

Датчики частоты вращения для подвижного состава

В течение многих десятилетий для измерения частоты вращения на железнодорожном подвижном составе использовали преимущественно датчики с аналоговым выходом. Переход к цифровым датчикам частоты вращения хоть и привел в общем к повышению их точности и надежности, но не во всех случаях их применения. Как показала практика, в зависимости от предъявляемых требований для измерения частоты вращения должны использоваться новые, а в некоторых случаях также нетрадиционные методы измерений.

Для многих систем железнодорожного подвижного состава требуется точный и надежный сигнал частоты вращения, который используется этими системами для измерения и регулирования скорости. К ним можно отнести в первую очередь системы контроля тяги, а также противоюзной защиты, обеспечения безопасности движения поезда, управления приводом дверей и др. Все эти задачи выполняются с помощью множества датчиков частоты вращения, расположенных в различных местах на подвижном составе.

К сожалению, используемые датчики зачастую не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям как по своим функциональным возможностям, так и по надежности и часто становятся причиной возникновения неисправностей на подвижном составе. Это относится как к использовавшимся ранее аналоговым датчикам, так и к появившимся позже цифровым.

Объясняется это в основном исключительно жесткими условиями эксплуатации на железнодорожном подвижном составе. Критерии испытания датчиков подробно изложены в соответствующих нормативных документах. Однако на практике нагрузки нередко оказываются более высокими, чем приводимые в этих документах.

В последние годы появилась возможность разработки датчиков, обладающих значительно более вы-

сокой надежностью и техническими характеристиками, улучшенными с точки зрения функциональных возможностей. На примере некоторых моделей компании Lenord + Bauer проведен анализ современного уровня развития техники в этой области.

Датчики частоты вращения для двигателей

Бесподшипниковые датчики. Несмотря на то что на железнодорожном подвижном составе нередко используют тяговые приводы без применения датчиков частоты вращения, в большинстве случаев их все же применяют для регулирования работы двигателя. Самым распространенным датчиком такого типа является двухканальный, который генерирует сигнал под действием шестерни на валу двигателя или в коробке передач и не требует собственных подшипников для установки. В современных датчиках этого типа применен принцип модуляции магнитного поля (рис. 1). Эти датчики используют с шестернями из ферромагнитных материалов с модулем $m = 1 \div 3,5$, которые могут иметь как эвольвентные, так и прямоугольные зубья.

В зависимости от диаметра и формы зубьев шестерен число импульсов составляет 60–300 на один оборот. Этого достаточно для регулирования привода в нижнем и сред-

нем диапазоне тяговой мощности. Основными элементами двухканальной системы являются: два датчика Холла, редкоземельный магнит и анализирующая электронная схема. Магнитное поле магнита модулируется проходящими зубьями шестерни. Эту модуляцию регистрируют датчики Холла, с выхода которых сигнал поступает на схему сравнения, где приобретает прямоугольную форму, после чего усиливается.

К сожалению, эффект Холла зависит от температуры. В связи с этим на чувствительность датчиков Холла и величину выходного сигнала влияет не только величина воздушного зазора, но и температура. В результате этого дополнительно ограничивается максимально допустимая величина воздушного зазора между датчиком и шестерней. Так, если для стандартного модуля шестерни $m = 2$ при комнатной температуре величина воздушного зазора может составлять 2–3 мм, то для получения надежного сигнала в требуемом диапазоне температур (от -40 до $+120$ °С) допустимое значение этой величины снижается до 1,3 мм.

Для достижения более высокой временной дискретизации сигнала, а также для уменьшения размеров и облегчения конструкции часто применяют шестерни с более мелкими зубьями модуля $m = 1$. В этом случае величина воздушного зазора может быть 0,5–0,8 мм.

