

УДК 621. 313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ТОКОСЪЁМА УНИПОЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, А.К. Надкин

По сравнению с классическими машинами постоянного тока в униполярной электрической машине (УЭМ) отпадает необходимость в коллекторе, что существенно упрощает конструкцию. Однако вопрос выбора токосъёмного аппарата является одним из ключевых. Рассматривается проблема выбора токосъёмного аппарата УЭМ. Проведён анализ и сравнение различных типов токосъёмов, а именно системы из щёток и контактных колец, токосъёма на основе жидкого металла и катящегося токосъёма. Наибольшее внимание уделяется катящемуся токосъёму, приводятся рекомендации по определению контактного сопротивления катящихся тел. Обоснован выбор материалов контактирующих электродов. Для достижения поставленной цели были проведены расчёты, а также создан опытный макет, на котором были проведены натурные эксперименты. Приведены схема макета и описание экспериментов. В результате была выбрана конструкция с катящимися медными роликами.
Ключевые слова: униполярная электрическая машина, токосъём, контактное сопротивление.

Униполярная электрическая машина (УЭМ) – это электромеханический преобразователь энергии, особенностью которого является неизменность направления протекания магнитного потока по магнитопроводу. УЭМ делятся на два типа: с дисковым и с цилиндрическим ротором. При вращении ротора в магнитном поле в его обмотке возникают ЭДС. Токосъёмный аппарат позволяет получать напряжение на выводах и подключать к ним нагрузку. В этом случае УЭМ работает в режиме генератора. Если в цепь ротора подать ток, то взаимодействие этого тока с магнитным потоком приводит к возникновению механических сил, однонаправленного электромагнитного момента и вращению ротора. По сравнению с классическими машинами постоянного тока в УЭМ отпадает необходимость в коллекторе, что существенно упрощает конструкцию. Однако вопрос выбора токосъёмного аппарата является одним из ключевых.

Обычно токосъём в УЭМ бывает двух типов: система из щёток и контактных колец и жидкометаллический токосъём. Ввиду протекания в обмотке ротора токов, достигающих значений в десятки и сотни кА, применение обычных угольных или графитовых щёток не является целесообразным, так как они допускают весьма ограниченные плотности тока, составляющие приблизительно 30 А/см^2 . Искрение и низкая механическая надёжность приводят к большим потерям и быстрому выходу из строя. Поэтому возникла необходимость разработки щёток с повышенными плотностями тока. Известно, что при металлизации угольных волокон тонким слоем металла значительно улучшаются характеристики щёток. Угольная нить имеет диаметр 7 мкм , а слой серебра около $0,7 \text{ мкм}$. Основная идея состоит в том, что в щётках, изготовленных из нитей, получается значительно большее число мест контактов по сравнению

с цельными щётками. Это позволяет увеличить плотность тока и уменьшить падение напряжения. В качестве результатов можно указать на плотность тока 90 А/см^2 при окружной скорости контактного кольца до 20 м/с и падение напряжения $0,1 \text{ В}$ для отрицательной щётки и $0,3 \text{ В}$ для положительной. Есть основания полагать, что можно достичь плотности тока $100 - 150 \text{ А/см}^2$. К достоинствам щёток из угольных нитей следует также отнести малое давление, требующееся для их работы. Оно составляет $0,07 \text{ кг/см}^2$, что позволяет уменьшить потери на трение [2]. Однако, при больших токах, свойственных УЭМ, число щёток в подвижном контакте велико, и трудно обеспечить равномерное распределение тока между ними из-за особенностей проводимости скользящего контакта. Это обстоятельство приводит к перегрузке отдельных щёток и выводу их из строя, поэтому надёжность работы больших групп щёток невысока. Для улучшения работы щёточного аппарата применяют обдув и водяное охлаждение, но эти меры не дают радикального решения проблемы щёточного токосъёма [1].

Преодоление недостатков щёточного контакта возможно с помощью токосъёма на основе жидкого металла. В биполярных машинах постоянного тока его применение принципиально исключается, так как жидкий металл замкнул бы накоротко пластины коллектора. В УЭМ контактная поверхность якоря эквипотенциальна. При жидкостном токосъёме пространство между твёрдыми электродами заполнено расплавленным металлом, покрывающим всю кажущуюся поверхность контакта. Благодаря хорошему смачиванию металлический или квазиметаллический контакт создаётся по всей поверхности [1]. В качестве жидких металлов могут применяться сплавы Na-K, In-Hg, Ga-In, Ga-In-Sn.

