

мером для создания 4-х канального single slope АЦП, а также порт ввода/вывода с высокой нагрузкой по току и встроенный в кристалл диод для измерения температуры [4].

Высокая нагрузочная способность по току очень важна для простых применений, так как позволяет сократить общее число элементов схемы. J16 имеет 6 выводов с нагрузочной способностью до 10 мА. Микросхема MC68HC705J17 имеет те же свойства, но ROM заменена на 6,1 Кбайт EPROM, что предпочтительно для этапа разработки программ.

Microchip свободно распространяет ассемблер MPASM, симулятор MPSIM и интегрированную систему отладки для Windows MPLAB. Имеющиеся для этих контроллеров Си-компиляторы (например, компилятор фирмы HI-TECH) ускоряют процесс написания и отладки программ. При несложных задачах управления электроприводом можно тактировать микроконтроллер от RC генератора. Максимально допустимая частота при этом – 4 МГц. Поскольку почти все команды выполняются процессором за один такт (в данном случае за 1 мкс), то этого оказывается достаточно даже для выдачи на двигатель синусоидально-центрированной ШИМ с частотой несущей 3 кГц [4].

В заключение отметим перспективность построения микропроцессорных систем управления электроприводом, даже в случае, когда определяющим фактором при разработке является цена. Стоимость микроконтроллеров уменьшается, а возможности, которые они предоставляют, делают систему гибкой и легко модернизируемой без изменения электрической схемы. Применение специализированных микросхем, как было показано на примере драйвера IR2131, избавляет разработчика от лишних затрат на проектирование, а изготовителя – от лишних затрат на сборку и настройку. Данная схема имеет высокую надёжность из-за минимального количества электронных компонентов. В результате симбиоза этих двух микросхем получается недорогой электропривод с удобным и качественным управлением.

### Литература

1. Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к контроллерам // CHIP NEWS. – 1999. – № 1. – С. 2–9.
2. PIC16/17 MICROCONTROLLER DATA BOOK. – 1997.
3. Однокристалльные микроконтроллеры Microchip: PIC16C8X. Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Владимирова. – Рига: ORMIX, 1996. – 120 с.
4. Radim Visinka, Leos Chalupa, Ivan Skalka. Системы управления электродвигателями на микроконтроллерах фирмы MOTOROLA // CHIP NEWS. – 1999. – № 1. – С. 14–16.

УДК 621.3

## СПОСОБЫ БОРЬБЫ СО СКИН-ЭФФЕКТОМ В ПРОВОДНИКАХ

*Адамцевич В.А., Гуца Т.Г.*

Научный руководитель – СЧАСТНАЯ Е.С.

*Провод литцендрат.*

Возможно это наиболее очевидный ответ, который приходит инженеру, однако исследование потерь в проводниках показывают, что литцендрат не является универсальным против высокочастотных потерь в проводниках.

Провод литцендрат изготавливается сплетением изолированных жил так, что бы каждая жила находилась на поверхности и в любом месте поперечного разреза на всем протяжении провода, что усредняет импеданс каждой жилы провода, чего не происходит в скрученных пучках проводов.

Чтобы аналитически исследовать потенциальные преимущества провода литцендрат, были сделаны следующие допущения:

- учитывается только скин-эффект и эффект близости;
- магнитное поле везде параллельно оси обмотки;
- провод литцендрат идеален и имеет плотность материала такую же, как и сплошной медный проводник.

Идеальный провод литцендрат не может существовать практически, т. к. необходимо размещение изоляции и оплетки.

Третье допущение эквивалентно секционирование проводника по горизонтали и вертикали так, что бы полный ток был равномерно распределено по всем жилам.

Горизонтальное секционирование не дает никакой выгоды (из-за второго допущения), поэтому, необходимо рассматривать только результат вертикального секционирования.

Вертикальное секционирование эквивалентно замене проводника на стопку проводников из более тонких проводников с тоже суммарной толщиной и током. Максимальную выгоду от этой операции на уже оптимизированных обмотках можно оценить, принимая число слоев равным корню квадратному от числа жил.

