

КОМПЕНСАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПО СХЕМЕ ГОПКИНСОНА

Розглядаються умови компенсації електричних втрат при випробуванні тягових електричних двигунів за схемою Гопкінсона.

Рассматриваются условия компенсации электрических потерь при испытании тяговых электрических двигателей по схеме Гопкинсона.

The conditions of compensation of electric losses at the test of hauling electric engines by the Hopkinson's scheme are considered.

Необходимость в модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин требует предварительного решения одного из основных вопросов – какой должна быть сама принципиальная схема стенда взаимной нагрузки.

Замена электромашинных преобразователей, используемых в настоящее время на большинстве испытательных станций в качестве вольтодобавочных машин и линейных генераторов, на статические преобразователи без решения задачи оптимизации структуры стенда будет нерациональной.

Известен целый ряд схем взаимной нагрузки электромашин постоянного тока [1, 2], многие из которых имеют определенные преимущества перед наиболее распространенной, упомянутой выше схемой испытания тяговых электродвигателей с использованием вольтодобавочной машины и линейного генератора.

Многие из хорошо известных схем взаимной нагрузки до настоящего времени не рассматривались проектировщиками испытательных станций в связи со сложностью ручного управления режимами их работы. При внедрении систем автоматического регулирования, без которых не проектируется ни одна современная испытательная станция, этот недостаток устраняется.

Одной из наиболее интересных для испытания по методу взаимной нагрузки тяговых электродвигателей является схема Гопкинсона, в которой компенсация всех видов потерь мощности осуществляется одним источником механической мощности (рис. 1).

Механические и магнитные потери в данной схеме компенсируются непосредственно ис-

точником механической мощности без преобразования, что и является одним из ее преимуществ перед другими известными схемами.

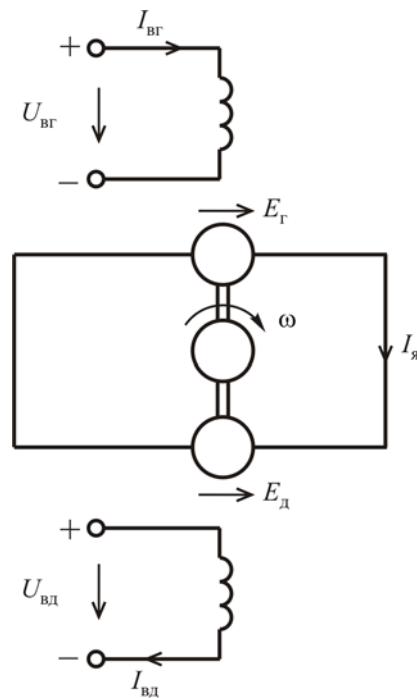


Рис. 1

Здесь следует отметить, что в качестве источников механической мощности, как правило, используются электрические двигатели постоянного или переменного тока, которые, по сути, сами являются электромашинными преобразователями мощности.

Однако, существуют варианты использования в схеме Гопкинсона нерегулируемого асинхронного привода, обеспечивающего как высокий к.п.д. преобразования, так и стабилизацию частоты вращения испытуемых электромашин без применения специальных средств

автоматического управления. Такая конфигурация схемы испытания делает ее конкурентоспособной с другими схемами, в которых не используются электромашинные преобразователи.

Компенсация электрических потерь при взаимной нагрузке по схеме Гопкинсона осуществляется тем же источником механической мощности, что и магнитные и механические потери. При этом происходит преобразование механической энергии источника в электрическую энергию в испытываемой электромашине-генераторе.

Условием компенсации электрических потерь является превышение электромагнитной мощности генератора $P_{эмг}$ над электромагнитной мощностью двигателя.

$$P_{эмг} > P_{эмд}. \quad (1)$$

При этом суммарные электрические потери двигателя и генератора представляют собой разность

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

С электромеханической точки зрения, условие протекания тока якорей электромашин $I_я$ может быть представлено в виде баланса напряжений в замкнутом контуре схемы при установившемся режиме

$$I_я \sum R = E_г - E_д, \quad (3)$$

где $\sum R$ – суммарное сопротивление контура;

$E_г$, $E_д$ – электродвижущие силы генератора и двигателя соответственно.

Суммарное сопротивление контура без учета сопротивления соединяющих проводов представляет собой сумму

$$\sum R = R_{яд} + R_{яг}, \quad (4)$$

где $R_{яд}$, $R_{яг}$ – сопротивления якорных цепей двигателя и генератора, соответственно.

