

Методы измерения тока

в активных корректорах коэффициента мощности

Существующие варианты схемотехнических решений для измерения тока в активных корректорах коэффициента мощности не дают однозначного решения проблемы. Знание плюсов и минусов той или иной схемы позволит разработать хорошее схемотехническое решение инженерам, которые впервые подходят к проектированию корректоров коэффициента мощности.

Александр Полищук

a.polishuk@prosoft.ru

Введение

Современные требования к уровню электромагнитных помех и гармоническому составу тока первичной сети требуют использования активной коррекции коэффициента мощности в источниках электропитания с преобразованием частоты. Так, международным стандартом IEC555-2 регламентируется уровень каждой гармоники тока частоты сети до 15 включительно (см. табл.), что предъявляет жесткие требования к схемотехнике АККМ.

Наибольшее распространение получили АККМ по схеме повышающего ШИМ-преобразователя (рис. 1) благодаря относительно низким потерям и простоте обеспечения постоянного потребления тока. Управление широтно-импульсным модулятором осуществляется сигналом, формируемым схемой управления таким образом, чтобы потребляемый ток по форме совпадал с выпрямленным напряжением. Для корректной работы схемы необходимо обеспечить с требуемой точностью считывание трех сигналов: выпрямленного напряжения после мостового выпрямителя, постоянного выходного напряжения ККМ и тока.

Измерение тока зависит от методов управления корректором, среди которых можно выделить три ос-

Таблица

Номер гармоники, n	Относительный допустимый ток, мА/Вт	Максимально допустимый ток, А
Нечетные гармоники		
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,78
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	0,3	0,21
15 и выше	$3,85/n$	$0,15 \times (15/n)$
Четные гармоники		
2	1,8	1,08
4	0,7	0,42
6	0,5	0,30
8 и выше	$3/n$	$1,8/n$

новных: метод разрывных токов и его разновидность — «граничное» управление, метод управления по пиковому значению тока и управление по среднему значению тока [1]. Первые два метода применяются в ККМ малой и средней мощности (до 300 Вт) из-за ряда существенных недостатков. Во-первых, большая амплитуда пульсаций тока создает значительные электромагнитные помехи, что приводит к необходимости установки больших сетевых фильтров, а также усложняет обеспечение устойчивости работы схемы управления. Во-вторых, усилитель токовой петли должен иметь низкое усиление и широкую полосу частот, что приводит к возникновению значительной ошибки между формой напряжения и тока, снижающей коэффициент мощности и увеличивающей искажения потребляемого от сети тока.

Корректоры коэффициента мощности с управлением по среднему току свободны от указанных недостатков. Как правило, пиковое значение пульсаций тока дросселя выбирают в пределах 20% от среднего значения. Усилитель токовой петли имеет высокое усиление на удвоенной частоте сети и низкое усиление на частоте преобразования, что значительно повышает помехоустойчивость схемы и точность отслеживания формы сигнала. Однако такой

