

Массовые интегральные таймеры корпораций National Semiconductor и Texas Instruments

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Среди интегральных микросхем-«долгожителей» одно из первых мест занимают аналоговые интегральные таймеры. Первый таймер на биполярных транзисторах — SE555/NE555 — появился еще в 1971 г. и был создан компанией Signetics Corporation [1]. Его схема оказалась настолько удачной, что заменила собой сотни различных схем мультивибраторов и генераторов импульсов микро-, милли- и секундного диапазона [2]. Даже спустя четыре десятилетия эту микросхему в огромных количествах продолжает выпускать ряд крупных и известных фирм. В статье приведен обзор монолитных микросхем массовых современных интегральных таймеров, которые производят крупные американские корпорации Texas Instruments (TI) и National Semiconductor (NS) [3, 4].

Интегральный таймер — что это такое?

Интегральный таймер — это микросхема для построения релаксационных генераторов с емкостным накопителем энергии. Релаксатор — устройство, которое использует сначала заряд накопителя (обычно конденсатора), а затем его разряд с высвобождением (релаксацией) энергии. Релаксатор может быть моностабильным (ждущим) и автоколебательным. В последнем колебания возникают автоматически, без внешнего воздействия.

У релаксатора на интегральном таймере длительность одного полупериода колебаний задается временем заряда времязадающего конденсатора C через зарядный резистор, а длительность второго полупериода — разрядом C через разрядный резистор. Конденсатор вместе с зарядным и разрядным резисторами подключаются к микросхеме как внешние компоненты.

Уже к началу 1980-х годов выпускалось более 20 типов интегральных таймеров. Практически все они дожили до наших дней. Среди них одиночные (NE555, LM322, XR320) и двойные (NE556, XR2256) интегральные таймеры, улучшенные таймеры с уменьшенным потребляемым током и таймеры на основе технологии комплементарных CMOS-транзисторов (ICM7555, ICM7556). Производятся также программируемые таймеры и таймеры со встроенным в них счетчиком импульсов (XR2240, ICM8240, ICM8250, ICM8260 и др.). В СССР был создан аналог микросхемы 555 — таймер 1006ВИ1,

который выпускается до сих пор и широко применяется при построении разнообразных импульсных устройств.

Наследники классики — таймера 555

В настоящее время основными поставщиками микросхем интегральных таймеров являются американские корпорации NS и TI. Они и сейчас выпускают два десятка типов микросхем интегральных таймеров, поставляемых в разных корпусах (рис. 1).

В таблице 1 представлены модели одиночных интегральных таймеров классического типа — полных аналогов таймера 555. Они отличаются точностью изготовления, рабочей частотой, температурным диапазоном, типом корпуса и стоимостью. Особо стоит отметить микросхему SE555-SP: она выпущена в радиационно-стойком исполнении с гарантированным сроком службы. Поэтому ее цена превосходит \$200, тогда как стоимость некоторых обычных микросхем класса 555 составляет всего 10–14 центов.

Кроме этих микросхем TI и NS продолжают выпуск хорошо себя зарекомендовавших таймеров LM555.

Описание интегрального таймера класса 555

На рис. 2 показано обозначение выводов корпуса самой массовой микросхемы таймеров — NA555. Последующее описание относится ко всем таймерам класса 555.

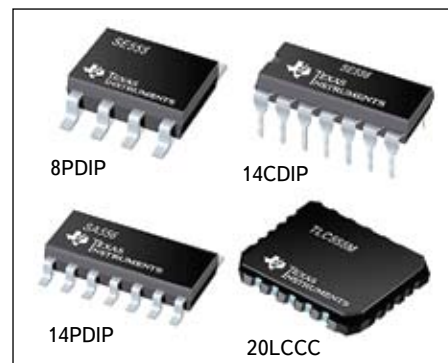


Рис. 1. Интегральные таймеры в разных корпусах

Таблица 1. Интегральные таймеры — полные аналоги микросхемы 555 фирм TI и NS

Тип таймера	Частота, МГц	V_{CC} , В	Температурный диапазон, °С	Цена, \$
NA555	—	4,5–16	–40...+105	0,1
NE555	0,5	4,5–16	0...+70	0,1
SA555	0,5	4,5–16	–40...+85	0,11
SE555	—	4,5–18	–55...+125	0,14
SE555-SP	—	4,5–16,5	–55...+125	205,5
SE555M	—	4,5–18	–55...+125	2,14

Примечание. Цена указана при поставке от 1000 микросхем.

Внутри корпуса находится функциональная диаграмма таймера. Полная принципиальная схема таймера NA555 представлена на рис. 3. Основой таймера является делитель напряжения из трех резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = R$ (номинал — 5 кОм). При интеграль-

