

кВт в длительном режиме. При этом наибольшая температура корпусов СПП составила 105 – 108 °С. Полученный результат не является предельным по теплопередаче для данного модуля, а определялся лишь мощно-

стью лабораторной установки.

Результаты испытаний разработанных систем охлаждения СПП подтверждают возможность создания высокоеффективных силовых полупроводниковых преобразователей в руд-

ничном взрывобезопасном исполнении для регулируемых электроприводов горных и транспортных машин, а конкретная разработка может быть нами выполнена по техническому заданию заказчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мазикин В.П., Вылегжанин В.Н.* Новая концепция перспективных направлений создания комплексной механизации ШНТУ для освоения Восточного Кузбасса// Материалы международной конф. «Динамика и прочность горных машин», ИГД СОРАН, Новосибирск, 2001.-С. 9-13.
2. *Разумняк Н.Л., Мышилев Б.К.* Пути создания высокоеффективных технологических схем угледобычи// Материалы международной конф. «Динамика и прочность горных машин», ИГД СОРАН, Новосибирск, 2001.-С. 13-25.
3. *Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Гейфман Е.М., Епишкин А.Н.* Разработка и производство силовых полупроводниковых приборов на ОАО «Электровыпрямитель»// Вестник Уральского государственного технического университета – УПИ «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», часть 1, Екатеринбург, 2003.-С. 315-318.
4. *Кузнецов Ф.А., Резниченко М.Ф., Асеев А.Л. и др.* Региональная межотраслевая программа «Силовая электроника Сибири»// Вестник Уральского государственного технического университета – УПИ «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», часть 1, Екатеринбург, 2003.-С. 281-285.

□ Авторы статьи:

Каширских

Вениамин Георгиевич

- канд. техн. наук, доц., зав. каф.
электропривода и автоматизации

УДК 658.567.1:621.311.031.004.18

П. Д. Гаврилов, Е. А Лир, А. А. Неверов

ПРОБЛЕМА РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

О проблеме энерго- и ресурсосбережения говорят уже давно и довольно много. И, тем не менее, эта проблема и по сей день остается одной из наиболее актуальных. Достаточно указать, что в настоящее время эффективность использования энергоресурсов у России не превышает 30% [1, 2], и это при том, что, по оценкам Международного энергетического агентства, подтвержденных мировых запасов хватит:

- нефти – на 40-60 лет,
- газа – на 60-80 лет,
- угля – на 200-250 лет,
- урана 235 – на 50-100 лет.

Так как две трети электроэнергии, выработанной на электростанциях, преобразуется различными электроприводами

в механическую энергию [3], и учитывая, что в народном хозяйстве России, по данным Главгосэнергонадзора, почти 60% излишнего энергопотребления приходится на асинхронные электродвигатели, у которых требуется регулирование частоты вращения [4], то, наконец, и в России с чрезмерно большим опозданием (в середине 90-х г.г.) осознали опасность большой энергоемкости ВВП. На Западе это осознали в середине 70-х г.г.

Дело в том, что лишнее необоснованное энергопотребление электроприводов должно компенсироваться электростанциями (преимущественно тепловыми). Следовательно, возникают дополнительные потери,

пропорциональные лишней энергии, в ЛЭП, трансформаторах, котлах, турбинах, электрогенераторах, тягодутьевом, топливо- и водоснабжающем оборудовании. Это вынуждает расходовать на каждый полезно используемый кВт в электроприводе дополнительно чрезмерно большое количество топлива.

В [4] написано: «Недооценка энергосбережения уменьшила до критического уровня надежность энергоснабжения России, а продолжающийся рост энергоемкости ВВП, без принятия экстренных мер по энергосбережению вызовет серьезные негативные последствия для всей экономики страны в целом.

... В качестве первоочеред-

ных приоритетных и быстроокупаемых проектов «Программой энергосбережения России» предусматривается широкое внедрение частотнорегулируемого электропривода на прогрессивной элементной базе, обеспечивающее экономию электроэнергии на 30% и более.

