

# Новые горизонты технологии датчиков тока

## на эффекте Холла

**Мишель Гиларди**  
(Michel Ghilardi)

**С**нижение энергопотребления и повышение эффективности — одни из важнейших задач при проектировании большинства изделий силовой электроники, особенно электроприводов, импульсных источников питания, источников бесперебойного питания и промышленного оборудования (например, сварочных аппаратов). То же касается и современных электростанций, работающих на солнечной и ветряной энергии.

Для решения этих задач необходимо использовать самые передовые материалы с повышенной электрической прочностью и пониженным уровнем частичного разряда, которые бы гарантировали безопасность изделия и его устойчивость ко внешним электрическим, магнитным и электромагнитным полям. Помимо высокой помехоустойчивости и низкого уровня собственного излучения, требуется также обеспечить сохранение эксплуатационных характеристик изделия в широком диапазоне температур.

В контексте требований к силовым полупроводниковым приборам это означает, в частности, низкий температурный дрейф, малое время отклика, высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала, широкую полосу пропускания и малый уровень шума сопутствующих компонентов. Компания LEM воплощает эти характеристики в своих датчиках тока. Ее новейшая продукция меняет существующие представления об ограничениях технологии датчиков на эффекте Холла.

### Новый этап

Классические датчики Холла уже давно применяются в промышленности. Они имеют довольно низкую погрешность (1–2%), но точность ухудшается в широком диапазоне температур. Как вариант,

вместо элемента Холла можно использовать феррозондовый (fluxgate) детектор, у которого выше температурная стабильность. В основе своей феррозондовый детектор — это не более чем катушка из медного провода с сердечником, но обеспечение стабильно высоких характеристик датчиков на его основе может быть весьма дорогостоящим.

Поэтому инженеры компании LEM начали искать способ добиться от технологии на эффекте-Холла таких же характеристик, как у феррозондовых датчиков. Результатом этой работы стало создание специализированной ИС (ASIC) с элементами Холла, предназначенной для применения в датчиках компенсационного типа. Датчики на ее основе также не имеют таких недостатков феррозондовых, как повышенный уровень шума. В отличие от феррозондовых датчиков они начинают работать даже если питание на датчик подается после подачи первичного тока и не имеют задержки запуска после перегрузки. Эта специализированная ИС применяется в новейших датчиках LEM, и ей принадлежит основной вклад в улучшение таких показателей, как величина начального смещения и его дрейф. Секрет заключается в патентованном методе «вращения» тока и оригинальной топологии ASIC.

Успех новой ИС был таков, что компания решила обновить всю линейку компенсационных датчиков тока на эффекте Холла с номинальными значениями измеряемого тока 200–2000 А. В рамках этой линейки были выпущены новые датчики на четыре номинала тока: LF 210-S, LF 310-S, LF 510-S и LF 1010-S. Выход пятого, LF 2010-S, состоялся в апреле 2015 г. (рис. 1).

Еще одно важное преимущество семейства LF xx10 — низкая чувствительность к внешним переменным и постоянным электромагнитным полям,



Рис. 1. Новая линейка датчиков тока LF xx10

позволяющая уменьшить размеры проектируемых изделий, так как теперь на датчики не влияют поля от соседних компонентов. Кроме того, расширился диапазон измерения, даже при малых значениях  $di/dt$ . Это связано с трансформаторным эффектом датчика, ток вторичной обмотки которого превышает верхнюю границу заданного диапазона измерения за счет использования магнитопровода с частичным воздушным зазором.

Датчики из новой линейки должны особенно заинтересовать инженеров-конструкторов в таких отраслях, как промышленность и железнодорожный транспорт. Они позволяют измерять выходной ток инверторов — в частности, в статических преобразователях. Датчики пригодны для эксплуатации в жестких условиях окружающей среды и полностью совместимы (в том числе по размерам посадочного места) с датчиками предыдущего семейства LEM LF xx05, так что их можно использовать при модернизации старого оборудования.

**Принцип работы**

Принцип точного измерения постоянных токов следующий: потокосцепление  $\Theta_p$ , создаваемое измеряемым током  $I_p$ , компенсируется противоположным по знаку потокосцеплением  $\Theta_s$  тока  $I_s$ , протекающего в обмотке с известным числом витков  $N_s$  (рис. 2):

$$\Theta_p - \Theta_s = 0, \text{ или } N_p \times I_p - N_s \times I_s = 0,$$

где  $N_p$  — число витков первичной обмотки, а  $N_s$  — число витков вторичной обмотки.

