

# Устранение влияния магнитных полей в электросчетчиках с импульсными трансформаторами

Вольф ХОММА (Wolf HOMMA)  
russia-feedback@maximintegrated.com

**В статье описаны пути подавления эффектов влияния внешних магнитных полей на трансформаторы, используемые совместно с микросхемами счетчиков электроэнергии семейства 71M6541/71M6542/71M6543. Особый акцент сделан на борьбе с влиянием сильного магнитного поля в замкнутом пространстве небольшого корпуса счетчика.**

## Введение

### Предыстория

Семейство микросхем счетчиков электроэнергии 71M6541/71M6542/71M6543 разработано для применения совместно с токовыми трансформаторами, традиционно используемыми в одно- и многофазных счетчиках, или с шунтирующими резисторами, подключаемыми к изолирующим интерфейсам удаленных сенсоров. Посредством малогабаритных недорогих импульсных трансформаторов 71M6541/71M6542/71M6543 и 71M6545 через интерфейс связи с удаленными сенсорами подключаются к 71M6601, 71M6103 или 71M6113.

Под воздействием очень сильных постоянных магнитных полей сердечники в токовых трансформаторах (обычно используемых в многофазных счетчиках электроэнергии) входят в насыщение, и выходные сигналы трансформаторов оказываются ниже уровня, пропорционального протекающему в сети току, что, соответственно, приводит к потерям при учете коммунальных услуг. Подобное насыщение происходит при высоких значениях тока, и его сложно обнаружить.

Подобно своим аналогам, токовым трансформаторам, импульсные трансформаторы также могут быть подвержены влиянию внешних магнитных полей. В худшем случае насыщение ведет к потере магнитной проницаемости и переходу в состояние низкоомной нагрузки для драйверов электроизмерительных устройств. Это приводит к короткому замыканию дифференциальных драйверов и последующей перегрузке источника питания.

Соответственно, измерительные системы на основе микросхем счетчиков электроэнергии 71M6541/71M6542/71M6543 и изолированных АЦП 71M6601, 71M6103 или 71M6113, соединенных с шунтирующими

резисторами, не имеют полного иммунитета к магнитным полям.

Следует отметить, что для защиты от магнитных полей не существует единого рецепта на все случаи жизни. Каждая конкретная ситуация уникальна в зависимости от того, действуют ли переменные или постоянные поля, погружен ли счетчик в магнитное поле или на него воздействует внешний магнит, обеспечивает ли конструктив пространство для перемещения трансформаторов от источников полей.

После краткого обзора требований в части воздействия магнитных полей к счетчикам электроэнергии в статье даны основные определения магнетизма. Также представлены методы снижения влияния: от простейших и наименее затратных способов до применения методик экранирования и трансформаторов на основе передовых магнитных материалов.

### Требования по воздействиям магнитных полей на счетчики электроэнергии

Традиционно, как в стандарте ANSI, так и в IEC, сказано, что счетчики электроэнергии функционируют при относительно небольших уровнях магнитных полей:

- В ANSI C12.1 (подраздел 4.7.3.4) описываются испытания с катушкой Гельмгольца размерами  $1,83 \times 1,83$  м, работающей при переменном токе 100 А. Этот стандарт допускает максимальное отклонение показаний счетчика в Вт/ч на  $\pm 1\%$ .
- В IEC 62053-11 (таблица 8) установлена плотность переменного магнитного потока в 0,5 мТл, которая создается кольцевой катушкой из 400 ампер-витков.
- В IEC 62053-21 (раздел 8.2.4) установлено воздействие постоянного магнитного потока в 1000 ампер-витков (как отмечено в таблице 11, для счетчиков класса 1 допустима погрешность регистрации электроэнергии до 2%).

- В EN 50470-1 оговаривается постоянное магнитное поле 1000 ампер-витков и описывается испытательная катушка (или, что чаще, постоянный магнит), которая при испытаниях прикладывается ко всем доступным поверхностям корпуса счетчика.

- В EN 50470-1 есть ссылка на EN 61000-4-8 для переменных магнитных полей (настольное оборудование, переменное магнитное поле на промышленной частоте). Эти требования не новы и являются результатом следующих соображений:

- В счетчиках могут возникать погрешности при работе вблизи силовых цепей переменного тока.

- Пользователи могут несанкционированно воздействовать на показания счетчика с помощью постоянных магнитов.

Условия испытаний варьируются от стандарта к стандарту, но могут быть разделены на две категории:

- Метод погружения: при испытаниях счетчик целиком помещается в магнитное поле, создаваемое большой катушкой.

- Метод приближения: при испытаниях источник магнитного поля прикладывается к поверхности корпуса счетчика.

В зависимости от метода испытаний можно сделать выводы относительно того, как следует защищать счетчик от магнитных полей. Когда используется метод приближения, геометрическое место расположения чувствительных компонентов имеет большое значение. Напротив, при методе погружения геометрическое место расположения чувствительных компонентов не имеет большого значения, так как поле при испытаниях будет воздействовать на все части счетчика.

Национальные стандарты разных стран могут содержать некоторые специфические требования помимо тех, что прописаны в стандартах IEC и EN.

### Новые требования к постоянным магнитным полям

В связи с появлением очень мощных постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов, которые могут быть использованы для искажения показаний счетчиков, на некоторых рынках были введены более строгие требования<sup>1</sup>. В немецком счетчике электроэнергии ЕHz очень строгие требования к магнитной устойчивости сочетаются с малыми физическими размерами конструктива и с даже увеличенной степенью защиты от воздействия магнита.

В таблице 1 представлены примеры воздействия, которые могут оказывать постоянные магниты на незащищенные счетчики электроэнергии. Приведенные результаты были получены при работе счетчика с трансформатором тока при наличии и отсутствии постоянного магнитного поля (создававшегося тестовым магнитом в соответствии с требованиями РТВ, Германия)<sup>2</sup>. Таблица демонстрирует значительные погрешности при больших значениях тока как результат насыщения сердечника.

