

ВЫБОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Наведено аналіз експериментальних методів визначення механічних втрат потужності в тягових електричних двигунах постійного струму.

Приведен анализ экспериментальных методов определения механических потерь мощности в тяговых электрических двигателях постоянного тока.

The analysis of experimental methods for determination of mechanical losses of power in the hauling electric engines of direct current is presented.

Механические потери в тяговых электрических машинах обычно определяются в режиме холостого хода при последовательном возбуждении [1]. В принципе эти же потери могут быть определены и при независимом возбуждении тяговых электродвигателей при условии, что их режим работы будет соответствовать минимуму суммы электрических и магнитных потерь. При соблюдении данного условия точность определения механических потерь при независимом возбуждении может быть выше, чем при последовательном.

Значительная жесткость зависимости момента двигателя независимого возбуждения от частоты вращения якоря обеспечивает более простые условия снятия характеристики благодаря малости времени переходных процессов при регулировании напряжения.

Принципиальные электрические схемы, по которым могут быть сняты характеристики механических потерь при работе двигателей с последовательным и независимым возбуждением, приведены на рис. 1 и 2, соответственно.

При последовательном возбуждении используется один источник электрической мощности «И» с напряжением $U_{и}$, к которому подключаются последовательно соединенные обмотки якоря и возбуждения.

При независимом возбуждении обмотка якоря электродвигателя подключена к источнику электрической мощности «И1» с напряжением $U_{и}$, а обмотка возбуждения питается током $I_{в}$ от другого источника электрической мощности «И2».

В обоих случаях электродвигатель работает в режиме холостого хода, при котором вся потребляемая из сети мощность компенсируется

суммарными потерями в нём. В дальнейшем будем рассматривать только электрические, магнитные и механические потери мощности в испытуемом электродвигателе. Пренебрежение добавочными потерями в данном анализе может быть оправдано их малостью в рассматриваемом режиме холостого хода [2].

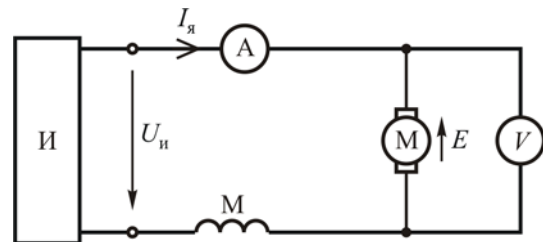


Рис. 1

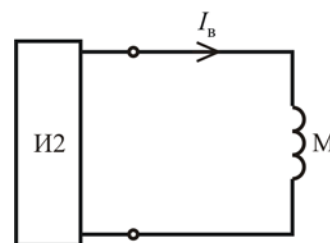
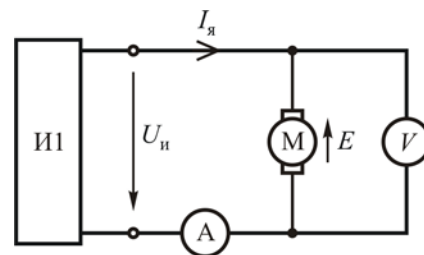


Рис. 2

С помощью вольтметра «V» и амперметра «А» определяются напряжение и ток якоря испытуемого электродвигателя.

Значение механических потерь в двигателе для любой из схем испытания рассчитывается

как мощность $P_{\text{пот}}$, потребляемая его якорем при установившемся режиме холостого хода:

$$P_{\text{пот}} = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение на зажимах якоря;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря.

Баланс мощностей для якоря при постоянной частоте его вращения имеет вид:

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность;

$\Delta P_{\text{э}}$ – электрические потери в якоре.

Электромагнитная мощность будет определяться в виде:

$$P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}}, \quad (3)$$

где E – э.д.с. якоря.

Электрические потери в цепи якоря испытуемого электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{эм}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря.

При холостом ходе электромагнитная мощность электродвигателя уравнивается магнитными и механическими потерями $\Delta P_{\text{маг}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$, соответственно:

$$P_{\text{эм}} = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (5)$$

Объединив формулы (2) и (5), получим баланс мощностей в виде:

$$P_{\text{пот}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}}. \quad (6)$$

Относительно точное определение механических потерь для любой из приведенных схем испытаний по формуле (1) возможно при условии, что механические потери намного больше суммы магнитных и электрических потерь:

$$\Delta P_{\text{мех}} \gg \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}}. \quad (7)$$

Только в этом случае можно считать, что механические потери приблизительно равны электрической мощности, потребляемой якорем электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (8)$$

Т.е., условием возможности использования формулы (8) для определения механических потерь с минимальной ошибкой будет минимум суммы остальных потерь в якоре $\Delta P_{\text{мэ}}$:

$$\Delta P_{\text{мэ}} = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}} \rightarrow \min. \quad (9)$$

При выполнении условия (9) можно считать справедливым выражение равенства потребляемой, электромагнитной мощности и мощности механических потерь:

$$P_{\text{пот}} \approx P_{\text{эм}} \approx \Delta P_{\text{мех}}. \quad (10)$$

Определим режим работы электродвигателя, при котором будет выполняться условие (9). Будем считать возможным раздельное регулирование напряжения на якоре $U_{\text{я}}$ и тока возбуждения $I_{\text{в}}$ испытуемой электрической машины.