Чтобы измерение было точным, необходимо устройство, которое бы с очень малой погрешностью определяло равенство нулю потокосцепления  $\Theta$ . Цель состоит в том, чтобы создать датчики тока со следующими характеристиками:

- высокая линейность;
- повышенная долговременная стабильность;
- низкий уровень остаточного шума;
- низкий температурный дрейф;
- широкая полоса пропускания;
- высокая надежность.

Чтобы точно скомпенсировать два противоположных по знаку потокосцепления ( $\Theta_p$  и  $\Theta_s$ ), необходим детектор, способный с малой погрешностью регистрировать равенство нулю суммарного потокосцепления  $\Theta$ . Это означает, что для получения максимально возможного выходного сигнала детектор должен быть очень чувствителен к малым значениям остаточного магнитного потока  $\Psi$ , созданного потокосцеплением  $\Theta$ .

Именно на этом принципе основана работа датчиков тока из нового семейства LF xx10 на базе упомянутой выше специализированной ИС с номинальными значениями измеряемого тока 200–2000 А (пиковое значение — 4000 А). Для их питания достаточно стандартного двуполярного источника напряжения постоянного тока с выходным напряжением  $\pm 11,4... \pm 25,2$  В.

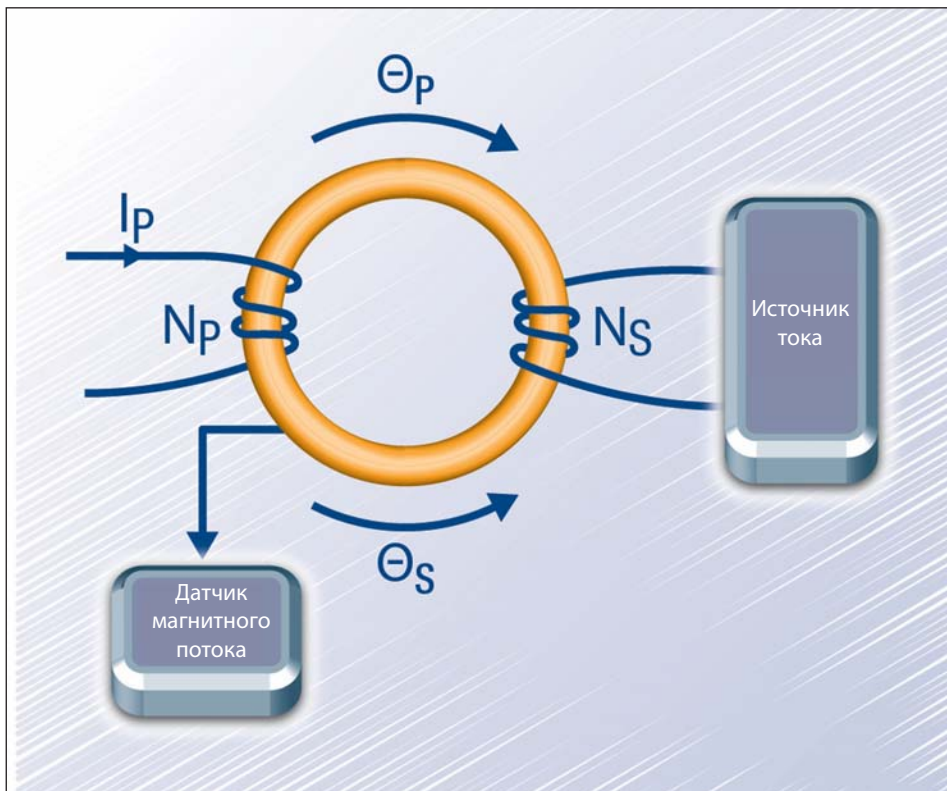


Рис. 2. Принцип работы компенсационного датчика тока

Новые датчики сохраняют все преимущества изделий предыдущего поколения, отличаясь при этом повышенной точностью, низкой чувствительностью ко внешним полям, расширенным диапазоном измерения, высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала и высокой электромагнитной совместимостью (таблица).

