

фазе, в околошовных зонах наблюдаются троостобейнитные структуры (рис. 5, в). Мелкие зерна феррита и перлита на участке нормализации (рис. 5, г) не свидетельствуют о большом перегреве этой зоны.

Таким образом, анализ проведенных исследований показывает, что сварка с импульсной подачей электродной проволоки является наиболее эффективной для получения сварных соединений легированных высокопрочных сталей с щелевой разделкой. При этом она обеспечивает:

- надежное сплавление кромок сварного соединения с щелевой разделкой и качественное формирование шва;
- стабильность управления переносом электродного металла на протяжении всего процесса сварки;
- стабильность качества формирования шва и механических свойств сварного соединения с высокой пластичностью;
- высокую работоспособность сварного соединения при работе изделия под нагрузками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. / Под ред. Э.Л. Макарова – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Повышение механических характеристик при сварке стали 30ХГСА // Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения: Матер. II Междунар. симп. – Минск, 2001. – С. 108–109.
4. Миходуй Л.И., Гончар А.К. Особенности сварки толстостенных конструкций из низколегированных высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. – 1990. – № 10. – С. 41–45.
5. Касаткин Б.С., Бреднев В.И., Царюк А.К., Николаенко В.П. Сварка под флюсом сталей 18Х2Н4МА, 38ХНЗМФА и 40ХН2МА // Автоматическая сварка. – 1993. – № 6. – С. 30–34.
6. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., Шпигунова О.И. Способы повышения трещиностойкости сварных соединений легированных сталей типа 30ХГСА // Технология машиностроения. – 2001. – № 1. – С. 35–39.
7. Походня И.К. Управление водородом в сварных соединениях сталей // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С. 23–27.
8. Тотальский Ю.Н., Новикова Д.П. О механизме предотвращения околошовных трещин при сварке закаливающихся сталей с использованием аустенитных материалов // Автоматическая сварка. – 1992. – № 2. – С. 21–25.
9. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука, 1994. – 108 с.
10. Елагин В.П., Снисарь В.В., Савицкий М.М., Гордань Г.Н., Васильев В.Г., Дорошенко Л.К. Химическая и структурная неоднородности в зоне сплавления низкоуглеродистой стали с аустенитным швом при сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. – 2001. – № 4. – С. 8–13.
11. Федько В.Т., Брунов О.Г. Управление процессом сварки при импульсной подаче электродной проволоки // Технология металлов. – 2000. – № 8. – С. 27–30.

УДК 621.313

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ

С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, Е.Н. Клыжко, О.С. Качин, В.Ю. Саблуков

Томский политехнический университет
E-mail: borovikov@tpu.ru

Рассмотрены пути обеспечения максимальных энергетических характеристик, минимизации расхода обмоточного провода, а также повышения ресурсных показателей и электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин с электронными системами.

Коллекторная электрическая машина является сложным электротехническим устройством, выходные показатели которого определяются множеством входных параметров конструктивного, технологического и эксплуатационного характера [1]. В этой связи ее проектирование является непростой инженерной задачей, включающей в себя различные стадии от формирования основных требований к изделию до его постановки на производство.

Все требования, предъявляемые к электрической машине, условно можно разделить на показатели

экономического, технико-экономического, технико-технологического характера, а также на ряд других классов, которые, как правило, связаны в той или иной мере с предыдущими группами показателей.

Поскольку обеспечить одновременное достижение максимумов всех показателей практически невозможно, то при проектировании электрических машин, обычно, прибегают к построению обобщенного параметра оптимизации как некоторой функции от выбранного множества исходных показателей [2].

Изложенные в [3, 4] технические решения, касающиеся электромагнитного состояния электрической машины, дают дополнительные возможности по улучшению ряда основных показателей коллекторных электрических машин малой мощности. При этом появляются такие входные факторы, как число катушек в секции и их распределение по пазам якоря, характер распределения магнитного поля под полюсами и другие, которые позволяют трансформировать выходные показатели электрических машин в том или ином направлении.

Понимание взаимосвязей предлагаемых технических решений с основными выходными показателями электрических машин может быть использовано как при модернизации выпускаемых изделий, так и в процессе проектирования новых образцов. Причем на стадии модернизации изделий, как правило, в качестве параметра оптимизации выбирается лишь один или несколько выходных показателей электрической машины, которые не удовлетворяют предъявляемым требованиям на рассматриваемом временном интервале. При этом в наиболее чистом виде проявляется связь того или иного выходного показателя электрической машины с входными параметрами, обусловленными используемым техническим решением, что позволяет оценить степень указанной взаимосвязи.

