

Описание и особенности применения микросхемы высоковольтного импульсного регулятора LM5001-Q1

А.В. Серебрянников, Г.В. Малинин, А.И. Самсонов

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары

Аннотация: В статье приведена структура и подробное описание работы микросхемы высоковольтного импульсного регулятора автомобильного класса LM5001-Q1, а также рассмотрены основные особенности её применения. Описаны все возможные режимы работы микросхемы, суть способа управления по току и компенсации наклона кривой тока. Объяснены принципы работы схем ограничения тока и тепловой защиты, а также особенности организации внешней синхронизации.

Ключевые слова: LM5001-Q1, микросхема, высоковольтный импульсный регулятор, импульсный преобразователь постоянного напряжения, широтно-импульсное регулирование.

Введение

Построение источников питания для автомобильной электроники является сложной и ответственной задачей [1-2]. Регуляторы напряжения в таких источниках должны работать в широком диапазоне номинальных напряжений, быть устойчивыми к воздействию кондуктивных помех и статических разрядов, а также иметь широкий диапазон рабочих температур [3-4].

Компания *Texas Instruments, Inc. (USA, Texas)* предлагает огромный выбор (более 120 наименований) аттестованных для автомобильной промышленности микросхем импульсных *DC/DC*-преобразователей [1]. Одной из таких микросхем является высоковольтный импульсный регулятор *LM5001-Q1*, который появился на рынке совсем недавно, поэтому информации на русском языке об этой микросхеме практически нет.

1. Структура и принцип работы микросхемы LM5001-Q1

Микросхема *LM5001-Q1* представляет собой высоковольтный импульсный регулятор, обладающий всеми функциями для построения эффективных импульсных преобразователей постоянного напряжения (*DC-DC* преобразователей) с различной топологией силовых частей (повышающий

(*Boost*), обратноходовой (*Flyback*), прямоходовой (*Forward*), *SEPIC* (*Single-Ended Primary Inductor Converter* – несимметричный преобразователь на катушках индуктивности)) с использованием лишь нескольких внешних компонентов [5-6].

Микросхему можно использовать для построения источников питания для промышленных, телекоммуникационных и автомобильных приложений. Этот простой в использовании регулятор имеет в своей структуре n -канальный МОП-транзистор на напряжение 75 В, датчик тока этого транзистора, схему ограничения пикового значения тока с порогом 1 А, высоковольтный регулятор напряжения смещения V_{CC} (напряжения питания драйвера встроенного МОП-транзистора), широкополосный усилитель ошибки (рис. 1). Кроме ограничения тока в микросхеме реализованы такие функции защиты, как блокировка при понижении входного напряжения (*UVLO – Under-Voltage Lock-Out*) и тепловая защита. Микросхема имеет возможность внешнего разрешения работы (*Enable*) или отключения микросхемы (*Shutdown*).

Частота переключений ключевого транзистора устанавливается с помощью единственного резистора и может достигать 1,5 МГц. Задающий генератор к тому же может быть синхронизирован внешними тактовыми импульсами. Микросхема может работать при температуре кристалла от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соответствует стандарту *AEC-Q100*. Регулятор имеет ультра-широкий диапазон входного напряжения (от 3,1 В до 75 В), регулирование выходного напряжения с точностью 1,5 %, пилообразное напряжение компенсации наклона кривой тока, максимальный коэффициент заполнения (относительную длительность включенного состояния транзистора) 85 %.

В начале каждого периода переключений задающий генератор тактовым импульсом u_T устанавливает логику драйвера в состояние логической «1» и включает силовой МОП-транзистор для протекания тока в силовой части преобразователя через катушку индуктивности или трансформатор. Пиковое значение тока силового МОП-транзистора