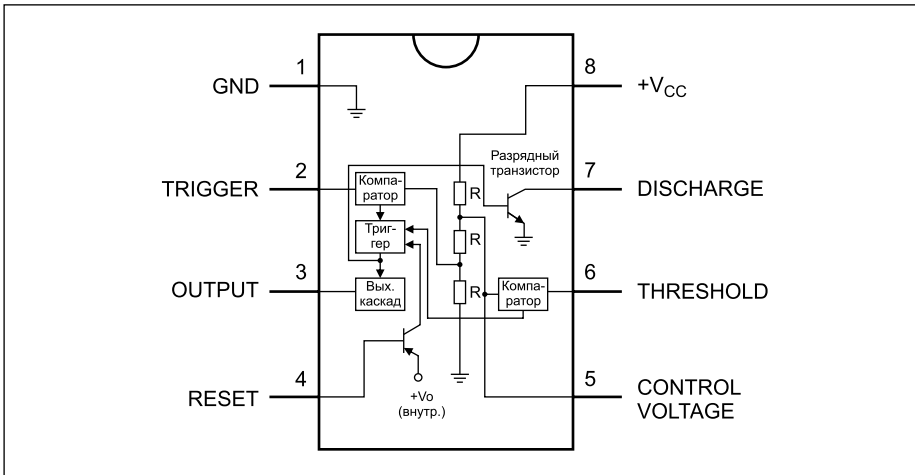


Рис. 2. Интегральный таймер NA555 и обозначение его выводов

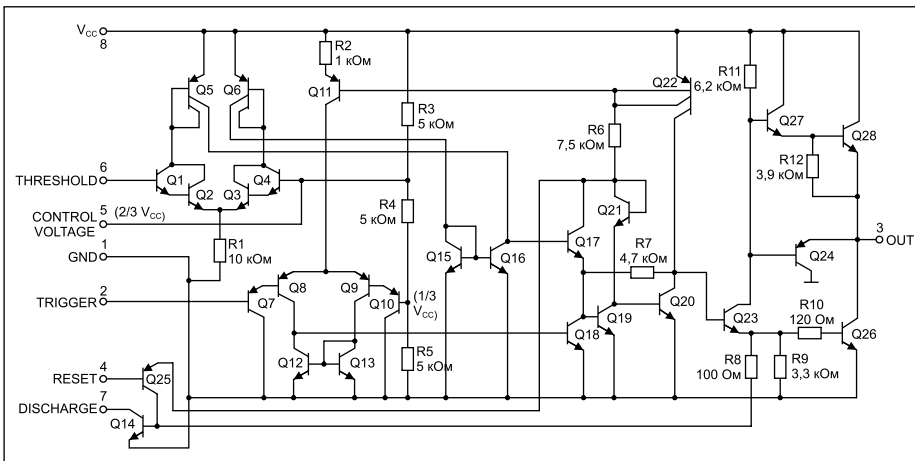


Рис. 3. Полная принципиальная схема таймера NA555

ном исполнении трудно получить стабильные значения сопротивлений резисторов. Однако температурные и иные изменения сопротивления строго коррелированы, и потому коэффициенты деления $1/3$ и $2/3$ у этого делителя стабильны, что и нужно для работы таймера. Вывод CONTROL VOLTAGE позволяет в некоторых пределах менять коэффициенты деления путем подключения внешних резисторов между ним и «землей» или между ним и выводом напряжения источника питания $+V_{CC}(E)$.

В левой части схемы видны два дифференциальных усилителя-компаратора, а в правой части — RS-триггер и выходной каскад. Компараторы таймеров имеют очень малые входные токи, что позволяет использовать внешние времязадающие резисторы с очень широким диапазоном значений их номиналов — от нескольких кОм до 20 МОм. В левом нижнем углу размещены разрядный транзистор и транзистор сброса триггера в исходное состояние.

Интегральные таймеры не претендуют на роль генераторов импульсов малой длительности. Так, таймер NA555 имеет быстродействие в десятки наносекунд, сравнимое

с быстродействием обычных ТТЛ-микросхем. На рис. 4 показана зависимость минимальной длительности запускающего импульса от его минимальной амплитуды. Она отражает инерционность таймера.

Для многих таймеров важна потребляемая от источника питания мощность. Она минимальна при отсутствии нагрузки ($R_L = \infty$). На рис. 5 показаны графики зависимости этой мощности от напряжения питания для таймера NA555, снятые при разной температуре ($-55, +25$ и $+125$ °C). Эти графики почти линейные. Определенную часть этой мощности составляет мощность, рассеиваемая внутренним резистивным делителем.

Ждущий релаксатор на интегральном таймере

Основная схема ждущего (моностабильного) генератора релаксационного типа показана на рис. 6. Генератор формирует цикл колебаний при подаче на вход TRIGGER запускающего импульса.

Прежде чем описывать процессы в ней, вспомним, как происходит заряд конденсатора C через резистор R от источника постоян-

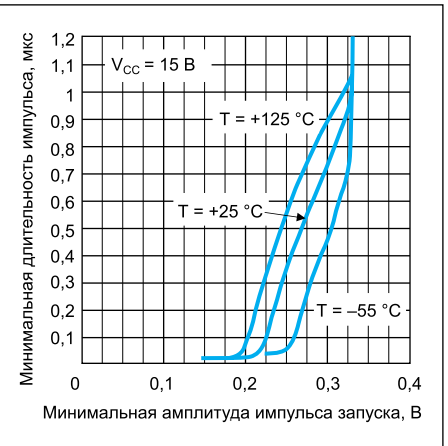


Рис. 4. Зависимость минимальной длительности запускающего импульса от его минимальной амплитуды

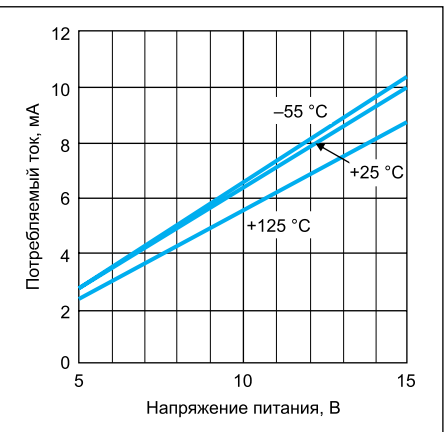


Рис. 5. Зависимость тока, потребляемого от источника питания, от его напряжения

ного напряжения E . Из курса теоретических основ электротехники или радиотехники известно, что напряжение на конденсаторе растет по экспоненциальному закону:

$$u_C(t) = u_C(0) - [u_C(\infty) - u_C(0)] \exp(-t/RC), \quad (1)$$

где $u_C(0)$ — начальное напряжение на C , начиная с которого происходит заряд и накопление

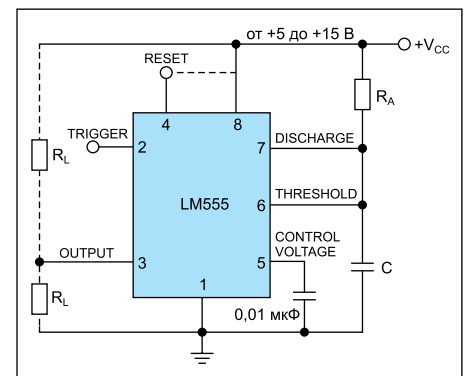


Рис. 6. Типовая схема ждущего (моностабильного) генератора (релаксатора) на интегральном таймере

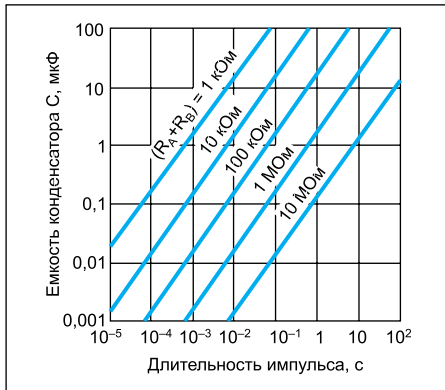


Рис. 7. Зависимость емкости конденсатора C от длительности импульсов ждущего генератора с рис. 6 при разных резисторах ($R_A + R_B$)

энергии в конденсаторе; $u_C(\infty)$ — предельное (при $t \rightarrow \infty$) напряжение (оно равно E).

Если в некоторый момент $t = t_H$ напряжение на конденсаторе C достигает уровня $u(t_H)$, то из (1) нетрудно найти:

$$t_H = RC \ln \left[\frac{u_C(\infty) - u_C(0)}{u_C(\infty) - u_C(t_H)} \right]. \quad (2)$$

Из (2) вытекает, что при стабильной постоянной времени RC процесс заряда C очень не стабилен и зависит от начального и конечного значения напряжения на конденсаторе. С учетом этого в таймере реализованы три основных метода стабилизации длительности импульсов:

- Мостовой принцип построения.
- Выбор начального и конечного значения напряжения конденсатора, которое должно быть пропорционально напряжению питания E (или V_{CC}).
- Применение во внешней RC -цепочке высокостабильных R и C . (Обычно они рассматриваются как внешние цепи таймера, и их нестабильность не учитывается.)

