

Бесфрикционные системы торможения и защиты двигателей в практических решениях

В статье рассматриваются практические решения в части бесфрикционных систем торможения и защиты приводов от перегрузки. Такие решения могут быть широко использованы на практике для самых различных применений.

В статье, опубликованной в [1], автором была затронута проблема организации торможения для приводов на основе шаговых двигателей. Поскольку тема шаговых двигателей вызывает повышенный интерес читателей, а упомянутый вопрос не был раскрыт достаточно широко и в целом ему мало уделяется внимания в технических изданиях, то предлагается его более широкое рассмотрение.

Владимир РЕНТЮК
rvk.modul@gmail.com

В системах на основе шаговых двигателей внешнее постоянное торможение особенно необходимо, если требуется точное позиционирование ротора шагового двигателя или исполнительного механизма в целом (особенно в случае использования и дополнительных понижающих редукторов), а проблема выбора вариантов не так проста, как кажется. Для этого обычно применяются фрикционные тормоза на основе различных материалов. В общем виде такое решение наиболее экономично и технологично. Проблема состоит в правильном выборе фрикционных пар и конструкции компенсатора, устанавливающего необходимое усилие подтормаживания. Обычно фрикционный тормоз для прецизионных систем имеет регулируемый пружинный компенсатор, который, собственно, и обеспечивает постоянное усилие подтормаживания в процессе эксплуатации устройства. Долгое время в изделии, выпускавшемся компанией, в которой работает автор статьи, использовался именно такой вариант исполнения подтормаживающего узла (рис. 6 из [1]). В качестве фрикционной пары применялся диск из зеркально отполированной нержавеющей стали и фторопластовые вставки с обычным пружинным компенсатором. Но в длительной эксплуатации (изделие предназначалось для круглосуточной непрерывной длительной работы) узел торможения начал засоряться и требовал обслуживания. При этом система оказалась сильно зависимой от качества стали и обработки ее поверхности. Так, одна из партий дисков под микроскопом показала, что их зеркально отполиро-

ванная поверхность реально сформирована из микроскопических чешуек, которые, как лезвия бритвы, срезали тончайшие частички фторопласта. Это и была одна из причин быстрого загрязнения. Поскольку другие варианты фрикционного торможения, упомянутые в [1], из-за особенностей конструкции не могли быть реализованы, нужно было найти решение, лежащее в совершенно иной плоскости, — обеспечивать необходимое торможение, но без использования контактирующих между собой тормозящих поверхностей, то есть бесфрикционное.

Первым логическим и в общем известным решением была установка дополнительного двигателя с неким усилием на роторе, противоположным усилию, которое обеспечивает основной двигатель. Как отмечалось в [1], автором статьи испытывались притормаживающие системы на основе коллекторных и шаговых двигателей постоянного тока. Торможение осуществлялось регулировкой тока в обмотках таких двигателей и частоты вращения, оба типа двигателя давали (в силу своих конструктивных особенностей) скачкообразное торможение (для его компенсации потребовался редуктор), а коллекторные двигатели, ко всему прочему, и требовали значительный компенсирующий ток управления, особенно в состоянии полной остановки. Системы на основе шаговых двигателей хотя и получались дороже, обладали меньшей неравномерностью торможения и выигрывали отсутствием генерации электромагнитных и радиопомех. В общем плане, решение на основе шагового двигателя с редуктором показало удовлетво-

рительный результат. Учитывая наличие редуктора и внешнего управления двигателем, формируемое такой схемой усилие торможения может для ряда применений оказаться чрезмерным. Меньшее усилие подтормаживания дало решение с использованием шагового двигателя, схема которого приведена на рис. 1. Оно не создает собственного момента вращения двигателя, а лишь обеспечивает момент его удержания.

