

ОСОБЕННОСТИ БИКМОП МИКРОСХЕМЫ ДРАЙВЕРА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ МНОГОФАЗНЫХ ИНВЕРТОРОВ

© И. Е. Шумков, М. М. Крымко, С. В. Корнеев, А. Н. Ростанин,
А. Г. Христьяновский

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

В статье рассмотрен опыт создания микросхемы драйвера для интеллектуальных силовых модулей многофазных инверторов, описываются её основные характеристики и реализуемые функции. Микросхема драйвера даёт возможность регулировать параметры модуля с помощью навесных элементов (резисторов и конденсаторов). Применение микросхемы драйвера в составе силовых модулей значительно расширяет их функциональные возможности и повышает надёжность данных устройств.

Ключевые слова: силовая электроника, микросхема драйвера, интеллектуальные силовые модули

Сведения об авторах: Шумков Илья Евгеньевич, shumkov_ilya@pulsarnpp.ru; Крымко Михаил Миронович, к.т.н., krymko@pulsarnpp.ru; Корнеев Сергей Викторович, korneev@pulsarnpp.ru; Ростанин Андрей Николаевич, xabbal@pulsarnpp.ru; Христьяновский Анатолий Григорьевич, khristianovsky@pulsarnpp.ru

BICMOS CIRCUIT DRIVER'S FEATURES FOR INTELLIGENT POWER MODULES MULTIPHASE INVERTORS

I. E. Shumkov, M. M. Krymko, S. V. Korneev, A. N. Rostanin, A. G. Khristyanovskiy

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

The experience of driver circuit designing for intelligent power modules multiphase invertors is studied, basic characteristics and realized functions are described. Driver circuit allows to justify module parameters with hookup elements (resistors and capacitors). Driver MMIC using aboard power modules significantly upgrades functionality and increases reliability of such devices.

Keywords: power electronics, driver MMIC, intelligent power modules

Data of authors: Shumkov Ilya Evgenievich, shumkov_ilya@pulsarnpp.ru; Krymko Mikhail Mironovich, Ph.D., krymko@pulsarnpp.ru; Korneev Sergei Victorovich, korneev@pulsarnpp.ru; Rostanin Andrey Nikolaevich, xabbal@pulsarnpp.ru; Khristyanovskiy Anatoly Grigorievich, khristianovsky@pulsarnpp.ru

Введение

Интеллектуальные силовые модули многофазных инверторов широко применяются во всём мире для управления большинством типов электродвигателей (трёхфазные двигатели постоянного и переменного тока, шаговые двигатели и др.). В таких инверторах осуществляется преобразование постоянного

напряжения в трёхфазное (или однофазное) импульсное напряжение изменяемой амплитуды и частоты. По сигналам системы управления, каждая обмотка электрического двигателя подсоединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Сигналы управления посту-

пают на затворы транзисторов с драйверов (микросхем управления). Микросхема драйвера (ИМС) в составе интеллектуального силового модуля является ключевым элементом, определяющим выполнение основных функций устройства. ИМС драйвера осуществляет управление затвором ключевого транзистора по внешнему логическому сигналу. Кроме того, ИМС осуществляет мониторинг тока нагрузки и температуры силовой части модуля, обеспечивая запираание выходного ключа при возникновении аварийной ситуации.

Состав микросхемы драйвера

Структурная схема драйвера представлена на рис. 1. Микросхема драйвера имеет отдельные вводы питания и общие шины для аналоговых, цифровых и силовых блоков. Такое конструктивное решение позволяет минимизировать влияние силовых и цифровых цепей на аналоговые схемы.