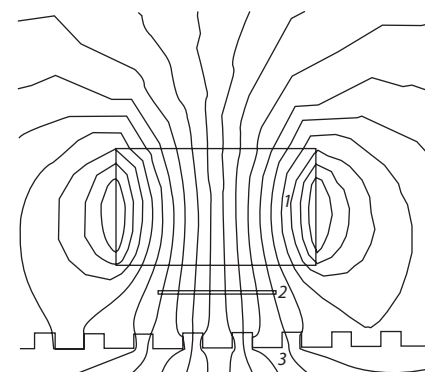


Рис. 1. Принцип взаимодействия с датчиками Холла зубьев шестерни из ферромагнитного материала:
1 — магнит; 2 — датчик Холла; 3 — зубья шестерни

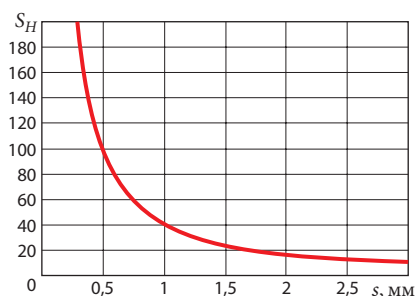


Рис. 2. Зависимость уровня сигнала датчика Холла от величины воздушного зазора:

S_H — уровень сигнала датчика Холла;
 s — величина воздушного зазора

Для разработчиков двигателей воздушный зазор датчика является важным фактором при определении параметров электрической машины. Однако к нему обязательно добавляются необходимые требования к измерению частоты вращения. Если эти требования обуславливают слишком малую величину воздушного зазора, возникает необходимость в использовании более жестких допусков на размеры корпуса двигателя или шестерен, чтобы при эксплуатации не нарушалась работоспособность измерительной схемы из-за исчезновения сигнала. На практике подобные проблемы возможны при неблагоприятной комбинации допусков и экстремальных температурах, особенно в случае шестерен с мелкими зубьями (модуль $m = 1$). В связи с этим изготовители двигателей и эксплуатирующие их компании заинтересованы в использовании датчиков с более широким диапазоном величин воздушного зазора.

С увеличением воздушного зазора в значительной мере уменьшается амплитуда первичного сигнала датчиков Холла (рис. 2). Для разработчика датчиков это означает, что он должен по возможности обеспечить компенсацию обусловленного физическими причинами снижения уровня первичного сигнала, снимаемого с датчика Холла. Классический метод, при котором измеряется температура на датчике, а затем с помощью полученной величины компенсируется температурный дрейф сигнала, непригоден, так как,

с одной стороны, сигнал изменяется нелинейно по отношению к температуре и, с другой стороны, знак этого дрейфа не является одинаковым для всех датчиков.

В связи с этим при разработке датчиков нового поколения необходимо было искать другие пути. Один из них — интеграция в конструкцию датчика процессора обработки сигнала для корректировки дрейфа и контроля амплитуды сигнала. Эта коррекция настолько эффективна, что максимальная допустимая величина воздушного зазора на датчике частоты вращения увеличивается почти в 2 раза. Для шестерен с модулем $m = 1$ при использовании новых датчиков допускается максимальная величина воздушного зазора 1,4 мм. Она даже больше, чем у ранее применявшихся датчиков при шестернях с модулем $m = 2$. При этих шестернях у новых датчиков максимальный допустимый зазор достигает 2,2 мм, значительно повышается качество сигнала. Как скважность импульсов, так и сдвиг фаз между каналами становятся по меньшей мере в три раза стабильнее по отношению к колебаниям воздушного зазора и температурному дрейфу.

Кроме того, несмотря на сложную электронику, удалось в 3–4 раза увеличить среднее время безотказной работы новых датчиков. Таким образом, значительно повысилась не только точность сигналов, но также и надежность их получения. Благодаря этому за счет использования новых датчиков в различных конструкционных исполнениях открываются совершенно новые возможности в проектировании тягового привода железнодорожного подвижного состава. Рассматриваемые датчики отличаются невысокой стоимостью и длительным сроком безысходной эксплуатации.