Здесь усилие подтормаживания создается постоянным магнитным полем недорогого шагового двигателя на постоянных магнитах, конструктивно совмещенного с редуктором [2]. Его начальный момент торможения

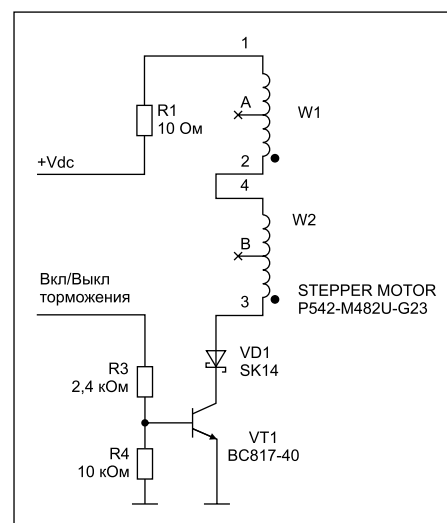


Рис. 1. Схема узла подтормаживания с малым усилием на базе шагового двигателя

зависит только от тока в обмотках двигателя. Обмотки могут быть соединены как последовательно (рис. 1), так и параллельно, что позволяет варьировать момент. Ток задается внешним источником напряжения (для данной схемы положительного) и/или номиналом резистора R1. Включение/отключение торможения может быть выполнено либо отдельным ключом (транзистор VT1 на рис. 1), либо отключением задающего ток источника питания. Как можно видеть, решение, приведенное на рис. 1, требует определенной мощности от общего источника питания устройства и соответствующего, пусть и простого, но управления — это накладывает определенные ограничения на его применение. И еще один важный момент: при вращении ротора под действием внешней силы шаговый двигатель, как и любой двигатель постоянного тока, превращается в генератор ЭДС. Вот почему должны быть приняты меры по соблюдению фазировки обмоток и предотвращению отрицательного воздействия этой ЭДС самоиндукции на схему управления (ключ и источник тока). Как видим, здесь не все так просто, как казалось на первый взгляд.

Однако существует аналогичное по действию решение, не требующее ни источников питания, ни электрических схем для его управления, — магнитное бесфрикционное торможение. Такое малоизвестное как в Украине так и в Российской Федерации решение было предложено компании, в которой работает автор статьи, партнерами из Великобритании. Изделия этого направления выпускаются, например, компаниями Techna International Ltd. (Великобритания) [9], Warner Electric [10], Precision Torque Control, Inc. [7] и SDP/SI [3] (все три из США). По мнению автора, сравнивая предложения данных компаний, конструктивное исполнение изделий и их спецификации, можно сделать вывод, что первенство в данном случае принадлежит компании SDP/SI, а остальные указанные компании, возможно, копируют ее продукты. Компания SDP/SI весьма мощная структура, состоящая из двух подразделений: SDP (подразделение продаж Stock Drive Product) и собственно разработчик SI (Sterling Instrument). Продукция компании SDP/SI совершенно неизвестна на нашем рынке (она даже отсутствует в нашем сегменте сети Интернет). Компания SDP/SI является лидером в разработке и производстве высокоточных механических компонентов, связанных с движением, таких как, например, прецизионные шестерни и редукторы, ремни и шкивы, муфты и двигатели. Ее предложения относятся к самым разнообразным сегментам рынка и промышленности: к робототехнике, включая аниматронику (роботы — аналоги живых существ); аэрокосмической индустрии; оборонной и медицинской промышленности и другим областям [3]. Причина ограниченной доступности высокотехно-



Рис. 2. Внешний вид нескольких вариантов исполнения магнитного тормоза от компании SDP/SI

гичных изделий компании SDP/SI, о которых пойдет речь, кроется в том, что на поставку этих элементов для стран бывшего СССР, находящихся вне ЕС, имеются экспортные ограничения. Надеюсь, что с открывшимися новыми возможностями для Украины после ее вступления в ассоциацию с ЕС эти рамки будут сняты. Но пока, по опыту автора статьи, это ограничение, например для совместных предприятий, легко обходится. Хотя компания SDP/SI представлена только в США, ее авторизованный дистрибьютор компания BDI (www.bdi.hu) находится в Венгрии. Менеджер по продажам силовых приводов компании г-н Levente Fazakas подтвердил автору статьи возможность поставок оригинальных устройств SDP/SI на Украину через Венгрию, но на условиях экспресс-доставки (TNT, UPS и т. п.), что не совсем удобно и дорого. А вот компания Warner Electric, выпускающая полностью соответствующие оригиналу реплики, имеет прямой выход на рынок Украины через киевскую компанию BIBUS Ukraine (www.bibus.ua). Менеджер по интересующим нас изделиям Олег Верещук подтвердил возмож-

ность беспрепятственной поставки от Warner Electric изделий данного типа украинским компаниям. С Российской Федерацией дело обстоит хуже, единственный российский дистрибьютор компании SDP/SI, как и все прямые американские поставщики, положительного ответа о возможности поставки в Россию подобных продуктов так и не дал.

