

## УДК 656.224.022.846

А. М. АФАНАСОВ – д. т. н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, afanasof@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4609-2361

С. В. АРПУЛЬ – к.т.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, arpul@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3698-2627

А. С. ШАПОВАЛОВ – аспирант, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, sssanya1993@ukr.net

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОВЕДЕНИЕ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Главным направлением повышения энергетических показателей станций для испытания тяговых электрических машин должно быть уменьшение количества и минимизация суммарной мощности преобразователей, используемых в схеме взаимной нагрузки. Выполнение этого требования при выборе варианта схемы взаимной нагрузки является необходимым условием достижения высокой экономической эффективности модернизации существующих испытательных станций.

Определение полезной мощности источников испытательного стенда, необходимой для проведения испытаний, представляет собой отдельную задачу, решение которой позволит оценить энергетическую эффективность того или иного варианта испытательной станции [1].

Программа приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока в соответствии с требованиями ГОСТ 2582-81 включает в себя следующие мероприятия [2]:

- измерение сопротивления обмоток в практически холодном состоянии;
- испытание на нагревание;
- проверка частоты вращения и реверсирования;
- испытание на повышенную частоту вращения;
- проверка коммутации;

- испытание электрической прочности изоляции обмоток (межвитковой, относительно корпуса, между собой);
- проверка биения коллектора;
- измерение сопротивления изоляции обмоток (относительно корпуса, между собой);
- проверка уровня вибрации.

Отдельно рассмотрим те пункты программы приёмо-сдаточных испытаний, которые требуют нагружения испытуемых электрических машин.

Режим 1. Испытание на нагревание. Тепловые испытания являются самым энергоёмким мероприятием из всего перечня программы приёмо-сдаточных испытаний. Целью данных испытаний является определение превышения температуры перегрева частей тяговой электромашины в часовом режиме работы. В соответствии с ГОСТ 8582-81 электрические машины постоянного и пульсирующего тока испытывают при номинальном напряжении и часовом токе в течение одного часа.

При тепловых испытаниях электрических двигателей номинальное значение напряжения и часовое значение тока устанавливаются на испытуемой электрической машине, работающей на стенде в режиме двигателя.

$$U_{\partial} = U_n ;$$

$$I_{\delta} = I_{\eta},$$

где  $U_{\delta}$ ,  $I_{\delta}$  – напряжение и ток испытуемого двигателя соответственно;  $U_{н}$  – номинальное напряжение испытуемых электромашин;  $I_{\eta}$  – часовой ток испытуемых электромашин.

Суммарная полезная мощность источников энергии (электрической или механической) стенда взаимной нагрузки определяется по формуле

$$\sum P_u = U_{\delta} I_{\delta} (1 - \eta_{\delta}) + U_{\epsilon} I_{\epsilon} (1 - \eta_{\epsilon}),$$

где  $U_{\epsilon}$ ,  $I_{\epsilon}$  – напряжение и ток испытуемого генератора соответственно;  $\eta_{\delta}$ ,  $\eta_{\epsilon}$  – к. п. д. испытуемых двигателя и генератора соответственно.

При упрощенных оценочных расчетах можно использовать формулу

$$\sum P_u = 2U_{\delta} I_{\delta} (1 - \eta),$$

где  $\eta$  – к. п. д. однотипных испытуемых электромашин.

Мощность  $\sum P_u$  изменяется в течение времени испытаний в связи с повышением сопротивления обмоток электромашин при нагревании, соответствующим увеличением электрических потерь и снижением к. п. д.

Максимальное значение суммарной полезной мощности источников испытательного стенда в конце тепловых испытаний в упрощенном виде будет определяться как

$$\sum P_{u1\max} = 2U_{н} I_{\eta} (1 - \eta_{\eta}),$$

где  $\eta_{\eta}$  – часовое значение мощности к. п. д.