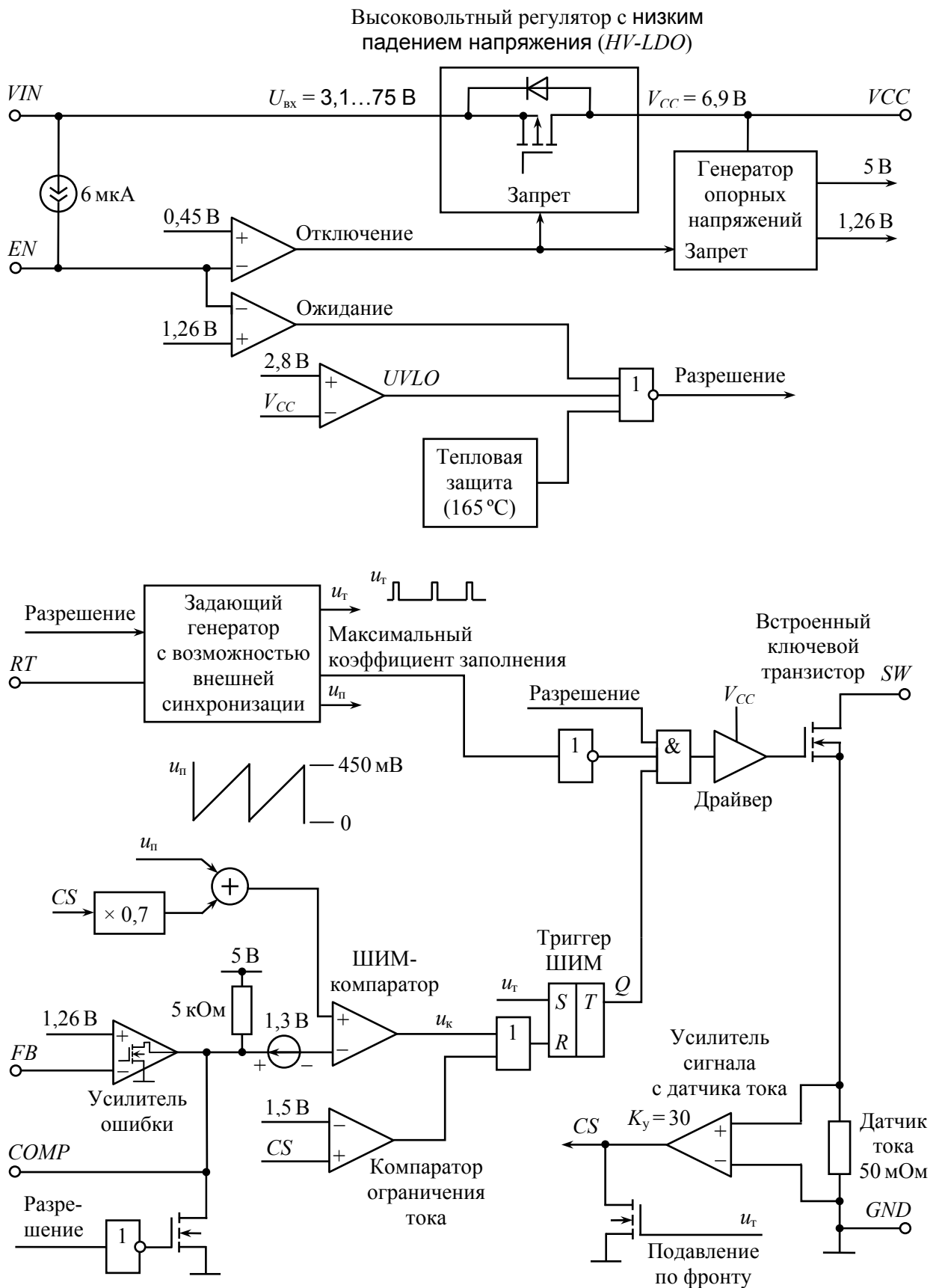


Рис. 1. – Функциональная схема микросхемы LM5001-Q1

управляется напряжением на выводе COMP, которое повышается при увеличении нагрузки и снижается при её уменьшении. Это напряжение сравнивается с суммой напряжения, пропорционального току силового МОП-транзистора, и напряжения пила $u_{п}$, генерируемой внутри микросхемы. Когда суммарный сигнал превышает напряжение на выводе COMP, ШИМ-компаратор сбрасывает логику драйвера, выключая силовой МОП-транзистор. В начале следующего рабочего периода логика драйвера снова устанавливается задающим генератором в состояние «1».

2. Особенности работы основных узлов микросхемы LM5001-Q1

2.1. Высоковольтный регулятор напряжения смещения V_{CC}

Высоковольтный регулятор напряжения смещения V_{CC} с низким падением напряжения (*HV-LDO*) микросхемы LM5001-Q1 позволяет ей работать при минимально возможном входном напряжении $U_{вх}$ [6]. Когда входное напряжение находится в диапазоне от 2,8 В до 6,9 В, напряжение $V_{CC} \approx U_{вх}$. При $U_{вх} > 6,9$ В, напряжение V_{CC} будет поддерживаться на уровне 6,9 В.