Вернемся к схеме ждущего генератора (в ней $R = R_A$). В ее исходном стабильном состоянии триггер поддерживает разрядный транзистор в открытом и насыщенном состоянии, при этом начальное напряжение на конденсаторе $u_C(0)$ очень мало — единицы-десятки мВ. Им можно пренебречь и считать $u_C(0) = 0$. При подаче запускающего импульса на вход TRIGGER напряжение на нем падает ниже $E/3$, срабатывает верхний компаратор, и триггер таймера перебрасывается в новое квазистабильное состояние, при котором разрядный транзистор закрыт и его коллекторный ток $I_{к0}$ оказывается пренебрежимо малым (кроме случая работы при максимальной температуре окружающей среды). Тогда $u_C(\infty) = E$ и происходит заряд конденсатора C . Когда он достигнет уровня $u_C(t_H) = 2E/3$, срабатывает второй компаратор, триггер возвращается в исходное положение, и конденсатор C разряжается. Таким образом, длительность импульса равна:

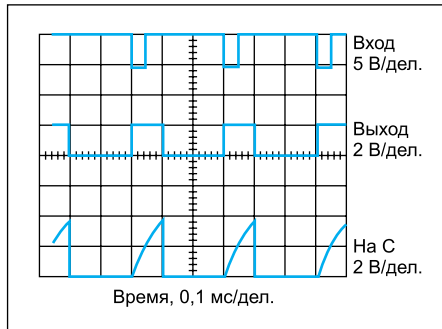


Рис. 8. Временные диаграммы работы ждущего генератора с рис. 6

$$t_H = RC \ln \left[\frac{E}{E - 2E/3} \right] = RC \ln(3) \approx 1,1RC. \quad (3)$$

Время разряда конденсатора задается током $I_{коткр}$ открытого разрядного транзистора в активном режиме его работы и равно:

$$t_p = \frac{2CE}{3I_{коткр}}. \quad (4)$$

Разряд C при этом происходит практически по линейному закону. При больших значениях C (мкФ) есть опасность перегрева разрядного транзистора. Поэтому часто между выводами разряда DISCHARGE и порога THRESHOLD включают разрядный резистор R_B , и транзистор при разряде C переводится в режим насыщения. Ток разряда при этом спадает по экспоненциальному закону, и

$$t_p \approx 3R_B C, \quad (5)$$

где t_p — время разряда.

Зависимость емкости конденсатора C от длительности импульсов ждущего генератора с рис. 6 при разных резисторах ($R_A + R_B$) показана на рис. 7. Следует выбирать конденсаторы с высокой стабильностью емкости и использовать известные средства температурной компенсации постоянных времени таймера.

Временные диаграммы работы ждущего генератора с рис. 6 показаны на рис. 8. Они полностью соответствуют сделанному выше описанию. Подобная идеализированная форма диаграмм наблюдается при длительности импульсов более ≈ 1 мкс.

Автоколебательный релаксатор на интегральном таймере

Типовая схема автоколебательного генератора (релаксатора) на интегральном таймере показана на рис. 9. Колебания в генераторе возникают автоматически и продолжаются при отсутствии внешнего воздействия.

Цикл работы состоит из двух стадий — заряда конденсатора C от уровня напряжения $E/3$ до $2E/3$ ($E = V_{CC}$) через резисторы R_A и R_B ,

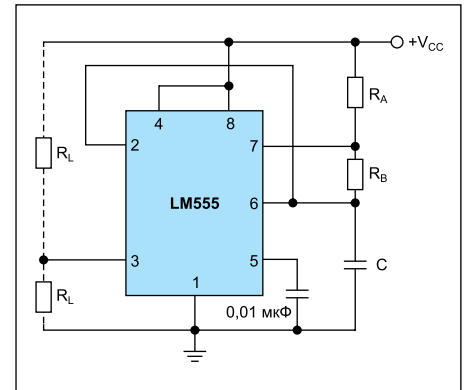


Рис. 9. Типовая схема автоколебательного генератора (релаксатора) на интегральном таймере

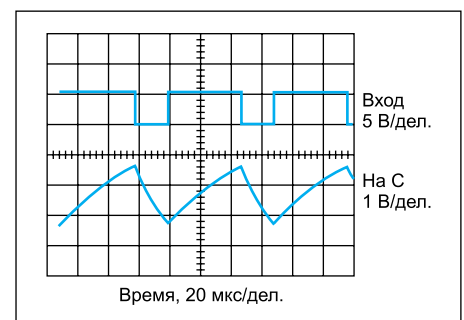


Рис. 10. Временные диаграммы работы автоколебательного генератора с рис. 9

а затем (после срабатывания верхнего компаратора и триггера) разряда C от напряжения $2E/3$ до $E/3$ через резистор R_B . Временные диаграммы работы генератора показаны на рис. 10.

Длительность стадий заряда и разряда равна:

$$t_1 = (R_A + R_B)C \ln(2) = 0,693(R_A + R_B)C, \quad (6)$$

$$t_2 = R_B C \ln(2) = 0,693R_B C. \quad (7)$$

Период колебаний и частота равны:

$$T = t_1 + t_2 = 0,693(R_A + 2R_B)C. \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C}. \quad (9)$$

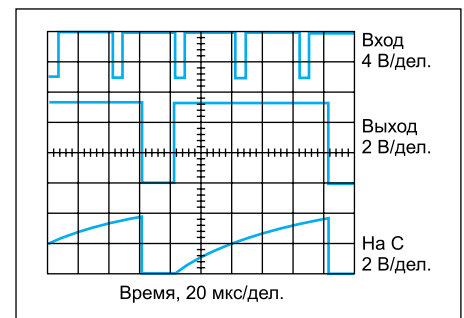


Рис. 11. Временные диаграммы работы автоколебательного генератора в режиме деления частоты на 3

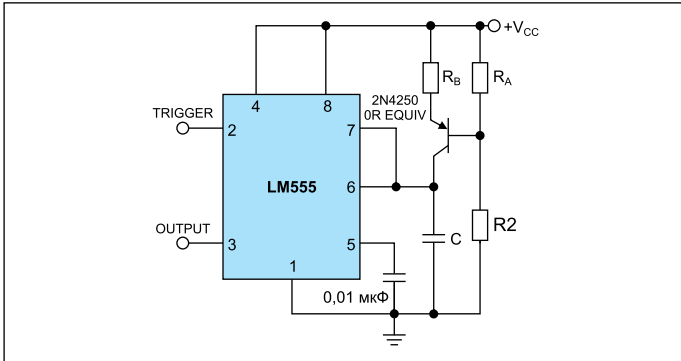


Рис. 12. Схема генератора пилообразного напряжения со стабилизатором зарядного тока на биполярном транзисторе

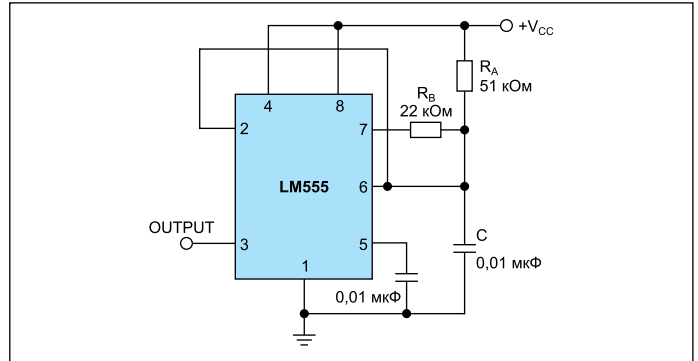


Рис. 14. Генератор, формирующий импульсы со скважностью, равной двум

При подаче на вход TRIGGER импульсов можно осуществить их деление частоты. Пример этого дан на рис. 11. Поскольку частота генерации интегрального таймера отличается высокой стабильностью, можно получить достаточно большое значение коэффициента деления частоты (но обычно не более 10).

Типовые схемы на интегральных таймерах класса 555

На интегральных таймерах построено огромное число электронных схем. Пожалуй, по их разнообразию таймеры не уступают операционным усилителям. Нередко новая схема получается в результате добавления в типовую схему одного или нескольких компонентов. Например, для построения ждущего генератора пилообразного напряжения достаточно заменить зарядный резистор стабилизатором тока на биполярном транзисторе (рис. 12).

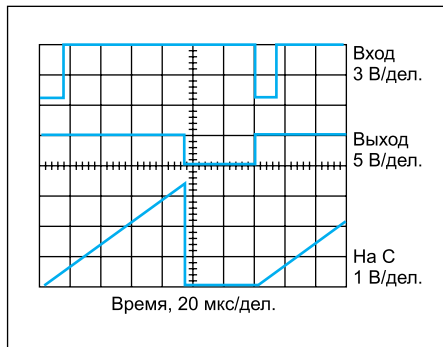


Рис. 13. Временные диаграммы работы генератора пилообразного напряжения с рис. 12

с одинаковыми значениями времени заряда и разряда конденсатора. На рис. 14 показана одна из простых схем автоколебательного генератора, генерирующего такие импульсы. Нужная скважность достигается соответствующим выбором резисторов.

Прецизионный интегральный таймер NA555

При производстве некоторых таймеров особое внимание уделяется гарантированной стабильности их параметров. Такие таймеры называют прецизионными. К ним относится таймер NA555. Он выпускается в разном исполнении (рис. 15).

При производстве некоторых таймеров особое внимание уделяется гарантированной стабильности их параметров. Такие таймеры называют прецизионными. К ним относится таймер NA555. Он выпускается в разном исполнении (рис. 15). Функциональная диаграмма микросхемы NA555 показана на рис. 16. Зависимость тока, потребляемого от источника электропитания, от напряжения этого источника представлена на рис. 17 при трех значениях температуры окружающей среды. Эти графики зависимости практически линейные.

Для прецизионных таймеров обычно нормируется зависимость относительной длительности импульсов от напряжения источника питания и температуры. Эти графики представлены на рис. 18. Из этих данных следует, что нестабильность временных параме-

стор стабилизатором тока на биполярном транзисторе (рис. 12).

Временные диаграммы работы генератора пилообразного напряжения представлены на рис. 13. Естественно, что высокую линейность можно получить только при работе на высокоомную нагрузку в сотни кОм. Если сопротивление нагрузки недостаточно велико, можно добавить в схему эмиттерный повторитель на биполярном транзисторе или повторитель на операционном усилителе.

Иногда желательна генерация импульсов со скважностью, близкой к двум, то есть

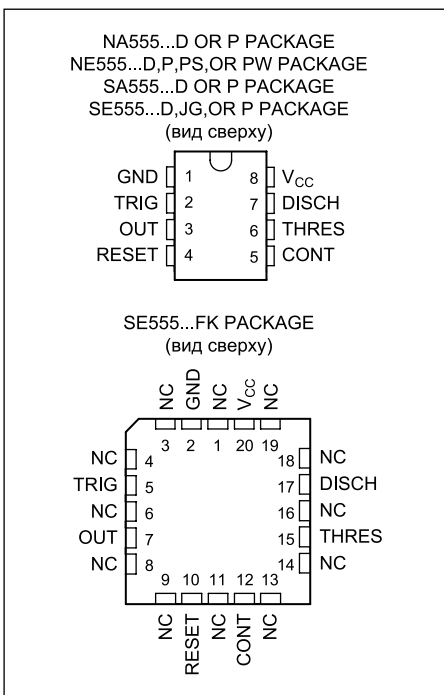


Рис. 15. Назначение выводов микросхем серии 555 в разных корпусах

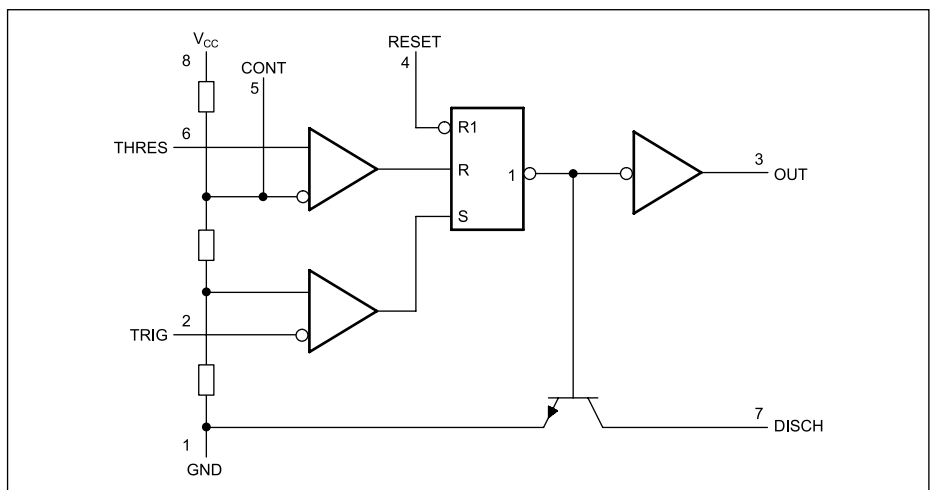


Рис. 16. Функциональная диаграмма прецизионного интегрального таймера серии NA555