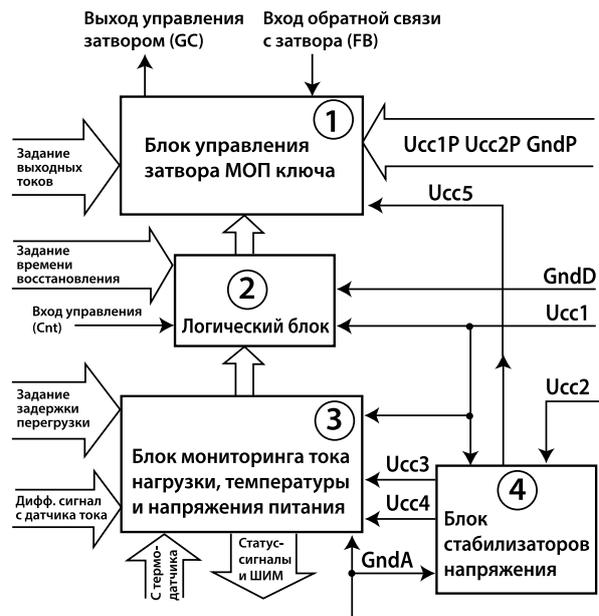


Рис. 1

Структурная схема БИКМОП драйвера

Таблица 1

Общие выводы и выводы питания БИКМОП микросхемы драйвера

Обозначение вывода	Назначение	Предельно-допустимый режим [Номинал]
U_{CC1}	Положительное напряжение питания цифровых блоков и стабилизатора напряжения U_{CC3}	+12,0 В...+15,0 В
U_{CC2}	Отрицательное напряжение питания стабилизатора напряжения U_{CC4}	(-20,0 В + U_{CC1})...-4,0 В
U_{CC1P}	Положительное напряжение питания силовых блоков	+12,0 В...+15,0 В
U_{CC2P}	Отрицательное напряжение питания силовых блоков	(-20,0 В + U_{CC1P})...-4,0 В
U_{CC3}	Положительное стабилизированное напряжение питания аналоговых блоков микросхемы (формируется микросхемой)	[+5,0 В]
U_{CC4}	Отрицательное стабилизированное напряжение питания аналоговых блоков микросхемы (формируется микросхемой)	[-3,0 В]
U_{CC5}	Вспомогательное стабилизированное напряжение блока управления затвором ключевого транзистора модуля	[+7,0 В]

Общие выводы и выводы питания БИКМОП микросхемы драйвера

Обозначение вывода	Назначение	Предельно-допустимый режим [Номинал]
<i>GndA</i>	Общая шина аналоговых блоков	0 В
<i>GndD</i>	Общая шина цифровых блоков	$GndA \pm 1,5$ В
<i>GndP</i>	Общая шина силовых блоков	$GndA \pm 1,5$ В

Назначение и состав выводов питания драйвера приведены в табл. 1.

Описание функционального назначения блоков и расчётные формулы для задания настраиваемых параметров микросхемы приведены ниже.

Общие функциональные требования к интеллектуальным силовым модулям, приведённые в [1], и степень их реализации в рассматриваемой микросхеме драйвера представлены в табл. 2.

Рассмотрим назначение и параметры блоков микросхемы драйвера (рис. 1).

Блок управления затвором МОП ключа

Блок 1 обеспечивает управление затвором ключевого транзистора. Режимы работы данного блока описаны в табл. 3.

Величины выходных токов блока 1 задаются внешними резисторами, схема включения которых показана на рис. 2:

- Втекающий выходной ток управления затвором в рабочем и аварийном режимах соответственно I_{OLW} и I_{OLA} – задаются резистором *Rin2*;

- Вытекающий выходной ток управления затвором I_{OH} – задаётся резистором *Rin3*.

Таблица 2

Функции управления и защиты в силовых модулях. Требования к микросхеме драйвера

Функция	Реализация в БИКМОП микросхеме драйвера	Номер блока структурной схемы на рис. 1
Управление затвором ключевого транзистора	Есть	1
Преобразование уровня управляющего напряжения	Нет	(нет высоковольтного «плавающего» кармана и высоковольтных ключевых транзисторов)
Защита от пониженного напряжения питания	Есть	3
Защита от короткого замыкания и перегрузки по току	Есть	3
Быстрое выключение	Нет	(малое быстродействие элементной базы микросхемы)
Защита от перегрева	Есть	3
Обработка сигнала с датчика тока	Есть	3
Статус-сигналы обратной связи	Есть	3