Датчики для двигателей, устанавливаемые в собственных подшипниках. Датчики, устанавливаемые без подшипников, могут выдавать ограниченное число импульсов. Максимальное число при

шестерне диаметром 300 мм составляет 300 импульсов на один оборот. Однако для нормальной работы тягового преобразователя на многих современных локомотивах и моторвагонных поездах требуется более высокое число импульсов, если предъявляются особые требования к регулированию силы тяги в диапазоне низкой скорости.

Для таких случаев необходимы датчики, устанавливаемые в собственных подшипниках. Благодаря гораздо более высокому классу точности подшипников датчика по сравнению с подшипниками двигателя обеспечивается возможность работы датчика с воздушным зазором, меньшим на порядок, если сравнивать с бесподшипниковыми датчиками. При этом можно существенно уменьшить модуль зубьев (до $m = 0,22$). Существуют различные типы таких датчиков, один из которых (типа 293) широко используется на электропоездах. Такие датчики обеспечивают широкий диапазон чисел импульсов на один оборот (менее чем от 100 и до 130 000 импульсов), однако на железнодорожном транспорте указанные максимальные значения не требуются.

При еще более высоких требованиях к жесткости конструкции и точности сигнала могут использоваться прецизионные датчики, например типа 295. Принцип действия датчиков типов 293 и 295 одинаков: многоканальная магнитно-резистивная сенсорная система взаимодействует с вращающейся шестерней, которая имеет 256 зубьев. Возникают сигналы двух типов: синусоидальный и косинусоидальный. Посредством \arctg -интерполяции из каждых 256 периодов сигнала формируется 512 прямоугольных импульсов. Кроме того, прецизионный датчик имеет поправку по амплитуде и дрейфу, которая учитывается при интерполяции. За счет этого достигается дополнительное повышение качества сигнала, которое положительно сказывается на регулировании силы тяги.

Датчики частоты вращения колесной пары

Датчики, устанавливаемые без подшипников. Бесподшипниковые датчики частоты вращения можно обнаружить практически на каждой колесной паре железнодорожного подвижного состава. Они используются главным образом в системах противоюзной защиты и поставляются в основном изготовителями этих систем. Важными характеристиками этих датчиков являются также достаточно малая величина воздушного зазора и высокая надежность.

Особенностью датчиков частоты вращения, используемых в системах противоюзной защиты, является наличие функций самоконтроля. Для обнаружения повреждений кабеля могут применяться вспомогательные двухпроводные датчики, при срабатывании которых на выходе появляется ток 7 или 14 мА. У датчиков других типов на выходе возникает напряжение 7 В, если частота сигнала станет ниже 1 Гц. Имеются также датчики с выходным сигналом частотой 50 Гц, если напряжение питания модулируется этой частотой. В двухканальных датчиках часто применяется гальваническая развязка каналов.

Иногда для системы противоюзной защиты необходимо снимать сигнал с тягового двигателя. В этом случае выходная частота нередко оказывается слишком высокой для электроники противоюзной защиты. Для этих случаев разработаны датчики со встроенным делителем частоты. В настоящее время существует достаточно много стандартных комплектующих изделий с улучшенными техническими характеристиками и продолжительным сроком службы.

Датчики частоты вращения колесной пары, устанавливаемые в собственных подшипниках. Железнодорожный подвижной состав, особенно тяговый, как правило, имеет много различных систем, для которых требуется отдельный сигнал

скорости, не имеющий гальванической связи с другими системами и узлами. В большинстве случаев для установки дополнительных датчиков трудно найти свободное пространство, особенно на поддерживающих колесных парах. В связи с этим в течение многих лет применяются многоканальные датчики частоты вращения, которые устанавливают на корпусе или крышке буксового подшипника. Преимущество этих датчиков по сравнению с бесподшипниковыми состоит в том, что они генерируют гораздо большее число импульсов. Для установки большего числа бесподшипниковых датчиков потребовалось бы также больше кабельных соединений, чего следует избегать из-за возможных повреждений в открытых местах, например при выбросах щебня.