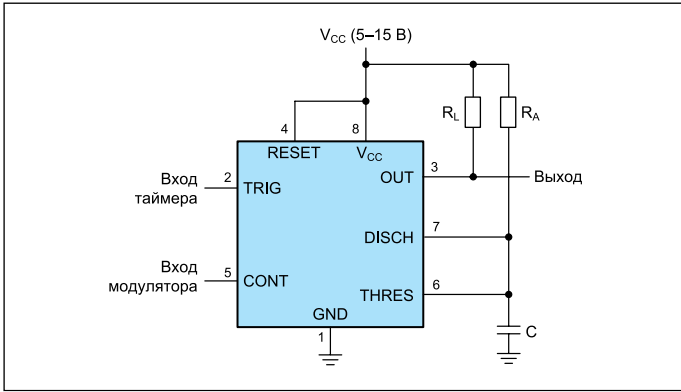


Рис. 23. Широтно-импульсный модулятор на интегральном таймере

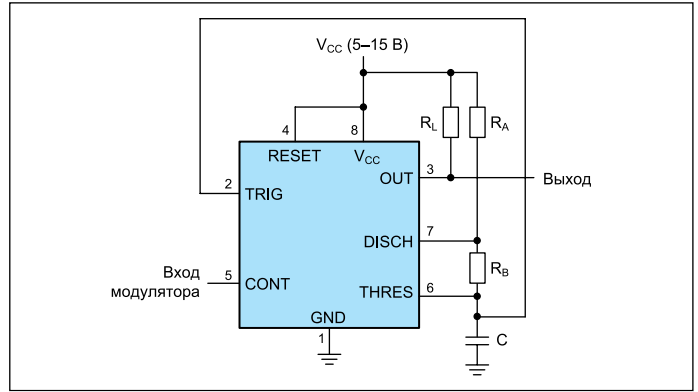


Рис. 25. Позиционно-импульсный модулятор на интегральном таймере

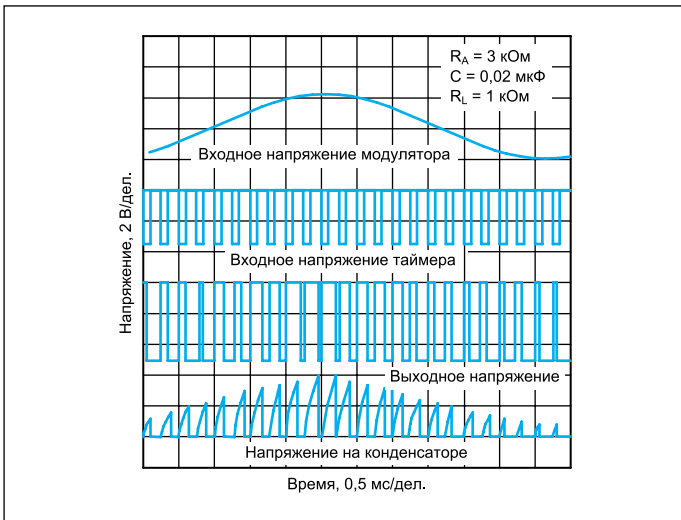


Рис. 24. Временные диаграммы работы широтно-импульсного регулятора на интегральном таймере

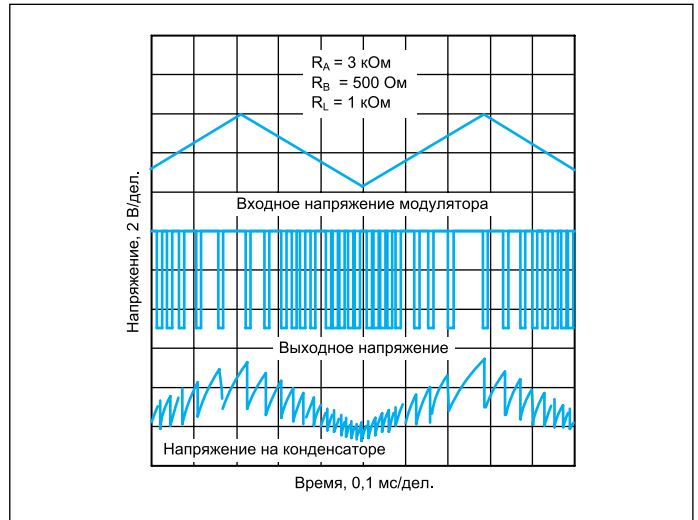


Рис. 26. Временные диаграммы работы позиционно-импульсного модулятора на интегральном таймере

работы такого генератора показаны на рис. 22. В особых комментариях они не нуждаются.

Широтно- и позиционно-импульсные модуляторы

Различное применение находят модуляторы импульсных сигналов. Например, широтно-импульсные и позиционно-импульсные модуляторы нужны для управления силовыми

ключами в импульсных источниках электропитания. Такие модуляторы легко построить на интегральных таймерах.

На рис. 23 показано применение интегрального таймера в качестве широтно-импульсного модулятора. Временные диаграммы его работы представлены на рис. 24. Модулирующий сигнал подается на вывод CONT.

Столь же просто реализуется построение на интегральном таймере позиционно-

импульсного модулятора (рис. 25). Его работу поясняют временные диаграммы, показанные на рис. 26.

Генераторы импульсных последовательностей

Дешевизна многих микросхем интегральных таймеров позволяет строить на них генераторы последовательностей разных

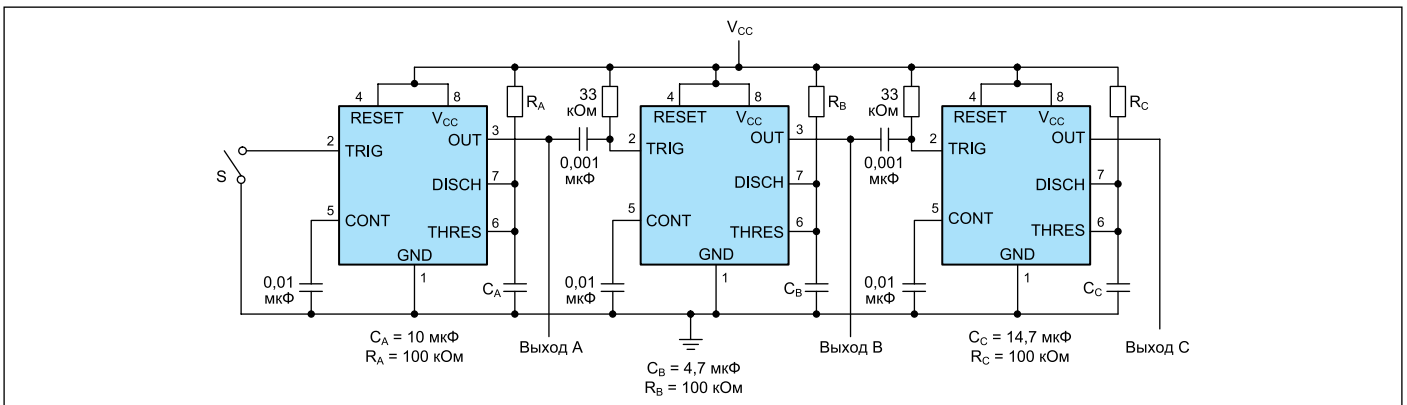


Рис. 27. Генератор последовательности из трех импульсов на трех интегральных таймерах

