

УСЛОВИЯ КОМПЕНСАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРИ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО СХЕМЕ ПОТЬЕ

Розглядаються умови компенсації магнітних і механічних втрат при випробуванні тягових електричних машин за схемою Пот'є.

Рассматриваются условия компенсации магнитных и механических потерь при испытании тяговых электрических машин по схеме Потье.

The conditions of compensation of magnetic and mechanical losses during the test of hauling electric machines according to the Potier's chart are considered.

Использование принципа взаимной нагрузки по схеме Потье [1, 2] для проведения испытаний тяговых электрических машин (ТЭД) постоянного и пульсирующего тока является перспективным направлением в решении общей задачи выбора рациональной структуры стенда для проведения испытаний ТЭД.

К преимуществам схемы Потье относится, прежде всего, наличие всего одного мощного источника электрической энергии невысокого напряжения, который компенсирует электрические, механические и магнитные потери в стенде. Применение одного источника для компенсации всех видов потерь при проведении испытаний дает возможность снизить себестоимость испытательного стенда и повысить к.п.д. самих испытаний [3].

Использование в схемах взаимной нагрузки ТЭД двух отдельных источников электрической или механической мощности для отдельной компенсации электрических, механических и магнитных потерь требует, как минимум, двукратного запаса мощности каждого из источников. Это связано с тем фактом, что при расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин происходит перераспределение потоков мощностей упомянутых источников при постоянстве их суммарной мощности, расходуемой на покрытие общих потерь.

Предварительные расчеты показывают, что при допустимом расхождении магнитных характеристик однотипных испытуемых ТЭД все суммарные потери мощности в стенде взаимной нагрузки могут покрываться мощностью только одного из источников (вольтодобавочной машины, линейного генератора, приводного двигателя).

Учитывая высокую вероятность возникновения переходных процессов в испытательной схеме, указанные источники должны иметь запас по мощности более чем двукратный.

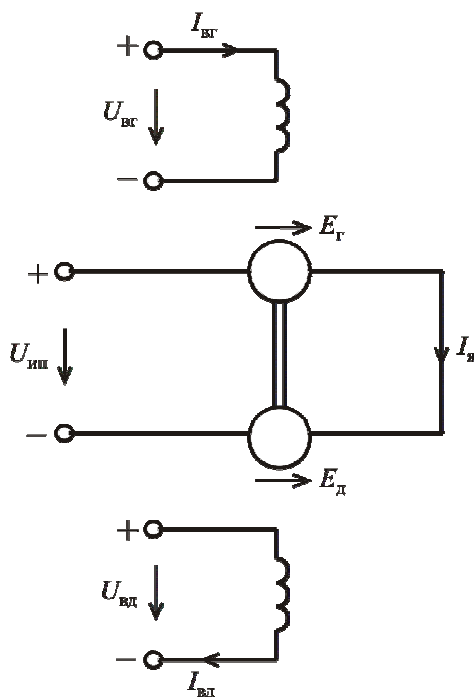


Рис. 1

Компенсация электрических потерь в схеме взаимной нагрузки по принципу Потье (рис. 1) обеспечивается подведением внешнего напряжения к последовательно соединенным якорным цепям электромашин, которое компенсирует падение напряжения в общей цепи при протекании тока.

Компенсация механических и магнитных потерь происходит путем предварительного преобразования в электромашине-двигателе части электрической мощности источника в

механическую мощность. Обязательным условием обеспечения такой компенсации является превышение электромагнитной мощности испытуемой электромашины-двигателя $P_{\text{эмд}}$ над электромагнитной мощностью электромашины-генератора $P_{\text{эмг}}$:

$$P_{\text{эмд}} > P_{\text{эмг}}. \quad (1)$$

При этом суммарные механические и магнитные потери обеих испытуемых электромашин при установившемся режиме работы схемы представляет собой разность их электромагнитных мощностей:

$$\sum \Delta P_{\text{м}} = P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}}. \quad (2)$$

С электромеханической точки зрения условие вращения испытуемых машин может быть представлено в виде общего уравнения баланса моментов, соответствующего установившемуся режиму работы схемы:

$$\sum \Delta M = M_{\text{эмд}} - M_{\text{эмг}}, \quad (3)$$

где $\sum \Delta M$ – суммарные потери моментов двигателя и генератора, обусловленные вращением их роторов;

$M_{\text{эмд}}$, $M_{\text{эмг}}$ – электромагнитные моменты испытуемых двигателя и генератора, соответственно.