Справедливости ради отмечу, что в России есть компании, которые работают в этой сфере, например НПО «ЭРГА» (г. Калуга) или ООО «ЭЛЕКТРОСИЛА» (г. Ростов-на-Дону), но они производят, скажем так, традиционные магнитные устройства.

Однако вернемся к технической стороне вопроса. Чем же так привлекательны изделия компании SDP/SI?

Внешний вид вариантов исполнения тормоза от компании SDP/SI [4] показан на рис. 2а, внутреннее строение представлено на рис. 3. Принцип функционирования устройства поясняет рис. 4. Данный принцип основан на том, что необходимое противодействие вращению и, следовательно, торможение осуществляется взаимодействием двух

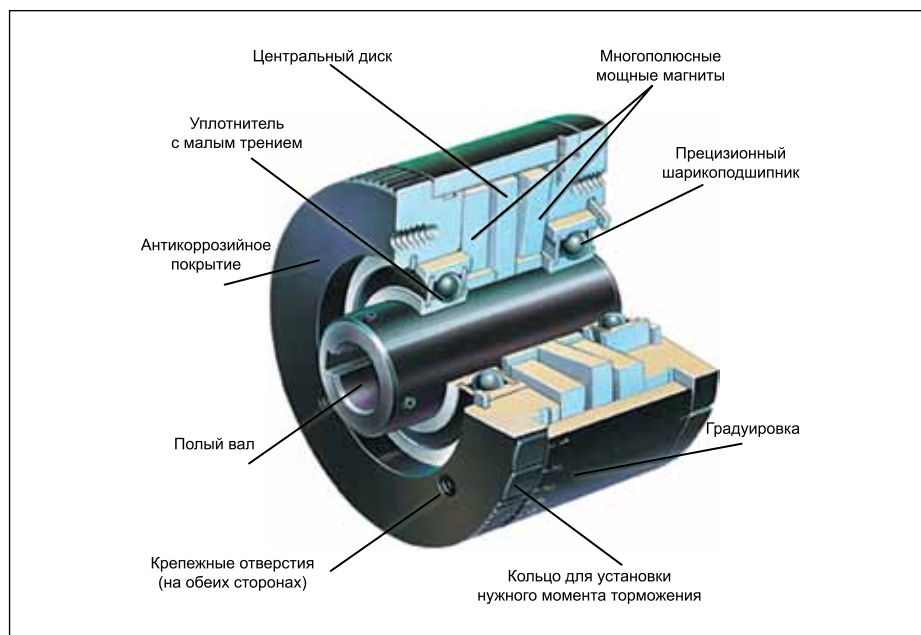


Рис. 3. Внутреннее устройство магнитного тормоза компании Precision Torque Control [8]

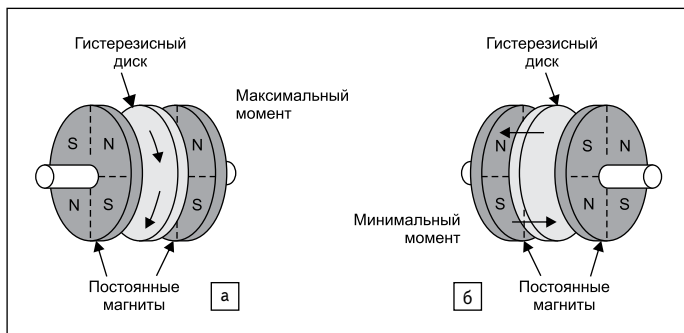


Рис. 4. Принцип действия устройства бесфрикционного торможения компании SDP/SI [4]