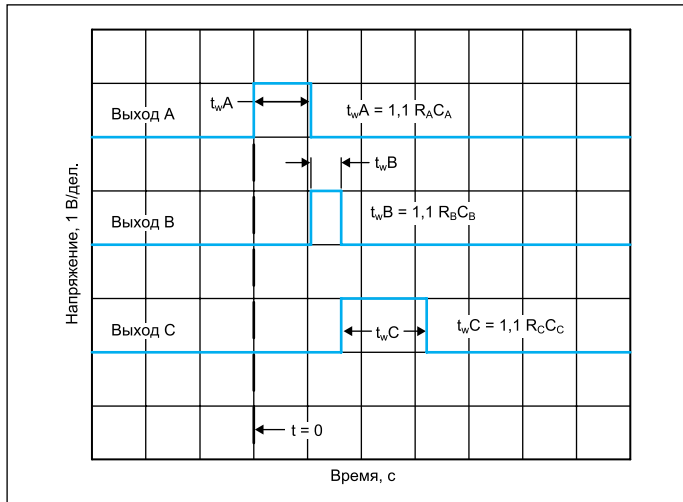


Рис. 28. Временные диаграммы работы генератора последовательности из трех импульсов

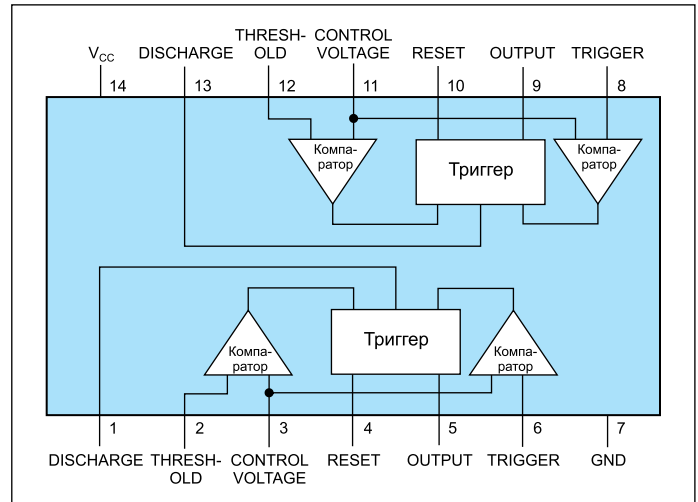


Рис. 29. Функциональная диаграмма двойного интегрального таймера

по длительности импульсов, просто соединив последовательно несколько ждущих релаксаторов (рис. 27). При этом каждый импульс может иметь свою установленную или регулируемую длительность.

Временная диаграмма работы генератора последовательностей импульсов показана на рис. 28.

Сдвоенные интегральные таймеры класса 556

Фирмы TI и NS выпускают также ряд двойных таймеров, что упрощает построение сложных импульсных устройств, например генераторов последовательностей импульсов. В таблице 2 представлены параметры микросхем двойных таймеров. Первым таким таймером была микросхема 556.

Таблица 2. Основные параметры микросхем двойных интегральных таймеров на биполярных транзисторах

Тип таймера	Частота, МГц	V _{CC} , В	Температурный диапазон, °С	Цена, \$
NA556	—	4,5–16	–40...+105	0,27
NE556	0,5	4,5–16	0...+70	0,18
SA556	0,5	4,5–16	–40...+85	0,22
SE556	—	4,5–18	–55...+125	2,14

Выпускается также таймер LM556. На рис. 29 показана функциональная диаграмма двойного интегрального таймера. Каждая половина такого таймера идентична одиночному таймеру. Сдвоенные таймеры обычно выполняются в 14-выводных корпусах (рис. 30).

Характеристики двойных интегральных таймеров и типовые схемы их применения не приводятся, поскольку они аналогичны таковым для одиночных таймеров.

Одиночные интегральные таймеры на CMOS-транзисторах

Второе поколение интегральных таймеров основано на технологии схем на компле-

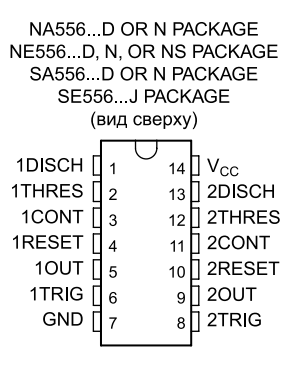


Рис. 30. Назначение выводов в 14-выводном корпусе двойных таймеров

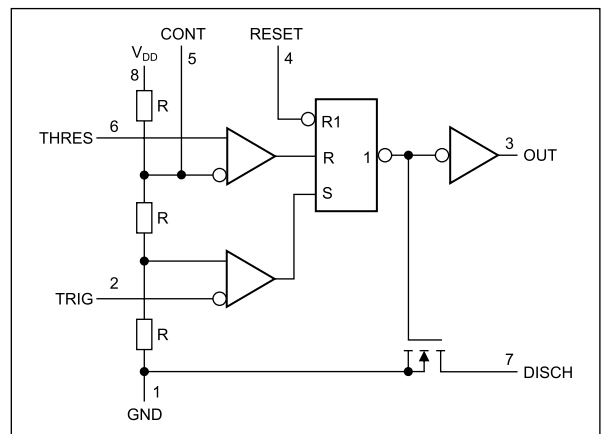


Рис. 31. Функциональная диаграмма таймера LMC555 на CMOS-транзисторах

ментарных полевых CMOS-транзисторах. Эта технология проще технологии схем на биполярных транзисторах и имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам относятся более высокая скорость работы, отсутствие насыщения у разрядного транзистора и работа в более широком диапазоне напряжений. Недостатком является больший разброс пороговых напряжений у компараторов (табл. 3).

На рис. 31 приведена функциональная диаграмма одиночного таймера на CMOS-

транзисторах. Она имеет разрядный CMOS-транзистор и этим отличается от функцио-

Таблица 3. Основные параметры одиночных таймеров на CMOS-транзисторах, выпускаемых фирмами TI и NS

Тип таймера	Частота, МГц	V _{CC} , В	Температурный диапазон, °С	Цена, \$
LMC555	3,08	1,5–12	–40...+86	—
TLC551	1,8	1–15	0...+70	0,6
TLC555	2,1	2–15	–40...+125	0,29
TLC555-Q1	—	5–15	–40...+125	0,34
TLC555M	—	5–15	–55...+125	2,14

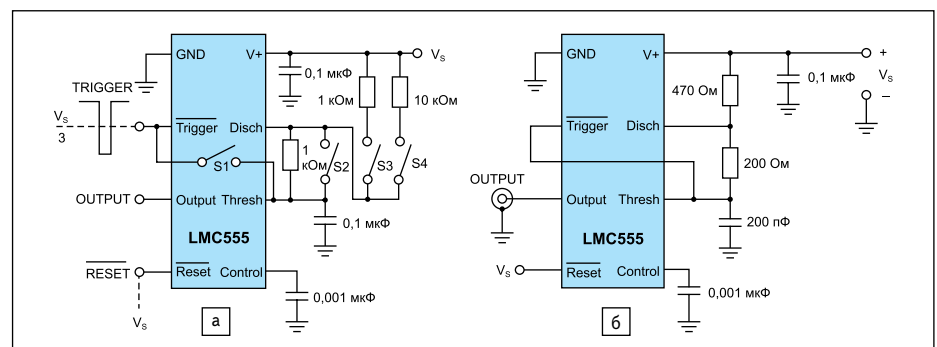


Рис. 32. Схемы тестирования таймеров LMC555: а) общего характера; б) на быстродействие

нальной диаграммы таймера на биполярных транзисторах (рис. 16). Однако следует помнить, что все остальные узлы таймера также построены на CMOS-транзисторах. При напряжении питания 5 В таймер потребляет мощность при отсутствии нагрузки менее 1 мВт. При этом он совместим с логическими CMOS- и ТТЛ-микросхемами, имеет максимальную частоту работы до 3 МГц и тестируется в диапазоне выходных токов от -10 до +50 мА при максимально допустимом токе 100 мА.