... В целях энергосбережения ФЭКРФ предлагает: всем поименованным в рассылке организациям при разработке проектов реконструкции и нового строительства ... считать обязательным применение частотнорегулируемого электропривода. Отсутствие в проектах частотнорегулируемого электропривода должно быть обосновано и защищено перед региональной энергетической комиссией. ... Главгосэнергонадзору России взять под постоянный контроль обязательное применение частотнорегулируемого электропривода и определение упущененной выгоды у потребителей».

Эта директива во исполнение указа Президента Российской Федерации, Закона Государственной Думы и Постановления Правительства весьма полезна, но, к сожалению, выполняется недопустимо медленно.

Специалистам в области автоматизированного электропривода и преобразовательной техники известны свойства частотноуправляемых электроприводов различных типов еще с 70-х г.г., изучены возможности их влияния на статику и динамику, на надежность, электробезопасность и взрывобезопасность электромеханических систем (ЭМС) в различных отраслях, оценена их техническая и экономическая эффективность [5-16].

Появление современных, более надежных, менее громоздких, с большими возможностями формирования различных законов частотного управления, с лучшей защитой электропривода от аварийных режимов преобразователей часто-

ты системы «нерегулируемый выпрямитель – фильтр – автономный инвертор с ШИМ» (В – Ф – АИН с ШИМ) создало более благоприятную перспективу (по сравнению с предыдущими ТПЧ) для экстренного снижения энергоемкости и ресурсоемкости ВВП. Причем в понятие минимизации ресурсоемкости мы вкладываем, кроме минимизации энергоемкости (расход тепла, топлива, электроэнергии) еще и минимизацию потерь воды и износа конструктивных материалов, обеспечивая с помощью ПЧ-АД оптимальное исчерпание технических ресурсов ЭМС горных машин, мощных ленточных и скребковых конвейеров, большегрузных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией, рудничных электровозов, трамваев и троллейбусов, шахтных подъемных машин, насосных и вентиляторных установок и других установок в различных отраслях.

Однако для наиболее эффективного использования автоматизированных электроприводов (АЭП) с частотным регулированием их координат, надо не увлекаться модными решениями, а технически и экономически грамотно обосновывать выбор того или иного типа АЭП с необходимыми для данного объекта характеристиками и свойствами, т.е. АЭП должен быть объектно-ориентированным.

В настоящее время существуют различные частотноуправляемые АЭП: непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) – асинхронный двигатель (АД) с естественной и искусственной коммутацией, ПЧ с регулируемым тиристорным выпрямителем (ТП) и автономным инвертором напряжения (АИН) на однооперационных тиристорах (ТПЧ с АИН) – АД; ПЧ с ТП и автономным инвертором тока (АИТ) на однооперационных тиристорах – АД; ПЧ с однодиодным выпрямителем (В) и АИН с широтноимпульсной

модуляцией (АИН с ШИМ) на силовых транзисторах IGBT, или двухоперационных тиристорах (GTO), или на новых высоковольтных приборах типа IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), состоящих из запираемого тиристора со встроенным блоком коммутации – АД; ПЧ с диодным выпрямителем (В) и зависимым инвертором (ведомым сетью),ключенными в роторную цепь АД с контактными кольцами, именуемый асинхронным вентильным каскадом (АВК); ПЧ с В в цепи ротора и питающейся от него машиной постоянного тока, присоединенной к валу АД, называемый асинхронным машинно-вентильным каскадом (АМВК), асинхронизированный синхронный двигатель (АСД) или машина двойного питания (МДП), представляющий АД с контактными кольцами, в роторную цепь которого включен НПЧ; ПЧ с ТП и АИН – синхронный двигатель (СД); ПЧ с ТП и инвертором тока, ведомым ЭДС синхронного двигателя, называемый вентильным двигателем (ВД) или бесколлекторной машиной постоянного тока (из-за аналогичных свойств).

Каждый из них проявляет определенные достоинства и недостатки на конкретных машинах и установках и в конкретных технологических процессах. Поэтому выбирать тип АЭП необходимо для выполнения подробно сформулированных требований на основании тщательного изучения объекта управления. Критерием выбора АЭП должен быть оптимум отношения цена /качество выполнения требований (ц/к). Стремление приобрести дешевую систему неизбежно приводит к серьезным потерям качества: из-за невыполнения ряда требуемых функций снижается производительность, безопасность, надежность, срок службы и, следовательно, эффективность ЭМС.