Для примера в таблице 1 приведены данные по потерям трансформатора с разнополярной прямоугольной формой для  $t_r = t_f = 5 \%$  и  $D=1$ , а в таблице 2 – для более коротких времен  $t_r$  и  $t_f$ .

Таблица 1

Число слоев	Эквивалентное число проводов в литцендрате	Оптимальная толщина	$K_r$	Относительные потери
1	1	1,588	1,08	1,00
2	4	1,588	0,945	0,88
5	25	2,138	0,65	0,60
10	100	2,958	0,465	0,42

Таблица 2

Число слоев	Эквивалентное число проводов в литцендрате	Оптимальная толщина	$K_r$	Относительные потери
1	1	2,178	0,87	1,00
2	4	2,178	0,86	0,99
5	25	2,178	0,79	0,91
10	100	2,228	0,643	0,74

Как видно из таблицы 1, провод литцендрат дает ощутимое снижение эффективного сопротивления, но только при относительно больших фронтах переключения, а следовательно с относительно низкочастотным спектром.

Согласно таблице 2, при наличии в спектре более высокочастотных составляющих, оптимальная толщина обмотки изменяется незначительно, но все еще имеется скромное снижение потерь.

Из вышесказанного следует, что использование провода литцендрат дает некоторое снижение потерь, однако не является универсальным решением для снижения высокочастотных потерь в проводниках. Для изученных форм тока он относительно скромно сокращает потери, но если использовать его неосторожно то в результате можно получить увеличение потерь.

#### *Дифференцированная намотка по слоям.*

В многослойных обмотках составляющая потерь во внутренних слоях увеличивается с числом слоев. Оптимальная толщина слоя – компромисс, являющимся балансом

между потерями от скин-эффекта во внешних слоях и потерь от вихревых токов во внутренних слоях. Можно предположить, что полные потери могли бы быть значительно уменьшены, если толщину каждого слоя независимо оптимизировать на минимальные потери в этом слое, производя изменение толщины провода по слоям, т. е. более тонкие во внутренней части и более толстые на внешней стороне.

Для однополярного импульсного тока с коэффициентом заполнения 0,5 и временами  $t_r, t_f = 0,1$  %, например, сокращение потерь составило 10 % для двухслойной обмотки, и медленно увеличивалось с ростом числа слоев до 16 % в десятислойной обмотке. Таким образом, эти улучшения не стоят усилий потраченных для их реализации.

*Плоские многожильные обмотки.* Ширина обмотки не оказывает влияния на коэффициент сопротивления на высоких частотах, и следовательно можно использовать более широкие обмотки для уменьшения сопротивления. Этот подход ограничен только практическими физическими соображениями и пригодностью в каждом конкретном случае применения.

*Чередование обмоток.* В трансформаторах первичная и вторичная обмотки могут чередоваться, создавая две и более секций, например: (П-В)(П-В) или (П-В)(В-П)(П-В), где скобки определяют независимые секции. Это позволяет сделать каждую обмотку в каждой секции оптимальной толщины, а сопротивление уменьшается от числа секций. Количество разбиений и тип чередования выбирается в зависимости от целесообразности.

*Влияние зазора в сердечнике.* Если требуемый воздушный зазор в дросселе и трансформаторе будет находится вне обмотки, генерирующей магнитное поле, то в обмотке не будет возникать значительных возмущений магнитного поля и, соответственно, дополнительных потерь.

Другая альтернатива – использование нескольких дискретных зазоров равномерно распределенных вдоль обмотки. Предварительные исследования показывают, что дополнительные потери, создаваемые одним зазором, уменьшаются приблизительно пропорционально кубу от числа используемых зазоров. Поэтому даже два или три зазора дадут значительный выигрыш.

*Влияние внешних проводников.* На высоких частотах следует избегать применения бифилярных обмоток и обмоток со средней точкой. Проволочные выводы не должны располагаться между первичной и вторичной обмотками, или между обмоткой и сердечником в дросселях. Не стоит, также, в этих местах располагать толстые клеммы.