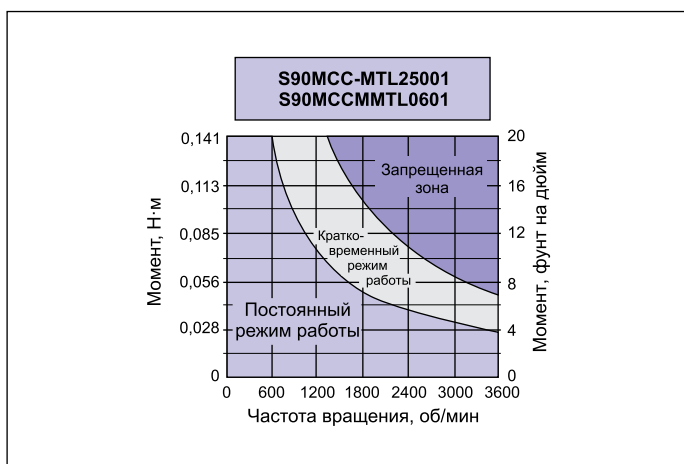


Рис. 5. Пример графика для выбора типа тормоза компании SDP/SI

сверхмощных дисковых постоянных магнитов (Magnetic Assemblies) со сложным расположением полюсов и установленной между ними дополнительной детали, выполненной в виде диска из особого магнитомягкого материала. Эта дополнительная деталь (рис. 4), которая, по-видимому, и является ноу-хау компании SDP/SI, названа гистерезисной (Hysteresis Assembly). Тонкости самой технологии полностью не разглашаются.

Конфигурация взаимной установки магнитных дисков, при которой обеспечивается максимальное усилие (момент) торможения, приведена на рис. 4а, а на рис. 4б — минимальное. При этом расстояние между магнитами не изменяется (в [1] из-за недостатка на момент написания статьи информации ошибочно указано обратное), изменяется только взаимодействие их магнитных полей через гистерезисный диск. Этот процесс в спецификации [4] описывается так, цитируется по оригиналу:

- Для получения максимального вращающего момента. Все основные детали устройства имеют отклонения в относительных размерах менее чем 0,025 мм. Гистерезисный диск расположен между магнитными дисками. Когда одноименные полюса магнитных дисков располагаются друг против друга, их поля приводят материал гистерезисного диска в максимальное насыщение, вынуждая силовые линии магнитного потока двигаться по окружности через материал гистерезисного диска.
- Для получения минимального вращающего момента. Когда противоположные полюса магнитных дисков располагаются друг против друга, их поля приводят материал гистерезисного диска в минимальное насыщение. Силовые линии магнитного потока при этом проходят через материал гистерезисного диска.

Комбинации углов регулирования между этими двумя крайними положениями магнитных дисков обеспечивают регулировку момента. Поскольку в системе нет каких-либо контактирующих по-