**Характеристики**

Общая погрешность новых датчиков находится в пределах  $\pm 0,3\%$  от  $I_{PN}$  при комнатной температуре, но не менее важно то, что она не превышает  $\pm 0,6\%$  от  $I_{PN}$  во всем рабочем диапазоне температур  $-40...+85$  °C (рис. 3).

У датчиков семейства LF 1010 начальное смещение при  $+25$  °C составляет  $\pm 1$  А/виток

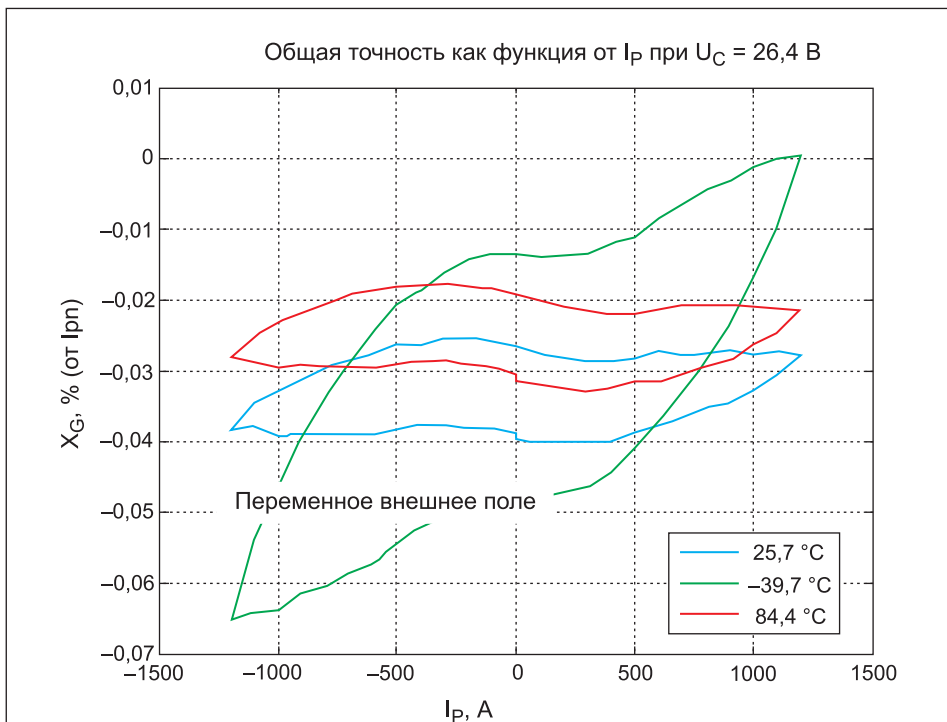


Рис. 3. Типичное значение общей погрешности датчика LF 1010 в диапазоне температур  $-40...+85$  °C

Таблица. Сравнение характеристик датчиков семейства LF xx10 и предыдущего поколения датчиков

| Параметры  | Модели               |                             |                      |                             |                      |                             |                      |                             |
|--|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|
|  | LF 1005-S            | LF 1010-S                   | LF 505-S             | LF 510-S                    | LF 305-S             | LF 310-S                    | LF 205-S             | LF210-S                     |
| Номинальный первичный ток $I_{PN}$ , А   | 1000                 |                             | 500                  |                             | 300                  |                             | 200                  |                             |
| Диапазон измерения первичного тока, $I_{PM}$ , А   | 1800                 | 2500                        | 800                  | 1500                        | 500                  |                             | 420                  |                             |
| Отношение числа витков   | 1/5000               |                             |                      |                             | 1/2000               |                             |                      |                             |
| Напряжение питания, В ( $\pm 5\%$ )  | $\pm 15-24$          |                             |                      |                             | $\pm 12-20$          |                             | $\pm 12-15$          |                             |
| Линейность $\epsilon_L$  | < 0,1%               |                             |                      |                             |                      |                             |                      |                             |
| Дрейф смещения относительно $I_{PN}$ , %   | < $\pm 0,4$          | < $\pm 0,1$                 | < $\pm 0,4$          | < $\pm 0,1$                 | < $\pm 0,5$          | < $\pm 0,1$                 | < $\pm 0,4$          | < $\pm 0,1$                 |
| Общая точность при $I_{PN}$ , % ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ )  | < $\pm 0,5$          | < $\pm 0,3$                 | < $\pm 0,7$          | < $\pm 0,3$                 | < $\pm 0,5$          | < $\pm 0,3$                 | < $\pm 0,5$          | < $\pm 0,3$                 |
| Общая точность при $I_{PN}$ во всем диапазоне температур   | < $\pm 0,9$          | < $\pm 0,4$                 | < 1,1                | < $\pm 0,6$                 | < $\pm 1$            | < $\pm 0,2$                 | < $\pm 0,9$          | < $\pm 0,2$                 |
| Время отклика $t_r$ на ступенчатое изменение тока по уровню 90% от $I_{PN}$ ( $di/dt = 100 \text{ A/мкс}$ ), мкс | < 1                  | < 0,5                       | < 1                  | < 0,5                       | < 1                  | < 0,5                       | < 1                  | < 0,5                       |
| Технология   | Трад. элемент Холла  | Спец. ИС с элементами Холла | Трад. элемент Холла  | Спец. ИС с элементами Холла | Трад. элемент Холла  | Спец. ИС с элементами Холла | Трад. элемент Холла  | Спец. ИС с элементами Холла |
| Размеры (Д×Ш×В), мм  | 90×34×95 (отв. — 38) | 94×34×95 (отв. — 40)        | 70×31×70 (отв. — 30) | 70×31×70 (отв. — 30)        | 54×27×57 (отв. — 20) | 54×27×57 (отв. — 20)        | 49×26×52 (отв. — 15) | 49×26×52 (отв. — 15)        |
| Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$  | -40...+85            |                             | -40...+70            |                             | -40...+85            |                             |                      |                             |

