

А.В. Шаповалов

(Украина, Днепрпетровск, Национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна)

ВЛИЯНИЕ ДОПУСКОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА КАЧЕСТВО КОММУТАЦИИ

В настоящее время остро стоит вопрос о продолжении срока службы всех видов подвижного состава, в том числе и тягового подвижного состава. В связи с этим возникает задача о продлении срока службы тяговых электрических машин при обеспечении необходимой надежности их работы. Требуемый уровень надежности двигателя должен быть обеспечен при минимальных затратах во время изготовления и проведения их капитальных ремонтов. Очевидно, что при увеличении сроков службы тяговых двигателей необходимо корректировать действующие правила их ремонта, а при изготовлении двигателей обеспечить рациональные значения их чертежных параметров для обеспечения рационального сочетания надежности и стоимости их изготовления и ремонта.

Известно, что для двигателей постоянного тока проблема их коммутации является особо актуальной с точки зрения надежности. Для разработки рекомендаций по корректировке правил ремонта тяговых двигателей при увеличении срока их службы необходимо провести соответствующие теоретические и экспериментальные исследования.

Случайные изменения параметров узлов и деталей по отношению к их расчетным значениям неизбежно возникают в процессе изготовления и сборки машины. В результате может оказаться, что или при необоснованно назначенных допусках, или при неблагоприятном их сочетании для узлов и деталей, влияющих на коммутацию, последняя может ухудшиться, а в отдельных случаях стать недопустимой.

В данной статье исследовано влияние значений допусков для деталей только магнитной цепи добавочных полюсов тяговых двигателей НБ-511 на качество коммутации. Фактические показатели работы контакта щетка-коллектор зависят от реальных, а не от расчетных значений элементов двигателя.

Уделим внимание лишь электромагнитным причинам, которые вызывают искрение в результате разрыва добавочного поперечного тока коммутации. Этот ток $i_{доб}$ возникает в короткозамкнутой коммутируемой секции под действием небалансной ЭДС D_e , представляющей собой остаточную величину после взаимодействия реактивной e_p и коммутационной ЭДС. Последняя наводится в контуре коммутируемой секции полем добавочных полюсов (ДП).

Поскольку коммутационная ЭДС есть ЭДС вращения, то согласно закону Фарадея она пропорциональна индукции в зоне коммутации B_k , которая, в свою очередь, определяется состоянием магнитной цепи ДП.

Таким образом, любые отклонения от расчетных в размерах участков магнитной цепи ДП, вызванные наличием технологических допусков, т.е. от-

клонением от расчетного значения величины $e_k \sim B_k$, неизбежно повлекут за собой возникновение $De, i_{доб}$.

Добавочный поперечный ток коммутации [2]

$$i_{доб} = \frac{(e_p - e_k) + k_p \cdot e_p}{r_{щ} + r_c}, \quad (1)$$

где $r_{щ}$ – сопротивление контактов щетка-коллектор; r_c – сопротивление секции обмотки якоря.

Коэффициент для данного типа двигателя $k_p = 0,18$ [2].

Сопротивление $r_{щ}$ зависит от падения напряжения DU в двух переходных слоях контакта щетка-коллектор и может быть в первом приближении принят равным 2 В [1].

Щеточное перекрытие в нашем случае $g = 5,2$ [5].

Величина $r_{щ}$ равна [2]:

$$r_{щ} = \frac{DU}{I_{щ}} \cdot g, \quad (2)$$

где $I_{щ}$ – ток одного щеткодержателя; g – щеточное перекрытие.

Для суждения о допустимости той или иной величины небалансной ЭДС воспользуемся предложенным А.Б.Иоффе критерием в виде фактора искрения Φ_u [2].

$$\Phi_u = \left(\frac{0,4}{D_k} \right)^{1,5} \frac{L_c \cdot i_{доб}^2 \cdot v_k}{2t_k \cdot L_{щ}}, \quad (3)$$

где D_k – диаметр коллектора, м; $L_{щ}$ – длина щеток одного щеткодержателя, м; L_c – индуктивность коммутируемой секции, Гн; v_k – окружная скорость коллектора, м/с; t_k – коллекторное деление, м.

Принимаем $I = 3,7$ [5]. Значение L_c согласно работе [3]:

$$L_c = 2 \cdot I \cdot l_{я} \cdot w_c^2 \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где $l_{я}$ – длина пакета железа якоря, м; I – магнитная проводимость потоку рассеяния; w_c – число витков в секции.