Все представленные на рынке изготовители пользовались до сих пор в основном оптической сенсорной техникой. С ее помощью реализуется от одного до четырех каналов, причем на каждом канале световой затвор считывает информацию с одной из двух дорожек перфорированного диска (рис. 3). Как показала практика, число каналов оказалось недостаточным. В связи с этим некоторые системы должны довольствоваться проходными сигналами из системы противоюзной защиты и уже имеющимся

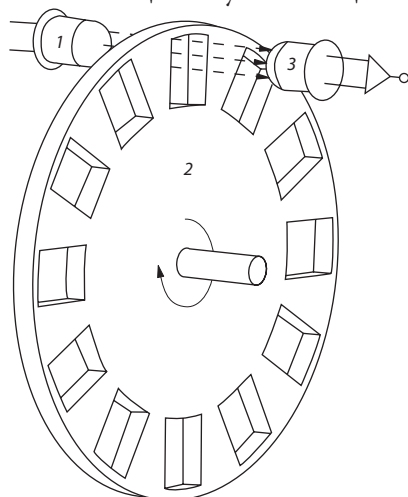


Рис. 3. Оптический принцип работы датчика:

1 — светодиод; 2 — перфорированный диск; 3 — фотодиод или фотоэлемент

числом импульсов, хотя отдельный сигнал скорости мог бы быть гораздо более эффективным.

Оптическая сенсорная техника применяется уже много лет и широко распространена в промышленности. Но, к сожалению, у нее имеются два слабых звена, а именно чувствительность оптики к загрязнениям и быстрое старение источников света. Даже небольшое загрязнение в значительной степени затрудняет прохождение светового луча через линзы и может привести к исчезновению сигнала. В связи с этим предъявляются высокие требования к герметичности датчиков.

Уплотнение подшипников с целью предотвращения вытекания смазки также является проблемой, которую не удастся решить окончательно, несмотря на все конструктивные меры. Кроме того, проблемы возникают также в том случае, если датчики эксплуатируются в условиях высокой влажности. В этом случае линзы запотевают, и это часто приводит к искажению сигнала.

Источниками света являются светодиоды, которые со временем стареют, в результате чего сила света через несколько лет заметно снижается. Делаются попытки предотвратить это путем специальных регулировок, с помощью которых постепенно увеличивается ток, проходящий через светодиоды. Но это еще больше ускоряет процесс старения.

Датчики, использующие магнитное сканирование ферромагнитного измерительного элемента, не имеют таких недостатков. Из многолетней практики известны случаи, когда магнитные датчики с нарушенной герметичностью корпуса оказывались покрытыми внутри толстым слоем пыли от тормозных колодок и других загрязнений, но тем не менее полностью сохраняли работоспособность. В последнее время появились новые многоканальные датчики частоты вращения, которые превосходят существовавшие до сих пор не только по прочности конструкции и устойчи-

ности против загрязнений, но также и по гибкости применения. Они имеют следующие характеристики:

- наличие от одного до восьми каналов, в то время как у прежних датчиков их было не более четырех;
- обеспечение трех различных серий импульсов на один оборот от одного датчика вместо двух серий, которые были у прежних датчиков;
- генерирование до 400 импульсов на один оборот вместо 200;
- наличие выходных сигналов в виде изменяющихся величин напряжения и тока, а также сигнала, соответствующего режиму стоянки с постоянной величиной напряжения, равной 7 В.

При благоприятных условиях установки, а также при наличии сильных вибраций применяют датчики с увеличенным до максимума гистерезисом, которые подавляют сигналы помех в режиме стоянки.

Новые датчики расширяют возможности применения благодаря улучшенным характеристикам. Так, они позволяют обеспечить значительно большее число систем независимыми сигналами с гальванической развязкой. Все новые датчики совместимы с существующими.