На рис. 32 представлены рекомендуемые для тестирования таймеров схемы. Они построены на основе обычных ждущего и автоколебательного релаксаторов.

Схемы на CMOS интегральных таймерах

Схема ждущего релаксатора на таймере LMC555 показана на рис. 33а. В принципе она ничем не отличается от схемы ждущего релаксатора на таймере серии 555, построенном на биполярных транзисторах. Оба варианта схем полностью совместимы. То же можно сказать о схеме автоколебательного релаксатора, показанной на рис. 33б.

Практически все схемы, описанные выше для таймеров на биполярных транзисторах, без какой-либо коррекции можно применять с таймером LMC555. Однако при глубоком анализе схем на интегральных таймерах следует учитывать разные параметры биполярных и полевых транзисторов.

Новейшие LinCMOS-таймеры TLC551 и TLC555

Новейшие интегральные таймеры корпорации TI — TLC551 и TLC555 — изготовлены по LinCMOS-технологии. На рис. 34 приведена полная принципиальная схема таймера TLC551. Интересно, что фирма отказалась от обычного резистивного делителя в пользу делителя, построенного на CMOS-транзисторах: он виден в левой части схемы. Это позволило существенно уменьшить потребляемую при отсутствии нагрузки мощность от источника питания и довести ее до значения 1 мВт. Компараторы, триггер и выходной усилитель — все они построены на CMOS-транзисторах.

Компания TI приводит и рисунок топологии таймера TLC551 (рис. 35). Большая часть поверхности кристалла занята защитными и согласующими резисторами: на рис. 34 они вынесены за пределы основной схемы.

Отметим основные особенности таймера TLC551:

- Очень малая (1 мВт при напряжении питания 5 В) потребляемая мощность при отсутствии нагрузки.
- Большой выходной ток: 100 мА втекающий и 10 мА вытекающий.