Расчетный размер воздушного зазора между ДП и якорем составляет 5мм. Согласно технологической документации допускается отклонение по высоте

сердечника ДП $\pm 0,15$ мм. Допуск на расточку остова под полюсами составляет $\pm 0,2$ мм на диаметр якоря $\pm 0,2$ мм. Кроме того, возможно отличие в размерах диэлектрических прокладок во «втором» воздушном зазоре между ДП и станиной. Согласно ГОСТ 12652-74 [6] каждая диэлектрическая прокладка имеет соответствующие отклонения от чертежных размеров, и в нашем случае они составляют $\pm 0,3$ мм. Учитывая эти факторы, воздушный зазор может изменяться в пределах $5 \pm 0,85$ мм. Статистические данные, собранные автором, показывают, что воздушный зазор может изменяться в более широких пределах.

Магнитная индукция в зоне коммутации:

$$B_k = \frac{\Phi_k}{l_y \cdot b_{zk}}, \quad (5)$$

где Φ_k – магнитный поток в зоне коммутации, Вб; b_{zk} – ширина зоны коммутации, м;

Коммутационная ЭДС согласно работе [3] определяется как:

$$e_k = 2l_y \cdot w_c \cdot v_y, \quad (6)$$

где v_y – окружная скорость якоря, м/с.

Относительную долю магнитного сопротивления участков воздушных зазоров ДП a_i можно представить в виде отношения ампер-витков (падения МДС) данных участков к общему падению МДС в магнитной цепи ДП.

$$a_i = \frac{(WI)_i}{\sum_1^n WI} = \frac{F_i}{\sum_1^n F_i}, \quad (7)$$

где F_i – МДС i -го участка; n – количество участков магнитной цепи.

Магнитная цепь добавочных полюсов тяговых двигателей выполняется ненасыщенной. В случае номинального режима, можно пренебречь падениями магнитных напряжений в стали участков сердечника добавочного полюса, ярма остова, ярма якоря и зубцов якоря из-за их малости.

Тогда

$$F_d = F_{aq} - F_{ko} + F_{dd} + F_{dj}, \quad (8)$$

где F_d – МДС добавочного полюса; F_{dd} – падение магнитного напряжения в «первом» воздушном зазоре; F_{dj} – падение магнитного напряжения во «втором» воздушном зазоре; F_{ko} – МДС компенсационной обмотки; F_{aq} – МДС якоря в зоне коммутации.

Согласно (7)

$$a_{dd} = \frac{F_{dd}}{F_d - F_{aq} + F_{ko}} = \frac{F_{dd}}{F_{dd} + F_{dj}}, \quad (9)$$

где a_{dd} – относительная доля магнитного сопротивления участка “первого” воздушного зазора под ДП.

Относительная доля магнитного сопротивления участка “второго” воздушного зазора под ДП:

$$a_{dj} = \frac{F_{dj}}{F_d - F_{aq} + F_{ko}} = \frac{F_{dj}}{F_{dd} + F_{dj}}. \quad (10)$$

Поскольку падение МДС на всех участках (кроме воздушного зазора) незначительное, по сравнению с падением МДС в зазоре, то в соответствии с формулой о дисперсии функции n -мерных независимых случайных величин, можно записать в первом приближении относительное отклонение магнитного потока $S_{\Phi_{ko}}$ в зоне коммутации в виде:

$$S_{\Phi_{ko}}^2 = a_{dd}^2 S_{d_{do}}^2 + a_{dj}^2 S_{d_{jo}}^2. \quad (11)$$

где $S_{d_{do}}$ – относительный допуск на величину “первого” воздушного зазора под ДП; $S_{d_{jo}}$ – относительный допуск на величину “второго” воздушного зазора под ДП.

$$S_{d_{do}} = \frac{S_{d_d}}{d_d}, \quad (12)$$

$$S_{d_{jo}} = \frac{S_{d_j}}{d_j}, \quad (13)$$

где d_d, d_j – номинальные значения “первого” и “второго” воздушных зазоров под ДП; S_{d_d}, S_{d_j} – возможные отклонения “первого” и “второго” воздушных зазоров под ДП.

Отсюда магнитный поток в зоне коммутации с учетом возможных отклонений значений зазоров

$$\Phi_{kS} = \Phi_k \pm \Phi_k \cdot S_{\Phi_{ko}}. \quad (14)$$

Используя вышеизложенное, при значении воздушного зазора под ДП $d_d = 5,85$ мм получим

$$a_{dd} = \frac{F_{dd}}{F_{dd} + F_{dj}} = \frac{590}{590 + 534} = 0,525,$$

$$a_{dj} = \frac{F_{dj}}{F_{dd} + F_{dj}} = \frac{534}{590 + 534} = 0,475.$$

В соответствии с формулой (11) относительное отклонение магнитного потока в зоне коммутации:

$$s_{\Phi_{\kappa}} = \sqrt{0,525^2 \cdot \left(\frac{0,85}{5}\right)^2 + 0,475^2 \left(\frac{0,3}{5}\right)^2} = 0,098.$$