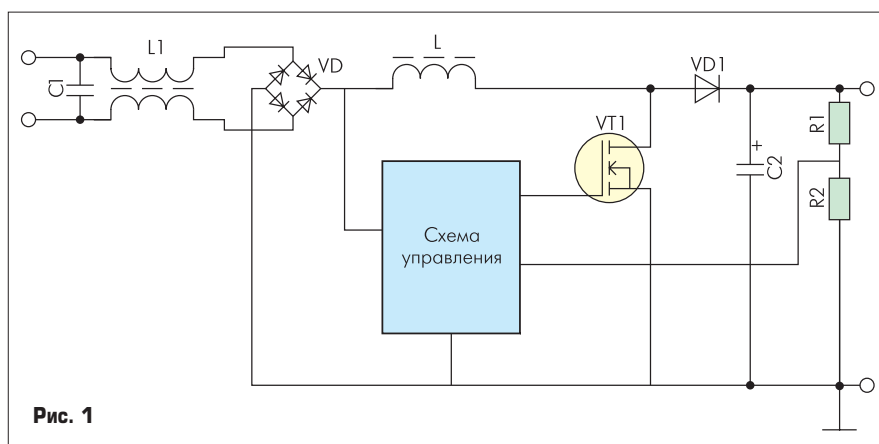


Рис. 1

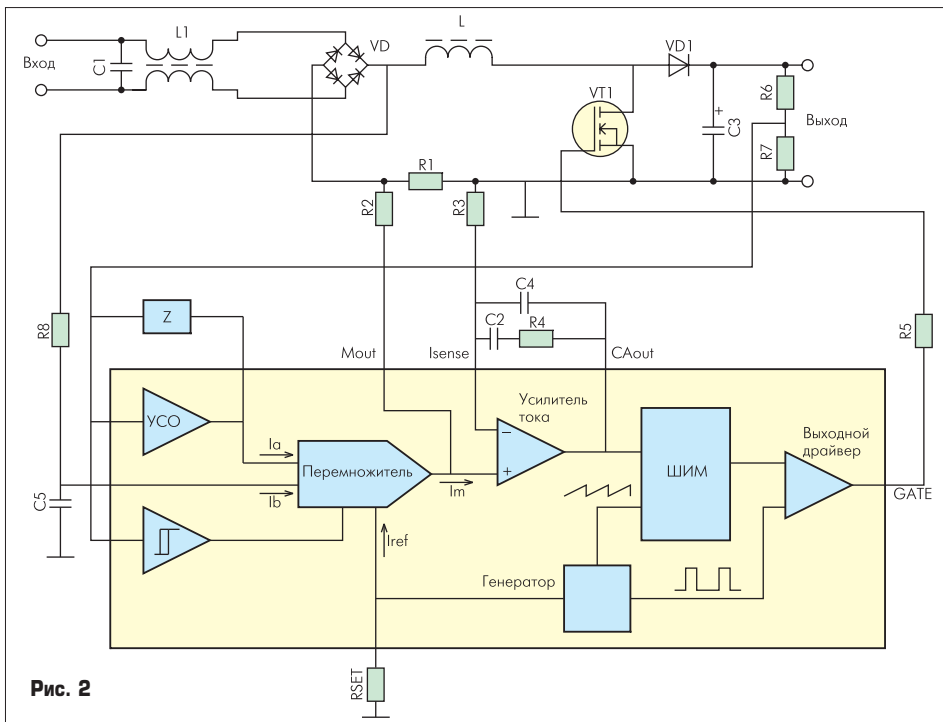


Рис. 2

метод требует считывания тока, протекающего в возвратном проводе преобразователя, что создает определенные трудности, возрастающие с ростом мощности ККМ.

Рассмотрим основные методы измерения среднего тока на примере ККМ, выполненного на базе контроллера LT1248 компании Linear Technology, одного из лучших в своем классе. Упрощенная структурная схема корректора приведена на рис. 2, где показаны только те элементы контроллера, которые формируют сигнал управления ШИМ. Необходимо отметить, что усилитель тока фактически выполняет функцию сравнения формы синтезированного опорного сигнала и реального тока, потребляемого от сети. Поэтому точность коррекции коэффициента мощности и устойчивость работы схемы будет во многом зависеть от характеристик токовой петли обратной связи.

Резистивный метод

Этот метод является наиболее простым и обеспечивает хорошие качественные показатели работы при правильном выборе величины резистивного датчика тока. Фрагмент схемы токовой петли с резистивным датчиком показан на рис. 3. Дифференциальный сигнал $U_{CS} = iR_{SENSE}$, снимаемый с резистора R_{SENSE} , подается на токовый усилитель (УТ), который вычитает его из опорного выходного сигнала перемножителя $U_M = I_m R_1$. Усиленный сигнал рассогласования подается на компаратор ШИМ.

Для обеспечения устойчивой работы и требуемой точности коррекции формы тока необходимо обеспечить частотную компенсацию УТ. Передаточная функция схемы управления по входному току повышающего преобразователя имеет один полюс на высоких частотах, положение которого зависит от величины индуктивности дросселя L и по форме аналогична характеристике фильтра нижних частот. Она может быть описана следующим соотношением:

$$\frac{V_{Rs}}{V_{CA}} = \frac{V_{out} \times R_{SENSE}}{V_s \times sL} = K_i(s) \quad (1)$$