К сожалению, все указанные металлы имеют определённые недостатки. Натрий не допускает присутствия влаги, ртуть токсична, галлий является и токсичным и коррозионным. Поэтому в системе с жидкометаллическим токосъёмом должны быть исключены попадания кислорода и течи в область с жидким металлом. Обычно в качестве жидкого металла используется сплав Na-K, а защитной средой служит азот. Исследования показали, что в процессе работы жидкий металл может постепенно трансформироваться в порошкообразный материал. Это особенно проявляется в случае применения сплава Ga-In. Разработка жидкометаллического токосъёма вызывает значительные трудности, так как исследования должны охватывать металлургические и химические явления, а также вопросы надёжности. Также необходимо получить возможность размещения жидкого металла в зоне больших магнитных полей. Сложность конструкции, дороговизна и технологические особенности ограничивают область их применения [2].

В качестве альтернативы рассмотренным выше системам токосъёмов возможно применение системы из катящихся зубчатых колёс или гладких металлических цилиндров, которые дешевле и конструктивно проще по сравнению с жидкометаллическими и надёжнее по сравнению со щёточными. Главным вопросом при рассмотрении данных систем является контактное сопротивление в точке касания электродов, которое необходимо учитывать для правильного выбора материала электродов. Контактное сопротивление обусловлено «плёнками потускнения» (или примесными пленками), состоящими из оксидов, сульфидов металла, водных соединений, адсорбированных газов и т. д.

Эти плёнки появляются при соприкосновении электрода с окружающей атмосферой. По своей физической природе они являются диэлектриками или полупроводниками и обуславливают падение напряжения, как правило, превосходящее по величине падение напряжения во всём электроде. Кроме того, поверхности твёрдых электродов даже при тщательной обработке не являются идеально гладкими, на них имеются выступы, бугорки, шероховатости. Вследствие этого соприкосновения двух твёрдых электродов происходит не по всей кажущейся геометрической площади, а лишь в ряде отдельных точек, по которым и проходит электрический ток через контакт. Величина контактного сопротивления зависит от удельного давления на электроды, поскольку при увеличении давления разрушаются в отдельных местах покровные плёнки, возрастает количество точек соприкосновения электродов.

Разрушение плёнок приводит к возникновению местного металлического контакта между электродами. Но даже при отсутствии такого контакта плёнки допускают прохождение электрического тока за счёт собственной проводимости, зависящей от физической природы плёнок.

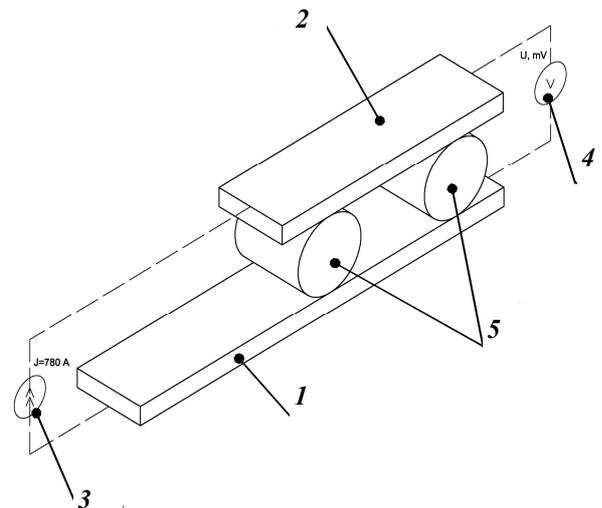


Рис. 1. Схема установки: 1 – основание; 2 – платформа; 3 – источник тока; 4 – вольтметр; 5 – ролики

Современная теория даёт в основном качественные и частично количественные предпосылки для определения контактного сопротивления. Немалую роль в этом процессе играют экспериментальные данные. Это объясняется сложностью физических процессов в электрическом контакте и зависимостью их от большого числа внешних факторов. Основные положения теории неподвижного контакта могут быть распространены на случай относительного перемещения электродов. Области через которые происходит контакт твёрдых электродов называются α -пятнами. В этих областях материал электродов при контактном давлении достигает границы текучести. При подключении к электродам напряжения создаётся эффект стягивания тока к α -пятнам и ток распределяется неравномерно в плоскости контактного перехода. При отсутствии металлического контакта в областях стягивания проводимость создаётся контактными эффектами. Различают следующие три эффекта.