Межобмоточные экраны следует делать минимально тонкими. Если возможно, то вспомогательные обмотки размещать на стороне слабого поля от основной обмотки. Любые проводники должны располагаться как можно дальше от всех воздушных зазоров в сердечнике.

**Что же можно сделать для борьбы с этим явлением?** Мы можем порекомендовать недорогой и эффективный способ нейтрализации скин-эффекта. Он основан на том обстоятельстве, что материал подавляющего большинства проводников (медь, серебро, алюминий, латунь) и полупроводниковых (кремний, германий) элементов имеет показатель относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от 0,9999 до 1,0001, т. е. около единицы. Поверхность токопроводящего элемента 1 покрывают парамагнитной оболочкой 2 (рисунок 1), причем оболочка не обязательно должна плотно прилегать, возможен некоторый небольшой зазор. Оболочка выполняется в виде одного или нескольких слоев твердого парамагнитного  $\mu$  больше 1 диэлектрического материала (магнетодиэлектрика), обладающего на макроуровне показателем относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , в несколько раз превосходящим проницаемость токопроводящего элемента, низкой электропроводностью, а также малыми потерями на перемагничивание

(петля гистерезиса). На рисунке 1 для наглядности показано два слоя оболочки: слой 3 и слой 4. Оболочка должна закрепляться неподвижно относительно токопроводящего элемента на его поверхности; в случае зазора ширина его не должна превышать половину длины волны переменного тока в токопроводящем элементе.

**И что это дает?** Протекающий в токопроводящем элементе 1 перпендикулярно плоскости рисунка переменный ток создает внутри проводящего слоя элемента 1 нежелательное поперечное электромагнитное поле скин-эффекта. Силовые линии 6 этого поля действуют на элементарные движущиеся заряды 5 внутри токопроводящего элемента 1 и направлены от центра токопроводящего слоя к его поверхности. В то же время основной (полезный) переменный ток сигнала, протекающий по токопроводящему элементу 1, создает в слоях 3 и 4 парамагнитной оболочки 2 противодействующее магнитное поле, силовые линии 7 которого направлены от поверхности токопроводящего элемента 1 к его центру и также воздействуют на элементарные движущиеся заряды 5 внутри проводника 1. Интенсивность и того, и другого полей возрастает с увеличением силы тока и с ростом частоты, таким образом достигается компенсация действия паразитного поперечного поля и однородное распределение электрического тока по всему поперечному сечению токопроводящего слоя. Для большинства слаботочных токопроводящих элементов с целью достижения положительного эффекта парамагнитная оболочка может выполняться из материала с показателем относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 20 толщиной несколько десятков микрон и более. Для силовых токопроводящих элементов, при малых размерах проводника, а также для низкочастотных устройств оболочка может быть сходной толщины при величине  $\mu$  от 1,5 до 50. Если материал оболочки обладает показателем  $\mu$  больше 50, а длина токопроводящего элемента значительная (несколько метров), то наряду с паразитной поперечной волной полезная волна также будет подавляться, возрастет собственная индуктивность кабеля и потери в самой оболочке, а проходящий сигнал получит фазовые сдвиги. Для наглядности принцип, на котором основан данный способ борьбы со скин-эффектом, можно сравнить с магнитной или электромагнитной фокусировкой пучка электронов в электронно-лучевой трубке, например, телевизионном кинескопе. В кинескопе поток электронов движется с ускорением в вакууме под действием высокого анодного напряжения от катода к аноду (экрану). При этом вследствие взаимоотталкивающего действия падающий на экран электронный луч образует размытое пятно. Поэтому необходима принудительная фокусировка луча, для чего применяются катушки, создающие кольцевое электромагнитное поле вокруг электронного пучка. Так достигается фокус и сведение.