где V_{Rs} — напряжение на резистивном датчике тока, V_{CA} — напряжение на выходе усилителя тока, V_{out} — выходное напряжение ККМ, V_s — амплитуда пилообразного напряжения на входе компаратора ШИМ, $s = j\omega$. Соотношение (1) корректно в диапазоне частот между резонансной частотой выходного фильтра LC_0 и частотой преобразования. Компенсация УТ должна обеспечивать равномерное усиление в области частоты преобразования и спад характеристики в области высоких частот. Для обеспечения режима управления по среднему току передаточная функция должна иметь ноль на низкой частоте. Усиление на частоте преобразования определяется согласованием скорости спада тока индуктора в режиме закрытого состояния ключевого транзистора со скоростью изменения пилообразного напряжения на входе компаратора ШИМ. Крутизна спада тока индуктора достигает максимального значения, когда напряжение на вхо-

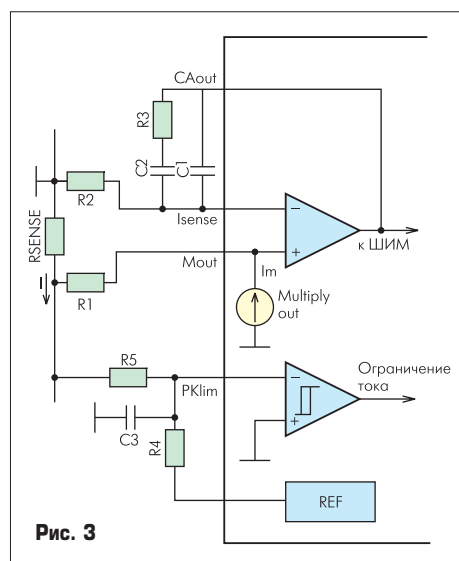


Рис. 3

де преобразователя близко к нулю и имеет максимальное значение:

$$\frac{di}{dt}(\max) = -\frac{V_{out}}{L} \quad (2)$$

Крутизна спада напряжения на датчике тока при этом будет составлять:

$$\frac{dV_{Rs}}{dt}(\max) = -\frac{V_{out} \times R_{SENSE}}{L} \quad (3)$$

Величина (3), умноженная на коэффициент усиления УТ на частоте преобразования, должна быть равна скорости изменения пилообразного напряжения на входе компаратора ШИМ. Если усиление на частоте преобразования будет слишком велико, устойчивость системы будет нарушена, что приведет к увеличению искажений и некорректной работе устройства.

Переходная частота f_{ci} усиления УТ находится из соотношения:

$$K_i(s) \times K_{CA}(s) = 1 \quad (4)$$

где $K_{CA}(s)$ — коэффициент усиления УТ. С учетом (1):

$$f_{ci} = \frac{V_{out} \times R_{SENSE} \times R3}{V_s \times 2\pi L \times R2} \quad (5)$$

где $R2, R3$ — сопротивления резисторов цепи ОС УТ (рис. 3). Исходя из условия равенства скоростей нарастания тока и пилообразного напряжения ШИМ, можно записать:

$$V_s \times f_s = \frac{V_{out} \times R_{SENSE}}{L} \times \frac{R3}{R2} \quad (6)$$

откуда

$$\frac{R3}{R2} = \frac{V_s \times f_s \times L}{V_{out} \times R_{SENSE}} \quad (7)$$

где f_s — частота преобразования.

Для обеспечения запаса по фазе и снижения чувствительности к шумам полюс и ноль передаточной функции располагают на частотах $f_s/2$ и f_{ci} соответственно. В этом случае соотношения для вычисления емкостей конденсаторов частотной коррекции $C1, C2$ имеют вид:

$$C1 = \frac{1}{2\pi \times R3 \times \frac{f_s}{2}} \quad (8)$$

$$C2 = \frac{1}{2\pi \times R3 \times f_{ci}} \quad (9)$$

Основным недостатком указанного метода является необходимость рассеяния большой мощности на резисторе датчика тока. Поскольку для большинства контроллеров, управляемых по среднему току, номинальное напряжение V_{Rs} на входе УТ имеет значение около 1 В, величина мощности, рассеиваемая резис-