Нарушение равенства (3) будет указывать на наличие переходного процесса в механической части испытательного стенда. При условии, когда суммарные потери момента будут больше разности электромагнитных мощностей двигателя и генератора, угловое ускорение их валов будет отрицательным, и частота вращения якорей будет снижаться. При условии, когда суммарные потери момента будут меньше разности электромагнитных мощностей двигателя и генератора, угловое ускорение их валов будет положительным, и частота вращения якорей будет увеличиваться. В течение времени переходного процесса небалансный механический момент на валах электромашин будет компенсироваться суммарным моментом инерции их якорей.

Общие потери моментов испытуемых электромашин представляют собой сумму

$$\sum \Delta M = \Delta M_{\text{д}} + \Delta M_{\text{г}}, \quad (4)$$

где $\Delta M_{\text{д}}$, $\Delta M_{\text{г}}$ – потери моментов двигателя и генератора, соответственно.

Электромагнитные моменты испытуемых двигателя и генератора могут быть определены в виде:

$$M_{\text{эмд}} = C_{\text{мд}} \cdot \Phi_{\text{д}} \cdot I_{\text{я}}; \quad (5)$$

$$M_{\text{эмг}} = C_{\text{мг}} \cdot \Phi_{\text{г}} \cdot I_{\text{я}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{мд}}$, $C_{\text{мг}}$ – конструктивные постоянные двигателя и генератора соответственно;

$\Phi_{\text{д}}$, $\Phi_{\text{г}}$ – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;

$I_{\text{я}}$ – общий ток якорей испытуемых электромашин.

Объединив (3) – (6), получим уравнение баланса моментов для установившегося режима вращения якорей испытуемых электромашин в виде

$$\Delta M_{\text{д}} + \Delta M_{\text{г}} = (C_{\text{мд}} \Phi_{\text{д}} - C_{\text{мг}} \Phi_{\text{г}}) \cdot I_{\text{я}}. \quad (7)$$

Для однотипных электромашин можно принять конструктивные постоянные $C_{\text{мд}}$ и $C_{\text{мг}}$ одинаковыми, равными $C_{\text{м}}$.

Тогда уравнение (7) получим в виде

$$\Delta M_{\text{д}} + \Delta M_{\text{г}} = C_{\text{м}} \cdot \Delta \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (8)$$

где $\Delta \Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}$ – разность магнитных потоков испытуемых электромашин.

Рассмотрим условия обеспечения номинальной нагрузки тяговых электромашин последовательного возбуждения при испытаниях по схеме Потье. Сам принцип работы данной схемы обеспечивает возможность установки одинакового для испытуемых электромашин номинального значения тока якоря $I_{\text{н}}$:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}}.$$

Установление значения тока возбуждения, равным номинальному току якоря при проведении прямо-сдаточных испытаний является условием, обязательным для той электромашины, которая будет работать двигателем, и для которой согласно требованиям к испытаниям определяется номинальное значение частоты вращения якоря.

Установление номинальных значений токов возбуждения для обеих однотипных испытуемых электромашин невозможно вообще по принципу работы самой схемы Потье. Однако существует три возможных варианта соотношения этих токов, рациональных с точки зрения адекватности результатов температурных

испытаний, наиболее важных и энергоемких из общего перечня приемосдаточных испытаний.