**Таблица 1.** Изменение величины тока при воздействии постоянного магнитного поля на токовый трансформатор

Ток, А	Показания без воздействия магнитного поля, А	Показания с воздействием магнитного поля, А	Погрешность, %
200	199,7	80	-60
100	99,8	25	-75
50	49,9	49,8	-0,2
10	9,99	9,99	0

По этой причине токовые трансформаторы, разработанные для применения в сильных магнитных полях, часто имеют экран от магнитных полей (увеличивающий их цену) или заменяются на устойчивые к магнитному полю трансформаторы DC-tolerant CTs, что также увеличивает расходы и отрицательно влияет на точность измерения фазовых соотношений при изменяющихся значениях тока и температуры.

### Некоторые основы магнетизма

В электротехнике мы используем термин — напряжение, которые вызывают протекание тока через резисторы в замкнутой цепи. Можно провести аналогию при изучении магнитных полей. Здесь магнит (или катушка с протекающим в ней электрическим током) выступает в качестве источника напряжения. Воздух или магнитные материалы играют роль дискретных резисторов, а магнитный поток является эквивалентом электрического тока. Линии магнитного поля, создаваемые на одном полюсе магнита, проникая через воздух или магнитный материал, возвращаются к противоположному полюсу магнита.

В таблице 2 приведены некоторые свойства магнитного поля и величины их измерения.

**Таблица 2.** Магнитные и электрические характеристики и единицы измерения

Характеристика	Символ	Размерность	Описание
Постоянный магнит	—	—	Источник постоянного магнитного поля
Напряженность поля	H	А/м	Величина поля, создаваемого магнитом или током
Относительная магнитная проницаемость	$\mu_r$		Проводимость для магнитного потока по отношению к проницаемости вакуума ( $\mu_0$ )
Магнитный поток	$\Phi$	Вб	Эквивалент тока в электричестве
Остаточная намагниченность	B	Тл	«Сила» постоянного магнита
Магнитная индукция, плотность потока	B	Тл	$B = \Phi / A$ (поток на единицу площади)

Для постоянных магнитов линии магнитного поля наиболее сконцентрированы вблизи магнитных полюсов, и напряженность поля уменьшается с увеличением расстояния от полюсов ( $r$ ). По закону о относительной близости к магниту поле уменьшается в зависимости от расстояния примерно от  $1/r^2$  и до  $1/r^3$ .

В вакууме или воздухе индукция ( $B$ ) пропорциональна напряженности поля:

$$B = \mu_0 \times H.$$

Внутри магнитных материалов индукция зависит от их относительной магнитной проницаемости и напряженности поля:

$$B = \mu_0 \times \mu_r \times H.$$

В этом уравнении  $\mu_r$  сильно нелинейна и зависит от напряженности поля  $H$ , материала, температуры и других факторов. Для типичных материалов, применяемых для магнитного экранирования, значение  $\mu_r$  может достигать 80 000 при сохранении линейности. При высоких значениях напряженности поля  $\mu_r$  снижается, и дальнейшее увеличение напряженности не сопровождается ростом индукции  $B$ , что и называется явлением насыщения.

Постоянные магниты обычно характеризуются размерами, остаточной намагниченностью, коэрцитивной силой и проницаемостью возврата.

В таблице 3 приведены некоторые параметры типичного редкоземельного магнита небольшого размера.

**Таблица 3.** Параметры небольшого редкоземельного магнита

Параметр	Значение	Описание
Размеры, мм	40×18×12	Геометрические размеры
Остаточная намагниченность, Тл	1,35	—
Коэрцитивная сила, А/м	$1 \times 10^6$	—
Проницаемость возврата	1,05	Сравнива с проницаемостью свободного пространства

### Магнитные свойства типовых измерительных систем на основе 71M6541/71M6542/71M6543

#### Корпус счетчика

Счетчики электроэнергии обычно имеют пластмассовые корпуса, через которые легко проникают магнитные поля. Поэтому на практике при анализе магнитных явлений такие счетчики следует рассматривать как вообще бескорпусные.

В правильно сконструированном счетчике чувствительные импульсные трансформаторы должны располагаться как можно дальше от стенок корпуса.

#### Импульсные трансформаторы

Для стандартных задач, то есть в условиях слабых магнитных полей, компания Maxim рекомендует применять импульсные трансформаторы с ферритовыми сердечниками совместно с измерительными микросхемами для электросчетчиков 71M6541/71M6542/71M6543 и изолированными АЦП 71M6601/71M6103/71M6113. Характеристики этих трансформаторов приведены в таблице 4. Для уточнения данных о производителях и их номенклатуре следует обращаться к дистрибьюторам компании Maxim.

Можно выполнить некоторые основные расчеты для типичного импульсного трансформатора с ферритовым сердечником, описанным в таблице 4. Магнитная индукция такого трансформатора при насыщении равна 470 мТл. Ток через первичную обмотку будет создавать магнитную индукцию, которая должна быть намного меньше индукции насыщения, так чтобы некоторая дополнительная индукция, создаваемая внешним магнитным полем, не приводила к насыщению сердечника.

Для определения индукции, связанной с прохождением цифровых сигналов, сначала рассчитаем напряженность поля, которая для тороидального сердечника описывается формулой:

$$H = (I \times N) / (2\pi r),$$

**Таблица 4.** Магнитные свойства типового импульсного трансформатора

Параметр	Значение	Комментарии
Тип сердечника	Тороид	—
Размер сердечника (OD), мм	4,8	Внешний диаметр
Размер сердечника (ID), мм	2,3	Толщина тороида — 1,27 мм
Начальная проницаемость	2700	При нулевой магнитной индукции и комнатной температуре
Максимальная проницаемость	4400	При магнитной индукции 200 мТл и комнатной температуре
Магнитная индукция при насыщении, мТл	470	При комнатной температуре

1 Как пример, см. требования из спецификации на продаваемые в Германии счетчики Lastenheft EDL с описанием воздействия магнитом размерами 75×50×25 мм с остаточной намагниченностью 1200 мТл, который прикладывают к внешним поверхностям корпуса счетчика при испытаниях.  
2 Измерения выполнялись с помощью токового трансформатора на 200 А и испытательного магнита РТВ размерами 75×50×25 мм с остаточной намагниченностью 1200 мТл, который располагался на расстоянии 30 мм от токового трансформатора.