при максимальном дрейфе  $\pm 1 \text{ A/виток}$  в пределах всего рабочего диапазона температур. Погрешность чувствительности при  $+25^\circ\text{C}$  —  $\pm 0,1\%$ , нелинейность — всего  $\pm 0,1\%$ .

За счет расширенного диапазона измерения увеличился максимально допустимый пиковый ток по сравнению с датчиками семейства LF xx5. При отношении числа витков, равном 5000, датчик LF 1010 позволяет измерять пиковый ток до 2500 А, тогда как максимально допустимый пиковый ток датчика LF 1005 составлял всего 1800 А.

Благодаря частичному воздушному зазору магнитопровода (рис. 4) датчики моделей LF 510, 1010 и 2010 очень мало чувствительны ко внешним переменным и постоянным электромагнитным полям. Это способствует уменьшению размеров проектируемых изделий, так как расположенные вблизи проводники с большими токами практически не оказывают влияния на датчики.

Лучший способ смоделировать внешние поля — поместить токовую шину с номинальным током в разных местах в окрестности датчика. Дополнительную погрешность, обусловленную полем от токовой шины, можно измерить (рис. 5). Это также способ смоделировать обратную токовую шину и ее влияние на погрешность датчика.

Например, чувствительность датчика LF 1010-S ко внешним переменным и постоянным полям в худшем случае впятеро ниже, чем у датчика LF 1005-S (предыдущего поколения). Типичная погрешность датчика LF 1010-S — 2% от  $I_{PN}$ , тогда как