В результате использования принципа магнитных измерений и оптимизации подшипников повышается надежность датчиков, а также увеличиваются интервалы между работами по техническому обслуживанию, что позволяет снизить эксплуатационные расходы.

В 2005 г. датчики новой конструкции успешно прошли эксплуатационные испытания на различных транспортных предприятиях в Германии и за ее пределами. Были также успешно проведены типовые испытания в соответствии со стандартом EN 50155. По состоянию на середину 2006 г. новые датчики были готовы к серийному производству.

Датчики колесной пары для тележек с внутренними подшипниками. Тележки с внутренними подшипниками ставят особые требования перед разработчиками датчиков. Причина заключается в

отсутствии крышки подшипника со стороны торца, где обычно монтируют датчик для измерения частоты вращения колесной пары. В этом случае датчик приходится устанавливать на адаптере, закрепленном на колесной паре, и предохранять от проворачивания с помощью опоры, связанной с рамой тележки.

Повышенная вибрация в этом месте приводит к повышенным нагрузкам на подшипники датчиков, которые являются опорой не только для относительно небольшой массы вала датчика, но также и для массы всего датчика в целом. Если учесть, что срок службы подшипника уменьшается пропорционально величине нагрузки, возведенной в третью степень, то становится ясно, что для данного варианта монтажа ни промежуточные фланцы, ни другие вспомогательные конструкции, используемые для крепления стандартных датчиков на тележках с внешними подшипниками, не смогут обеспечить надежной и долговечной работы этих датчиков. Необходима специальная конструкция, соответствующая конкретным условиям в месте монтажа.

До сих пор эти датчики выпускали с большими ограничениями технических характеристик. Максимальное число импульсов ограничивалось величиной 140 на один оборот. Число каналов также было ограничено. С учетом этих проблем был разработан новый датчик специально для установки на тележки с внутренними подшипниками.

Датчики частоты вращения для специальных целей

Датчики для шестерен из немагнитных материалов, а также для установки в местах возможного попадания металлических частиц. Некоторые транспортные компании сталкиваются с рядом специфических проблем. Так, на тяговом подвижном составе воздух, охлаждающий двигатели, может содержать металлические частицы, являющиеся продуктами износа в системе ко-

лесо — рельс. Эти частицы оседают на сенсорных головках магнитных датчиков и вызывают нарушение их нормальной работы. В результате магнитного короткого замыкания сигнал на датчике может пропадать периодически или на длительное время. В эксплуатации известны также случаи механического повреждения датчиков в результате абразивного воздействия металлических частиц. В настоящее время увеличивается число двигателей, на которых датчики должны взаимодействовать с шестернями из алюминия. Для таких ситуаций разработан датчик, работающий без магнитов. С помощью нескольких передающих и принимающих обмоток создается переменное электрическое поле с частотой около 1 МГц. В датчике оценивается модуляция связи между передающими и принимающими обмотками. Этот датчик по способу монтажа и виду выходных сигналов совместим с магнитными датчиками и может использоваться с шестернями, имеющими различные модули зубьев. За счет внедрения датчиков этой конструкции на многих транспортных предприятиях удалось за последние годы значительно уменьшить количество случаев их неправильной работы, обусловленной рассмотренными критическими условиями монтажа.

Датчики с удвоением импульсов. Нередки случаи, когда заказчики хотели бы иметь большее число импульсов на один оборот, чем можно получить в условиях имеющегося монтажного пространства и при наименьшем модуле $m = 1$. Для этих целей разработан датчик, генерирующий по два импульса на каждый зуб шестерни. Его крепежный фланец соответствует существующим промышленным стандартам. Так, на шестерне с модулем $m = 1$ и диаметром 300 мм может быть получено 600 импульсов на один оборот. В настоящее время эти датчики проходят испытания.