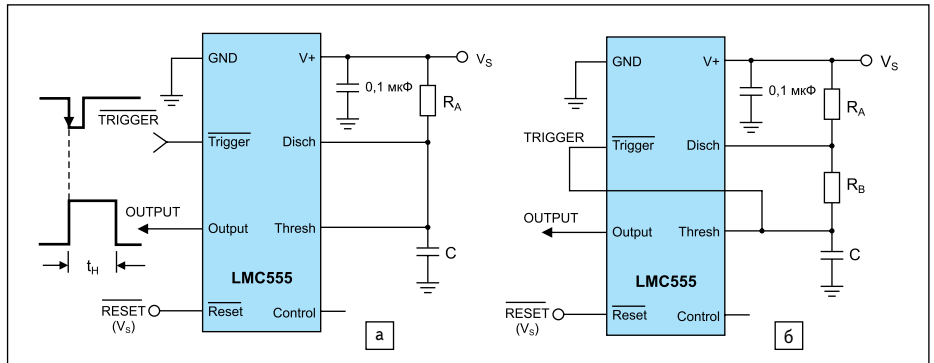


Рис. 33. Схемы релаксационных генераторов на таймере LMC555

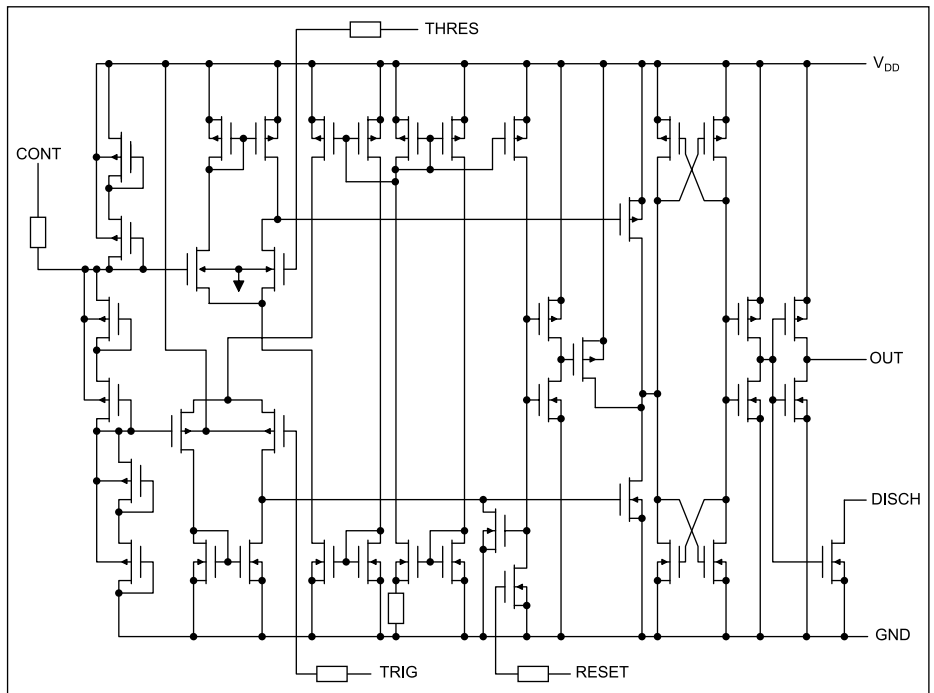


Рис. 34. Полная принципиальная схема интегрального LinCMOS-таймера TLC551

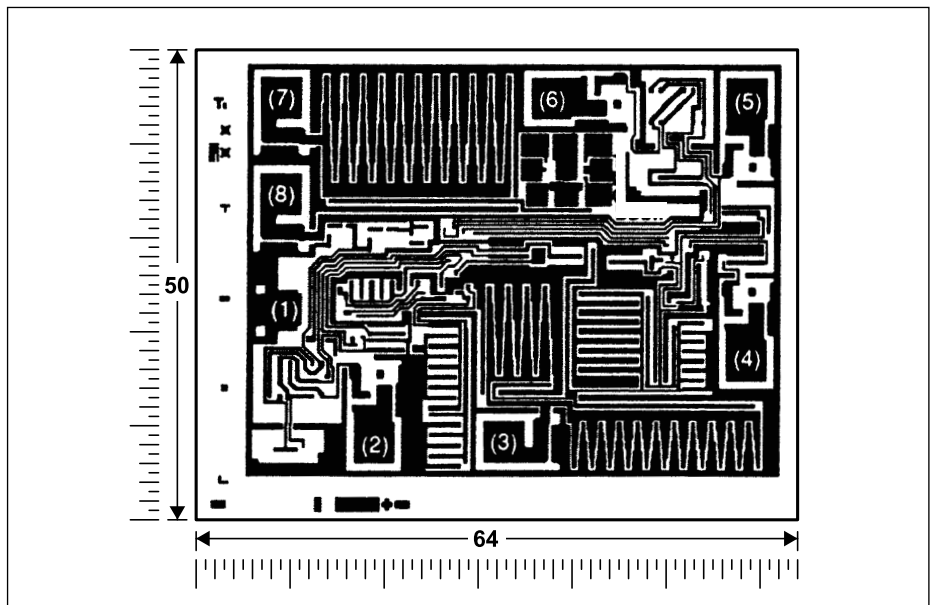


Рис. 35. Топология микросхемы LinCMOS-таймера TLC551

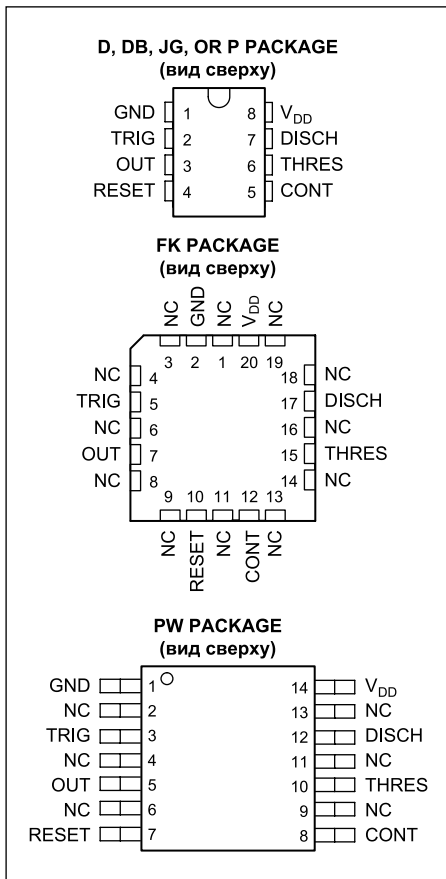


Рис. 36. Обозначение выводов интегрального таймера TLC555

- Совместимость выхода с TTL-, CMOS- и MOS-микросхемами.
 - Уникально широкий диапазон напряжения питания: от 1 до 15 В.
 - Полная совместимость с другими таймерами серии 555.
- Микросхема TLC555 подобна TLC551, но рассчитана на более широкий температурный диапазон. Суффикс в названии микросхемы означает:

- С — от 0 до +70 °С;
- I — от -40 до +85 °С;
- Q — от -40 до +125 °С;
- M — от -55 до +125 °С.

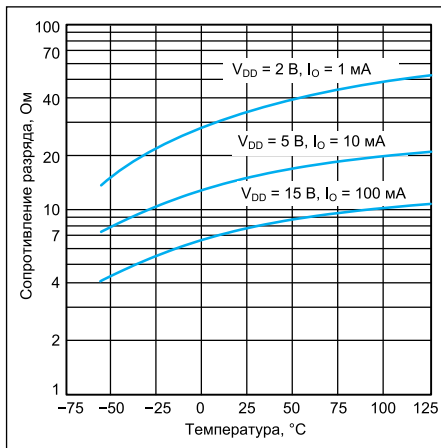


Рис. 37. Зависимость сопротивления разрядной цепи таймера TLC555 от температуры при разных значениях V_{DD} и I_O

На рис. 36 показано обозначение выводов этой микросхемы при различном ее исполнении. Зависимость сопротивления разрядной цепи TLC555 от температуры при разных значениях V_{DD} и I_O показана на рис. 37.

В остальном характеристики микросхемы и примеры ее применения подобны описанному ранее.

Двойные таймеры на CMOS-транзисторах

В таблице 4 приведены основные параметры двойных таймеров на CMOS-транзисторах, которые выпускает фирма TI.

Назначение выводов корпусов микросхем TLC556 представлено на рис. 38.

Параметры каждого из двух таймеров этих микросхем подобны приведенным для одиночных таймеров.

Заключение

Интегральные таймеры остаются одними из самых массовых и широко применяемых микросхем [3–5]. Их усовершенствованием и серийным производством заняты

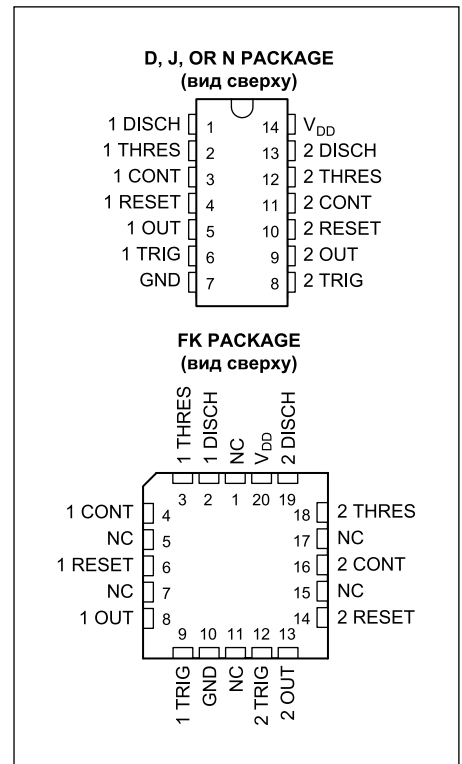


Рис. 38. Назначение выводов корпусов микросхем TLC556

Таблица 4. Основные параметры двойных таймеров на CMOS-транзисторах, выпускаемых фирмой TI

Тип таймера	Частота, МГц	V_{CC} , В	Температурный диапазон, °С	Цена, \$
TLC552	2,8	1–18	0...+70	1
TLC556	2,1	2–15	0...+70	0,44
TLC556M	2,1	2–15	-55...+125	0,6

такие крупные и всемирно известные фирмы, как TI и NS. Новое поколение интегральных таймеров, выполненных на основе технологии CMOS-транзисторов, обладает беспрецедентно широким диапазоном напряжения питания, очень малой (до 1 мВт) потребляемой мощностью при отсутствии нагрузки, большими выходными токами, допускающими подключение миниатюрных реле или микродвигателей, высокой скоростью работы и широким температурным диапазоном. Все это делает таймеры по-прежнему незаменимыми и очень популярными изделиями мировой микроэлектронной промышленности. ■

Литература

1. Дьяконов В. П. Интегральные таймеры и их применение в импульсных устройствах // Зарубежная электроника. 1978. № 6.
2. Коломбет Е. А. Таймеры. М.: Радио и связь, 1983.
3. www.ti.com
4. www.national.com
5. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2011.