Рис. 4. Частичный воздушный зазор магнитопровода

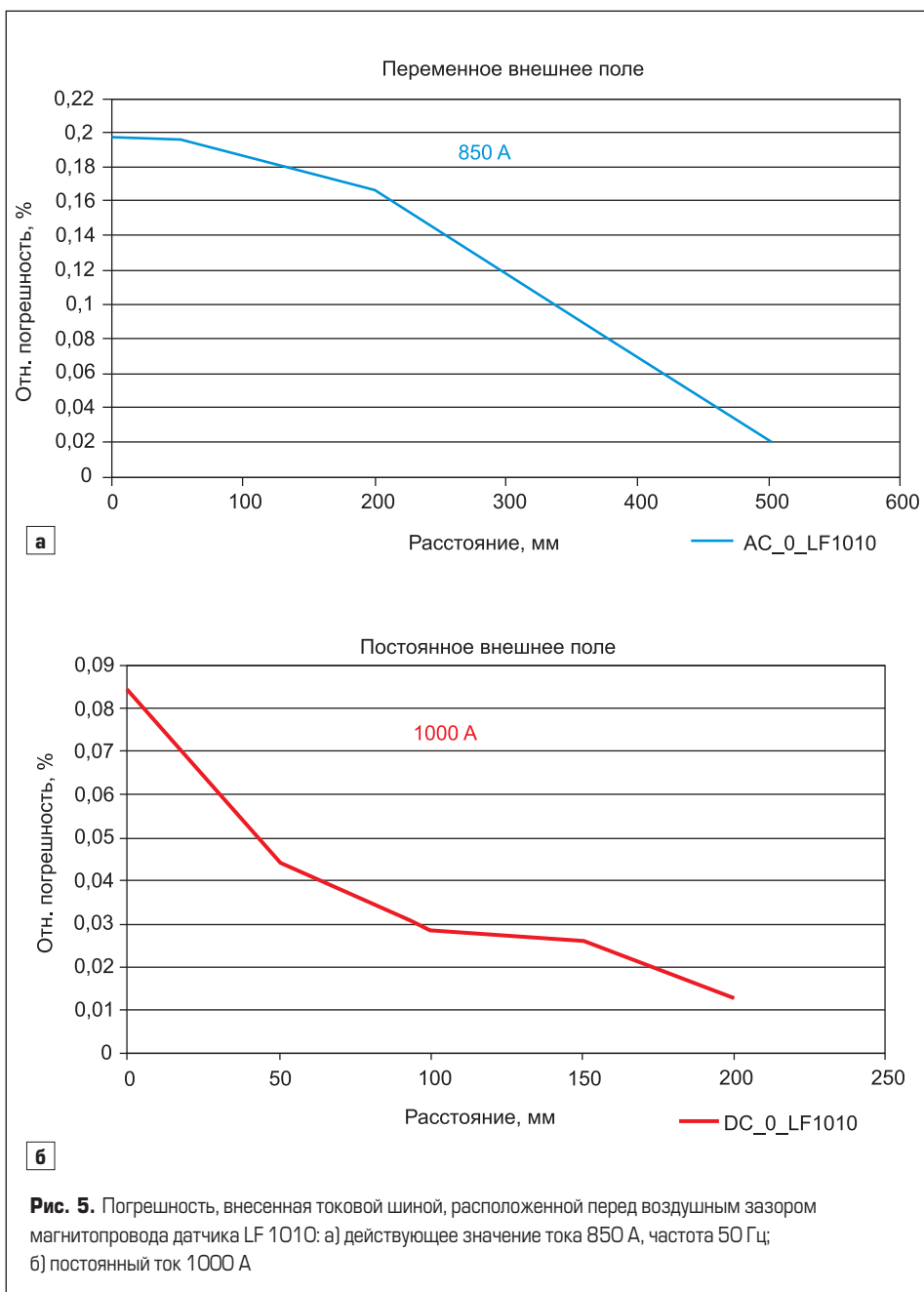


Рис. 5. Погрешность, внесенная токовой шиной, расположенной перед воздушным зазором магнитопровода датчика LF 1010: а) действующее значение тока 850 А, частота 50 Гц; б) постоянный ток 1000 А

датчик LF 1005-S при тех же характеристиках переменных и постоянных возмущающих полей имеет погрешность 10%.

Типичное время отклика датчиков LF xx10 на ступенчатое изменение тока  $I_{PN}$  (определяемое по уровню 90% от  $I_{PN}$ ) составляет менее 0,5 мкс (рис. 6). Магнитопровод с частичным воздушным зазором повышает коэффициент индуктивной связи, тем самым улучшая отклик на быстрое изменение тока ( $di/dt$ ).

Полоса пропускания ограничивается только резонансной частотой вторичной обмотки, которая приблизительно равна 100 кГц. Этот резонанс обусловлен индуктивностью рассеяния и паразитными емкостями между слоями и отдельными витками обмотки.

Отношение сигнал-шум показывает, насколько полезный сигнал выделяется на уровне фонового шума. Оно определяется как отношение мощности сигнала к мощности шума и часто выражается в децибелах. Когда измеренное значение оцифровывается, максимально достижимое отношение сигнал-шум характеризуется разреженностью цифрового сигнала. Разрешение датчиков семейства LF xx10 превышает 14 разрядов (рис. 7) благодаря высокому отношению сигнал-шум.

Предусмотрены различные способы присоединения вторичной цепи к датчикам (соединители, кабели, зажимы и резьбовые шпильки по техническому заданию заказчика), а к датчикам LF 2010 предлагается комплект для монтажа токовой шины.