Ток выхода регулятора напряжения V_{CC} ограничен значением 20 мА. Во время включения, когда напряжение $U_{вх} > 2,8$ В, а напряжение на выводе EN больше 0,45 В, регулятор напряжения V_{CC} включается и подаёт ток на внешний керамический конденсатор ёмкостью не менее 0,47 мкФ, который необходимо подключить к выводу V_{CC} .

2.2. Задающий генератор и организация внешней синхронизации

Частоту задающего генератора микросхемы LM5001-Q1 устанавливает один внешний резистор, подключаемый между выводами R_T и GND . Если желаемая частота переключений генератора равна $f_{п}$, то необходимое значение сопротивления резистора R_T рассчитывается по формуле [6]:

$$R_T = 13,1 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{1}{f_{\text{п}}} - 83 \text{ нс} \right).$$

Микросхема также может быть синхронизирована по фронту импульсов от внешнего тактового генератора, частота которого должна быть больше собственной частоты задающего генератора, установленной резистором R_T . Тактовый сигнал должен быть подан на вывод RT через конденсатор ёмкостью 100 пФ. Размах импульсов на выводе RT должен быть больше 2,6 В. Микросхема регулирует среднее значение напряжения на резисторе R_T на уровне 1,5 В. Отрицательная амплитуда импульсов синхронизации поддерживается равной 1,5 В внутренним усилителем микросхемы с выходным сопротивлением примерно 100 Ом. Таким образом, для успешной организации внешней синхронизации задающего генератора двуполярный импульс, прикладываемый к резистору R_T , должен иметь положительную амплитуду не менее 1,1 В. Длительность импульсов синхронизации на выводе RT должна быть больше 15 нс и меньше 5 % от периода переключений.

2.3. Режимы работы микросхемы

Микросхема $LM5001-Q1$ имеет два уровня разрешения работы («Отключение» и «Ожидание»), которые реализуются с помощью двух компараторов, связанных с выводом EN . Когда напряжение на выводе EN ниже 0,45 В, микросхема находится в режиме отключения с низким током потребления (около 95 мкА) и отключенным регулятором напряжения V_{CC} . Когда напряжение на выводе EN выше порога отключения 0,45 В, но ниже порога ожидания 1,26 В, регулятор напряжения V_{CC} включается, в то время как оставшаяся часть микросхемы остаётся отключенной. Когда напряжение на выводе EN поднимается выше порога ожидания 1,26 В, а напряжение V_{CC} будет больше порога 2,8 В, работа всех узлов микросхемы разрешается и начинается нормальная работа регулятора. Контроллер остаётся включенным до тех пор, пока напряжение V_{CC} не опустится ниже 2,7 В или напряжение на

выводе EN не станет ниже 1,16 В (для пороговых значений 2,8 В и 1,26 В имеется гистерезис в 100 мВ).

Внутренний источник тока 6 мкА подтягивает напряжение на выводе EN до нужного значения, чтобы разрешить работу микросхемы, когда на вывод EN ничего не подаётся.

2.4. Усилитель ошибки и ШИМ-компаратор

Внутренний усилитель ошибки с высоким коэффициентом усиления генерирует сигнал ошибки, пропорциональный разности между регулируемым выходным напряжением и внутренним опорным напряжением микросхемы $LM5001-Q1$. Выход усилителя ошибки подключен к выводу $COMP$, позволяя разработчику импульсного преобразователя добавлять в схему управления цепь коррекции, как правило, 2-го порядка [6]. Для примера, который показан на рис. 2, а, передаточная функция усилителя ошибки с учётом цепи коррекции будет иметь вид [7-10]:

$$W_{yo}(p) = \frac{K_{yo}(1 + \tau_1 p)}{p(1 + T_1 p)},$$

где K_{yo} – коэффициент усиления по постоянному току, τ_1 и T_1 – постоянные времени, причём:

$$K_{yo} = \frac{1}{R_1(C_1 + C_2)}, \quad \tau_1 = R_2 C_2, \quad T_1 = R_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Эта цепь коррекции создаёт низкочастотный полюс ($p=0$), который даёт первоначальный наклон -20 дБ/дек асимптотической логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) усилителя ошибки $L_{yo}(\omega)$ (рис. 2, б). Для точного регулирования выходного напряжения коэффициент усиления K_{yo} должен быть достаточно большим. Нуль $\omega_n = 1/\tau_1$ обеспечивает большое значение фазы вблизи частоты среза ω_c , чтобы иметь большой запас устойчивости по фазе, а высокочастотный полюс $\omega_n = 1/T_1$ способствует ослаблению высокочастотных колебаний, вызванных переключениями