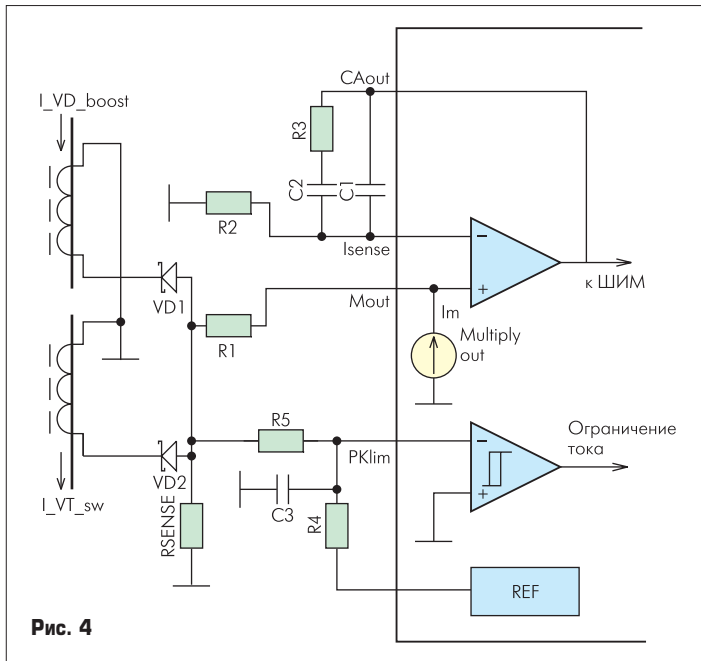


Рис. 4

тором, составляет 5–8 Вт на 1 кВт мощности нагрузки. Это приводит к увеличению габаритов и снижению эффективности ККМ.

Трансформаторный метод

Этот метод практически свободен от указанных выше недостатков резистивных датчиков, поскольку позволяет осуществить считывание тока без потерь мощности. Для реализации управления по среднему току необходимо восстанавливать форму тока, протекающего в возвратном проводе. Для этого используются два трансформаторных датчика: один включается в цепь стока ключевого транзистора, другой — в цепь катода бустерного диода (рис. 4). Сигналы с датчиков суммируются на резисторе R_{SENSE} и подаются на вход УТ. Компенсация усилителя тока производится аналогично предыдущему методу.

Основная сложность, возникающая при использовании этого метода, заключается в конструировании трансформаторов, способных передавать сигналы с изменяющимся в широких пределах коэффициентом заполнения, вплоть до 100%. Это может приводить к насыщению сердечника трансформатора и, как следствие, некорректной работе устройства. Существует несколько способов уменьшения указанного эффекта, среди которых увеличение числа витков, использование дополнительного источника смещения противоположной полярности, размагничивающего сердечник, установка дополнительной размагничивающей обмотки и т. п. Однако ни один из них не позволяет полностью устранить искажения сигнала при больших коэффициентах заполнения. К тому же возникающие переходные процессы на паразитных индуктивностях и емкостях также могут приводить к снижению точности коррекции и дополнительным трудностям. Использование данного метода также требует трудоемкой предварительной проработки топологии, что приводит к увеличению стоимости изделия и снижает его технологичность.

Разновидностью указанного метода является метод с синтезатором тока. В этом случае