Поскольку полупроводниковые устройства отличаются повышенной скоростью коммутации, между первичной (высоковольтной) и вторичной (низковольтной) цепями датчиков наблюдаются повышенные значения  $dv/dt$ . Вторичная цепь обычно заземляется из соображений безопасности. В первичной цепи присутствуют некоторые дифференциальные напряжения, но ее потенциал может быть плавающим. Изменение потенциала в первичной цепи может вызывать возмущения во вторичной цепи, т. е. на выходе датчика. Устранить эти возмущения путем фильтрации нельзя, так как это увеличит время отклика и ухудшит АЧХ. Поэтому необходимо по возможности минимизировать паразитную емкость между первичной и вторичной цепями датчика еще на стадии проектирования. Низкая паразитная емкость между первичным проводником (токовой шиной) и вторичной цепью датчика — один из способов ослабить динамические синфазные помехи. Если этого недостаточно, для тех же целей можно дополнительно использовать электростатический экран.

Новые датчики LF xx10 спроектированы и испытаны в соответствии с последними международными промышленными и железнодорожными стандартами — в частности, EN 50178

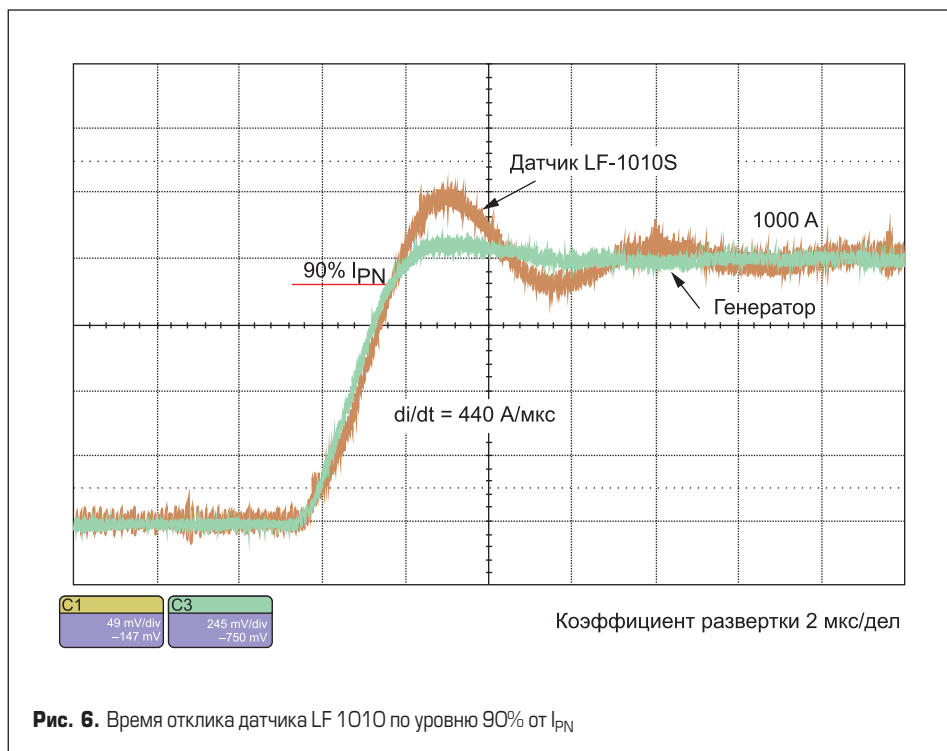


Рис. 6. Время отклика датчика LF 1010 по уровню 90% от  $I_{PN}$

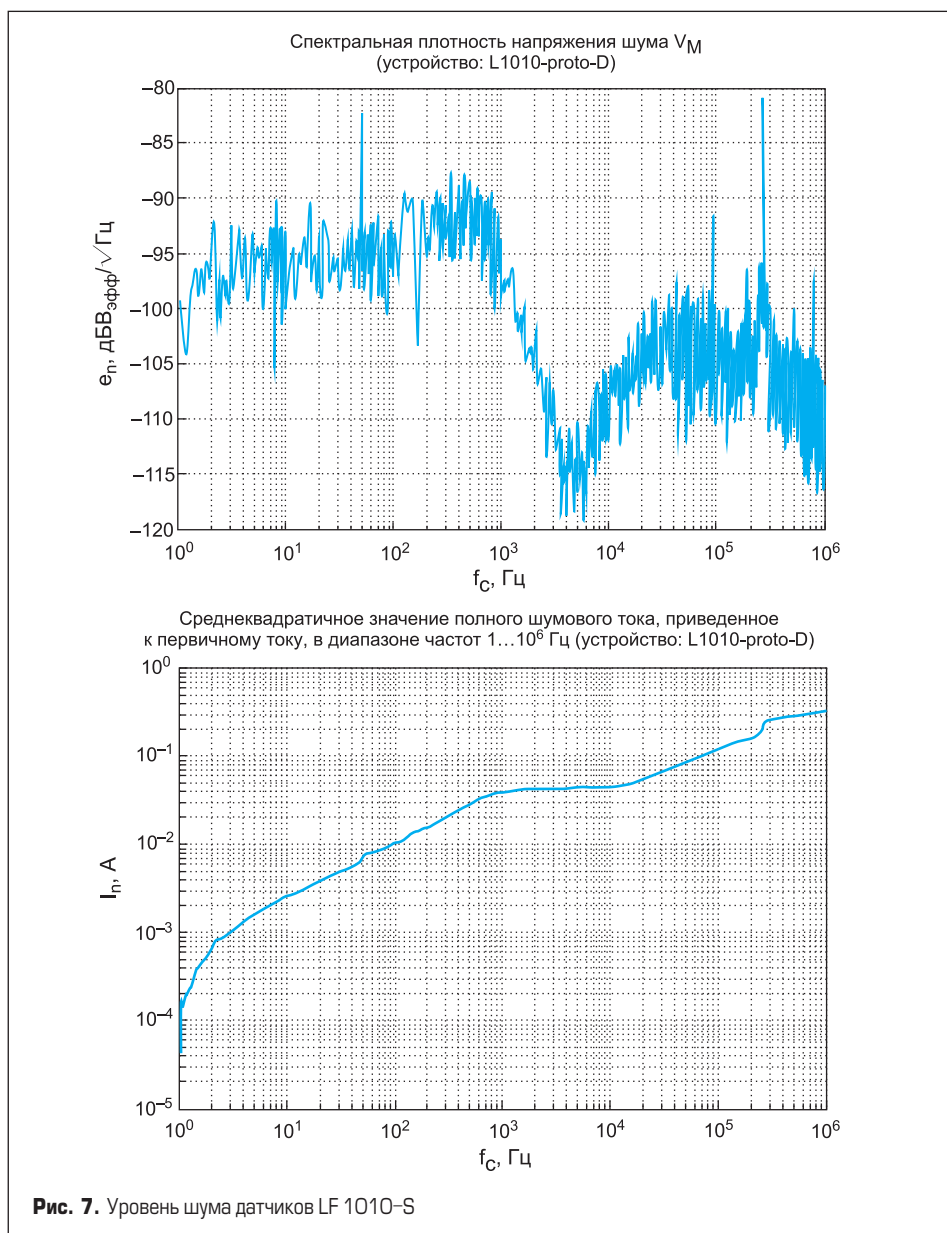


Рис. 7. Уровень шума датчиков LF 1010-S