Выразим суммарные потери $\Delta P_{\text{мэ}}$ через э.д.с. и ток якоря. Предварительно представим магнитные потери как пропорциональные квадрату э.д.с.:

$$\Delta P_{\text{маг}} = K_{\text{м}} \cdot E^2, \quad (11)$$

где $K_{\text{м}}$ – параметр электродвигателя, постоянный при неизменной частоте вращения его якоря [3].

Подставив (4) и (12) в (11), получим:

$$\Delta P_{\text{мэ}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + K_{\text{м}} \cdot E^2. \quad (12)$$

Определим, при каком токе $I_{\text{я}}$ и э.д.с. E будет выполняться условие (9). При этом будем учитывать, что в соответствии с (3) и (10)

$$\Delta P_{\text{мех}} = E \cdot I_{\text{я}}. \quad (13)$$

Причем, принимая во внимание условие постоянства частоты вращения якоря, будем считать $\Delta P_{\text{мех}} = \text{const}$.

Проведя анализ функции $\Delta P_{\text{мэ}}(I_{\text{я}}, E)$ на предмет определения точек экстремума, нетрудно убедиться, что её минимум находится в точке, для которой электрические потери в якоре равны магнитным потерям, т.е.:

$$R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = K_{\text{м}} E^2. \quad (14)$$

Для этого режима работы электродвигателя будут справедливы выражения для определения оптимальных значений тока якоря $I_{\text{я0}}$ и э.д.с. E_0 , обеспечивающих минимум суммы электрических и магнитных потерь:

$$I_{\text{я0}} = \sqrt{\Delta P_{\text{мех}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{м}}}{R_{\text{я}}}}}; \quad (15)$$

$$E_0 = \sqrt{\Delta P_{\text{мех}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{м}}}}}. \quad (16)$$

Оптимальное соотношение э.д.с. и тока якоря испытуемого электродвигателя при этом будет выглядеть как:

$$\frac{E_o}{I_{яo}} = \sqrt{\frac{R_{я}}{K_{м}}} \quad (17)$$

Практическое использование выражений (15)–(17) весьма затруднительно в связи с невозможностью точной предварительной оценки всех параметров, входящих в эти формулы, в том числе и самих механических потерь, определение которых является целью испытаний. Однако, если предположить известным отношение электрических и магнитных потерь в тяговом электродвигателе для номинального режима $\Delta P_{эH} / \Delta P_{магH}$, то можно найти оптимальное соотношение напряжения и тока якоря, обеспечивающее минимальную ошибку в определении механических потерь при любой частоте вращения.

Как правило, отношение электрических и магнитных потерь для любого испытуемого тягового электродвигателя может быть достаточно точно оценено еще до проведения испытаний даже по приблизительным значениям его типовых параметров.

Электрические и магнитные потери в номинальном режиме, соответственно:

$$\Delta P_{эH} = R_{я} I_{яH}^2 \quad (18)$$

$$\Delta P_{магH} = K_{м} E_{H}^2 \quad (19)$$

Отношение потерь в номинальном режиме:

$$\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}} = \frac{R_{я}}{K_{м}} \cdot \left(\frac{I_{яH}}{E_{H}} \right)^2 \quad (20)$$

Учитывая, что оптимальное отношение э.д.с. и тока якоря электродвигателя определяется выражением (17), путем исключения отношения $R_{я} / K_{м}$ получим:

$$\frac{E_o}{I_{яo}} = \frac{E_{H}}{I_{яH}} \sqrt{\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}}} \quad (21)$$

При выполнении условия (9) э.д.с. якоря можно считать приблизительно равной напряжению на нем. Тогда выражение (21) можно записать в более удобном для практического использования виде:

$$\frac{U_o}{I_{яo}} = \frac{U_{H}}{I_{яH}} \sqrt{\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}}} \quad (22)$$

Обеспечение оптимального соотношения напряжения и тока якоря при определении механических потерь электродвигателя достаточно легко достижимо в случае использования независимого возбуждения и, как правило, невыполнимо при последовательном возбуждении. Тем не менее, при проведении квалификационных испытаний для определения этого вида потерь используют последовательное возбуждение испытуемого электродвигателя.