В каждом АЭП предусмотрена возможность реализации

определенных законов частотного управления координатами технологического процесса, и выбирать их также надо для выполнения требований конкретного технологического процесса.

К сожалению, из-за недостаточного знания свойств и возможностей частотноуправляемых АЭП производственники часто боятся их применять, а вследствие некачественного (иногда никакого) формулирования требований к АЭП из-за неглубокого изучения объекта управления допускают грубые ошибки при выборе типа АЭП и его комплектации и недоиспользуют его возможности. Нередко считают достаточным сам факт изменения частоты вращения, не анализируя качество регулирования ее и электромагнитного момента АД или тока.

Итак, выбрав технически и экономически грамотно АЭП, необходимо использовать его свойства и возможности с максимальной эффективностью, т.е. минимизируя ц/к. Для этого надо обязательно предусмотреть в структуре АЭП возможность реализации автоматического управления по критерию минимальной удельной ресурсоемкости (исчерпание технического ресурса ЭМС на единицу полезной работы) или (и) минимальной удельной энергоемкости (затраты энергии на единицу продукта).

При этом надо обеспечить оптимальную ресурсоемкость, включая и энергоемкость, самого АЭП. Рассмотрим это на примере современного, новейшего АЭП системы «В – Ф – АИН с ШИМ – АД».

У людей, знакомых с красочными рекламными проспектами фирм-производителей комплектных частотных электроприводов и отдельных преобразователей частоты, могут возникнуть мнения, что, дескать, все это уже давно делается. Но при более детальном рассмотрении особенностей эксплуатации

частотно-

регулируемого электропривода, даже если не учитывать особенностей конкретного технологического процесса, на поверхность всплывают следующие нюансы:

1) ресурсоемкость и энергоемкость электропривода определяются двумя обратно пропорциональными составляющими (ресурсоемкость и энергоемкость преобразователя частоты и ресурсоемкость и энергоемкость двигателя);

2) реальная энергоемкость преобразователя частоты зависит от многих факторов (частоты коммутации вентилей инвертора, нагрузки, колебаний напряжения питания и др.), в то время как данные, предоставляемые производителями, приводятся лишь для конкретных (наверняка «благоприятных») условий;

3) для оценки ресурсоемкости и энергоемкости электродвигателя при его питании от преобразователя частоты необходимо иметь данные о гармоническом составе тока двигателя, об уровне коммутационных перенапряжений и о степени защиты обмотки от термо-вибромеханических повреждений, которые, по «непонятным» причинам не предоставляются производителями;

4) эксплуатация преобразователей частоты без входных фильтров, с одной стороны, приводит к снижению электромагнитной совместимости, а также надежности работы преобразователей, а с другой – обеспечивает более высокий КПД и массогабаритные показатели;

5) эксплуатация преобразователей частоты с выходными фильтрами, с одной стороны, обеспечивает снижение энергоемкости и повышение срока эксплуатации двигателя, а с другой – приводит к увеличению потерь в преобразователе и ухудшению массогабаритных показателей.

Рассмотрим каждый из этих нюансов поподробнее и с точки

зрения анализа, и с точки зрения синтеза.

Экстремальный характер потерь в системе ПЧ-АД известен давно [5, 8, 9]. Однако, из-за того, что двигатели и преобразователи чаще всего выпускаются различными фирмами, которые при этом не предоставляют всей информации, необходимой для определения экстремума, нет и соответствующего управления.

В паспортных данных на преобразователи практически всегда приводятся данные о КПД и $\cos \phi$ без указания условий и режимов, в которых они измерялись. На наш взгляд, эти показатели должны приводиться, как минимум, в виде графиков зависимости от нагрузки, причем для разных значений частоты ШИМ.