Вариант «а»:

$$\begin{cases} I_{\text{вд}} = I_{\text{н}}; \\ I_{\text{вг}} < I_{\text{н}}. \end{cases} \quad (9)$$

Вариант «б»:

$$\begin{cases} I_{\text{вг}} = I_{\text{н}}; \\ I_{\text{вд}} > I_{\text{н}}. \end{cases} \quad (10)$$

Вариант «в»:

$$\begin{cases} I_{\text{вд}} > I_{\text{н}}; \\ I_{\text{вг}} < I_{\text{н}}. \end{cases} \quad (11)$$

Вариант «а» является наиболее рациональным с точки зрения обеспечения номинальных значений параметров испытуемой электромашины-двигателя. Ток возбуждения двигателя устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения генератора – меньшим номинального. При этом обмотка возбуждения электромашины – генератора недогружена по току на величину

$$\Delta I_{\text{вг}} = I_{\text{н}} - I_{\text{вг}}. \quad (12)$$

При варианте «б» ток возбуждения генератора устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения двигателя – большим номинального. Этот вариант характерен тем, что обмотка возбуждения электромашины-двигателя перегружена по току на величину

$$\Delta I_{\text{вд}} = I_{\text{вд}} - I_{\text{н}}. \quad (13)$$

При варианте «в» ток возбуждения двигателя устанавливается несколько большим его номинального значения, а ток генератора – меньшим номинального. Обмотка возбуждения генератора недогружена, а обмотка возбуждения двигателя при этом перегружена по току относительно номинального значения $I_{\text{н}}$ на величины, определяемые формулами (12) и (13), соответственно. При этом каждое из значений $\Delta I_{\text{вг}}$ и $\Delta I_{\text{вд}}$ приблизительно вдвое меньше, чем в вариантах «а» и «б». Наиболее рациональным для данного варианта будет обеспечение равенства отклонений от номинального значения токов возбуждения двигателя и генератора $\Delta I_{\text{вд}}$ и $\Delta I_{\text{вг}}$, соответственно.

Окончательный выбор распределения токов возбуждения двигателя и генератора относи-

тельно номинального значения будет определяться тем, какая из обмоток испытуемой электромашины является лимитирующей по условиям нагрева.

Для электродвигателей, у которых лимитирующей является обмотка возбуждения, рациональным будет вариант «а». Для электродвигателей, у которых лимитирующей является одна из обмоток якорной цепи, рациональным будет вариант «б».

Вариант «в» будет компромиссным решением для электромашин, у которых обмотки якорной цепи и обмотка возбуждения находится в приблизительно одинаковых условиях по нагреву.

Графически принцип каждого из перечисленных возможных вариантов обеспечения компенсации механических и магнитных потерь показан на рис. 2 – 4.

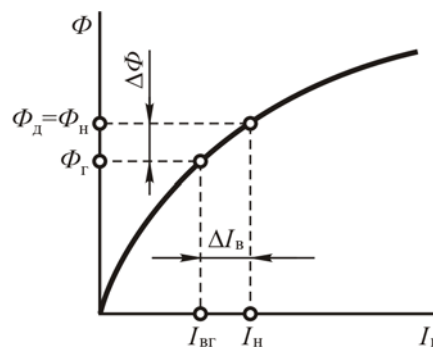


Рис. 2. Вариант «а»

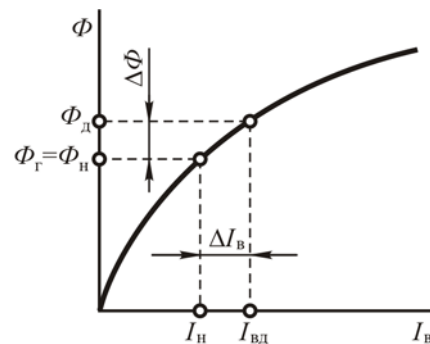


Рис. 3. Вариант «б»

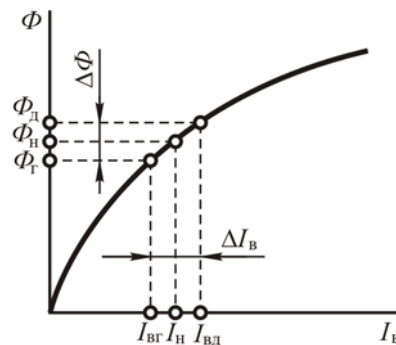


Рис. 4. Вариант «в»

Разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, обеспечивающая компенсацию потерь моментов электромашин по формуле (8), для каждого их приведенных вариантов определяется разностью токов возбуждения $\Delta I_{\text{в}}$ и местом положения точки, соответствующей номинальному режиму, на кривой намагничивания $\Phi = f(I_{\text{в}})$.