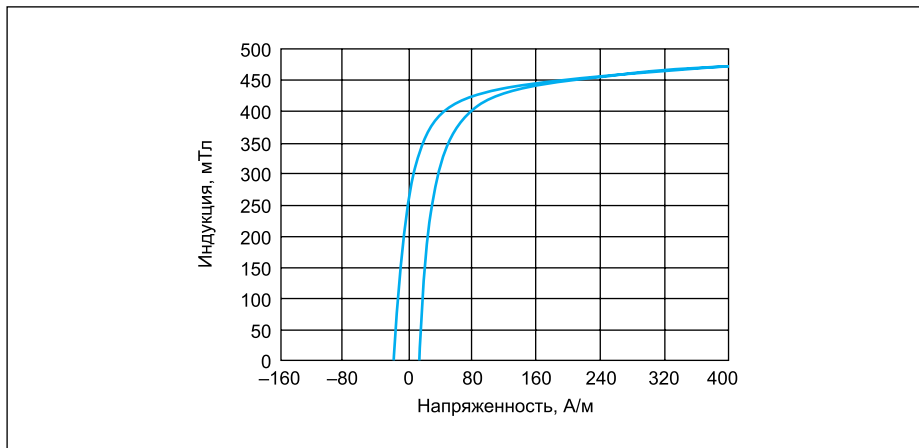


Рис. 1. Кривая намагничивания сердечника

где  $N$  — число витков в первичной обмотке;  $I$  — ток, создаваемый драйверами 71M6541/71M6542/71M6543/71M6545;  $r$  — радиус тора.

Подставляя значения  $I = 12$  мА,  $N = 13$  и  $r = 0,0024$  м, получим значение  $H = 10,35$  А/м.

Для определения величины магнитной индукции, создаваемой этой напряженностью поля, можно применить кривую намагничивания (для феррита данного типа), приведенную на рис. 1. Индукция, соответствующая напряженности 10,35 А/м, равна 170 мТл, что означает теоретический запас по индукции  $470 - 170 = 300$  мТл для полей, создаваемых внешними магнитами до наступления насыщения.

#### Другие магнитные компоненты

При разработке «магнитоустойчивых» счетчиков мы не должны упускать из виду тот факт, что в состав этих приборов могут входить некоторые другие компоненты, подверженные влиянию магнитных полей. Примерами таких компонентов являются:

- Трансформаторы и дроссели в источниках питания.
- Ферриты, применяемые в цепях подавления радиопомех.
- Трансформаторы, используемые в схемах PLC.
- Трансформаторы в изолирующих цепях.

#### Методы борьбы с несанкционированным искажением показаний с использованием магнитов

Для разработчиков счетчиков доступны различные способы борьбы с магнитными помехами. Перечисленные ниже методы приведены в порядке изменения их себестоимости и эффективности:

- регистрация событий;
- грамотное расположение компонентов, чувствительных к магнитным полям;
- магнитные экраны;

- использование трансформаторов с альтернативными материалами сердечников, имеющими высокую индукцию насыщения.

#### Регистрация событий

«Первая линия защиты» от насыщения трансформаторов внешними магнитными полями — простая регистрация событий<sup>3</sup>. Фиксация внешнего магнитного поля может сопровождаться различными мерами борьбы против правонарушителя — от правовых методов до отключения от сети (с использованием коммутирующего устройства) или штрафа по максимальным тарифам.

Для обнаружения внешних магнитов можно использовать разнообразные способы. При производстве приборов учета применяют следующие методы защиты:

- Герконовые реле. Эти миниатюрные реле имеют ферромагнитные контакты, которые замыкаются под воздействием внешнего магнитного поля. Контакты обычно подключают к выводам I/O микросхемы счетчика.

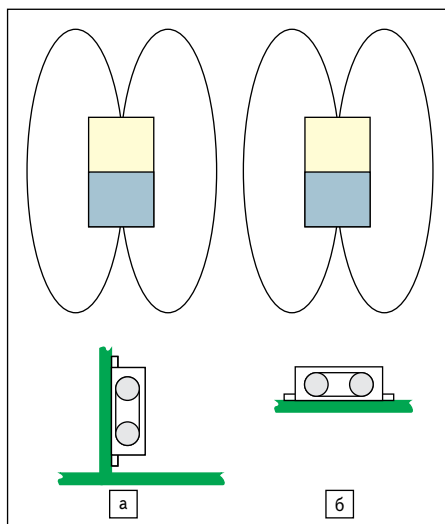


Рис. 2. Ориентация ферритового сердечника трансформатора: а) вертикальная; б) горизонтальная

- Датчики на основе эффекта Холла. Эти аналоговые датчики формируют выходное напряжение, пропорциональное приложенному магнитному полю. Выход датчика Холла обычно подключают к входу АЦП или компаратора микросхемы счетчика.