Мы предлагаем использовать для парамагнитной оболочки смесь диэлектрика (например лака, смолы или поливинилхлорида) с порошком электропроводного магнетомягкого материала (например, измельченный пермаллой или оксифер). Объемное соотношение диэлектрика и магнитного материала выбирают таким, чтобы электропроводность их смеси была ничтожной по сравнению с электропроводностью токопроводящего элемента. Предлагаю также использовать смесь диэлектрического полимера с порошками таких веществ, как двуокись хрома  $\text{CrO}_2$ , гамма-окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , кобальт-гамма-окись железа  $\text{CoFe}_2\text{O}_3$ . Эти магнитные материалы имеют показатель относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 2,0 и обладают малым временем пере-

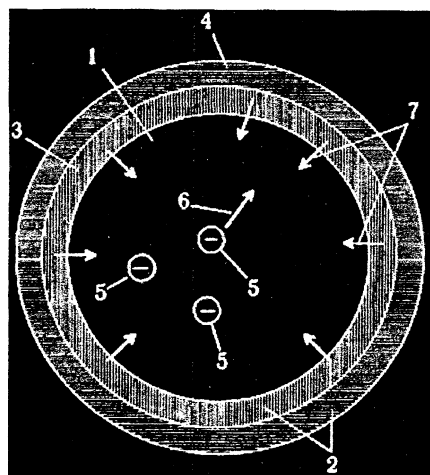


Рис. 1

магничивания. Они производятся промышленностью для аудио- и видеолент, их стоимость невелика. Хотя в сильном магнитном поле указанные материалы обладают сравнительно высокой коэрцитивной силой, в большинстве радиоэлектронных элементов сила проходящего по ним тока недостаточно высока для проявления магнитотвердых свойств этих материалов. Поэтому в данном случае потери на гистерезис в оболочке невелики, что позволяет достичь положительного эффекта. При изготовлении гибкого высококачественного (аудиофильного, как теперь модно говорить) неэкранированного межблочного или акустического кабеля (автор использовал обычную хромдиоксидную видеоленту шириной 12,7 мм на лавсановой основе). Лента наматывается с перекрытием в 6–10 слоев на основную металлическую (медную или серебряную) токопроводящую жилу. В результате такой операции резко снижаются нелинейные искажения, вносимые кабелем, а верхняя частота пропускания кабеля увеличивается с 30 МГц до 120–250 МГц и выше, в зависимости от толщины провода. При этом кабель выполняется в виде трех сплетенных «косичкой» проводников (наподобие того, как это делает фирма Kimber Kable).

Кроме изготовления кабелей, описанный метод борьбы со скин-эффектом может быть применен на промышленном уровне в отношении токопроводящих элементов любых форм и видов, выполненных из проводников, сверхпроводников и полупроводников с показателем относительной магнитной проницаемости около единицы, предназначенных для пропускания тока и управления током в широком диапазоне силы и частоты. Заявленный метод может быть применен, например, в производстве кабелей связи, монтажных и соединительных проводов, транзисторов, диодов, интегральных микросхем, контактных устройств, разъемов, резисторов, электрических конденсаторов и высокочастотных катушек индуктивности.

### Литература

1. Фридман Б.Э. Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Массивные проводники в электрических цепях // Журнал технической физики. Т. 72, вып. 9. – 2002. – С. 52–56.
2. Герасимов А.А., Кастров М.Ю. Электромагнитные компоненты преобразователей напряжения // Практическая силовая электроника. – 2001. – № 1. – С. 32–38.

УДК 621.3

## УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ФОРСУНКИ

*Лихтарович Е.С.*

Научный руководитель – ЖУКОВСКАЯ Т.Е.

Важнейшими элементами при работе любого механизма, являются исполнительные механизмы. К числу исполнительных механизмов (ИМ) относят электромагнитные форсунки, регулятор холостого хода, катушки зажигания, электробензонасос. Важным узлом в системе впрыска являются электромагнитные форсунки.

Электромагнитом называется всякое железное, стальное или чугунное тело, которое может быть временно намагниченным посредством пропускания электрического тока по проводнику, окружающему это тело [1]. Вокруг всякого проводника, по которому проходит электрический ток, возникает магнитное поле, характер которого может быть описан указанием расположения и распределения магнитных силовых линий этого поля. Если проводник представляет собой сталь круглого сечения 3–5 мм значительной длины, то магнитные силовые линии созданного вокруг обмотки поля представля-