Рассмотрим основные направления совершенствования коллекторных электрических машин, которые могут быть достигнуты путем применения предложенных ранее новых технических решений в области электромагнитного состояния машин, таких как демпфированные обмотки якоря и индукторы с анизотропией магнитных свойств.

1. Обеспечение максимальных энергетических характеристик коллекторных электрических машин

Минимизация массогабаритных показателей электрических машин является одной из основных тенденций развития современного электромашиностроения. Это вызвано стремлением к экономии материалов на их производство, снижению массы и объемов конечных изделий, на которых устанавливаются электрические машины, повышению удобства пользования более компактными устройствами.

Указанные побудительные мотивы в полной мере присущи отраслям, выпускающим бытовые электротехнические изделия и электроинструменты, где повышенные требования к массогабаритным показателям изделий (а значит, в первую очередь, электрического привода) предъявляются как со стороны самих производителей, так и со стороны потребителей. Вместе с тем удельные мощностные показатели данных электрических машин являются одним из главных факторов, обуславливающих конкурентоспособность выпускаемых изделий.

Для достижения указанной цели в качестве электропривода используются коллекторные машины с высокими скоростями вращения, что вызывает существенное ухудшение качества коммута-

ции. Эта проблема еще более обостряется в случае, если питание электродвигателей осуществляется непосредственно от сети переменного тока, что обусловлено наличием некомпенсированной трансформаторной ЭДС в коммутируемом контуре [5].

Поэтому, зачастую, увеличение удельной мощности в машинах данного класса ограничивается недопустимо высокой степенью искрения под щетками, которое вызывает дополнительный нагрев коллектора, повышенное изнашивание элементов скользящего контакта и в ряде случаев превышение допустимого уровня радиопомех.

В этих условиях предложенные ранее новые технические решения, касающиеся обмотки якоря и конструкции индуктора, могут быть напрямую использованы для улучшения коммутации и, соответственно, повышения выходной мощности подобных электрических машин.

Так, например, применение демпфированной обмотки в электроприводе ПК 58.03-01 позволило снизить класс коммутации с $1\frac{1}{2}$ –2 до 1 балла [6]. Одновременно был повышен КПД электродвигателя при номинальном моменте на валу на 10,7 %. Кроме того, снятие ограничения по качеству коммутации позволило увеличить выходную мощность данного электродвигателя на 30 % (дальнейшее повышение нагрузки было ограничено предельной тепловой нагрузкой электродвигателя).

Следует отметить, что в коллекторных машинах без дополнительных полюсов существует дополнительная возможность увеличения удельной мощности, обусловленная повышенными коммутирующими свойствами демпфированных обмоток якоря. В данном типе машин удовлетворительная коммутация, как правило, достигается благодаря сдвигу щеток с нейтральной. При этом происходит ослабление основного магнитного потока за счет появляющейся продольной реакции якоря, что ведет к снижению полезной мощности электрической машины.

Применение демпфированных обмоток позволяет получать удовлетворительную коммутацию при меньших углах сдвига щеток с нейтральной, что сопровождается соответствующим повышением удельной мощности электрической машины.

Этому же способствует использование анизотропного индуктора, поскольку выравнивание результирующего магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины приводит к усилению положительной коммутирующей ЭДС, что позволяет дополнительно снижать угол сдвига щеток с геометрической нейтральной.

Кроме того, применение анизотропного индуктора снижает поперечную реакцию якоря и, соответственно, еще более увеличивает результирующий магнитный поток электрической машины.

Вместе с тем уменьшается и индуктивность якоря, что в машинах переменного тока эквивалентно повышению ЭДС вращения при заданных напряжении питания и величине нагрузки. Соот-

ветственно возрастает электромагнитная и выходная мощность электродвигателя.

Естественно, что увеличение интегральной величины магнитного потока и ЭДС вращения влияет на вид механической характеристики электрической машины, а это требует соответствующей корректировки ее обмоточных данных для достижения максимального увеличения выходной мощности.

Так, например, реализация указанных выше мероприятий в нереверсивном электродвигателе ИЭ-5713 без корректировки обмоточных данных привела к увеличению момента на валу на 16,7 % и снижению скорости вращения на 9,9 % [6], что не позволило в полной мере использовать заложенные в конструкции возможности по увеличению удельной мощности (она была увеличена лишь на 5,25 %). Для повышения скорости вращения данного электродвигателя до требуемого уровня и соответствующего увеличения выходной мощности необходимо снизить числа витков в его обмотках при одновременном повышении сечения обмоточного провода.