Программное обеспечение демонстрационных плат 71M6543F-DB и 71M6541F-DB позволяет обнаруживать провалы напряжения питания, связанные с насыщением трансформаторов, и регистрировать попытки несанкционированного искажения показаний. Код помогает различать естественные потери мощности и потери, обусловленные воздействием искусственно созданного магнитного поля, по следующим критериям:

1. Потеря мощности связана с получением соответствующего сигнала от вычислителя (CE).
2. Потеря мощности, вызванная несанкционированным магнитным воздействием и не связанная с провалами сетевого напряжения. Выполнение кода кратковременно будет переведено в аварийный режим brownout, внешние подключения будут восстановлены после перехода в рабочий режим. Если воздействие магнитного поля все еще присутствует, будет установлен «бит 0» в регистре VSTAT[2:0], и микроконтроллер зарегистрирует это событие как попытку несанкционированного вмешательства.

#### Размещение компонентов, чувствительных к магнитным полям

При испытаниях методом приближения магнита, для случаев с наиболее жестким магнитным воздействием, следует учитывать расположение магниточувствительных компонентов, таких как трансформаторы и дроссели источников питания, а также импульсных трансформаторов, которые должны располагаться как можно дальше от доступных поверхностей корпуса счетчика.

Ранее мы отметили, что по закону в относительной близости от магнита его поле ослабляется от  $1/r^2$  до  $1/r^3$ . Отсюда можно заключить, что на расстоянии 2 см от магнита поле будет по крайней мере в четыре раза слабее по сравнению с дистанцией в 1 см. Это играет особую роль при обеспечении защиты, когда простой метод регистрации событий сам по себе не является достаточной мерой.

Другим важным моментом является ориентация трансформаторов. Торoidalный трансформатор более подвержен воздействию магнитных полей, если к магниту обращена одна из плоских поверхностей его сердечника. На рис. 2 показаны две различные ориентации сердечника. Вариант расположения слева менее подвержен воздействию магнитного поля от магнита, изображенного вверху.

#### Экранирование

Если требования к счетчикам не ограничены регистрацией событий, а возможности

<sup>3</sup> Спецификация Lastenheft EDL (Германия) оговаривает наличие в составе счетчиков электроэнергии магнитных датчиков для регистрации влияния внешнего магнитного поля с сигнализацией.

удаления импульсных трансформаторов дальше от стенок корпуса ограничены, то для уменьшения воздействия внешнего магнитного поля можно использовать экранирование. Для экономии экранирующего материала следует установить все трансформаторы в одном компактном месте на плате, которое затем и будет защищено экраном.

Идея магнитного экранирования состоит в том, что при заданной напряженности поля его индукция будет максимальна в материале с более высокой проницаемостью. Экранирующий материал будет «впитывать» магнитное поле (как губка впитывает воду), отводя его от чувствительных компонентов. Однако при достижении определенного уровня напряженности поля экран может насытиться и не сможет сохранить пропорциональность магнитной индукции напряженности поля. Важно знать проницаемость и другие магнитные свойства экранируемых компонентов. Так же как и материал, используемый для экранирования, эти компоненты будут концентрировать в себе силовые линии магнитного поля, потому что проницаемость их сердечников обычно намного выше, чем проницаемость воздуха.

Слабые магнитные поля могут быть эффективно экранированы мю-металлом, сплавом с высокой относительной проницаемостью (обычно от 70 000 до 80 000). Многие производители выпускают такие материалы в виде фольги или фольги с адгезивным слоем. Эти типы фольги легко режутся и изгибаются для получения требуемой формы экрана при лабораторных испытаниях. После того как будет экспериментально определена оптимальная конструкция экрана, можно использовать штампование для формовки экрана в виде короба или крышки.

При экспериментах с магнитными экранами полезно соблюдать некоторые указания, а именно:

- Экраны лучше работают, когда их углы не острые, а плавно изогнутые.
- При изготовлении экрана из нескольких частей фольги следует предусмотреть их перекрытие в местах стыков.
- Двойной или тройной экран с зазором между слоями работает лучше, чем одинарный экран вдвое или втрое большей толщины. Для разделения экранирующих слоев между собой нужно использовать бумагу или пластик.

Эффективность экранирования ограничена, особенно при воздействии сильных магнитов. На практике экранирующие материалы с высокой проницаемостью имеют свойство насыщаться раньше и по этой причине теряют свои экранирующие свойства. Для экранирования от сильных магнитных полей следует рассматривать малоуглеродистую (мягкую) сталь или другие материалы. Однако эффективное экранирование возможно только при использовании большого объема экранирующего материала, что делает счетчик тяжелым и дорогим.

#### Использование альтернативных материалов для сердечников

Ферритовые сердечники стандартных импульсных трансформаторов насыщаются при 450–500 мТл. Такие трансформаторы являются хорошим выбором при работе в слабых внешних магнитных полях, когда есть возможность использовать регистрацию событий или размещение счетчика и (или) его экранирование обеспечивает хороший результат.

Но не всем сценариям внешних магнитных воздействий способны противостоять подобные трансформаторы. Иногда против огромных и мощных магнитов единственно эффективным средством противодействия является трансформатор с сердечником с большой индукцией насыщения. Компания Maxim сотруд-

ничает с производителями трансформаторов для поиска наиболее подходящих материалов для сердечников, обеспечивающих хорошее сочетание электрических и магнитных свойств, а также себестоимости.

В результате интенсивных исследований были отобраны два материала для сердечников — MPP и Hi-Flux.

Для уточнения данных о производителях и их номенклатуре следует обращаться к дистрибьюторам компании Maxim.

Некоторые результаты испытаний представлены в разделе «Испытания альтернативных материалов».

#### Моделирование экранов

Моделирование экранов выполнялось с помощью симулятора магнитных взаимодействий Vizimag 2-D. При этом использовались модели экранирующих пластин толщиной 1 мм с проницаемостью 80 000.

#### Без экранирования

Без экранирования силовые линии магнитного поля пронизывали печатную плату, как воздух, и создавали магнитную индукцию 92 мТл в центре и 75 мТл на расстоянии 15 мм (рис. 3).

Важно отметить, что приведенные результаты (92 или 75 мТл) не будут повторены при наличии в данном магнитном поле сердечника трансформатора. Ферритовый сердечник, обладая сравнительно высокой проницаемостью, будет «всасывать» в себя линии магнитного поля. Это приведет к созданию в нем намного большей индукции, чем значения, полученные при моделировании на воздухе.

#### Плоский экран

Плоский экран снижает индукцию незначительно. Введение экрана шириной 40 мм

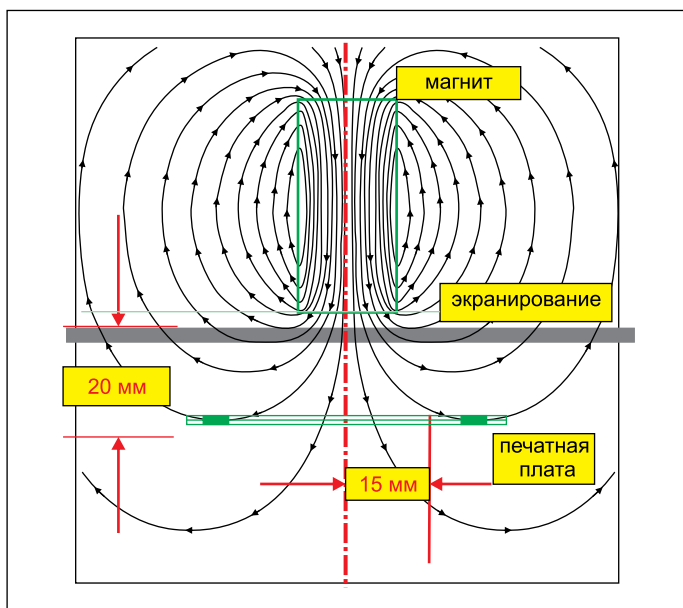


Рис. 3. Магнитное поле без экранирования

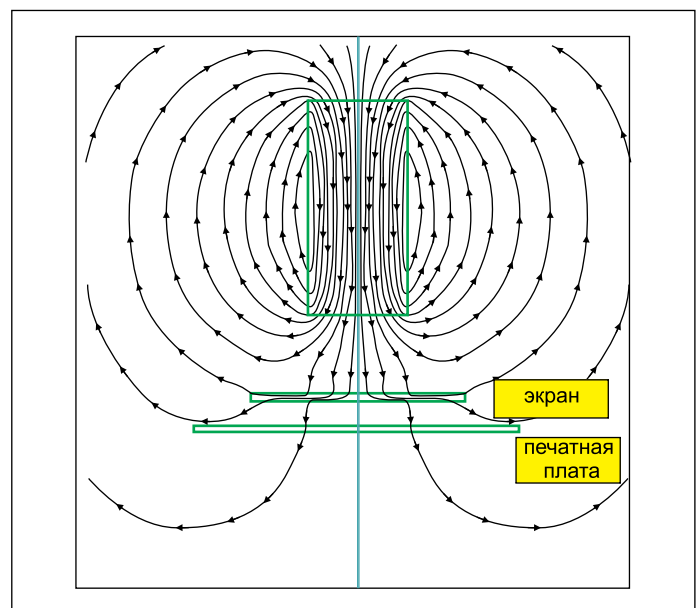


Рис. 4. Магнитное поле с плоским экраном

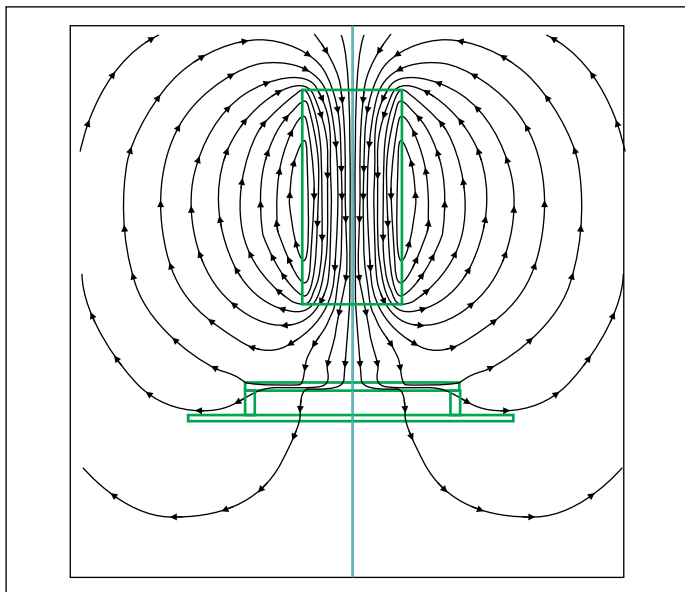


Рис. 5. Магнитное поле с П-образным экраном

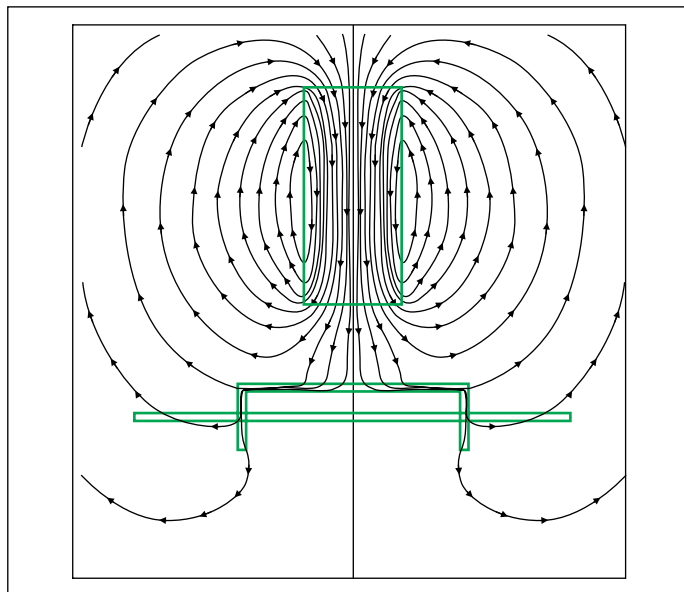


Рис. 6. Магнитное поле с экраном с удлиненными боковыми стенками

с проницаемостью 80000 и толщиной 1 мм уменьшает индукцию до 40 мТл в центре и до 57 мТл на расстоянии 15 мм от центра. Эффект экранирования можно оценить по расстоянию между силовыми линиями (рис. 4), которое примерно в два раза больше, чем у модели, представленной на рис. 3.

