаний требуется измерить механические потери и потери в стали. Потери в обмотке ротора вычисляются так же, как в *калориметрическом методе* определяются добавочные потери (1). Добавочные потери на два двигателя вычисляются как:

$$P_{\text{адп}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} - P_{1s} - P_{2s} - P_{1r} - P_{2r} - P_{o1} - P_{o2} - P_{\text{мех1}} - P_{\text{мех2}}. \quad (4)$$

Добавочные потери в двигателе M1 вычисляются следующим образом:

$$P_{\text{ад1}} = I_1^2 * R_1 * P_{\text{адп}} / (I_1^2 * R_1 + I_2^2 * R_2). \quad (5)$$

Добавочные потери в генераторе M2 вычисляются как:

$$P_{\text{ад2}} = P_{\text{адп}} - P_{\text{ад1}}. \quad (6)$$

Для определения добавочных потерь в двигательном режиме для второго двигателя требуется провести повторно, поменяв М1 и М2 местами. Данный метод точен, прост в проведении, но требует специальную двух-инверторную установку, стоимость которой превышает стоимость оборудования, необходимого в дифференциальном методе (особенно для машин большой мощности). По этой причине данный метод подходит в основном для приемо-сдаточных испытаний серийных машин (нужно хотя бы две одинаковые машины, изготовленные по единой отлаженной заводской технологии).

По результатам проведенного обзора можно заключить, что для испытаний в условиях современной лаборатории электромеханики наиболее подходят методы определения добавочных потерь, описанные в стандарте [1]. Другие описанные методы могут быть ограниченно применены при наличии соответствующего оборудования и в условиях серийного производства. Дорогой и сложный в реализации калориметрический метод может при необходимости применяться как вспомогательный – для проверки результатов измерения, сделанных другими методами. В дальнейшем планируется проведение экспериментального сопоставительного исследования методов определения добавочных потерь, описанных в [1], с целью определения реальной точности и причин погрешности отдельных методик.

#### Список использованных источников

1. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава).
2. Aoukadi M. Experimental Determination of Stray Load Losses in Cage Induction Machines. TU Darmstadt: Institut für Elektrische Energiewandlung, 2011.
3. Рихтер Р. Электрические машины. Т. 4. Индукционные машины. Учебное пособие для энергетических вузов. Ленинград - Москва: ГОНТИ. Редакция энергетической литературы, 1939.
4. IEEE\_std\_112\_2004 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators: Efficiency Test Method C–Duplicate machines.
5. Литвинов А. В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов.