

Обеспечивая поезд тягой: навстречу новым технологическим запросам

В статье описаны датчики напряжения DVM, созданные компанией LEM с применением цифровой технологии изоляции. Они обеспечивают надежное измерение постоянного и переменного напряжения на транспорте, в частности, является одним из важных условий корректной работы тягового преобразователя.

**Мичел Гхиларди
(Michel Ghilardi)**

Перевод: Евгений Карташев

Одним из ключевых элементов тягового привода для транспорта, от городского и до пригородных и высокоскоростных поездов, является тяговый преобразователь, преобразующий напряжение источника энергии, в качестве которого может выступать контактная сеть или дизель-генератор, для управления тяговыми электродвигателями.

Тяговый преобразователь содержит выпрямитель, если он подключен к источнику питания переменного тока, или фильтр в случае подключения непосредственно к сети постоянного тока, а также инвертор привода двигателя (рис. 1). Выход выпрямителя или контактной сети соединяется с инвертором через звено постоянного тока (DC-шину). Чтобы обеспечить устойчивую работу привода, необходимо поддерживать постоянное напряжение в DC-цепи независимо от нагрузки. При этом крайне важно обеспечить надежное измерение уровня постоянного напряжения. Ключевым компонентом для выполнения данной задачи является датчик напряжения.

Поезда эксплуатируются в условиях жестких воздействий окружающей среды, в том числе при экстремальных уровнях температуры, засушливости или влажности. Это означает, что тяговые преобразователи и их компоненты подвергаются сильной нагрузке. Кроме того, новые технологии силовой электроники не только предлагают значительные преимущества, но и подразумевают наличие дополнительных ограничений, влияющих на поведение компонентов. Источником основных преимуществ от внедрения новых технологий для тяговых преобразователей является полупроводниковая промышленность, которая позволяет переходить на более высокие частоты коммутации и, соответственно, значительно сократить потери мощности и уменьшить габариты преобразователей. К недостаткам повышения рабочей частоты можно отнести повышение интенсивности магнитных полей и уровня синфазных помех, особенно сильно влияющих на работу датчиков напряжения.

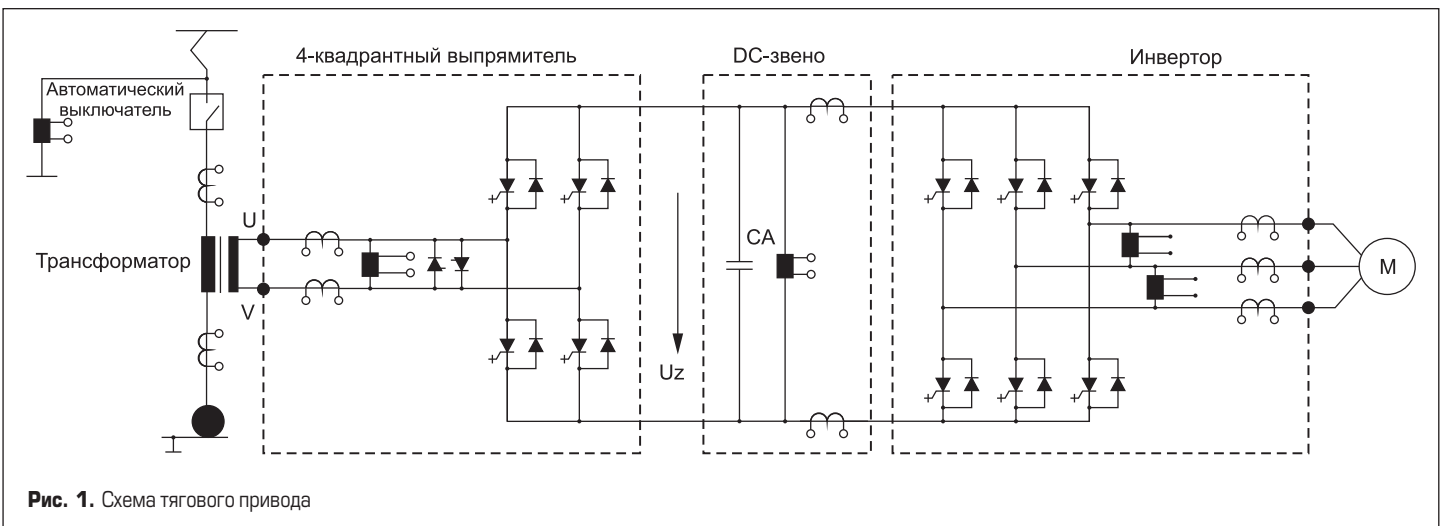


Рис. 1. Схема тягового привода

Старые технологии, используемые ранее в датчиках напряжения, не подходят для более жестких условий окружающей среды, поэтому новые датчики DVM, созданные с применением проверенных запатентованных технологий LEM, являются отличным решением. Они имеют чрезвычайно высокую устойчивость к внешним магнитным полям, а напряжение частичного разряда у них превышает максимальное напряжение DC-шины. Обладая компактными габаритами, хорошей точностью, очень низким температурным дрейфом и высокой устойчивостью к синфазным dv/dt -помехам, DVM является отличным выбором для измерения напряжения в цепи постоянного тока.

Новый датчик напряжения от LEM

На основе цифровой технологии изоляции, успешно примененной ранее в выпускаемой с 2012 г. серии DVL, компания LEM разработала новую серию датчиков напряжения DVM, которая охватывает диапазон номинальных напряжений 600–4200 V_{RMS} (с помощью шести датчиков на разные напряжения, рис. 2) и обеспечивает возможность измерения напряжения свыше 2000 V_{RMS} , что является самым высоким номинальным напряжением для серии DVL. Для работы датчик DVM достаточно подключить к измеряемой цепи без применения дополнительных резисторов на входе и подать на него питание от стандартного источника напряжения в диапазоне $\pm 13,5... \pm 26,4$ В.

Потребление датчика составляет не более 30 мА (максимальное внутреннее потребление) при отсутствии напряжения на входе, плюс выходной ток до 50 мА (типичное значение) при подаче номинального напряжения, в варианте исполнения с токовым выходом.

Датчики DVM сочетают в себе все преимущества предыдущих серий LEM и при этом соответствуют всем новым требованиям по EMC. Сенсоры разработаны в соответствии со стандартами IRIS и ISO 9001, они отличаются от датчиков предыдущего поколения по четырем показателям:

- низкое потребление — около 30 мА;
- полоса частот — 12 кГц;
- безопасная изоляция — 12 кВ;



Рис. 2. Датчик напряжения серии DVM для измерения напряжения от 600 до 4200 V_{RMS}

- очень хорошая точность во всем диапазоне рабочих температур.

Как это работает?

Рассмотрим схему на рис. 3, начиная с левой части. Входное напряжение может составлять $\pm 4,2$ кВ, первичный каскад представляет собой делитель напряжения, который уменьшает его уровень до нескольких вольт, он способен выдержать высокое значение dv/dt , имея при этом низкий температурный дрейф. Далее сигма-дельта ($\Sigma\Delta$) модулятор преобразует аналоговый сигнал в цифровой 16-битный код.

Далее цифровой кодировщик формирует однобитовый последовательный сигнал, что позволяет передавать данные по одному изолированному каналу. После этого усилитель подает сигнал на первичную обмотку трансформатора, обеспечивающего требуемую гальваническую развязку. Максимальное испытательное напряжение изоляции составляет 12 кВ. Соответственно, трансформатор должен выдерживать такой уровень напряжения, при этом изоляционные характеристики должны быть гарантированы в течение всего срока службы. Эта возможно только в том случае, если обеспечивается частичный разряд менее 10 пКл при приложении напряжения 5 кВ между входом и выходом устройства. Датчики DVM разработаны с учетом этих требований.

На выходе битовый поток декодируется и фильтруется цифровым фильтром. Поскольку прямоугольная форма входного сигнала искажается трансформатором, к вторичной обмотке трансформатора подключен триггер Шмитта, восстанавливающий прямоугольный сигнал. Он поступает затем на декодер и цифровой фильтр, функция которых состоит в том, чтобы преобразовать битовый поток в стандартный цифровой сигнал, который может быть использован в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП) микроконтроллера. Восстановленный выходной сигнал полностью изолирован от входного (высоковольтного) напряжения и при этом обеспечивает его точное отображение.

Датчик может быть легко адаптирован для различных диапазонов измерения путем перепрограммирования коэффициента усиления

в микроконтроллере. Это не требует изменений в конструкции трансформатора или печатной платы внутри датчика. Микроконтроллер компенсирует выходное смещение и настраивает усиление программным способом, а затем преобразует сигнал из цифровой формы в аналоговую. Микроконтроллер обрабатывает данные с выхода цифрового фильтра и подает на 12-разрядный ЦАП за время около 6 мкс. Аналоговое выходное напряжение фильтруется и преобразуется в выходной ток (полная шкала ± 75 мА) с помощью генератора тока, защищенного от короткого замыкания.

Микроконтроллер также управляет работой DC/DC-конвертера, формирующего регулируемое напряжение для внутренних потребителей. Датчики DVM работают от типового напряжения питания ± 24 В или ± 15 В, а DC/DC-преобразователь вырабатывает питание входных каскадов $\Sigma\Delta$ -модулятора и цифрового энкодера, составляющее ± 5 и $\pm 3,3$ В. DC/DC-преобразователь изображен в верхней части функциональной схемы (рис. 3); частота конвертера задается микроконтроллером.

Последний блок, находящийся справа от микроконтроллера, представляет собой преобразователь напряжения в ток. Этот узел предназначен для заказчиков, которые предпочитают иметь на выходе токовый сигнал, как правило, 50 мА при номинальном напряжении, что обеспечивает необходимый уровень электромагнитной совместимости (EMC). Низкоимпедансный токовый выход менее чувствителен к помехам от внешних электромагнитных полей. Доступно также исполнение с выходом по напряжению (10 В при номинальном напряжении), а также с токовым выходом 4–20 мА для однополярного измерения.

Основные характеристики

При типовой погрешности $\pm 0,5\%$ от V_{PN} при комнатной температуре, датчики DVM имеют достаточно низкий температурный дрейф, в результате типовая погрешность составляет всего $\pm 1\%$ от V_{PN} в диапазоне рабочих температур $-40...+85$ °C. Начальное напряжение смещения при $+25$ °C не превышает 50 мкА при максимально возможном дрейфе ± 100 мкА (типичное значение) в диапазоне рабочих температур.

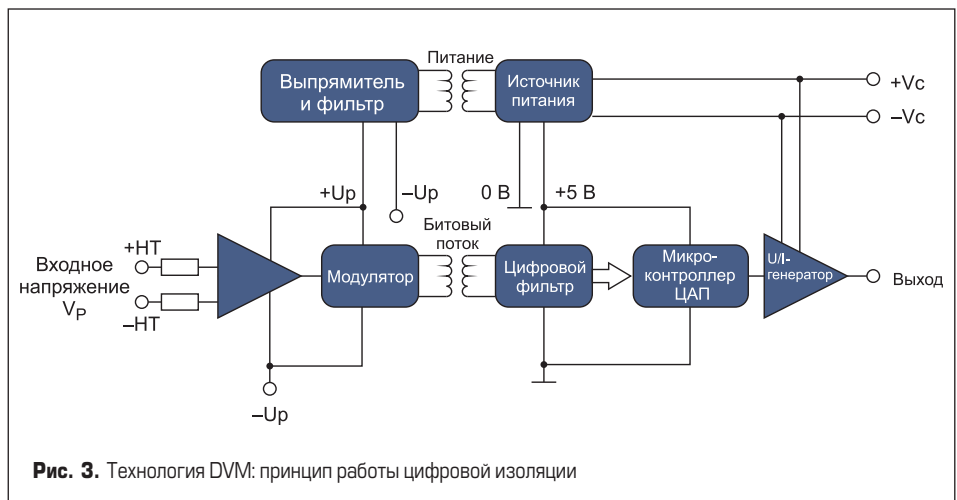


Рис. 3. Технология DVM: принцип работы цифровой изоляции

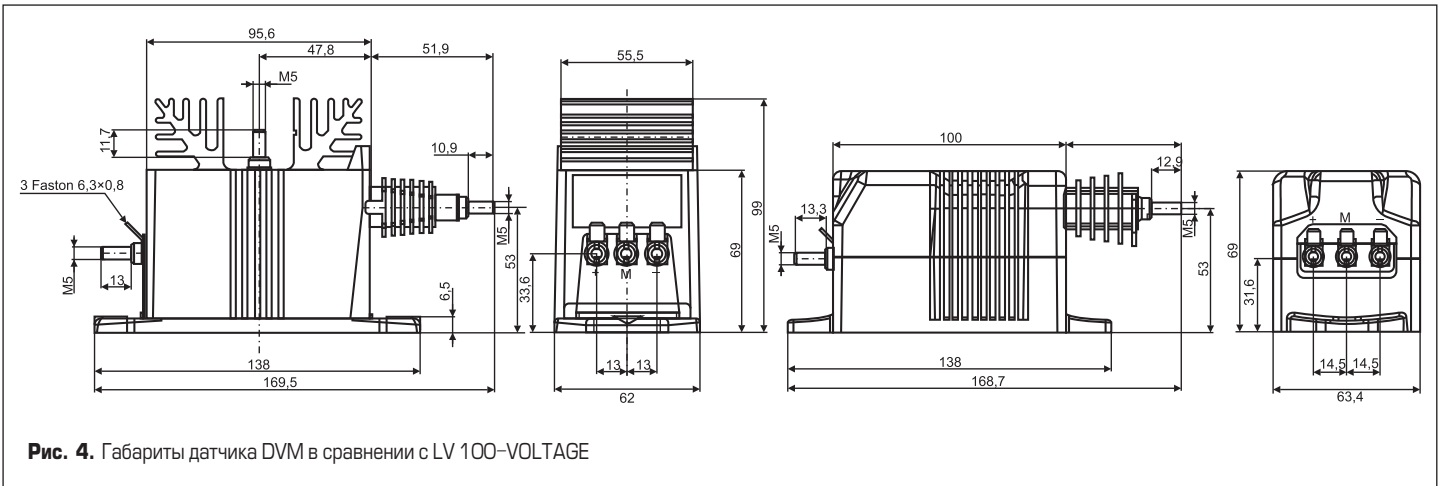


Рис. 4. Габариты датчика DVM в сравнении с LV 100-VOLTAGE

Нелинейность характеристики составляет не более $\pm 0,1\%$. Типовое время отклика датчиков DVM (определяемое при $90\% V_{PN}$) на скачок напряжения от 0 до V_{PN} составляет 48 мкс (макс. значение 60 мкс). Благодаря этому датчики обеспечивают полосу пропускания 12 кГц на уровне -3 дБ.

Механические характеристики и стандарты

Новые серии датчиков LEM создает конструктивно совместимыми, и в то же время превосходящими по параметрам, с предыдущими поколениями датчиков (семейство LV 100). С точки зрения функциональности и характеристик, они обеспечивают 100%-ную совместимость, отличаясь в то же время повышенным уровнем точности и температурной стабильности, что значительно упрощает модернизацию.

Датчики серии DVM на 100% совместимы по крепежным размерам, но несколько отли-

чаются по габаритам, в частности по положению входных и выходных разъемов. Благодаря новой конструкции датчики DVM меньше по высоте на 30%, занимают на 25% меньше места и легче на 56% (рис. 4).

Уменьшение размеров не ухудшает высокую устойчивость датчиков DVM к воздействию внешних помех или скачкам напряжения благодаря оптимизации конструкции выполненной на печатной плате встроенной электроники датчика, а также оптимизации механических параметров конструкции (рис. 5).

Ошибка датчика DVM 4000 при воздействии синфазной помехи с $dv/dt = 6$ кВ/мкс (напряжение 4200 В) ограничена уровнем 0,5% от V_{PN} с небольшим временем восстановления (менее 50 мкс). У аналогичного сенсора LV 100 при тех же условиях испытаний погрешность может достигать до 18% при времени восстановления 500 мкс.

Благодаря низкой паразитной емкости датчиков DVM воздействие динамической

синфазной помехи сведено почти к нулю (находится в пределах погрешности) (рис. 5). Эта характеристика является очень важной, поскольку новые технологии силовых ключей, таких как IGBT и SiC MOSFET, генерируют более высокие значения dv/dt , воздействующие на вход датчика. Вторичные, выходные цепи датчика, как правило, заземлены по соображениям безопасности. На первичной стороне, на входе датчика измеряется дифференциальное напряжение, но его потенциал может «плавать». Эти изменения потенциала на входе вызывают помехи на выходе, которые не могут быть отфильтрованы, поскольку в противном случае это приведет к ухудшению времени отклика. Поэтому паразитная емкость между входом и выходом должна быть снижена до минимально возможного уровня, обеспечиваемого конструкцией датчика.

Предыдущее поколение датчиков напряжения LV 100-VOLTAGE создано на основе эффекта Холла, это компенсационные датчики с использованием магнитной цепи, что делает их более чувствительными к внешним магнитным полям, в то время как в датчиках DVM нет магнитных цепей.

Датчики DVM адаптированы по конструкции входных изоляторов в зависимости от измеряемого напряжения, а также по способу подключения выхода, имея такие варианты исполнения, как: с выходным разъемом, с экранированным кабелем, терминалы (резьбовые шпильки M4, M5, втулки, UNC и т. д.) в соответствии с требованиями заказчика.

Датчики серии DVM были разработаны и испытаны в соответствии с последними мировыми стандартами для транспортных и промышленных применений. Стандарт EN 50155 «Электронное оборудование для подвижного состава», разработанный для железнодорожной отрасли, является эталонным для нормирования электрических, климатических и механических параметров. Соответствие ему гарантирует качество продукции, выпускаемой для применения на железной дороге. Для промышленных применений датчики соответствуют следующим стандартам: IEC 61800 (приводы), IEC 62109 (солнечная энергетика), IEC 61010 (безопасность).

Как упоминалось ранее, особое внимание инженерами LEM было уделено улучшению

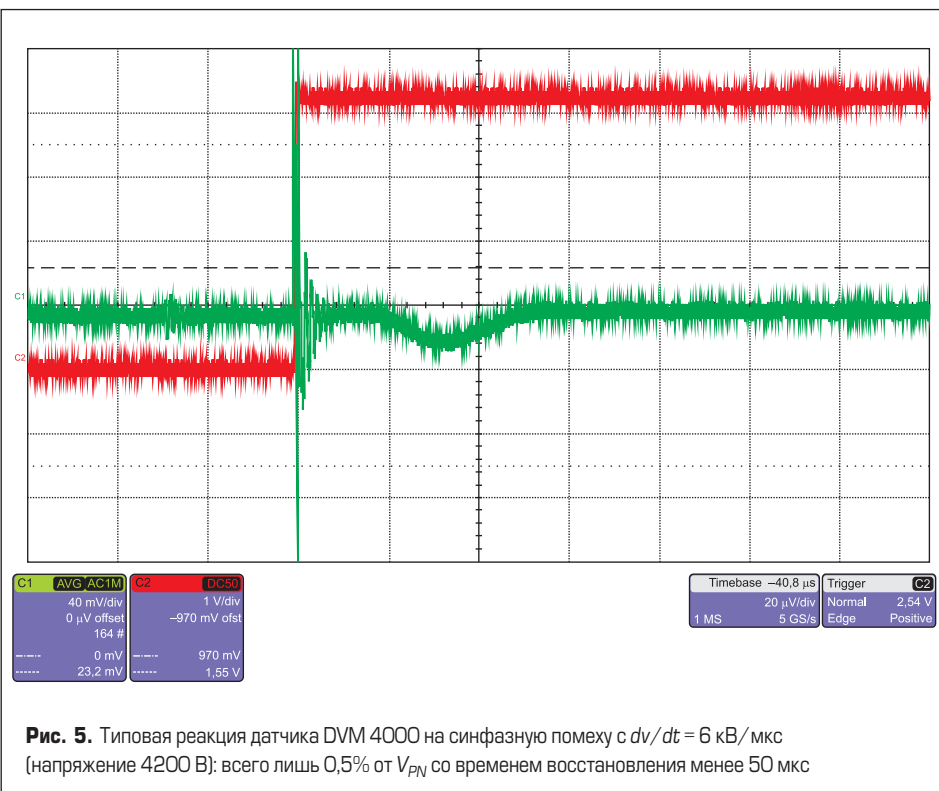


Рис. 5. Типовая реакция датчика DVM 4000 на синфазную помеху с $dv/dt = 6$ кВ/мкс (напряжение 4200 В): всего лишь 0,5% от V_{PN} со временем восстановления менее 50 мкс

механической конструкции DVM с целью обеспечения низкого уровня частичных разрядов при воздействии высокого напряжения. Чем выше напряжение затухания частичных разрядов (>5 кВ), тем выше вероятность того, что разряды не будут наблюдаться при нормальной эксплуатации. Уровень частичных разрядов для DVM составляет 10 пКл.

С ростом напряжения повышается вероятность появления частичных разрушающих разрядов между двумя точками, соответствующими, как правило, противоположным потенциалам любого компонента. Частичные разряды снижают свойства изоляции с течением времени и, в конечном итоге, ухудшают качество изделия вплоть до его выхода из строя. Эти разряды происходят при напряжении, называемом «напряжением зажигания», и счи-

таются исчезающими, если они достигают уровня 10 пКл при уменьшении приложенного напряжения («напряжение затухания»). Как правило, «напряжение затухания» всегда ниже, чем «напряжение зажигания».

Чтобы гарантировать длительный срок службы компонента, необходимо, конечно, иметь «напряжение затухания» на более высоком уровне, чем обычный уровень рабочего напряжения. Использование датчиков DVM обеспечивает это требование благодаря величине «напряжения затухания» 5 кВ при диапазоне измеряемых сигналов 600–4200 V_{RMS} . Для оценки интенсивности отказов были проведены ускоренные испытания, в том числе на воздействие температурных циклов, а также полный цикл испытаний в соответствии с международными стандартами. Благодаря инновационной конструкции с использова-

нием изолирующего трансформатора и цифровых технологий, у датчиков серии DVM гарантированы изоляционные характеристики и уровень частичных разрядов при использовании для измерения в цепях с импульсным напряжением до 5 кВ.

Датчики DVM, предназначенные для измерения средних и высоких уровней напряжения, подходят для работы в жестких условиях, требующих высоких характеристик по точности, диапазону, линейности, низкому начальному смещению, малому температурному дрейфу и т. д. Благодаря большому иммунитету к внешним электромагнитным воздействиям, порожденным проходящими рядом токовыми шинами или внешними помехами, например, и высокой устойчивости к большим синфазным перепадам входного напряжения, датчики DVM обеспечивают отличную надежность.