При просмотре рекомендаций по выбору частоты ШИМ, приводимых в инструкциях по эксплуатации некоторых производителей, порой в качестве критерия выбора выступает только тон звука, возникающего при работе ПЧ-АД. В случае же, если и приводятся объективные критерии выбора, то опускаются конкретные численные значения, которые бы позволили более обоснованно подходить к выбору данного параметра преобразователя. В [8, 10, 11-16] показаны причины, характер и количественные значения коммутационных перенапряжений и термо-вибромеханических воздействий и их влияние на надежность АД, на помехоустойчивость систем управления, на электро- и взрывобезопасность АЭП, а также приведены средства снижения негативных влияний импульсных воздействий.

В настоящее время фирмам, реализующим преобразователи частоты, пользуясь недостаточной осведомленностью большинства производственников в вопросах частотно-регулируемого электропривода и той волной «популярности», которую он к себе привлек, ус-

пешно удается не учитывать повышение потерь в двигателе при его питании от преобразователя частоты. Если при этом еще учесть и то обстоятельство, что отечественные двигатели обычно проектируются на синусоидальное напряжение промышленной частоты, то потери, вносимые несинусоидальностью тока, могут оказаться существенное влияние на энергетические и эксплуатационные показатели электропривода [17].

В отношении применения входных фильтров при эксплуатации преобразователей частоты большую роль играет недостаточная электротехническая грамотность производственников. Так как в нашей стране пока не так строго контролируют электромагнитную обстановку на предприятиях, как, например, в большинстве европейских стран, то на многих объектах оказываются установленными преобразователи частоты либо вообще без входных фильтров, либо с фильтрами, не обеспечивающими достаточного снижения уровня электромагнитного излучения, после чего начинаются различного рода «чудеса», обусловленные повышением уровня высших гармоник [18, 19] и электромагнитных помех [20].

Про выходные фильтры часто упоминают, как о средстве снижения емкостных токов при больших длинах кабеля, соединяющего двигатель с преобразователем [2, 17, 22, 23-25]. Ни коим образом не умаляя значимости этой проблемы, хотелось бы все-таки напомнить,

что задача определения гармонического состава напряжения (тока) двигателя при его питании от преобразователя частоты, являясь не менее важной, не возможна без знания гармонического состава на выходе ПЧ и после фильтра. Поэтому уверенний в том, что при наличии выходного фильтра обеспечивается нормальная работа преобразователя частоты с АД вплоть до такой-то длины кабеля, опять же, на наш взгляд, недостаточно. Несколько лучше описан этот вопрос в [22, 24, 25], где приводятся различные варианты выходных фильтров, ориентированные на решение различных задач, в том числе и обеспечение синусоидальности напряжения и тока двигателя, хотя и здесь лишь указано, что «коэффициент искажений для напряжения двигателя частотой 50 Гц с синусоидальным фильтром равен примерно 5%». При этом возникает вопрос – кто, не понимая серьезности и важности, станет дополнительно приобретать выходной фильтр, увеличивающий стоимость преобразователя на 30% [23]. А в действительности выбор коммутационной частоты, входных и выходных фильтров является важнейшей и весьма серьезной проблемой. Так как в процессе эксплуатации АЭП изменяется длина кабеля (на ряде предприятий), загрязняется и увлажняется обмотка АД, то, следовательно, изменяются их волновые сопротивления. Это влечет изменение уровня и распределения по обмотке коммутационных перенапряжений. Кроме

этого, в заземляющей жиле гибких кабелей, в свинцовой и стальной оболочках бронированных кабелей и в проложенных параллельно силовым кабелям управления, имеющих связь с «землей», наводятся достаточно большие токи, взрывоопасные и пожароопасные в соответствующей среде и вызывающие самовключение транзисторов и тиристоров [14].

Подытоживая вышесказанное, можно сказать, что в отношении анализа преобразователей частоты требуется доработка методики контроля энергетических параметров, что позволило бы адекватно оценивать их эффективность в различной комплектации с учетом изменения настроек параметров во всем диапазоне нагрузки.

В отношении же синтеза разработчикам предоставляется широчайшее поле деятельности по оптимизации параметров преобразователей частоты и электродвигателей (по отдельности и при совместной работе) и пересмотру перечня данных, предоставляемых в технической документации.