В соответствии с ГОСТ 183-74 для электрических машин постоянного тока мощностью свыше 50 кВт допускается отклонение к. п. д., соответствующее превышению общих потерь на 10 %, что соответствует уменьшению к. п. д. на величину  $0,1(1 - \eta_{н})$ . Тогда минимально допустимое

возможное значение к.п.д. тяговой электромашин будет определяться как

$$\eta_{\min} = 1,1\eta_{\eta} - 0,1.$$

При этом выражение для максимальной суммарной полезной мощности источников испытательного стенда примет вид

$$\sum P_{u1\max} = 2,2U_{н} I_{\eta} (1 - \eta_{\eta}).$$

Суммарная полезная энергия источников, затрачиваемая на проведение тепловых испытаний, будет определяться в виде

$$\sum Q_{u1} = 2U_{н} I_{\eta} \left[ t_{u1} - \int_0^{t_{u1}} \eta(t) dt \right],$$

где  $\eta(t)$  – к.п.д. электромашин в функции времени;  $t_{u1}$  – длительность тепловых испытаний (3600 с).

Режим 2. Проверка частоты вращения и реверсирования. Целью данных испытаний является проверка тяговых электромашин на соответствие требованиям ГОСТ 2582-81 в части допусков отклонений частоты вращения в номинальном режиме от типового значения номинальной частоты вращения.

Выполнение данной проверки требует измерение частоты вращения якоря при номинальных значениях напряжения, тока и степени возбуждения в двигательном режиме работы испытуемой электромашин

$$\begin{cases} U_{\delta} = U_{н}; \\ I_{\delta} = I_{н}; \\ \beta = \beta_{н}, \end{cases}$$

где  $I_{н}$  – номинальное типовое значение тока испытуемой электромашин (часовой или длительный ток);  $\beta_{н}$  – номинальное значение систем возбуждения.

Для выполнения проверки частоты вращения и реверсирования необходима возможность взаимного изменения режимов работы испытуемых электромашин (двигатель-генератор), а также направления их вращения.

Проверка частоты вращения и реверсирования в соответствии с ГОСТ 2582-81 проводится на нагретой электрической машине. Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда при этой проверке определяется формулой

$$\sum P_{u2} = 2,2U_n I_n (1 - \eta_n),$$

где  $\eta_n$  – к.п.д. в номинальном режиме.

Суммарная полезная энергия источников, расходуемая на проверку

$$\sum Q_{u2} = 2U_n I_n \left[ t_{u2} - \int_0^{t_{u2}} \eta(t) dt \right],$$

где  $t_{u2}$  – длительность проверки частоты вращения и реверсирования.

При данной проверке обмотки электромашин продолжают нагреваться и, строго говоря, для определения значения  $\sum Q_{u2}$  необходимо определение зависимости  $\eta(t)$  в течение времени  $t_{u2}$ . В упрощённом виде формула для  $\sum Q_{u2}$  может быть представлена при условии постоянства  $\eta$  как

$$\sum Q_{u2} = \sum P_{u2} \cdot t_{u2}.$$

Режим 3. Испытание на повышенную частоту вращения. Целью данных испытаний является проверка работоспособности электрической машины после непродолжительного (2 минуты) вращения на холостом ходе с частотой, превышающей наибольшее её типовое значение на 20, 25 или 35%.

Для тяговых двигателей электропоездов и электропоездов переменного тока, питающихся от выпрямительной установки, включенных параллельно, испытательная повышенная частота вращения

$$n_{u1} = 1,25n_{\max},$$

где  $n_{\max}$  – наибольшая типовая частота вращения.

Для тяговых двигателей электропоездов и электропоездов постоянного тока и электровозов двойного питания, постоянно попарно соединённых последовательно, испытательная частота вращения

$$n_{u2} = 1,35n_{\max}.$$

Для вспомогательных электрических машин постоянного тока

$$n_{u3} = 1,2n_{\max}.$$

Испытательная повышенная частота вращения для тяговых двигателей электропоездов постоянного тока, спроектированных до 1981 г., определяется в виде

$$n_{u1} = 1,25n_{\max}.$$

Учитывая то, что испытания на повышенную частоту вращения проводят при холостом ходе, величины напряжения и тока определяются в основном механическими потерями и магнитной характеристикой испытуемых электромашин.

Суммарная полезная мощность источников энергии испытательного стенда при данной проверке

$$\sum P_{u3} = \Delta P_{\text{мехд}} + \Delta P_{\text{мехг}},$$

где  $\Delta P_{\text{мехд}}$  и  $\Delta P_{\text{мехг}}$  – механические потери испытуемых двигателя и генератора соответственно при повышенной частоте вращения.