Подобная корректировка обмоточных данных была проведена в экспериментальном образце нереверсивного электродвигателя МА-2001, который был выполнен с демпфированной обмоткой на якоре, анизотропной магнитной системой индуктора и со сниженным сдвигом щеток с нейтрали на одно коллекторное деление. Число витков катушки обмотки возбуждения здесь было уменьшено со 100 до 92 при одновременном увеличении диаметра обмоточного провода с 0,9 до 0,95 мм, а число витков в секциях паза якоря снижено с 26 до 23 при одновременном повышении диаметра обмоточного провода с 0,63 до 0,67 мм.

Испытания данного образца электродвигателя показали, что при номинальной плотности тока он имеет больший КПД (на 3,78 %) и повышенную выходную мощность (на 10,8 %). Причем преимущества опытного образца в сравнении с базовым электродвигателем возрастали по мере увеличения нагрузки, поскольку он имеет более жесткую механическую характеристику [6].

Эффективность предложенных технических решений в плане повышения удельной мощности коллекторных электрических машин во многом определяется их исходным электромагнитным состоянием.

Так, например, в реверсивном электродвигателе для изделия МЭС-420ЭР применение демпфированной обмотки и анизотропного индуктора позволило повысить их КПД на 24 %. Здесь при одной и той же потребляемой мощности полезная мощность опытного образца также увеличена почти на 24 % [6]. Одновременно улучшена коммутация электрической машины.

Подобные результаты получены и на образцах нереверсивных электродвигателей МЭС-450ЭР, в которых были применены индукторы с анизотропией магнитных свойств. Величина КПД и полез-

ная мощность при номинальной нагрузке были повышены почти на 27 %.

В описанных выше образцах реверсивных электродвигателей изменение сдвига щеток с нейтрали не производилось и, соответственно, не осуществлялась корректировка их обмоточных данных. Одним из факторов, определяющих повышение удельной мощности электрических машин, явилось уменьшение пространственного угла сдвига между результирующим магнитным полем электродвигателя и вектором магнитодвижущей силы якоря, что обеспечило оптимальное взаимодействие магнитного поля и проводников с током обмотки якоря.

Повышение КПД, которое наблюдается в образцах электрических машин с предложенными конструкциями обмотки якоря и индуктора, позволяет снижать потребляемую мощность при заданной выходной мощности (в том случае, если не требуется увеличение последней). Например, в электродвигателе МЭС-420ЭР потребляемая мощность при номинальной нагрузке может быть снижена более чем на 10 %, а в электродвигателе МЭС-450ЭР – на 13 %.

Существенно уменьшаются потери мощности в модернизированных электродвигателях, что ведет к снижению перегрева обмоток и других их элементов, а это в свою очередь создает благоприятные условия для повышения надежности данных электрических машин. По приведенным выше результатам испытаний снижение мощности потерь в опытном образце электродвигателя МЭС-420ЭР составляло почти 22 %, а в экспериментальном образце электродвигателя МЭС-450ЭР – порядка 21 %. Это позволило снизить перегрев обмоток якоря и индуктора на 30 °С в сравнении с серийной машиной, что существенно облегчает тепловую загрузку изделия. При сохранении тепловой загрузки экспериментальных образцов электродвигателей на базовом уровне возможно увеличение их полезной мощности на 30...40 % относительно серийных изделий.

Таким образом, как с точки зрения повышения удельной мощности коллекторных электродвигателей, так и с позиций уменьшения энергопотребления и снижения перегрева их активных элементов целесообразно использование предложенных технических решений, позволяющих улучшать процесс коммутации секций обмотки якоря и создавать оптимальные условия для электромагнитного взаимодействия токового слоя обмотки якоря с магнитным полем машины.

2. Минимизация расхода обмоточного провода в коллекторных электрических машинах

Проблема экономии активных материалов электрических машин всегда являлась важной задачей в процессе их проектирования и производства. Особую значимость при этом имели мероприятия, приводящие к снижению потребления медных материалов на единицу изделия, поскольку они являются дорогостоящими и наиболее широко

применяемыми (в весовом отношении) в электрических машинах. В настоящее время эта задача становится еще более актуальной в связи с постоянным ростом стоимости, как коллекторной меди, так и медных обмоточных проводов.