Туннельный эффект, или прохождение микрочастицы (электрона) сквозь потенциальный барьер, т. е. сквозь область пространства на границе электродов, в которой потенциальная энергия частицы больше её полной энергии. Туннельный эффект возникает при контактном давлении, достаточном

для уменьшения толщины покровных плёнок до мономолекулярной. Проводимость контактного перехода имеет электронный характер. Приложенное к электродам напряжение создаёт электрическое поле, уменьшающее потенциальный барьер для электронов у поверхности металла, обеспечивая проводимость контакта.

Эффект смятия (квэтч-эффект), т. е. образование при относительно больших контактных давлениях трещин и щелей в плёнках, когда между электродами возникают металлические мостики.

Фриттинг-эффект, т. е. образование металлических мостиков под действием высоких напряжённостей электрического поля в плёнках (порядка 10^8 в/м), обуславливающих электрический пробой плёнок, затем тепловой пробой и оплавление электродов в контактных областях стягивания [1].

Для определения сопротивления контактов используют эмпирическую формулу:

$$R_k = K_0 / (0,102 \cdot P)^n, \quad (1)$$

где n – показатель степени, $n=0,3 - 0,8$; K_0 – коэффициент, зависящий от материала из которого изготовлены контакты (табл. 1).

Для обоснованного выбора материалов контактирующих электродов был создан макет, состоящий из платформы, катящейся на роликах по неподвижному основанию.

Схема установки представлена на рис. 1. Между основанием 1 и платформой 2 с помощью источника тока 3 пропускался постоянный ток, значение которого составляло 780 А. Измерения напряжения между основанием и платформой проводились с помощью вольтметра 4. Далее по закону Ома для участка цепи рассчитывалось сопротивление. В качестве материала роликов 5 использовались медь, алюминий и латунь, в качестве материала платформы – медь и алюминий.

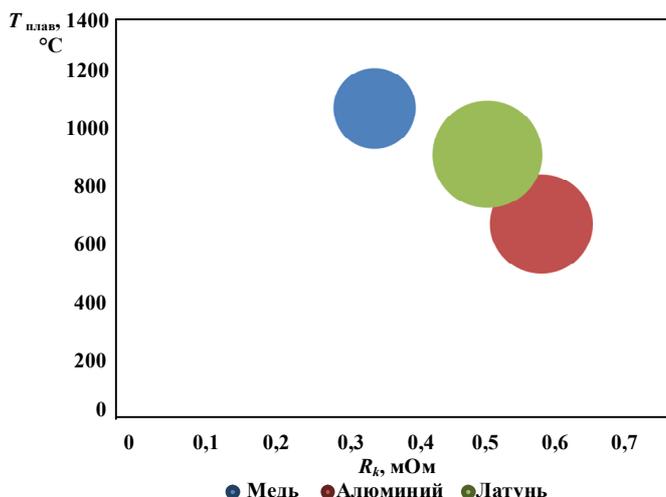


Рис. 2. Итоговая диаграмма

Таблица 1

Значения коэффициента K_0 [3]	
Материал	K_0 , мкОм/Н ⁿ
Медь	400
Серебро	60
Латунь	670
Алюминий	4000

Эксперименты проводились для различных сочетаний материалов роликов и платформы, для случаев покоящейся и движущейся платформы, а также для сухих и смазанных контактов. Результаты экспериментов сведены в табл. 2 и 3.

С помощью программы FEMM были рассчитаны сопротивления роликов для алюминия меди и латуни. Их значения соответственно составили 2,729, 1,738 и 6,31 мкОм. Поскольку в системе находятся два одинаковых цилиндра, включённых параллельно, то общие сопротивления цилиндров составляют половины указанных. Можно увидеть, что эти сопротивления в три порядка меньше полных сопротивлений системы.

Таблица 2

Результаты измерений контактного сопротивления

Материал оснований	Материал роликов	$R_{рок}$, мкОм (сухие контакты) за $T=1$ мин	$R_{рок}$, мкОм (сухие контакты) за $T=10$ мин	$R_{рок}$, мкОм (контакты со смазкой) за $T=1$ мин	$R_{рок}$, мкОм (контакты со смазкой) за $T=10$ мин
Алюминий	Алюминий	0,323	0,221	0,251	0,187
Алюминий	Медь	0,326	0,336	0,109	0,076
Алюминий	Латунь	0,169	0,136	0,233	0,156
Медь	Алюминий	0,185	0,167	0,109	0,076
Медь	Медь	0,024	0,023	0,018	0,013
Медь	Латунь	0,054	0,048	0,039	0,036