При упрощённых расчетах можно использовать формулу

$$\sum P_{u3} = 2\Delta P_{\text{мех}}(n_u),$$

где  $\Delta P_{\text{мех}}(n_u)$  – механические потери в однотипных испытуемых электрических машинах, соответствующие испытательной частоте вращения  $n_u$  по типовым характеристикам механических потерь.

Значение  $\Delta P_{\text{мех}}(n_u)$  для тяговых двигателей с независимой вентиляцией может быть в 2-3 раза больше суммарных потерь при номинальном режиме. Механические потери, соответствующие повышенной частоте вращения, в двигателях с самовенти-

ляцией на порядок выше этих же потерь в номинальном режиме.

Суммарная полезная энергия источников стенда, расходуемая на испытание повышенной частотой вращения

$$\sum Q_{u3} = \sum P_{u3} \cdot t_{u3},$$

где  $t_{u3}$  – длительность испытания на повышенную частоту вращения (120 с).

Режимы 4 - 6. Проверка коммутации. Проверка коммутации является той частью программы приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин, которая в сравнении с испытаниями на нагрев требует существенной перегрузки источников испытательного стенда по току, напряжению, моменту и частоте вращения (для источников механической мощности). Целью данных испытаний является определение работоспособности щёточно-коллекторного узла электрической машины при перегрузках по напряжению, току, частоте вращения, искажающему действию реакции якоря.

При проверке коммутации тяговых электрических двигателей постоянного тока ГОСТом 2582-81 предусмотрено три режима испытания. При проверке коммутации вспомогательных машин – два режима.

Выполнение проверки коммутации по каждому из режимов 1, 2, 3, 8 (ГОСТ 2582-82) проводится визуальная оценка степени искрения (не более  $1\frac{1}{2}$ ) при вращении электромашин в течение 30 с в каждом направлении, а также последствий самого искрения (возникновение кругового огня, остаточные деформации, повреждения коллектора и щеточного узла).

Выполнение проверки коммутации вспомогательных машин в режиме 9 предусматривает ту же визуальную оценку степени искрения и его последствий при пятикратном пуске, способом, соответствующим работе на электроподвижном составе.

Рассмотрим каждый из упомянутых режимов отдельно.

Режим 4. Проверка в режиме 4 выполняется при номинальном напряжении, двойном часовом токе и номинальной степени возбуждения:

$$\begin{cases} U_d = U_n; \\ I_d = 2I_q; \\ \beta = \beta_n. \end{cases}$$

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для каждого режима будет определяться в виде

$$\sum P_{u4} = 4U_n I_q (1 - \eta_4),$$

где  $\eta_4$  – значение к. п. д. однотипных испытуемых электрических двигателей в режиме 4.

Учитывая то, что значение к.п.д.  $\eta_4$  не является типовым параметром испытуемых электромашин, для данного режима может быть более удобной в использовании формула

$$\sum P_{u4} = 2 \left[ 4I_q^2 R_{\text{гор}} + \Delta P_{\text{хх4}} \right],$$

где  $R_{\text{гор}}$  – сопротивление обмоток в горячем состоянии;  $\Delta P_{\text{хх4}}$  – потери холостого хода в режиме 4.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Частота вращения сама является функцией тока якоря при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

$$\Delta P_{\text{хх4}} = \Delta P_{\text{хх}}(n_1, 2I_q) \text{ при } I_{\text{в4}} = I_{\text{в}}(2I_q, \beta_n).$$

$$n_4 = n_{\text{хх}}(2I_q) \text{ при } U = U_n; \beta = \beta_n.$$

Ток возбуждения в режиме 4

$$I_{\text{в4}} = 2\beta_n I_q.$$

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда

$$\sum Q_{u4} = \sum P_{u4} \cdot t_{u4},$$

где  $t_{u4}$  – длительность испытания в режиме 4.

Режим 5. Проверка в режиме 5 выполняется при наибольшем напряжении, наибольшей частоте вращения и наименьшей степени возбуждения:

$$\begin{cases} U_{\delta} = U_{\max}; \\ n = n_{\max}; \\ \beta = \beta_{\min}. \end{cases}$$

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для режима 5

$$\sum P_{u5} = 4U_{\max} I_5 (1 - \eta_5),$$

где  $I_5$ ,  $\eta_5$  – значения тока и к. п. д. в режиме 5 соответственно.