Перемещение экрана вверх или вниз не изменяет существенно индукцию на поверхности печатной платы. Интересно, что толщина экрана оказывает минимальное влияние на индукцию.

#### Экран П-образной формы

Загибание краев экрана вниз для придания ему П-образной формы (рис. 5) уменьшает индукцию до 25 мТл в центре и до 29 мТл

на расстоянии 15 мм от центра. Силовые линии стремятся двигаться по мю-металлу и проникают в печатную плату только в двух местах.

Дальнейшее усовершенствование возможно за счет удлинения стенок экрана. На рис. 6 показано распределение силовых линий магнитного поля при использовании П-образного экрана со стенками длиной 12 мм. Силовые линии стремятся избежать попадания в полость под экраном и покидают мю-металл на самых краях стенок экрана. Этот прием позволяет уменьшить индукцию до 15 мТл в центре и до 12 мТл в 15 мм от центра печатной платы. По сравнению с вариантом без экрана в данном случае достигнуто шестикратное уменьшение индукции.

Отметим, что при указанном варианте экран вставляется в печатную плату, а значит, в нем нужно делать пазы.

После того как было достигнуто значительное уменьшение индукции в сердечниках за счет экранирования, результаты были проверены путем введения в модель торoidalных трансформаторных сердечников с физическими характеристиками, приведенными выше (рис. 7).

Результаты моделирования демонстрируют, что максимальная индукция в сердечниках достигает 2 мТл, и это намного ниже порога насыщения. Для сравнения, индукция в сердечниках без экрана достигает 200 мТл, что близко к максимальному значению согласно установленному ранее допуску (рис. 8).

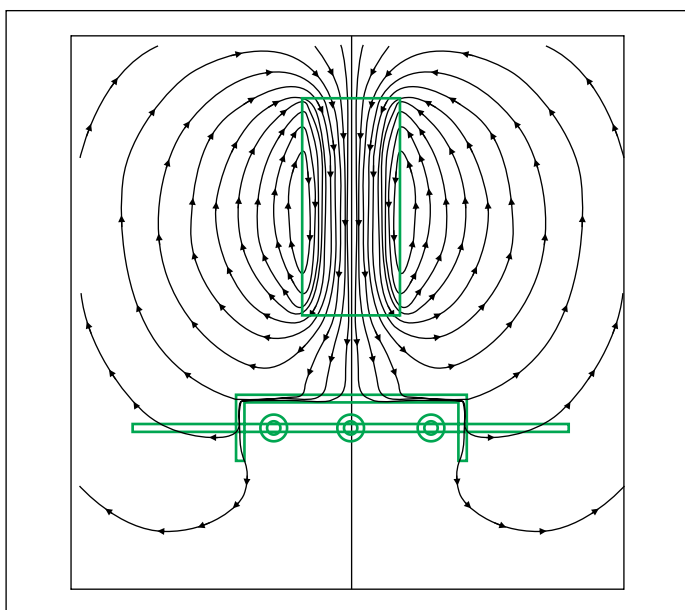


Рис. 7. Магнитное поле с экраном с удлиненными боковыми стенками и трансформаторными сердечниками