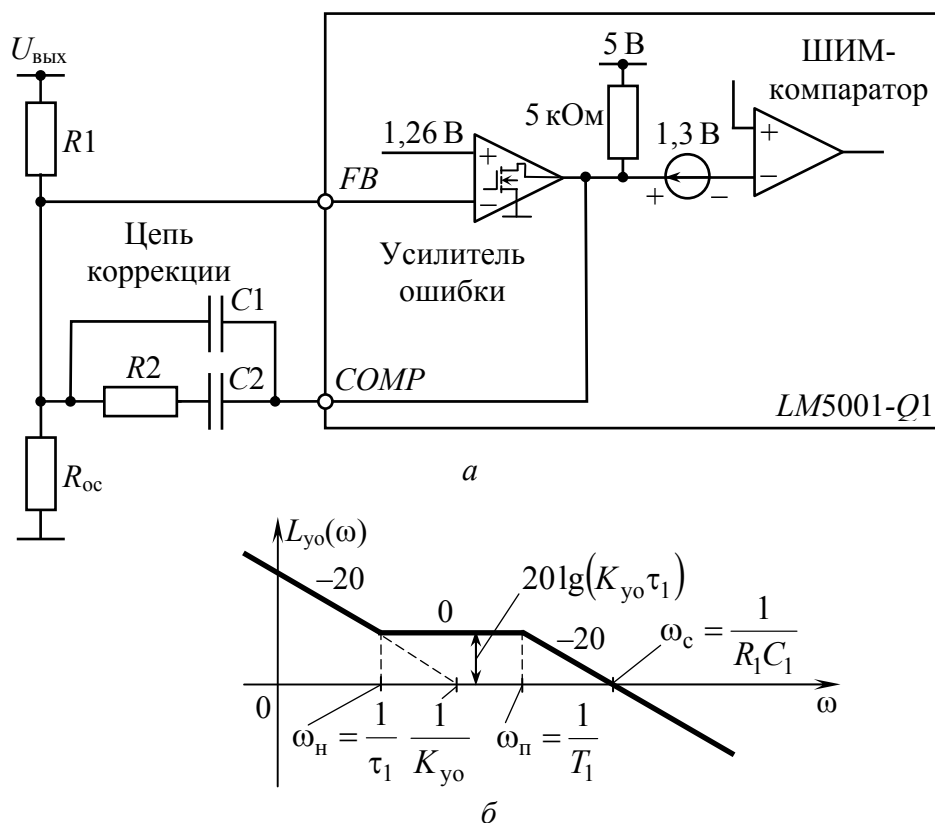


Рис. 2. – Подключение цепи коррекции 2-го порядка (а);
асимптотическая ЛАЧХ усилителя ошибки с учётом цепи коррекции
ключевого транзистора. ШИМ-компаратор сравнивает сигнал на выходе
усилителя датчика тока с выходным напряжением усилителя ошибки.

2.5. Управление по току и компенсация наклона кривой тока

Микросхема *LM5001-Q1* работает в режиме управления по пиковому значению тока, которое также обеспечивает функцию поперiodного ограничения тока. Внутренний резистивный датчик тока сопротивлением 50 мОм измеряет ток истока встроенного МОП-транзистора. Напряжение на резисторе с помощью операционного усилителя усиливается в 30 раз, чтобы обеспечить сигнал 1,5 В/А, подаваемый на компаратор ограничения тока. Ограничение тока включается, если входное напряжение отвечающего за это компаратора превышает порог 1,5 В, соответствующий току 1 А. При этом вывод *SW* немедленно переключается в *z*-состояние (состояние высокого импеданса).

Сигнал тока МОП-транзистора перед подачей на ШИМ-компаратор умножается на коэффициент $0,05 \cdot 30 \cdot 0,7 = 1,05$ В/А. Затем полученный сигнал

суммируется с пилообразным напряжением с амплитудой 450 мВ (0 В в начале и 450 мВ в конце периода переключений). Суммарный сигнал сравнивается в ШИМ-компараторе с сигналом управления, который достигает 1,5 В, когда ток МОП-транзистора равен 1 А.