(электронное оборудование промышленных силовых установок) и EN 50155 (электронное оборудование железнодорожного подвижного состава). Эти стандарты устанавливают общие характеристики изделий, предназначенных для использования в промышленности и на подвижном составе железных дорог.

Датчики LF xx10 сертифицированы организацией UL и маркированы знаком CE, который гарантирует соответствие европейским директивам по электромагнитной совместимости (2004/108/ЕЕС) и низковольтному оборудованию (2006/95/ЕЕС). Они также соответствуют производным местным нормам ЭМС и требованиям последней редакции стандарта EN 50121-3-2 (ЭМС изделий железнодорожного назначения), которые превосходят требования к ЭМС типового промышленного оборудования.

### **Заключение**

В связи с растущим уровнем автоматизации, направленным на повышение эффективности и снижение энергопотребления, сегодня в системы встраивается все больше датчиков. Каковыми бы они ни были, связующими звеньями между различными системами для мониторинга и управления могут служить датчики тока. Для таких систем хорошо подойдет новое семейство LF xx10, отличающееся улучшенными характеристиками. Эти приборы пригодны для эксплуатации в самых жестких условиях окружающей среды, где требуются высокие точность, чувствительность и линейность, малое начальное смещение и малый температурный дрейф. Высокая устойчивость ко внешним помехам от близкорасположенных проводников с током и других источников обуславливает высокую надежность датчиков LF xx10.