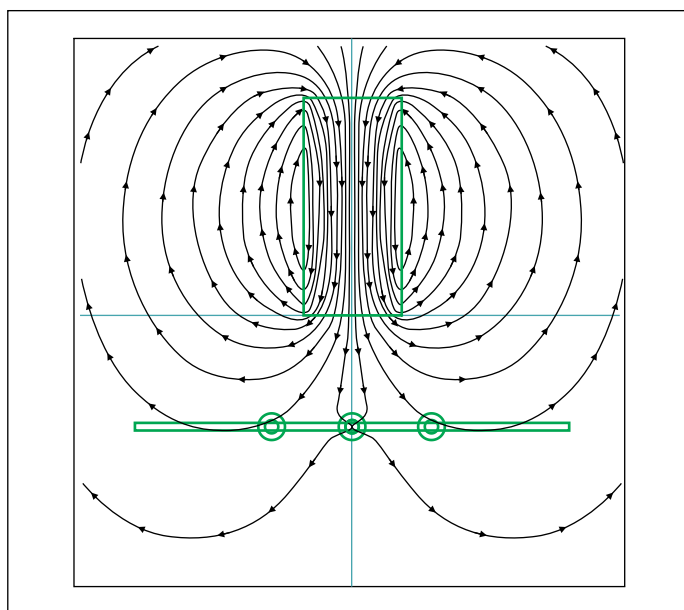


Рис. 8. Магнитное поле без экрана с трансформаторными сердечниками

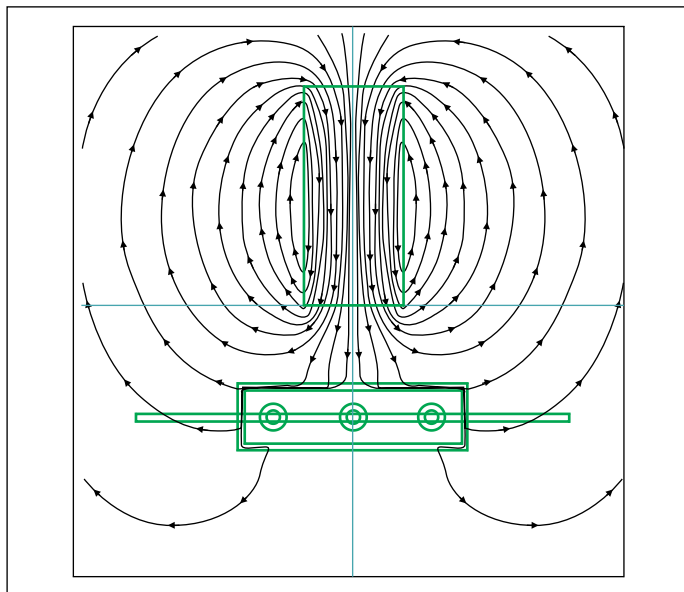


Рис. 9. Магнитное поле с сердечниками, помещенными в замкнутый экран

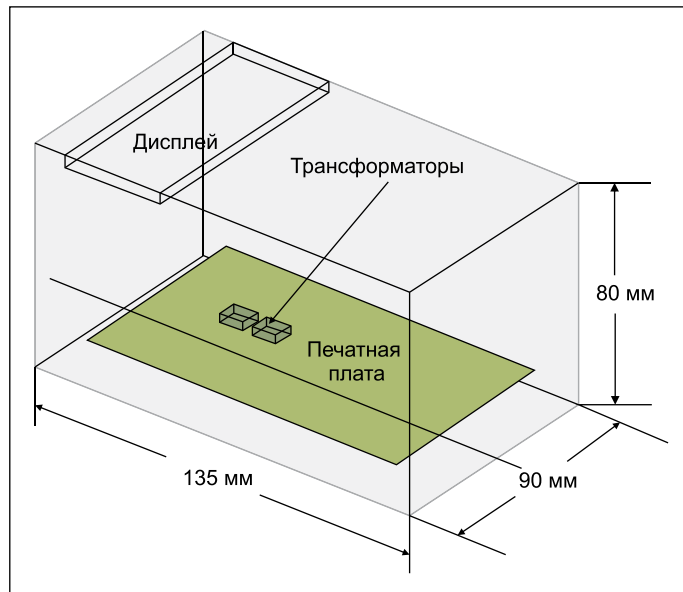


Рис. 10. Размеры корпуса счетчика ЕHz с местом расположения трансформаторов

### Замкнутый экран

Достигнуть лучших результатов можно при экранировании со всех сторон защищаемого узла. Из-за проблем конструирования и обеспечения электрической изоляции это может оказаться непрактичным, но в исключительных случаях может быть единственным методом. Двухмерное моделирование показывает величину индукции 1,6 мТл в сердечниках, размещенных внутри замкнутого экрана (рис. 9).

### Ограничения при моделировании

Простые программы моделирования, примененные для получения представленных выше результатов, имеют ограничения, а именно:

- Двумерность: нет данных относительно третьего измерения.
- Характеристики тороидов невозможно представить точно по их ориентировке в пространстве. Как видно на иллюстрациях, оси тороидов перпендикулярны поверхности бумаги (ось Z). При обычном монтаже трансформаторов на печатную плату оси тороидов были бы направлены параллельно бумаге (ось Y).
- Самое важное: экранирующий материал будет насыщаться вблизи сильных магнитов и по этой причине терять свои экранирующие свойства.

Эти обстоятельства не позволяют точно на основе моделирования предсказать поведение экранов в реальных условиях. В случае если необходима более высокая точность модели, необходимо применять программы трехмерного моделирования.

Кроме того, экранирование осложняется следующими обстоятельствами:

- Магнитные материалы являются проводниками.
- На трансформаторах часто присутствует высокое напряжение.

- Для экранирования предпочтительней применять трехмерные конструкции.
- Следует соблюдать требования по зазорам и протяженности путей утечки для высоковольтных цепей.

В реальных условиях разработчик будет стремиться размещать металлические конструкции подальше от импульсных трансформаторов. Это ограничивает применимость экранов теми областями, что находятся вдали от импульсных трансформаторов. Тот факт, что трансформаторы лучше работают, когда размещены внутри трехмерной экранирующей конструкции, также означает, что на физические конструкции наложены ограничения: они не могут пересекать печатные платы.

### Испытания экранов

#### Испытания экрана счетчика ЕHz

Испытания были проведены с типом корпуса, весьма схожим с корпусом одной из моделей счетчика серии ЕHz (Германия).

Этот корпус имеет длину 135 мм, ширину 90 мм и высоту 80 мм. Подобные малые размеры усложняли задачу проектирования для разработчиков, так как магнитные компоненты нельзя было разместить далее чем в 45 мм от наружных стенок корпуса (рис. 10).

При испытаниях использовался стандартный магнит РТВ, указанный в спецификации на счетчик ЕHz: согласно техническим условиям FNN Lastenheft EDL магнитная индукция на доступной поверхности корпуса счетчика, когда он установлен в рабочее положение, должна составлять 380 мТл. Рекомендуемый метод испытаний предусматривает использование магнита из материала Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 280/167 согласно стандарту IEC 60404-8-1 с остаточной намагниченностью 1200 мТл (при размерах 75×50×25 мм),

который прикладывается «широкой стороной», то есть площадкой 75×50 мм, непосредственно к корпусу счетчика.

На рис. 11 показан наихудший сценарий, при котором магнит приложен к корпусу счетчика сбоку.

После установки на четырех сторонах корпуса листов стали толщиной 0,75 мм (рис. 12а) трансформаторы можно было разместить в узкой зеленой области по продольной оси корпуса (если смотреть на корпус сверху). Трансформаторы при этом «спрятаны» на глубину более 48 мм от верхней стенки корпуса для исключения магнитного взаимодействия.