Добавление к сигналу с датчика тока пилообразного напряжения с фиксированным наклоном и называется компенсацией наклона кривой тока. Такая компенсация используется в структурах с ШИМ и управлением по току для устранения субгармонических колебаний тока в виде чередования коротких и длинных ШИМ-импульсов, которые возникают в статических режимах работы с коэффициентом заполнения более 50 %.

2.6. Тепловая защита

Внутренняя схема тепловой защиты микросхемы *LM5001-Q1* необходима для её отключения при достижении максимально допустимой температуры кристалла 165 °С. При этом регулятор переводится в состояние ожидания с низким энергопотреблением и с отключением всех узлов, кроме регулятора напряжения V_{CC} . Дальнейшая работа регулятора будет разрешена только после уменьшения температуры кристалла на 20 °С.

2.7. Силовой МОП-транзистор

Микросхема *LM5001-Q1* содержит в своей структуре *n*-канальный МОП-транзистор с сопротивлением во включенном состоянии 440 мОм, которое меняется с изменением температуры. Типовой заряд затвора встроенного МОП-транзистора составляет 4,5 нКл и обеспечивается от напряжения V_{CC} , когда транзистор включен.

Литература

1. Гавриков В. Texas Instruments за рулём: компоненты TI для автомобильных приложений // Новости электроники. 2014. №7. С. 23-29.
2. Звонарев Е., Черемисов П. Рекомендации при проектировании схем

защиты цепей питания 12 и 24 В для автомобильных приложений // Новости электроники. 2014. №8. С. 12-14.

3. Шанин Д.А., Чикин В.В. Нейросетевой адаптивный контроллер для задачи управления объектом с неизвестной структурой посредством глобальной обратной связи // Инженерный вестник Дона. 2008. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60.

4. Кульченко А.Е. Структурно-алгоритмическая организация автопилота робота-вертолета // Инженерный вестник Дона. 2011. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/330.

5. LM5001-Q1. Automotive Grade 3.1-75V Wide Vin, 1A Current Mode Non-Synchronous Switch Mode Regulator. URL: ti.com/product/lm5001-q1.

6. LM5001x High-Voltage Switch-Mode Regulator. URL: ti.com/lit/ds/symlink/lm5001.pdf.

7. Белов Г.А., Серебрянников А.В., Павлова А.А. К синтезу одноконтурных систем управления понижающими импульсными преобразователями // Практическая силовая электроника. 2013. №2(50). С. 26-33.

8. Белов Г.А., Серебрянников А.В., Павлова А.А. Синтез одноконтурной системы управления понижающим импульсным преобразователем // Практическая силовая электроника. 2013. №3(51). С. 9-15.

9. Белов Г.А., Серебрянников А.В. К синтезу одноконтурной системы управления двухтактным импульсным преобразователем // Силовая электроника. 2013. №3. С. 47-52.

10. Белов Г.А., Серебрянников А.В. Синтез одноконтурной системы управления двухтактным импульсным преобразователем // Силовая электроника. 2013. № 4. С. 10-15.

References

1. Gavrikov V. Novosti elektroniki. 2014. №7. pp. 23-29.



2. Zvonarev E., Cheremisov P. Novosti elektroniki. 2014. №8. pp. 12-14.
3. Shanin D.A., Chikin V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2008. №2.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60.
4. Kul'chenko A.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2011. №1. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/330.
5. LM5001-Q1. Automotive Grade 3.1-75V Wide Vin, 1A Current Mode Non-Synchronous Switch Mode Regulator. URL: ti.com/product/lm5001-q1.
6. LM5001x High-Voltage Switch-Mode Regulator. URL: ti.com/lit/ds/symlink/lm5001.pdf.
7. Belov G.A., Serebryannikov A.V., Pavlova A.A. Prakticheskaya silovaya elektronika. 2013. №2 (50). pp. 26-33.
8. Belov G.A., Serebryannikov A.V., Pavlova A.A. Prakticheskaya silovaya elektronika. 2013. №3 (51). pp. 9-15.
9. Belov G.A., Serebryannikov A.V. Silovaya elektronika. 2013. №3. pp. 47-52.
10. Belov G.A., Serebryannikov A.V. Silovaya elektronika. 2013. № 4. pp. 10-15.