Таблица 3

Результаты измерений контактного сопротивления

Материал оснований	Материал роликов	R_{dvg} , мкОм (сухие контакты) за $T=1$ мин	R_{dvg} , мкОм (сухие контакты) за $T=10$ мин	R_{dvg} , мкОм (контакты со смазкой) за $T=1$ мин	R_{dvg} , мкОм (контакты со смазкой) за $T=10$ мин
Алюминий	Алюминий	0,551 – 0,590	0,564 – 0,590	0,615 – 0,628	0,590 – 0,603
Алюминий	Медь	0,590	0,577 – 0,590	0,308 – 0,333	0,346 – 0,372
Алюминий	Латунь	0,538 – 0,564	0,538 – 0,564	0,500 – 0,538	0,500 – 0,538
Медь	Алюминий	0,551 – 0,577	0,564 – 0,590	0,308 – 0,333	0,346 – 0,372
Медь	Медь	0,153 – 0,156	0,180 – 0,205	0,141 – 0,154	0,180 – 0,205
Медь	Латунь	0,231 – 0,244	0,282 – 0,295	0,205 – 0,218	0,256 – 0,282

Принимая во внимание то, что сопротивления платформы и основания очень малы, можно считать полученные в таблицах значения сопротивлений равными контактному сопротивлению

На рис. 2 приводится сравнение медных алюминиевых и латунных роликов, где величина точки соприкосновения соответствует значению предела прочности материала.

Нетрудно заметить, что наиболее предпочтительным материалом является медь, так как у неё наименьшее значение контактного сопротивления, наибольшая температура плавления при сравнительно таком же, как и у остальных материалов пределе прочности.

Выводы

1. В ходе анализа литературы, было установлено, что вопрос выбора токосъёмного аппарата является одним из ключевых и требует глубокого изучения.

2. Для обоснованного выбора конструкции и материалов токосъёмного аппарата были проведены расчёты и натурные эксперименты, в результате которых была выбрана конструкция с катящимися медными роликами.

3. Полученные экспериментальные данные будут использоваться при проектировании УЭМ.

Литература

1. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъёмом / А. И. Бертинов, Б. Л. Алиевский. – М. – Л.: Энергия, 1966.
2. Глебов И. А., Лаверик Ч. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости / И. А. Глебов, Ч. Лаверик. – Л.: Наука, 1980.
3. Розанов Ю. К. Электрические и электронные аппараты. – 2-е изд., испр. и доп. / Ю. К. Розанов. – М.: Информэлектро, 2001.

Поступила в редакцию 07.10.2014

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, заместитель генерального директора, т. (495) 365-26-69.

Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, начальник отдела, т. (495) 366-26-44.

Александр Каренович Надкин, младший научный сотрудник, т. (495) 366-54-24.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

CONTACT RESISTANCE DETERMINATION FOR THE HOMOPOLAR ELECTRICAL MACHINE' CURRENT COLLECTION

V.IA. Gecha, A.B. Zakharenko, A.K. Nadkin

Comparing to the traditional DC – machines, homopolar electrical machines no longer require the commutator, which greatly simplifies its design. However, the question regarding the selection of the current collector comes first. The problem of its selection is being considered. Analysis and comparison of various current collectors' types have been made, i.e. the system of collectors and brushes, as well as the rolling current collectors and liquid metal-based current collectors. Most of attention is paid to the rolling current collector. Recommendations are given to determine contact re-

sistance of the rolling bodies. The selection of materials for contacting electrodes is justified. Calculations have been made in order to achieve the desired goal, and the prototype model has been created, which allowed the full-scaled experiments to be performed. Model layout and the experiments' descriptions are provided. Hence, the design with the rolling "copper rollers" has been selected.

Key words: Homopolar electrical machine, current collector, contact resistance.

References

1. Bertinov A. I., Alievskiy B. L. Homopolar electrical machines with the liquid-metal current collector / Bertinov A. I., Alievskiy B. L. – M. – L.: Energiia, 1966.
2. Glebov I. A., Laverik CH. Electrophysical problems of the superconductivity utilization / Glebov I. A., Laverik CH. – L.: Nauka, 1980.
3. Rozanov IU. K. Electrical and electronic devices. – 2nd edition, revised / Rozanov IU. K. – M: Informelectro, 2001.

Vladimir Iakovlevich Gecha, Ph. D. of Engineering, Deputy Director General, tel.: (495) 365-26-69.

Andrei Borisovich Zakharenko, Ph.D. of Engineering, Head of the Department, tel.: (495) 366-26-44.

Alexandr Korenovich Nadkin, junior research associate, tel.: (495) 366-54-24.

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*