Таблица 3

Режимы работы блока управления затвором ключевого МОП транзистора

Состояние входа обратной связи «FB»	Состояние входа управления «Cnt»	Состояние схемы защиты	Состояние выхода «GC»
$U_i \geq +5,0$ В	$U_i \geq +2,5$ В	Любое	$U_o = U_{CC2P}$ R_o – высокое (> 5 Ом)
$U_i \geq +5,0$ В	$U_i \downarrow \leq +1,4$ В	Выключена	C_L заряжается постоянным током I_{OH} до $U_o = U_{CC1P}$
$U_i \geq +5,0$ В	$U_i \uparrow \geq +2,5$ В	Выключена	C_L разряжается постоянным током I_{OLW} до $U_o = U_{CC2P}$
$U_i \geq +5,0$ В	$U_i \leq +1,4$ В	Включается	C_L разряжается постоянным током I_{OLA} до $U_o = U_{CC2P}$
$U_i = U_{CC2P}$	$U_i \geq +2,5$ В	Любое	$U_o = U_{CC2P}$, R_o – низкое
$U_i = U_{CC2P}$	$U_i \downarrow \leq +1,4$ В	Выключена	C_L заряжается постоянным током I_{OH} до $U_o = U_{CC1P}$
$U_i = U_{CC2P}$	$U_i \uparrow \geq +2,5$ В	Выключена	C_L быстро разряжается через низкое выходное сопротивление до $U_o = U_{CC2P}$
$U_i = U_{CC2P}$	$U_i \leq +1,4$ В	Включается	C_L быстро разряжается через низкое выходное сопротивление до $U_o = U_{CC2P}$
Вход соединён с выходом «GC»	$U_i \geq +2,5$ В	Любое	$U_o = U_{CC2P}$, R_o – низкое (< 3 Ом)
Вход соединён с выходом «GC»	$U_i \downarrow \leq +1,4$ В	Выключена	C_L заряжается постоянным током I_{OH} до $U_o = U_{CC1P}$
Вход соединён с выходом «GC»	$U_i \uparrow \geq +2,5$ В	Выключена	C_L разряжается постоянным током I_{OLW} до $U_o = U_{CC2P} + \Delta U$; затем разряжается до U_{CC2P} через низкое выходное сопротивление
Вход соединён с выходом «GC»	$U_i \leq +1,4$ В	Включается	C_{LOAD} разряжается постоянным током I_{OLA} до $U_o = U_{CC2P} + \Delta U$; затем разряжается до U_{CC2P} через низкое выходное сопротивление

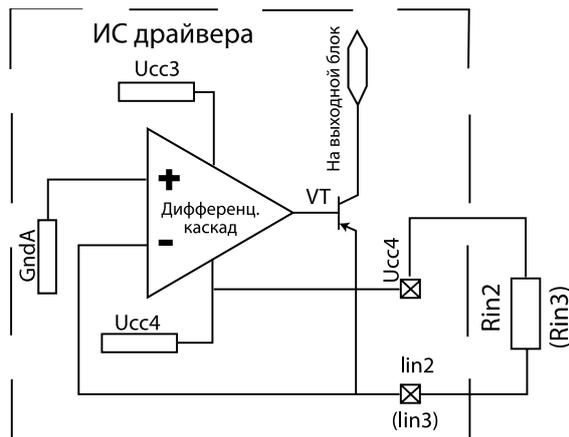


Рис. 2

Блок генератора опорного тока

На рис. 3 представлены расчётные ВАХ выходных генераторов тока I_{OLW} и I_{OLA} – при разных значениях сопротивления $Rin2$.

В выключенном состоянии на затворе ключевого транзистора формируется отрицательное напряжение, близкое к отрицательному напряжению питания U_{CC2P} . Низкое выходное сопротивление драйвера обеспечивает при этом устойчивость схемы

к наводкам, возникающим при быстром изменении выходного напряжения модуля.

Настроечные резисторы $Rin2$ и $Rin3$ включаются между шиной стабилизированного питания U_{CC4} и входами генераторов опорного тока $lin2$ и $lin3$. Схема электрическая принципиальная такого генератора представлена на рис. 2. Блок формирует на выводе $lin2$ ($lin3$) напряжение, близкое к потенциалу общей шины «GndA». Входной ток, равный $U_{CC4}/Rin2$ ($U_{CC4}/Rin3$), передаётся в блок 1 и там усиливается в фиксированное число раз.

Логический блок 2 формирует сигналы управления блоком 1, используя при этом логические сигналы с блока 3 и входной сигнал управления «Cnt».