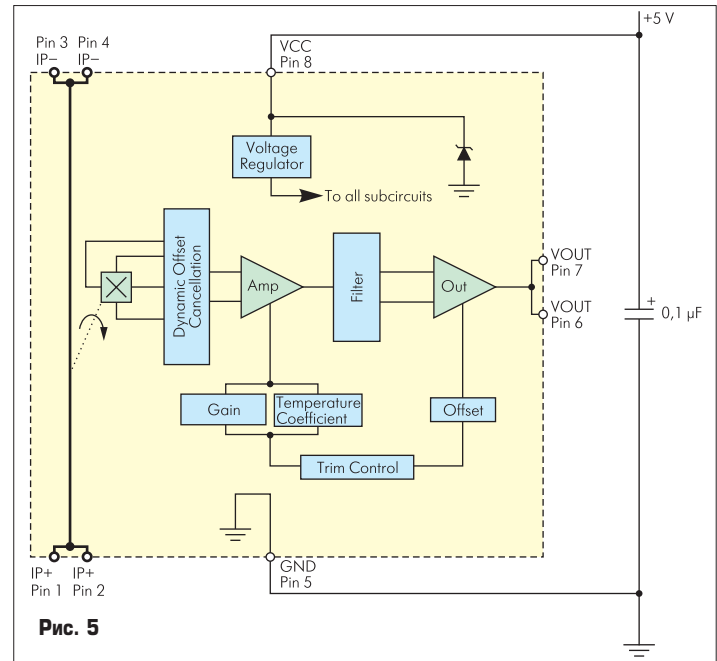


Рис. 5

используется только один трансформатор тока ключевого транзистора, сигнал которого заряжает опорный конденсатор во время открытого состояния ключа. Спад напряжения на конденсаторе во время закрытого состояния ключа программируется с помощью специальной схемы, устанавливающей его скорость пропорционально изменению выпрямленного входного напряжения. Такой способ реализован в контроллере UC1855, реализация его как самостоятельной схемы представляет определенные трудности, поэтому в данной статье не рассматривается.

Использование датчика тока на эффекте Холла

Теоретически этот метод является почти идеальным, поскольку у него отсутствуют все перечисленные выше недостатки и ограничения. Наибольший интерес с точки зрения минимизации стоимости и габаритов представ-

ляет использование новых интегральных датчиков тока компании Allegro Microsystems ACS704ELC-015, рассчитанных на измерение тока до 15 А. Они обеспечивают хорошую линейность — $\pm 1\%$ в диапазоне ± 15 А, чувствительность 100 мВ/А и имеют низкое сопротивление токовой шины — 1,5 мОм. Структурная схема датчика показана на рис. 5.

Он включает в себя элемент Холла, усилитель со схемой температурной компенсации, фильтр, стабилизатор напряжения питания и выходной буфер. Датчик выполнен в стандартном корпусе для поверхностного монтажа SOIC-8. Выходное напряжение датчика симметрично относительно половины питающего напряжения. Схема измерения тока с использованием датчика Холла приведена на рис. 6.

На операционном усилителе DA1 выполнена схема смещения выходного напряжения датчика Холла на величину половины напряжения питания для обеспечения изменения напряжения на входе УТ относительно нуле-

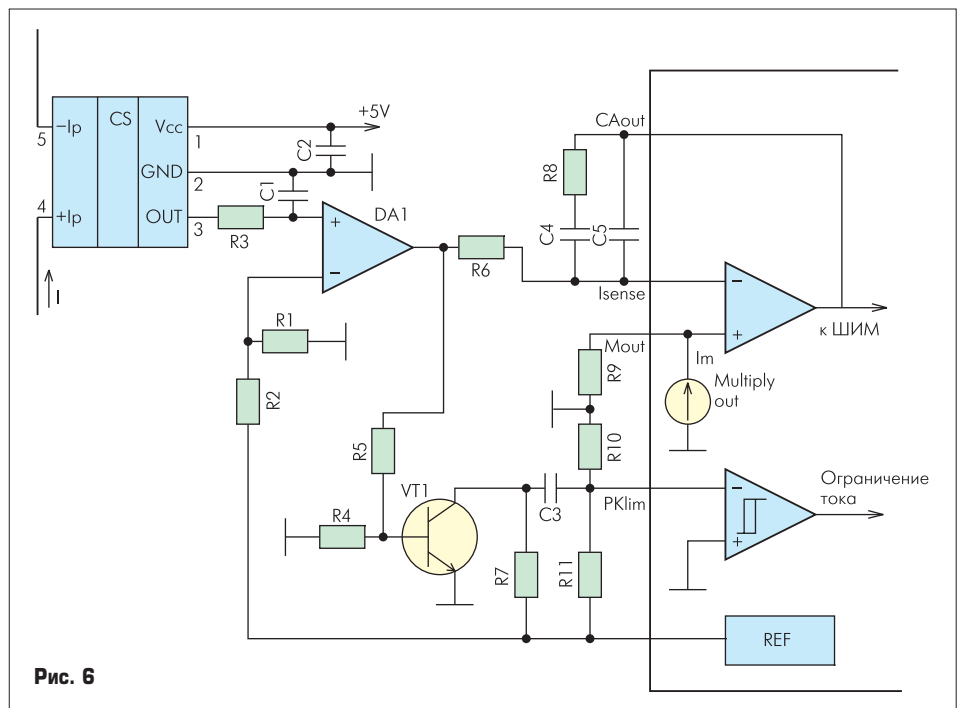


Рис. 6

вого уровня. Для организации режима ограничения максимального тока на элементах R4, R5, VT1, R7, R10, R11, C3 выполнен инвертор напряжения. Его необходимость обусловлена конфигурацией компаратора тока контроллера ККМ, у которого прямой вход соединен с общим проводом и поэтому для его переключения требуется небольшое напряжение отрицательной полярности на выводе Pklim.