Использование последовательного возбуждения при определении механических потерь автоматически обеспечивает относительно равномерное распределение электрических и магнитных потерь за счет одновременного снижения магнитного потока при уменьшении тока. Отношение этого вида потерь при последовательном возбуждении для каждого типа электродвигателя будет определяться видом его кривой намагничивания.

На рис. 3. кривая намагничивания электродвигателя схематично приведена в виде зависимости его э.д.с. от силы тока при условии постоянства частоты вращения якоря. Для простоты анализа будем считать частоту вращения якоря, равной номинальному значению, при котором току $I_{яH}$ соответствует э.д.с. E_{H} .

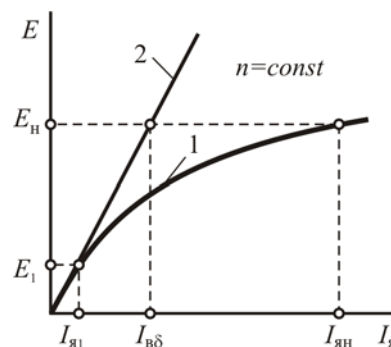


Рис. 3

Кривая 1 на рис. 3 представляет собою зависимость э.д.с. от тока якоря, а прямая 2 является касательной к кривой 1 в точке, соответствующей началу координат.

Как и при анализе схемы с независимым возбуждением будем считать известным отношение электрических и магнитных потерь в номинальном режиме $\Delta P_{эH} / \Delta P_{магH}$.

В режиме холостого хода, при котором измеряются механические потери, ток и э.д.с. якоря уменьшаются до значений $I_{я1}$ и E_1 , соответственно. При этом точка, соответствующая холостому ходу, оказывается на линейной части характеристики 1, для которой отношение $E_1 / I_{я1}$ отлично от значения $E_{H} / I_{яH}$, и

может быть определено из выражения для коэффициента магнитного насыщения электромашины:

$$K_n = \frac{I_{ян}}{I_{яб}}, \quad (24)$$

где $I_{яб}$ – ток возбуждения и он же якоря, который создаёт магнитодвижущую силу, компенсирующую падение напряжения в воздушном зазоре магнитной цепи электродвигателя.

Из рис.3 видно, что $(E_1/I_{я1}) = (E_n/I_{яб})$. Тогда с учетом выражения (24) получим равенство:

$$\frac{E_1}{I_{я1}} = K_n \cdot \frac{E_n}{I_{ян}}. \quad (25)$$

При последовательном возбуждении в режиме холостого хода при любом значении механических потерь $\Delta P_{мех}$ отношение $E_1/I_{я1}$ будет определяться именно выражением (25).

Заменив в (25) э.д.с. на напряжения, что допустимо, учитывая условие (9), которое автоматически частично выполняется и для последовательного возбуждения, получим новое выражение:

$$\frac{U_1}{I_{я1}} = K_n \cdot \frac{U_n}{I_{ян}}. \quad (26)$$

Ошибка в определении механических потерь на холостом ходу при последовательном возбуждении будет определяться степенью отклонения отношения $U_1/I_{я1}$ от оптимального значения $U_o/I_{яо}$. Минимальная ошибка будет соответствовать условию равенства этих отношений:

$$\frac{U_1}{I_{я1}} = \frac{U_o}{I_{яо}}. \quad (27)$$

С учетом выражений (22) и (26) это же условие может быть записано в виде оптимального соотношения электрических и магнитных потерь мощности в тяговом электродвигателе при номинальном режиме:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} = K_n. \quad (28)$$

В случае, когда электрические потери при холостом ходе больше магнитных потерь, справедливо неравенство:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} > K_n. \quad (29)$$

Когда же магнитные потери при холостом ходе выше электрических потерь, имеет место другое неравенство:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} < K_n. \quad (30)$$

И в случае (29), и в случае (30) ошибка в определении механических потерь больше, чем при условии (28). При этом необходимо отметить, что рассчитанные по показаниям приборов (амперметра и вольтметра) механические потери всегда больше реального их значения на сумму электрических и магнитных потерь в испытуемом электродвигателе.

В современных мощных тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока, как правило, при длительном и часовом режиме выполняется условие (30). Но отклонение от условия (28) при этом незначительно. Для двигателей малой мощности с самовентиляцией и большой долей механических потерь отклонение от условия (28) при испытании с последовательным возбуждением может быть существенным.

Уменьшение ошибки в определении механических потерь в электродвигателях с большим коэффициентом магнитного насыщения и высокой долей магнитных потерь при номинальном режиме может быть достигнуто путём шунтирования обмотки возбуждения.

Наиболее точное определение механических потерь может быть обеспечено при независимом возбуждении электродвигателя путём выбора оптимального соотношения напряжения и тока якоря при испытании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тягове [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Проектирование тяговых электрических машин. [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
3. Афанасов, А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 59-62.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.
Принята к печати 31.03.2010.