Блок 3 содержит в своём составе схему защиты, включение которой происходит при возникновении следующих нештатных ситуаций:

- короткое замыкание на выходе модуля,
- перегрузка по току на выходе модуля,
- перегрев силовой части модуля,
- падение напряжения питания U_{CC1} ниже порогового уровня.

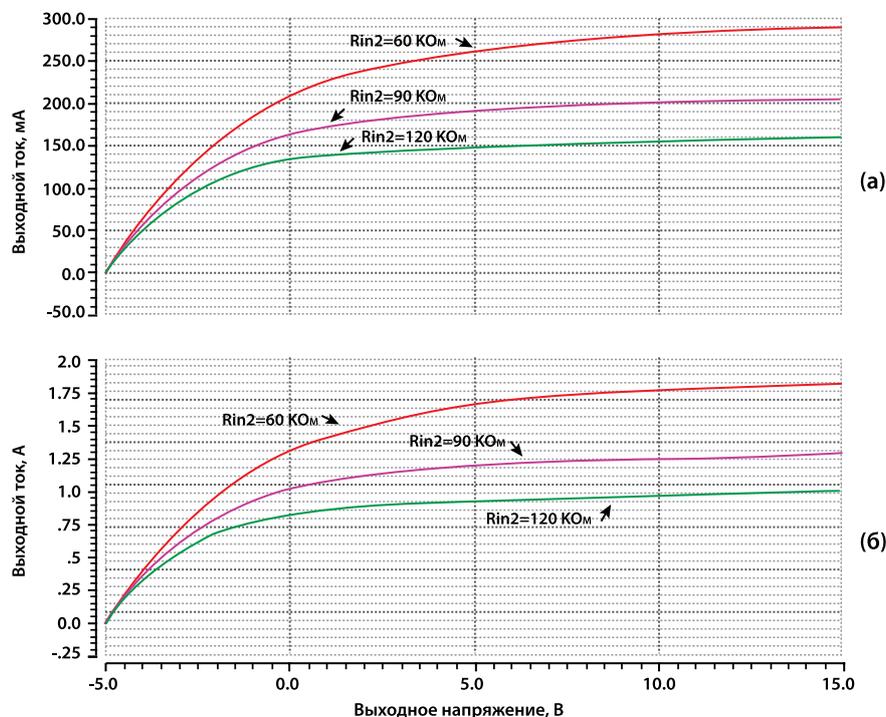


Рис. 3

Расчётные ВАХ выходных генераторов тока I_{OLA} (а) и I_{OLW} (б) при различных значениях сопротивления настроечного резистора $Rin2$

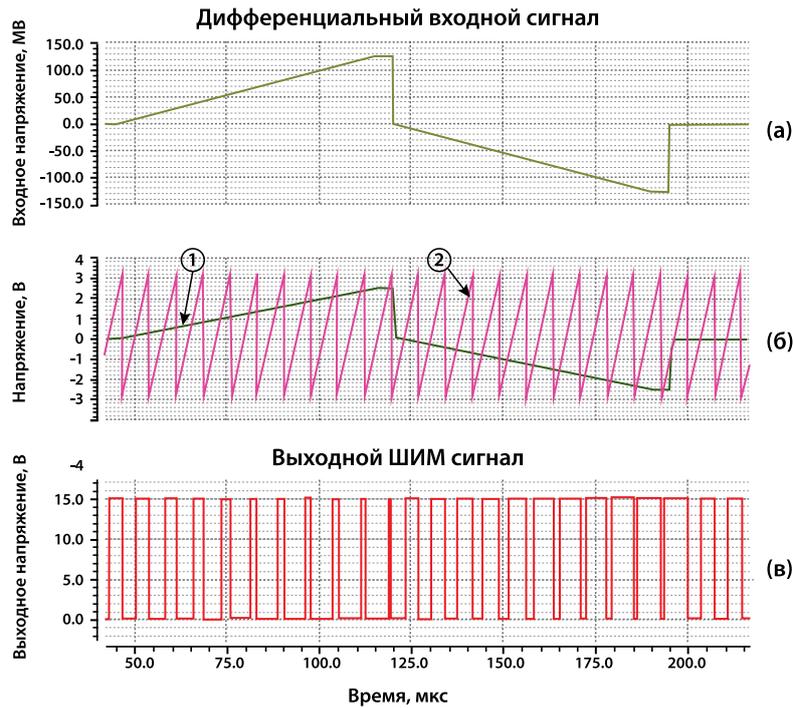


Рис. 4

Принцип мониторинга тока нагрузки с помощью ШИМ: а) входное дифференциальное напряжение с датчика тока; б) внутренние сигналы микросхемы драйвера: 1 – усиленный в 20 раз входной сигнал, 2 – пилообразный сигнал для формирования ШИМ; в) – выходной ШИМ сигнал