Указанная проблема в определенной мере может также решаться путем применения демпфированных обмоток якоря и анизотропных конструкций индуктора. Это следует из возможности повышения удельной мощности электрических машин, в которых использованы данные технические решения.

Как отмечалось выше, увеличение выходной мощности в подобных конструкциях электрических машин может составлять 20 % и более. В результате объем их активных материалов может быть снижен при условии сохранения выходных параметров и тепловой загрузки на базовом уровне. При этом одновременно могут решаться задачи технологического характера. Так, например, в изделии ИЭ-5713 использование демпфированной обмотки якоря и анизотропного индуктора позволило снизить расход обмоточной меди якоря почти на 29 % [6], а относительное заполнение паза якоря – на 22,5 %.

Последнее обстоятельство существенно облегчило укладку обмотки в пазы якоря и повысило надежность ее электрической изоляции вследствие снижения механических воздействий, требуемых для закрытия пазов якоря, что обуславливает увеличение выхода годной продукции на операциях по изготовлению обмотки якоря.

В электродвигателе МЭС-450ЭР с анизотропным индуктором удалось уменьшить массу меди обмотки возбуждения почти на 30 % в сравнении с серийной машиной за счет снижения диаметра обмоточного провода с 0,355 до 0,315 мм. При этом рабочие характеристики опытного образца со сниженной массой обмотки возбуждения оставались выше соответствующих параметров базовой машины [6]. При номинальной потребляемой мощности КПД у опытного образца электродвигателя на 8,5...11,8 % больше в сравнении с серийной машиной, что свидетельствует о дополнительном резерве по снижению активных материалов в экспериментальном изделии. Перегрев обмотки возбуждения у опытной машины на 13 °С ниже, чем у серийной, а обмотки якоря – на 21 °С.

Таким образом, повышенные энергетические характеристики коллекторных машин с усовершенствованной активной зоной позволяют разрабатывать изделия с минимальным расходом активных электротехнических материалов, что улучшает их весовые показатели, делает продукцию дешевле и повышает ее конкурентоспособность.

3. Повышение ресурсных показателей коллекторных электрических машин и их электромагнитной совместимости с электронными системами

Улучшение процесса коммутации электрических машин с оптимизированной (посредством

предложенных технических решений [3, 4]) активной зоной влечет многократное снижение энергии искрения под щетками, что положительно влияет на характеристики изнашивания элементов коллекторно-щеточного узла, поскольку эрозионная составляющая изнашивания у напряженных в коммутационном отношении машин, как правило, преобладает. В результате интенсивность изнашивания контактных элементов в усовершенствованных машинах снижается, увеличивается временной период до замены комплекта щеток и ресурс коллекторно-щеточного узла в целом [7].

Проведенные экспериментальные исследования на образцах электрических машин, выполненных с использованием предложенных конструктивных усовершенствований, показали, что относительное снижение интенсивности изнашивания элементов скользящего контакта может составлять от нескольких единиц до десятков раз, в зависимости от типа машины и условий ее эксплуатации.

Так, например, в неререверсивном электродвигателе СНЕФ 240.001 с демпфированной обмоткой на якоре снижение степени искрения с $1\frac{1}{2}$ –2 до $1\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$ балла позволило уменьшить интенсивность изнашивания щеток в 2,2...2,3 раза, а коллекторных пластин – в 2,1 раза.

Еще более высокие результаты были получены на модернизированных образцах перфоратора БПР 241Е. Особенностью данного изделия является то, что оно предназначено для работы в двух различных режимах: в режиме сверления и в режиме сверления с ударами. Эти режимы отличаются по характеру нагрузки на электродвигатель, а также по интенсивности механического воздействия на коллекторно-щеточный узел. Причем в ударном режиме работы коммутация, как правило, значительно ухудшается, что сопровождается увеличением интенсивности изнашивания элементов коллекторно-щеточного узла. При этом требуется замена щеток за недопустимо короткое время, составляющее (в среднем) около 20...30 ч работы.

Результаты испытаний серийного и модернизированных образцов перфоратора БПР 241Е приведены в таблице.