На практике существует серьезная проблема, связанная с выходными шумами интегрального датчика Холла. Они обусловлены использованием схемотехники стабилизации прерыванием для температурной компенсации дрейфа нуля усилителя сигнала в элементе Холла. Это требует включения фильтра на элементах R3, C1 с частотой среза 30–40 кГц, а также расположения полюса передаточной функции УТ на более низкой частоте. Наличие ФНЧ на выходе датчика снижает скорость нарастания и спада выходного напряжения, поэтому частота преобразования ККМ ограничивается величиной 100–120 кГц при мощности нагрузки 1 кВт.

Использование резистивного датчика с усилителем

В ряде случаев компромиссным решением может быть использование резистивного датчика с дифференциальным усилителем (рис. 7). Для достижения хороших результатов по точности и отношению «сигнал — помеха» лучше всего использовать инструментальный усилитель (ИУ) с фиксированным коэффициентом

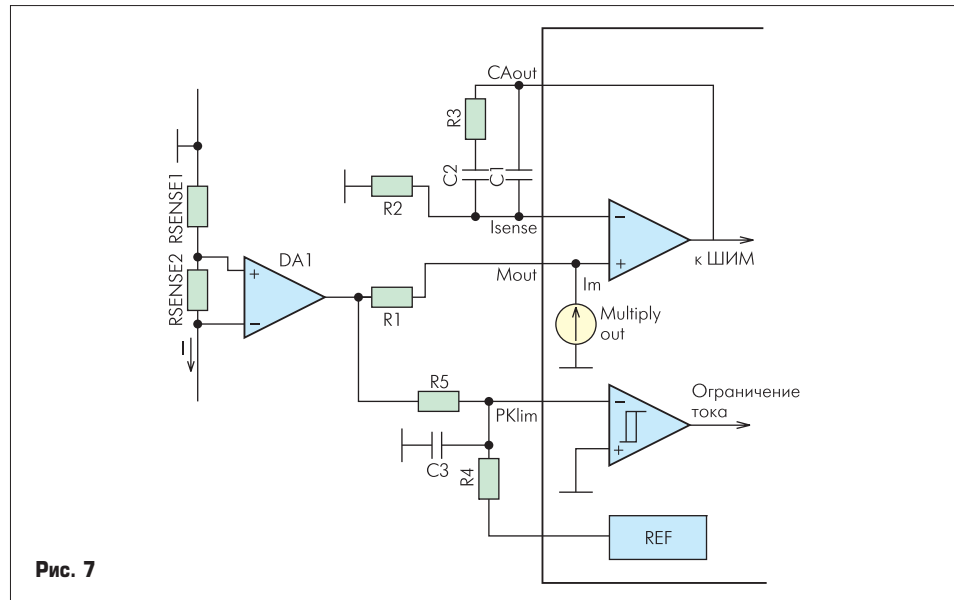


Рис. 7

усиления. Например, при усилении ИУ $K_u=10$ суммарное сопротивление резистивного датчика $R_{SENSE1}+R_{SENSE2}$ может быть снижено в 5 раз и, соответственно, во столько же уменьшены потери мощности в схеме измерения тока.

Заключение

Рассмотренные варианты не дают однозначного решения проблемы измерения тока в ККМ. При проектировании необходимо в каждом конкретном случае рассматривать возможности использования той или иной схемы исходя из конкретных требований

к мощности, точности и стоимости изделия. Автор надеется, что данная статья поможет разработать хорошее схемотехническое решение инженерам, которые впервые подходят к решению задачи проектирования корректоров коэффициента мощности.

Литература

1. Васильев А., Худяков В., Хабuzов В. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Компоненты и технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.