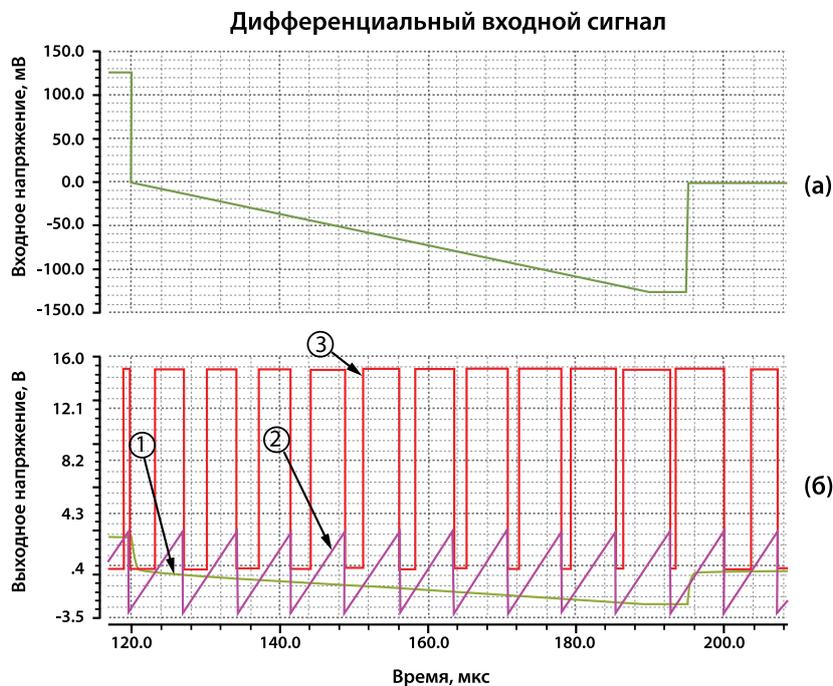


Рис. 5

Мониторинг тока нагрузки. Способ формирования выходного сигнала ШИМ: а) входное дифференциальное напряжение с датчика тока; б) внутренние сигналы микросхемы драйвера: 1 – усиленный в 20 раз входной сигнал, 2 – пилообразный сигнал для формирования ШИМ, 3 – выходной ШИМ сигнал

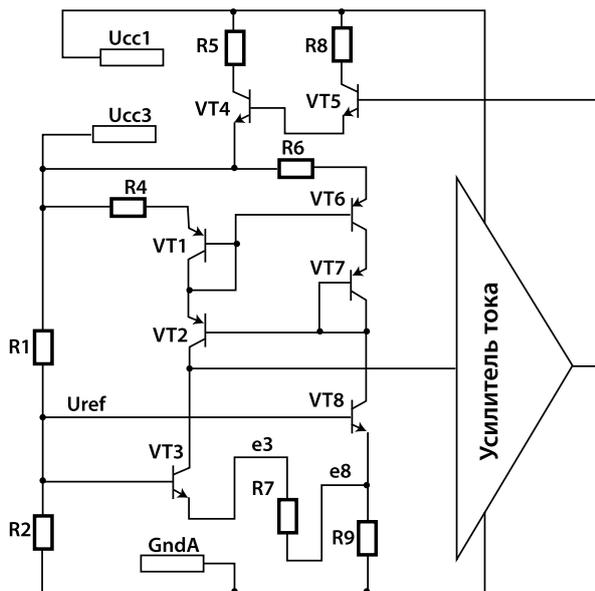


Рис. 6
Электрическая схема стабилизатора напряжения U_{CC3}

Включение схемы защиты приводит к запитанию силового ключа согласно табл. 3.