Как видно из таблицы, электродвигатель с демпфированной обмоткой на якоре обеспечил снижение интенсивности изнашивания щеток в номинальном продолжительном режиме в 19,2 раза в сравнении с серийной машиной (оценивается по максимальным значениям). Улучшение данного показателя в электродвигателе с демпфированной обмоткой якоря и анизотропным индуктором составило уже 34,6 раза относительно базового изделия. Максимальное снижение скорости изнашивания щеток в ударном режиме (в 8,1 раза) обеспечил образец с демпфированной обмоткой на якоре, анизотропным индуктором и увеличенным щеточным перекрытием.

Поскольку изделия подобного типа в реальных условиях эксплуатации работают при определен-

Таблица. Результаты испытаний серийного и модернизированных образцов перфоратора БПР 241Е

Вариант выполнения электродвигателя	Режим работы	Время работы, ч	Температура коллектора, °С	Величина изнашивания щетки, мм		Интенсивность изнашивания щетки, мм/ч	
				с выключателем	без выключателя	с выключателем	без выключателя
1. Серийный	Вращательный	11	145	1,90	0,70	0,173	0,064
	Ударный	12	111	5,30	7,30	0,442	0,608
2. С демпфированной обмоткой якоря	Вращательный	11	120	0,10	0,10	0,009	0,009
	Ударный	12	93	9,80	13,20	0,817	1,100
3. С демпфированной обмоткой якоря и с анизотропным индуктором	Вращательный	11	106	0,05	0,05	0,005	0,005
	Ударный	12	92	10,50	12,70	0,875	1,060
4. С демпфированной обмоткой якоря, с анизотропным индуктором и с увеличенным $\beta_{\text{щ}}$	Вращательный	11	156	1,50	1,40	0,136	0,127
	Ударный	12	132	0,90	0,80	0,057	0,067

Примечание. Ударный режим – 30 с работы, 90 с перерыв

ных сочетаниях как ударного режима, так и режима сверления, то ресурс работы комплекта щеток t_p , рисунок, определяется соотношением времен работы в указанных режимах и может быть оценен по выражению:

$$t_p = (K + 1)h_m / (K\Delta_{S1} + \Delta_y),$$

где $K = t_{S1}/t_y$; t_{S1} , t_y – времена работы в продолжительном (S1) и ударном режимах; Δ_{S1} , Δ_y – скорости изнашивания щеток в продолжительном и ударном режимах; h_m – предельная высота изнашивания щетки.

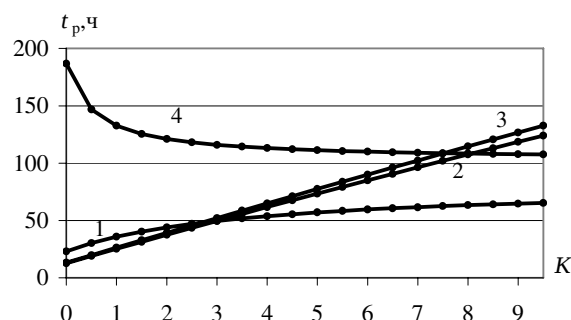


Рисунок. Зависимости ресурсов работы щеток серийного электродвигателя (кривая 1) и опытных образцов (кривые 2, 3 и 4) изделия БПР 241Е от параметра K

Из приведенных зависимостей следует, что при малой относительной величине времени эксплуатации изделия в ударном режиме ($K > 8$) предпочтение следует отдать вариантам опытных образцов № 2 и № 3 (кривые 2, 3), а при преобладании ударного режима работы ($K < 8$) – образцу № 4 (кривая 4).

Другим важным следствием улучшения коммутации благодаря оптимальному построению активной зоны электрической машины является снижение уровня радиопомех, генерируемых в процессе ее работы. К данному эксплуатационному показателю в последнее время предъявляются все более жесткие требования, поскольку он влияет на работу различного рода систем управления самим двигателем (электронные регуляторы скорости, стабилизаторы скорости, защитные системы), а также на расположенные поблизости электронные приборы и устройства (распространение помех может происходить как по сети питания, так и путем электромагнитного излучения).

Уменьшение степени искрения под щетками модернизированных машин в ряде случаев сопровождается существенным снижением уровня радиопомех на большинстве частот защищаемого диапазона. Например, у электродвигателей ДК 100-250-12 и ПК 58.03-01 наблюдалось уменьшение напряжения радиопомех на несколько дБ в диапазоне частот 0,15...3 МГц и на 6...20 дБ на частотах от 3 до 30 МГц (электродвигатели без фильтров) [6].