При использовании двухслойного экранирования с толщиной экранирующих слоев 0,75 мм, разделенных между собой пластиковой пленкой толщиной 0,2 мм изнутри корпуса (рис. 12б), трансформаторы можно было разместить на большой зеленой площадке (если смотреть на корпус сверху). И в этом случае трансформаторы «спрятаны» на глубину свыше 48 мм от верхней стенки корпуса. Двойное экранирование увеличивает вес

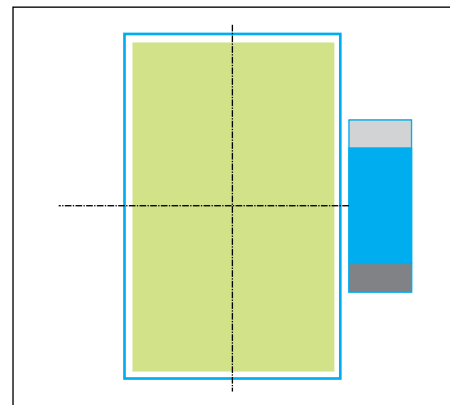


Рис. 11. Корпус ЕHz с приложенным РТВ магнитом

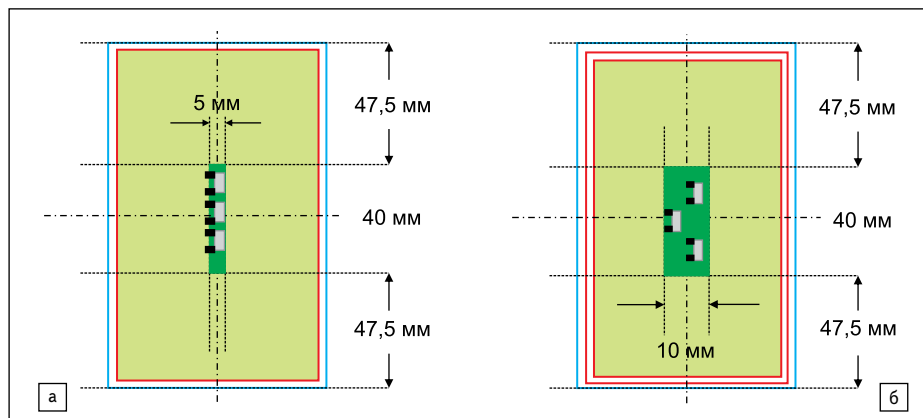


Рис. 12. Корпус EHz: а) с однослойной экранировкой; б) с двухслойной экранировкой

счетчика, но цена используемых материалов остается умеренной. Однако возможности размещения трансформаторов ограничены, что не позволяет разработчику быть полностью свободным в выборе места для них.

### Испытания альтернативных материалов

Были испытаны образцы трансформаторов с сердечниками на основе MPP, Ni-Flux и Sendust, предоставленные изготовителями магнитных материалов, которые сотрудничают с компанией Maxim. Предварительные

испытания показали, что допустимое расстояние до магнита РТВ может быть уменьшено на 50% по сравнению с расстоянием для стандартных ферритовых сердечников.

Трансформаторы с сердечниками из трех разных материалов были закреплены на демонстрационной плате 71M6543F-DB и подвергнуты воздействию магнита РТВ. При испытаниях расстояние от трансформаторов, на котором был установлен магнит, изменяли (рис. 13). Магнит также перемещали по вертикали (от 0 до 10 мм). Испытания проводились при различных значениях тока нагрузки и дистанции.



Рис. 13. Испытание счетчика с внешним магнитом РТВ

Результаты оказались хорошими для сердечников из материалов Ni-Flux и MPP, даже когда испытательный магнит располагался на расстоянии всего 17 мм от трансформаторов (рис. 14). Для сравнения, обычный ферритовый трансформатор насыщался, когда магнит РТВ находился на расстоянии 40 мм от него.

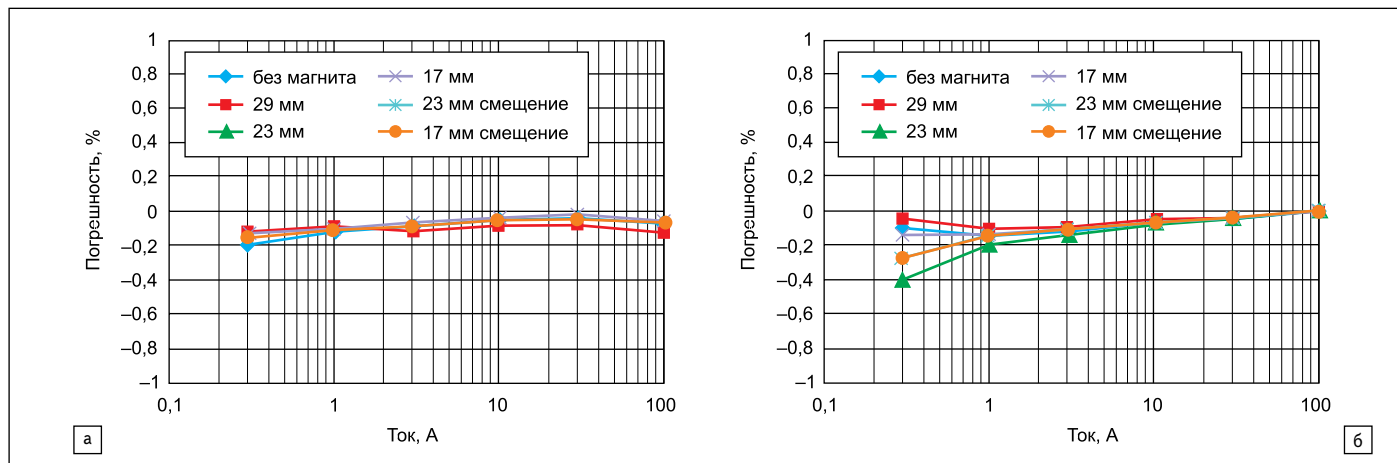


Рис. 14. Зависимость погрешности измерений от расстояния до магнита РТВ и тока нагрузки: а) с сердечником MPP; б) с сердечником Ni-Flux