Слежение за током нагрузки. Выходной ШИМ сигнал

Блок 3 осуществляет постоянный мониторинг тока нагрузки силового модуля. Блоком вырабатывается ШИМ (широтно-импульсная модуляция) сигнал, коэффициент заполнения которого зависит линейно от величины дифференциального напряжения на датчике тока. Принцип формирования ШИМ сигнала иллюстрируют рис. 4 и рис. 5.

Источник стабилизированного напряжения питания

Микросхема драйвера включает в себя блок 4 стабилизаторов напряжения. Термостабилизированное напряжение питания U_{CC3} с номиналом +5,0 В используется во всех аналоговых блоках драйвера. Оно обеспечивает питание компараторов и операционных усилителей и формирование всех пороговых потенциалов схемы защиты. Термостабилизированное напряжение питания U_{CC4} с номиналом -3,0 В служит отрицатель-

ным напряжением питания аналоговых блоков. Опорным напряжением, используемым для формирования потенциала U_{CC4} , служит напряжение U_{CC3} . Напряжение питания U_{CC5} с номиналом +7,0 В необходимо для ограничения напряжения на затворах КМОП транзисторов на уровне не более $\pm 15,0$ В.

Выработка напряжения питания U_{CC3} обеспечивается в микросхеме драйвера за счёт формирования термостабилизированного опорного напряжения [2]. Электрическая схема стабилизатора напряжения U_{CC3} представлена на рис. 6.

Опорное напряжение формируется в узле U_{ref} относительно потенциала общей шины $GndA$. Биполярный *NPN* транзистор $VT3$ имеет площадь эмиттерного перехода в $N = 10$ раз больше, чем транзистор $VT8$. Система токовых зеркал на *PNP* транзисторах $VT1$, $VT2$, $VT6$, $VT7$ и блок обратной связи обеспечивают равные токи коллекторов транзисторов $VT3$ и $VT8$. При таких условиях разность потенциалов узлов «e3» и «e8» всегда остаётся равной $\ln(N) \cdot \varphi_T \approx 2,3 \cdot \varphi_T$.

При этом потенциал узла $U(e3)$ всегда равен:

$$\Delta U1 = U(e3) \approx 2,3 \cdot \varphi_T \cdot (1 + 2 \cdot R9/R7). \quad (1)$$

$\Delta U2$ – падение напряжения на эмиттерном переходе транзистора $VT3$. Опорное напряжение U_{ref} равно сумме:

$$U_{ref} = \Delta U1 + \Delta U2. \quad (2)$$

Составляющие опорного напряжения U_{ref} согласно формуле (2) имеют температурные коэффициенты разных знаков. Термостабильность напряжения U_{ref} можно обеспечить, выбирая оптимальное соотношение сопротивлений $R9/R7$ [2].

Необходимый выходной ток стабилизатора напряжения обеспечивается схемой Дарлингтона на транзисторах $VT5$, $VT4$. Выходное напряжение определяется соотношением:

$$U_{CC3} = U_{ref} \cdot (1 + R1/R2). \quad (3)$$

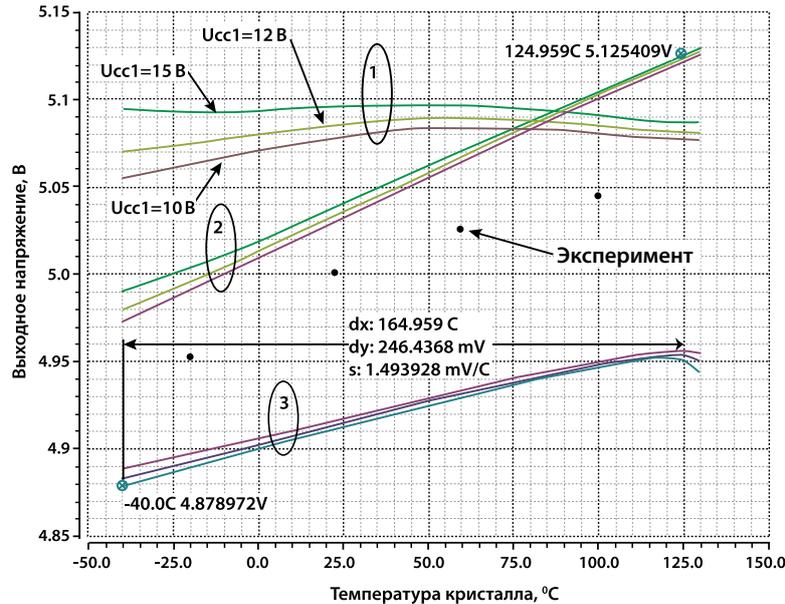


Рис. 7

Расчётные температурные зависимости напряжения U_{CC3} (резисторы $R7, R9$ – высокоомный поликремний): 1) β – минимальный, R – минимальные; 2) типовые параметры; 3) β – максимальный, R – максимальные. Разброс значений U_{CC3} – 246,4 мВ. Экспериментальные значения U_{CC3} получены при напряжении питания $U_{CC1} = 15$ В