Ни значение тока  $I_5$ , ни к. п. д.  $\eta_5$  не являются типовыми параметрами испытуемых электромашин. Поэтому более удобной в использовании может быть формула

$$\sum P_{u5} = 2[4I_5^2 R_{zop} + \Delta P_{xx5}],$$

где  $\Delta P_{xx5}$  – потери холостого хода в режиме 5.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Ток является функцией частоты вращения при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

$$\Delta P_{xx5} = \Delta P_{xx}(n_{\max}, I_5) \text{ при } I_{\delta 5} = I_{\delta}(I_5, \beta_{\min}).$$

$$I_5 = I(n_{\max}) \text{ при } U_{\delta} = U_{\max}; \beta = \beta_{\min}.$$

Ток возбуждения в режиме 5

$$I_{\delta 5} = \beta_{\min} I_5.$$

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда

$$\sum Q_{u5} = \sum P_{u5} \cdot t_{u5},$$

где  $t_{u5}$  – длительность испытания в режиме 5.

Режим 6. Проверка в режиме 6 выполняется при наибольшем напряжении,

наибольшем пусковом токе и наименьшей степени возбуждения:

$$\begin{cases} U_{\delta} = U_{\max}; \\ I_{\delta} = I_{\max}; \\ \beta = \beta_{\min}. \end{cases}$$

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для режима 6

$$\sum P_{u6} = 2U_{\max} I_{\max} (1 - \eta_6),$$

где  $\eta_6$  – значение к. п. д. в режиме 6.

Значение к.п.д.  $\eta_6$  не является типовым параметрам испытуемых электромашин. Поэтому более удобной в использовании может быть формула

$$\sum P_{u6} = 2[I_{\max}^2 R_{zop} + \Delta P_{xx6}],$$

где  $\Delta P_{xx6}$  – потери холостого хода в режиме 6.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Частоты вращения является функцией тока при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

$$\Delta P_{xx6} = \Delta P_{xx}(n_6, I_{\max}) \text{ при}$$

$$I_{\delta 6} = I_{\delta}(I_{\max}, \beta_{\min}).$$

$$n_6 = n(I_{\max}) \text{ при } U = U_{\max}; \beta = \beta_{\min}.$$

Ток возбуждения в режиме 6

$$I_{\delta 6} = \beta_{\min} I_{\max}.$$

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда

$$\sum Q_{u6} = \sum P_{u6} \cdot t_{u6},$$

где  $t_{u6}$  – длительность испытания в режиме 6.

В качестве энергетического показателя качества послеремонтных испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки может быть использован коэффициент энергетической эффективности испытаний, равный отношению полных потерь энергии в испытуемых электромашин-

нах к общим затратам электроэнергии на проведение испытаний.

Необходимо отметить, что сумма потерь мощностей в испытуемых электромашинах (электрические, магнитные, механические потери) является полезной мощностью, затрачиваемой на проведение испытаний. Это те потери, которые не зависят, или, по крайней мере, не должны зависеть ни от структуры испытательной системы, ни от характеристик источников, регуляторов, и преобразователей. Более того, условия проведения испытаний должны обеспечивать полное соответствие характеров энергетических процессов в электромашинах в условиях испытаний и реальной эксплуатации. Суммарные потери мощности в преобразователях и регуляторах являются потерями, связанными с обеспечением испытаний, и должны быть минимизированы путем структурной оптимизации системы взаимного нагружения.

### Библиографический список

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. [Текст] – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст]/ Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. -50с.

**Ключові слова:** взаємне навантаження, тяговий двигун, енергозбереження, статичний перетворювач.

**Ключевые слова:** взаимное нагружение, тяговый двигатель, энергосбережения, статический преобразователь.

**Keywords:** mutual load, traction motor, energy saving, static converter.

### Рецензенты:

д.т.н., проф. А. М. Муха,  
д.т.н., проф. А.Б. Бойник.

Поступила в редколлегию 12.10.2018.

Принята к печати 24.10.2018.