Электродвижущие силы испытываемых двигателя и генератора:

$$E_д = C_д \cdot \Phi_д \cdot \omega; \quad (5)$$

$$E_г = C_г \cdot \Phi_г \cdot \omega, \quad (6)$$

где $C_д$, $C_г$ – конструктивные постоянные двигателя и генератора, соответственно;

$\Phi_д$, $\Phi_г$ – магнитные потоки двигателя и генератора, соответственно;

ω – угловая скорость валов электромашин.

Объединив формулы (3) – (6), получим уравнение баланса напряжений для установившегося режима в виде

$$I_я (R_{яд} + R_{яг}) = (C_г \cdot \Phi_г - C_д \cdot \Phi_д) \cdot \omega. \quad (7)$$

Для однотипных электромашин при условии, что $C_г = C_д = C$, получим это же уравнение в виде

$$I_я (R_{яд} + R_{яг}) = C \cdot \Delta \Phi \cdot \omega. \quad (8)$$

где $\Delta \Phi = \Phi_г - \Phi_д$ – разность магнитных потоков испытываемых электромашин.

Рассмотрим условия создания номинальной нагрузки тяговых электрических двигателей последовательного возбуждения при их испытании по схеме Гопкинсона (см. рис. 1).

Одноконтурность цепи, включающей в себя якорные обмотки (цепи) испытываемых электромашин, обеспечивает условие равенства якорных токов, которые при определенных условиях могут поддерживаться равными номинальному значению $I_н$.

Равенство токов якорей и возбуждения является необходимым условием испытания тяговых электродвигателей последовательного возбуждения при определении номинальной частоты вращения якоря, по крайней мере, для электромашин, работающей двигателем.

Установление одинаковых токов возбуждения обеих испытываемых электромашин невозможно в принципе в связи с неработоспособностью данной схемы при таких условиях.

Рассмотрим три возможных варианта соотношения токов возбуждения тяговых электродвигателей, обеспечивающих компенсацию электрических потерь мощности при взаимной нагрузке по схеме Гопкинсона.

Вариант «а»:

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

Вариант «б»:

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

Вариант «в»:

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

При варианте «а» ток возбуждения генератора устанавливается равным номинальному значению, а ток возбуждения двигателя – меньше номинального. При этом электромашин-генератор работает в номинальном режиме, а обмотка возбуждения двигателя недогружена по току на величину

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

Вариант «б» является наиболее рациональным с точки зрения возможности обеспечения номинального режима работы электромашин-двигателя. Ток возбуждения двигателя устанавливается равным номинальному значению, а ток возбуждения генератора – большим номинального.

При этом варианте обмотка возбуждения генератора будет перегружена по току на величину

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

В варианте «в» ток возбуждения генератора устанавливается большим номинального значения, а ток возбуждения двигателя – меньше номинального.

Обмотка возбуждения двигателя недогружена, а обмотка возбуждения генератора перегружена по току относительно номинального значения $I_{\text{н}}$ на величины, определяемые формулами (12) и (13), соответственно. При этом каждые из значений $\Delta I_{\text{вг}}$ и $\Delta I_{\text{вд}}$ меньше, чем в вариантах «а» и «б».

Наиболее рациональным для данного варианта будет обеспечение равенства отклонений токов возбуждения двигателя $\Delta I_{\text{вд}}$ и генератора $\Delta I_{\text{вг}}$, соответственно.

Окончательный выбор распределения токов возбуждения двигателя и генератора относительно номинального значения будет определяться тем, какая из обмоток испытуемой электромашин 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».

Графически принцип каждого из вариантов компенсации электрических потерь в рассматриваемой схеме взаимной нагрузки показан на рис. 2 – 4.

Разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, обеспечивающая компенсацию электрических потерь

за счет дополнительной электромагнитной мощности генератора по формуле (8), для каждого из рассмотренных вариантов определяется разностью токов возбуждения $\Delta I_{\text{в}}$ и местом положения точки номинального режима на кривой намагничивания $\Phi = f(I_{\text{в}})$.