Таким образом, повышенные коммутационные свойства электрических машин с оптимизированной активной зоной позволяют существенно увеличить ресурс работы элементов коллекторно-щеточного узла. Кроме того, улучшение коммутации в указанных машинах обуславливает, в ряде случаев, значительное снижение уровня генерируемых ими радиопомех, что повышает их электромагнитную совместимость с другими электронными системами.

Выводы

1. Реализация демпфированных обмоток якоря и анизотропных индукторов в коллекторных электрических машинах без дополнительных полюсов позволяет повышать их КПД до 27 % в номинальном режиме работы, что обеспечивает снижение потребляемой мощности до 13 % и мощности потерь до 22 % при сохранении их полезной мощности на базовом уровне. При этом перегрев обмоток якоря и индуктора может быть снижен до 30 °С, что предопределяет существенное увеличение срока службы электрической изоляции указанных элементов и повышение надежности модернизированных электрических машин. При сохранении тепловой загрузки модернизированных электрических машин на базовом уровне возможно увеличение их полезной мощности на 30...40 % относительно серийных изделий.
2. Потенциальные возможности по повышению удельных энергетических характеристик электрических машин, появляющиеся благодаря предложенным техническим решениям, открывают ряд других направлений их совершенствования с целью экономии активных материалов на их изготовление, снижения их массы и упро-

щения ряда технологических процессов при их производстве. При этом возможно сокращение массы меди обмотки индуктора до 30 %, снижение расхода обмоточного провода якоря до 29 % и относительного заполнения паза якоря почти на 23 % (в ряде случаев это существенно облегчает укладку обмотки в пазы якоря), уменьшение длины пакетов якоря и индуктора до 17 %, а также уменьшение числа ламелей коллектора при соответствующем снижении его габаритов и массы.

3. Выполнение электрических машин с применением предложенных технических решений позволяет существенно уменьшить степень их коммутационного искрения, что сопровождается снижением уровня как электроэрозионного,

так и результирующего изнашивания контактных элементов до 30 и более раз в зависимости от исходного электромагнитного состояния машины и режимов ее эксплуатации.

4. Уменьшение коммутационного искрения в модернизированных электрических машинах, а также специфическое распределение взаимных индуктивных связей между секциями демпфированных обмоток якоря, как правило, положительно влияют на снижение уровня генерируемых ими радиопомех: до 2...6 дБ в диапазоне частот 0,15...3 МГц и до 6...20 дБ на частотах 3...30 МГц.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом с Федеральным агентством по науке и инновациям РФ № 02.442.11.7267 от 28 февраля 2006 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.Я. Современные коллекторные двигатели // Электропривод постоянного тока. Состояние и тенденции: Доклады науч.-практ. семинара. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 4–12.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. – 1997. – № 6. – С. 28–32.
4. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Бекишев Р.Ф. Улучшение эксплуатационных показателей коллекторных электрических машин применением анизотропных конструкций индукторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 3. – С. 44–49.
5. Скобелев В.Е. Двигатели пульсирующего тока. – Л.: Энергия, 1968. – 232 с.
6. Качин С.И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности: Дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 2002. – 438 с.
7. Качин С.И. Ресурсные характеристики коллекторно-щеточных узлов электрических машин с демпфированными обмотками на якоре // Электронные и электромеханические системы и устройства: Труды XV науч.-техн. конф. – Томск: ГНПП «Полус», 1996. – С. 120–124.

УДК 62-83:621.313.333

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Л.К. Бурулько, Л.А. Паюк

Томский политехнический университет
E-mail: blk@ido.tpu.edu.ru

Представлена математическая модель системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, позволяющая исследовать динамические режимы работы при скалярном частотном управлении и определить влияние гармонического состава питающего напряжения на быстродействие электропривода.

Последнее десятилетие уходящего века ознаменовалось значительными успехами силовой электроники, что привело к неуклонному снижению доли систем приводов с двигателями постоянного тока и к увеличению доли систем приводов с двигателями переменного. По прогнозам специалистов доля приводов постоянного тока сократится в ближайшее время до 10 % от общего числа приводов. Это связано с низкой надежностью механического коллектора и более высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока.

В настоящее время от частотно-регулируемых электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями (АД) при массовом их применении (приводы насосов, вентиляторов, конвейеров, компрессоров и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и сравнительно низкое быстродействие. При этом целесообразно использовать классические структуры скалярного управления. В широкодиапазонных (до 1:10000), быстродействующих приводах станков, роботов и транспортных средств применяют более сложные структуры векторного