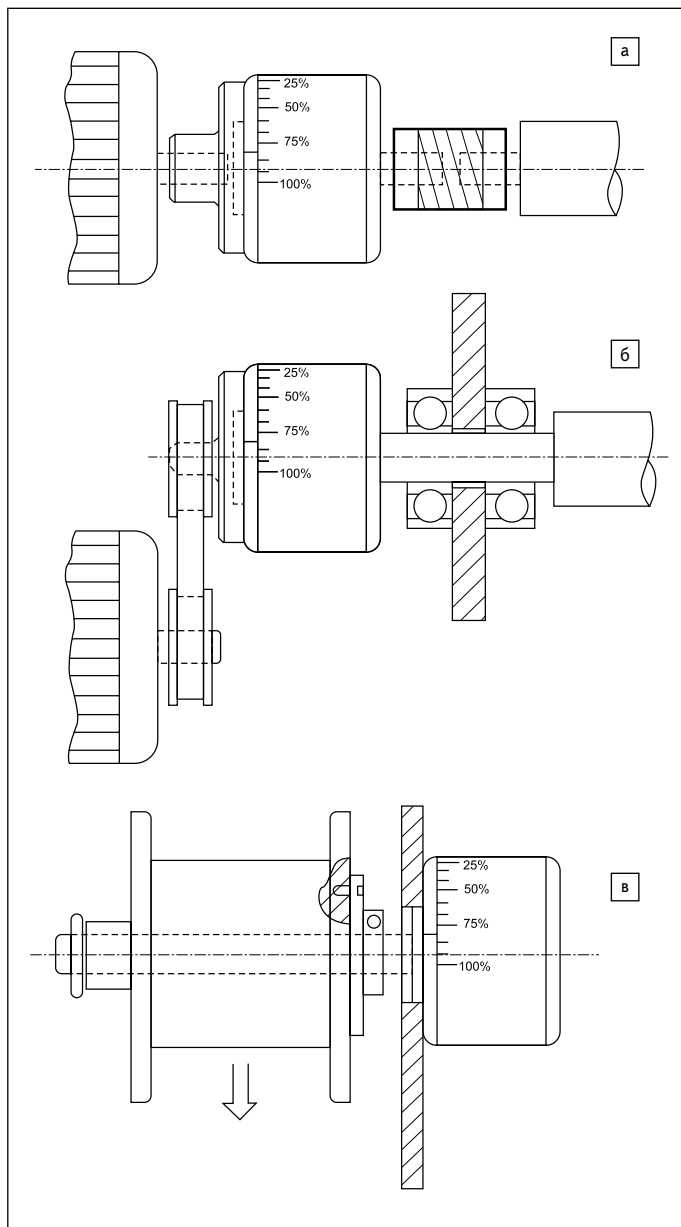


Рис. 6. Основные сферы применения магнитных систем компании SDP/SI

верхностей, установка усилия может поддерживаться без деградации длительное время.

Для каждого типа тормозов приводятся графики, позволяющие осуществить оптимальный выбор для конкретного применения. Пример графика приведен на рис. 5.

Для оптимального выбора сначала необходимо найти подходящее значение скорости вращения (в оригинале это указано как скорость скольжения — slip) вала магнитного тормоза — об/мин на оси X и на оси Y момент вращения в Н·м (шкала слева) или в фунтах на дюйм (шкала справа). Значения усилия в заданных градациях нанесены на корпусе устройства и легко устанавливаются поворотом шкалы, а после установки надежно фиксируются специальным винтом, расположенным, например, сбоку.

Координаты полученной точки могут попасть в одну из трех обозначенных на графике (рис. 5) областей: безопасный режим для постоянного действия; повторно-кратковременный режим, например пять минут работа, пять минут перерыв, и область, которая не рекомендуется для использования. Применение изделия в этой области в течение любого периода времени приведет к его перегреву и возможному повреждению.



Рис. 7. Тормоз для исключения разматывания бобины или шпули



Рис. 8. Обеспечение постоянного момента подачи нити



Рис. 9. Обеспечение постоянного момента при сматывании бумаги

Особенности предлагаемых к использованию бесфрикционных магнитных тормозных систем компании SDP/SI таковы, что, выполнив один раз настройку оборудования на технологических тормозах с заданным усилием, можно устанавливать аналогичные по типу уже при установке оборудования у конечных пользователей без переналадки устройства в целом. Основная область применений такой технологии — различные муфты сцепления, которые не столько передают, сколько ограничивают передаваемое усилие (примеры на рис. 6).

В этом случае устройство может устанавливаться непосредственно на вал двигателя и передавать его усилие (рис. 6а) или быть промежуточным звеном для ременной или цепной передачи (рис. 6б). То есть в общем виде предлагаемое решение прямо не предназначено для использования в качестве устройства торможения применительно к задаче, описываемой в данной статье. Но это следует из еще одного возможного применения — обеспечения постоянного усилия (правильнее: момента) торможения (рис. 6в), когда нагрузка на валу меняется в зависимости, например, от сматываемого материала (ткань, бумага, нить и т. п.). Таким образом обеспечивается равномерность, исключается провисание и рывки.

Как показала проверка, для подтормаживания приводов на основе шаговых двигателей данное решение прекрасно подходит. И такое его использование в изделии, упомянутом в начале статьи, позволило обеспечить долговременную точность позиционирования не хуже $\pm 0,1$ мм без технического обслуживания и дополнительной подстройки во время эксплуатации.

Основными достоинствами бесфрикционных изделий на основе постоянных магнитов, предлагаемых компанией SDP/SI, являются:

- не требуется электропитание;
- отсутствует момент трогания;
- постоянный момент, не зависящий от скорости вала (ротора);

- полное отсутствие контактирующих поверхностей или быстроизнашивающихся частей;
- отсутствие фрикционных элементов, полное сохранение заданного момента в течение длительного периода времени;
- бесшумность в работе;
- невозможность засорения конечного продукта частичками магнитов;
- возможность использования в самых тяжелых условиях окружающей среды;
- доступны варианты исполнения в виде узла как с обычным валом, так и сцепного типа clutch (с пустотелым валом);
- возможен заказ на исполнение по спецификациям потребителя.