Оптимизация схемы стабилизатора (рис. 6) при типовых значениях параметров NPN – транзисторов $VT3, VT8$ и резисторов $R7, R8$ не гарантирует, однако, стабильности напряжения в диапазоне технологического разброса. Нестабильным оказывается величина прямого падения напряжения на эмиттерном p-n переходе $\Delta U2$. При максимальном коэффициенте передачи по току (β) транзистора $VT3$ и максимальном сопротивлении резисторов $R7, R9$ величина $\Delta U2$ принимает минимальное значение. При минимальном β транзисторов и минимальном сопротивлении резисторов величина $\Delta U2$ – максимальна.

В связи с вышесказанным существенным становится выбор конструкции резисторов $R7$ и $R9$.

На рис. 7 представлены расчётные значения выходного напряжения U_{CC3} в диапазоне рабочих температур кристалла драйвера и технологического разброса параметров элементной базы. При этом резисторы $R7, R9$ формируются в слое высокоомного поликремния и имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Соот-

ношение сопротивлений равно $R9/R7 \approx 5,67$. Разброс значений U_{CC3} составляет 246,4 мВ, или 4,9 % от номинального значения.

Заключение

Описанная микросхема интеллектуального драйвера мощных МОП транзисторов обладает рядом особенностей, расширяющих функциональные возможности микросхемы и надёжность силовых модулей, а именно:

- формирование отрицательного напряжения питания на затворе закрытого ключевого транзистора;
- задание постоянного тока управления затвором ключевого транзистора с помощью внешних резисторов;
- удержание запирающего напряжения на затворе ключевого транзистора при низком выходном сопротивлении после окончания переходного процесса;
- формирование выходного ШИМ сигнала, модулированного током нагрузки фазы модуля;
- наличие стабилизированного напряжения питания, задающего все встроенные уровни включения схем защиты;

- отдельные входы шин питания силовых, цифровых и аналоговых блоков.

Литература

1. Giacomini D., Bianconi E., Martino L., Palma M. A new fully integrated power module for three phase servo motor driver applications, Industry Applications Conference, 2001, vol. 2, pp. 981-987.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Том I: пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 241 с.
3. Using Intelligent Power Modules. Mitsubishi Electric. Application Note.
4. Motto E., Donlon J., Shirakawa S., Iwagami T., Kawafuji H., Seo M., Satou K. Latest Progress in Power Modules for Appliance Inverter Applications, Industry Applications Conference, 2006, vol. 3, pp. 1222-1228.
5. Motto E., Donlon J., Ming Shang, Kuriaki K., Iwagami T., Kawafuji H., Nakano T. Large Package

Transfer Molded DIP-IPM, Industry Applications Society Annual Meeting, 2008, pp. 1-5.

References

1. Giacomini D., Bianconi E., Martino L., Palma M. A. New fully integrated power module for three phase servo motor driver applications, Industry Applications Conference, 2001, vol. 2, pp. 981-987.
2. Tutse U., Shenk K. Semiconductor circuitry. Moscow, DMK Press Publ., 2008, vol. 2, 241 p.
3. Using Intelligent Power Modules. Mitsubishi Electric. Application Note.
4. Motto E., Donlon J., Shirakawa S., Iwagami T., Kawafuji H., Seo M., Satou K. Latest Progress in Power Modules for Appliance Inverter Applications, Industry Applications Conference, 2006, vol. 3, pp. 1222-1228.
5. Motto E., Donlon J., Ming Shang, Kuriaki K., Iwagami T., Kawafuji H., Nakano T. Large Package Transfer Molded DIP-IPM, Industry Applications Society Annual Meeting, 2008, pp. 1-5.