Магнитный поток в зоне коммутации согласно формуле (14):

$$\Phi_S = 2,49 \cdot 10^{-3} - 2,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,098 = 2,246 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Индукция в зоне коммутации согласно формуле (5):

$$B_{\kappa} = \frac{2,246 \cdot 10^{-3}}{0,43 \cdot 0,046} = 0,114 \text{ Тл.}$$

Тогда в соответствии с формулами (6), (1) и (3):

$$e_{\kappa} = 0,114 \cdot 2 \cdot 0,43 \cdot 1 \cdot 26 = 2,53 \text{ В;}$$

$$i_{\text{доб}} = \frac{(2,78 - 2,53) + 0,18 \cdot 2,78}{0,065 + 2,87 \cdot 10^{-3}} = 11 \text{ А;}$$

$$\Phi_u = \left(\frac{0,4}{63}\right)^{1,5} \frac{3,19 \cdot 10^{-6} \cdot 10,7 \cdot 2210}{2 \cdot 0,384 \cdot 4} = 0,14.$$

Из характеристики, приведенной в работе [2], находим степень искрения, которая равна $1\frac{1}{2}$ балла.

При $d_d = 4,15$ мм $i_{\text{доб}} = -4,6$, $\Phi_u = 0,025$. Степень искрения при этом составит 1 балл.

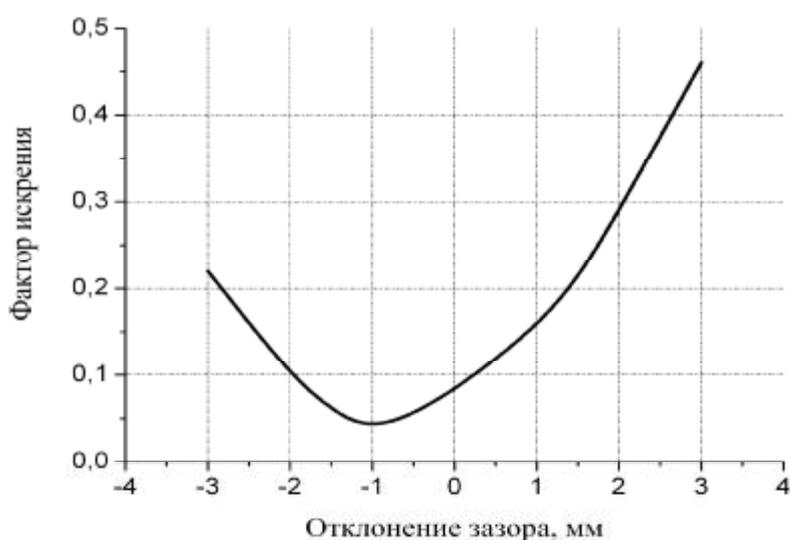
Результаты влияния величины воздушного зазора под ДП на значение фактора искрения и соответствующей степени искрения двигателя НБ-511 при разных отклонениях зазора показаны в таблице:

Отклонение воздушного зазора (мм)	Добавочный поперечный ток коммутации (А)	Фактор искрения	Степень искрения (баллы)
-----------------------------------	--	-----------------	--------------------------

+0,85	10,66	0,13	$\frac{1}{4}$
-0,85	-4,4	0,023	1
+1,5	13,4	0,21	от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$
-1,5	-7,15	0,06	больше 1
+2	15,54	0,29	от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$
-2	-9,3	0,1	$\frac{1}{4}$
+3	19,9	0,46	больше $\frac{1}{2}$
-3	-13,6	0,22	больше $\frac{1}{4}$

По данным таблицы построим зависимость $\Phi_u = f(d_d)$.

Как видно из графика, в случае отклонения воздушного зазора в большую сторону, степень искрения может превысить допустимые нормы. В случае перегрузочных режимов это влияние сказывается еще сильнее, т.к. e_p не полностью компенсируется полем ДП ввиду насыщения магнитной цепи ДП. Уменьшение воздушного зазора под ДП, т.е. перекомпенсация, сказывается менее пагубно на процесс коммутации, чем недокомпенсация. Однако при этом также может возникнуть искрение.



Аналогичные исследования могут быть проведены и для двигателей других типов. Однако проведенные исследования не учитывают некоторых факторов, например, влияние пульсации тока на качество коммутации и т.п. Но в первом приближении полученный результат (зависимость $\Phi_u = f(d_d)$) может быть применен при корректировке правил ремонта двигателей типа НБ-511 при их ремонте и определении рационального значения воздушного зазора при изготовлении двигателей.

Список литературы

1. Безрученко В.М., Варченко В.К., Чумак В.В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
2. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 232 с.
3. Проектирование тяговых электрических машин/Под ред. М.Д. Находкина. Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
4. Исаев И.П. Допуски на характеристики электрических локомотивов. – М.: Транспорт, 1958. – 369 с.
5. Расчетная записка для тягового двигателя НБ-511. НЭВЗ, 1982.
6. ГОСТ 12652-74Е. Стеклотекстолит электротехнический листовой.