Как видно, изделие действительно обладает уникальными свойствами, особенно хотелось бы отметить полное отсутствие момента трогания и плавность (отсутствие рывков, характерных для подтормаживающих двигателей без редукторов) усилия во время вращения, а также заявленную независимость момента торможения от скорости вращения вала. Хотя в последнее и трудно поверить без самостоятельной проверки. Кроме того, большинство предлагаемых устройств имеют неплохой дизайн. Они выполнены или из нержавеющей стали (рис. 2а), или из анодированного черного алюминия (рис. 2б, в) и стали с качественным черным оксидированием. Градация регулировки достаточно точная и указывается либо непосредственно на корпусе, либо на отдельном шильдике. Градуировка легко читается и, главное, обеспечивает полную повторяемость настройки. Хочу еще раз отметить, что такой тормоз совершенно не требует технического обслуживания (очистка, смазка, подстройка), что особенно важно, когда конечные изделия рассредоточены среди множества удаленных пользователей.

В изделии, не раз упомянутом автором статьи, магнитный тормоз от компании SDP/SI использовался для обеспечения заданного позиционирования накопительного и раздаточных барабанов, которые приводят-

ся в движение шаговыми двигателями, и требуют точной фиксации своего положения. Тормоз жестко связан через шестерню непосредственно с барабаном и подключается через дополнительный редуктор с отношением 25:1. За все время эксплуатации такой системы, а она, как уже говорилось, работает круглосуточно и без перерывов, в отличие от ее фрикционного аналога не было ни одного отказа, переналадка или подстройка у конечных пользователей также не осуществлялась. Единственным относительным недостатком данного решения является отсутствие возможности снятия (отключения) торможения и сложность приобретения таких магнитных тормозов для европейских стран — не членов ЕС и не состоящих в ассоциации с ЕС, а также цена устройств. Так, на момент написания статьи (август 2014), согласно [5], цена модели S90MCCMMTL0601 с моментом торможения 0,007–0,14 Н·м составляла от \$197,48 до \$174,29 за штуку, в зависимости от количества приобретаемых изделий. Но все это в итоге окупается страницей и, поверьте, того стоит. Диапазон выбора магнитных тормозов по моменту достаточно широк: от 0,0003–0,002 Н·м для модели S90MCCM5130213 до 0,33–7,9 Н·м для модели S90MCCM80619.

Примеры основного практического применения магнитных бесфрикционных систем приведены ниже (рис. 7–9).



Рис. 10. Электромагнитный тормоз S90MPA-B11D12S

В [4] также приведены детальные примеры расчетов для всех рассмотренных выше практических применений.

Кроме не потребляющих мощности систем на постоянных магнитах, в программе поставок компании SDP/SI имеются и традиционные тормоза и муфты, в том числе и электромагнитные, момент торможения и усилия которых задается величиной тока от внешнего источника. Использование таких систем в ряде случаев может дать лучший результат, чем вариант, предложенный

на рис. 1. Пример такого тормоза семейства S90MP можно посмотреть в [6], а его внешний вид представлен на рис. 10. ■

Литература

1. Рентюк В. Шаговые двигатели и особенности их применения // Компоненты и технологии. 2013. № 10.
2. Geared stepper motor P542-M48 series, Mclennan Servo Supplies Ltd. www.mclennan.co.uk
3. www.sdp-si.com
4. Magnetic Clutches & Couplings, Sterling Instrument <http://www.sdp-si.com/D810/PDFS/Section-13/81013010.pdf>
5. <https://sdp-si.com/eStore/Catalog/Group/993>
6. <http://sdp-si.com/ss/pdf/79013028.PDF>
7. www.precisiontork.com
8. <http://www.precisiontork.com/permmagnet/gallery/permanentmagnet.html>
9. <http://www.techna.co.uk/mechanical/magnetic-brakes>
10. www.warnerelectric.com