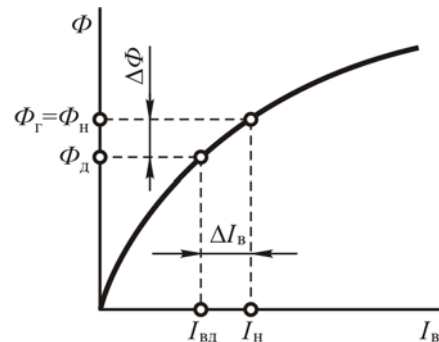


Рис. 2. Вариант «а»

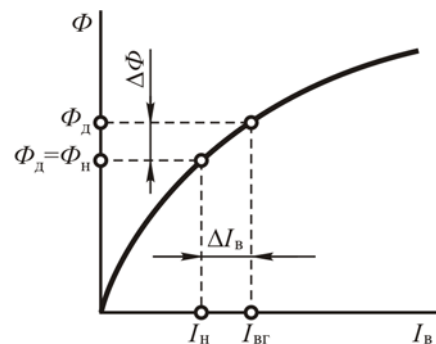


Рис. 3. Вариант «б»

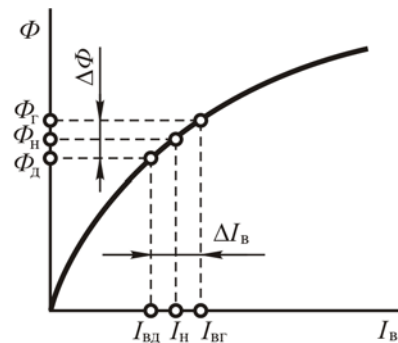


Рис. 4. Вариант «в»

Для универсальной кривой намагничивания положение этой точки будет определяться значением коэффициента магнитного насыщения соответствующего режима.

При смещении режима испытания по кривой намагничивания в сторону насыщения, для одной и той же разности магнитных потоков будет соответствовать большая разница токов возбуждения и наоборот.

Для номинального режима значение $\Delta\Phi$ будет определено в виде

$$\Delta\Phi_n = \frac{I_y(R_{яд} + R_{яг})}{C \cdot \omega_n}. \quad (14)$$

Если принять сопротивления якорных цепей однотипных испытуемых электромашин одинаковыми, равными R_y , то формулу (14) можно упростить к виду

$$\Delta\Phi_n = \frac{2I_{ян} \cdot R_y}{C \cdot \omega_n}. \quad (15)$$

Поделив левую и правую часть уравнения (15) на номинальное значение магнитного потока Φ_n , после преобразований получим выражение для определения относительной разности магнитных потоков, приведенной к номинальному значению

$$\frac{\Delta\Phi_n}{\Phi_n} = \frac{2I_{ян} \cdot R_y}{E_n}, \quad (16)$$

где E_n – электродвижущая сила электромашин, соответствующая номинальному режиму испытания.

Если числитель и знаменатель правой части уравнения (16) умножить на $I_{ян}$, то это же выражение после преобразований может быть записано в виде

$$\frac{\Delta\Phi_n}{\Phi_n} = \frac{2\Delta P_{эн}}{P_{эмн}}, \quad (17)$$

где $\Delta P_{эн}$ – электрические потери мощности в электромашине при работе в номинальном режиме;

$P_{эмн}$ – номинальная электромагнитная мощность однотипных испытуемых электромашин.

Таким образом, при проведении испытаний электрических машин по схеме Гопкинсона разность магнитных потоков испытуемых однотипных генератора и двигателя, приведенная к номинальному магнитному потоку, равна удвоенным электрическим потерям мощности, приведенным к номинальной электромагнитной мощности.

Здесь необходимо отметить, что электрические потери мощности в испытуемых электромашинках являются функциями температуры их обмоток и растут с течением времени испытания.

Следовательно, по мере проведения испытаний по данной схеме величина $\Delta\Phi_n$ при условии постоянства тока якорей ($I_{ян}$) будет рас-

ти пропорционально изменению сопротивления якорных цепей испытуемых электромашин.

Обозначим:

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

$$K_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{эн}}{P_{эмн}} \text{ – относительные электрические}$$

потери.

Согласно (17), связь между данными коэффициентами выглядит как

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

Коэффициент $K_{\Delta\Phi}$ будет определять относительную разность токов возбуждения испытуемых электромашин $K_{\Delta I}$ (приведенную к номинальному току возбуждения), обеспечивающую компенсацию электрических потерь мощности при испытаниях

$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_B}{I_n}. \quad (19)$$

Причем, необходимая относительная разность токов возбуждения испытуемых электромашин будет определяться как значением $K_{\Delta\Phi}$, так и коэффициентом магнитного насыщения в номинальном режиме или другом режиме, соответствующем условиям проведения испытаний.

Такие зависимости могут быть рассчитаны для всех типов тяговых двигателей по их магнитным характеристикам. По универсальной магнитной характеристике [3] могут быть рассчитаны универсальные зависимости упомянутых выше параметров.

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. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

Поступила в редколлегию 21.07.2009.

Принята к печати 30.07.2009.