Для номинального режима значение $\Delta\Phi$ по формуле (8) может быть определено в виде

$$\Delta\Phi_{\text{н}} = \frac{\Delta M_{\text{д}} + \Delta M_{\text{г}}}{C_{\text{м}} I_{\text{н}}}. \quad (14)$$

Строго говоря, магнитные потери мощности и момента в генераторе при испытаниях по схеме Потье должны быть меньше, чем в двигателе в связи с меньшим значением магнитного потока. Однако самые общие предварительные расчеты показывают, что в тяговых электрических машинах с коэффициентом полезного действия не менее 0,9 это различие не будет превышать 10 %. При этом суммарные потери, связанные с вращением роторов электромашин (механические и магнитные) будут отличаться не более, чем на 5 %, которыми можно пренебречь. В связи с вышесказанным формулу (14) можно записать в упрощенном виде

$$\Delta\Phi_{\text{н}} = \frac{2\Delta M_{\text{н}}}{C_{\text{м}} I_{\text{н}}}, \quad (15)$$

где $\Delta M_{\text{н}}$ – механические и магнитные потери момента одной электромашин в номинальном режиме.

Поделив левую и правую часть уравнения (15) на номинальное значение магнитного потока $\Phi_{\text{н}}$, после преобразований получим

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}} = \frac{2\Delta M_{\text{н}}}{M_{\text{эмн}}}, \quad (16)$$

где $M_{\text{эмн}}$ – номинальное значение электромагнитного момента электромашин.

Это же выражение может быть записано в виде соотношения мощностей

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}} = \frac{2\Delta P_{\text{мн}}}{P_{\text{эмн}}}, \quad (17)$$

где $\Delta P_{\text{мн}}$ – механические и магнитные потери мощности в одной электромашине при номинальном режиме;

$P_{\text{эмн}}$ – номинальная электромагнитная мощность одной электромашин.

Таким образом, разность магнитных потоков однотипных электромашин, испытываемых по

схеме Потье, приведенная к номинальному магнитному потоку, равна удвоенным механическим и магнитным потерям электромашин в номинальном режиме, приведенным к её номинальной электромагнитной мощности.

Обозначим:

$$K_{\Delta\Phi} = \frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}} \text{ – относительная разность магнитных потоков;}$$

$$K_{\Delta M} = \frac{\Delta P_{\text{мн}}}{P_{\text{эмн}}} \text{ – относительные механические и магнитные потери;}$$

$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{\text{в}}}{I_{\text{н}}} \text{ – относительная разность токов возбуждения электромашин.}$$

Согласно (17), связь между данными коэффициентами имеет вид:

$$K_{\Delta\Phi} = 2K_{\Delta M}. \quad (18)$$

Значение коэффициента $K_{\Delta\Phi}$, необходимое для создания условий компенсации механических и магнитных потерь, будет определяться значением $K_{\Delta I}$ и коэффициентом магнитного насыщения испытываемых электромашин. По универсальной магнитной характеристике [4] могут быть определены универсальные зависимости $K_{\Delta I}$ от $K_{\Delta M}$ для ТЭД.

Такие универсальные характеристики, полученные для ряда значений коэффициента магнитного насыщения, могут быть использованы при выборе основных параметров источников мощности и регуляторов вновь проектируемых стендов взаимной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. Коварский, Е. М. Испытание электрических машин [Текст] / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Афанасов, А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 258-262.
4. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

Поступила в редколлегию 04.08.2009.

Принята к печати 19.08.2009.