Для резкого повышения эффективности применения частотноуправляемых АЭП необходимо срочно организовывать курсы для производственников различных уровней с соответствующими программами по характеру их деятельности. На кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ есть такие специалисты и необходимое техническое оснащение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Энергосбережение. Время действовать». Новости электротехники, №6, 2001, www.news.eltech.ru.
2. «Энергосбережение для повышения экономической эффективности предприятия». Новости электротехники, №1, 2002, www.news.eltech.ru.
3. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.:Энергоатомиздат, 1986. – 360с
4. Корсун Ю. Н. О применении частотнорегулируемого электропривода. Директивное письмо Председателя Федеральной Энергетической Комиссии Российской Федерации № ФЭК – 3, 14.05.96г.
5. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – 3-е перераб. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 216с.
6. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоатомиздат,

1982. – 192с.

7. Рудаков В. В. И др. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136с.
8. Гаврилов П. Д. Автоматизированный электропривод горных машин. - Кемерово: Кузбасский политехн. ин-т, 1983. – 61с.
9. Мануковский Ю.М., Пузаков. Широкорегулируемые автономные транзисторные преобразователи частоты. – «Штиинца», Кишинев, 1990. - 152 с.: ил.
10. Гаврилов П. Д. Коммутационные перенапряжения в забойных электродвигателях. / Автоматизация и электрификация в горной промышленности. //Сб. науч. тр./ Кузб. политехн. ин-т. Кемерово, 1969. №19
11. Гаврилов П. Д. Повреждения витковой изоляции электродвигателей забойных машин. / Автоматизация и электрификация в горной промышленности. //Сб. науч. тр./ Кузб. политехн. ин-т. Кемерово, 1969. №19
12. Гаврилов П.Д., Машенцев А. С. Результаты разработки и исследования комплексной модели износа электродвигателя и трансмиссии горных машин. / Современное взрывозащищенное электрооборудование.// Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции. М.: Информэлектро, 1975.
13. Высоцкий В. П., Демидов В. Я., Гаврилов П.Д. Коммутационные перенапряжения в шахтных участковых сетях напряжением 660 и 1140 В. / Промышленная энергетика, 1978, №3
14. Демидов В. Я., Гаврилов П. Д., Высоцкий В. П. Изменение токов управления в процессе эксплуатации тиристоров и влияние их на помехоустойчивость тиристорных систем. / Электропривод и автоматизация в горной промышленности. // Сб. науч. тр. / Кузб. политехн. ин-т. Кемерово, 1974. №70
15. Высоцкий В. П., Гаврилов П.Д., Демидов В. Я. Средство снижения наводок во вспомогательных жилах силового кабеля забойной машины с тиристорным приводом. /Автоматизированные системы управления горных предприятий. // Сб. науч. тр. / Кузб. политехн. ин-т. Кемерово, 1986
16. Высоцкий В. П., Гаврилов П.Д., Демидов В. Я. Исходные данные при расчете двухобмоточного дросселя для снижения наводок в контуре заземления забойной машины с тиристорным приводом. /Повышение безопасности труда в шахтах.// Сб. науч. тр./ ВостНИИ. Кемерово, 1986.
17. Андрианов М.В., Родионов Р.В. Особенности электропотребления комплектных приводов на базе преобразователей частоты с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Электротехника, №11, 2002 г.
18. «Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ». Новости электротехники, №1, 2003, www.news.eltech.ru.
19. Жежеленко И.В., Сорокин В.М. Высшие гармоники в электрических сетях. Электричество, № 11, 1974 г.
20. «Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой». Новости электротехники, №6, 2001, www.news.eltech.ru.
21. Проблема «длинного кабеля» в электроприводах с IGBT-инверторами, корпорация Триол, www.triolcorp.ru.
22. Siemens, Каталог DA 65.10 2001-2002
23. Siemens, Интерактивный каталог CA01.
24. ABB AC Drives. Comp – ACTM Каталог 1999
25. ABB Автоматизация. Высоковольтные электроприводы серии ACS 1000 для регулирования скорости и момента асинхронных двигателей мощностью от 315 до 5000 кВТ

Авторы статьи:

Гаврилов Петр Данилович - канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации	Лир Евгений Александрович аспирант каф. электропривода и автоматизации	Неверов Андрей Александрович - аспирант каф.электропривода и автоматизации
--	---	---