

DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ SILENT SWITCHER®2 КОМПАНИИ ANALOG DEVICES

В статье приведена краткая информация об основных параметрах понижающих преобразователей, изготовленных по технологии Silent Switcher 2, отличающихся низким уровнем электромагнитных помех. Приведены результаты моделирования этих преобразователей в программе LTspice.

В. Макаренко

Один из реальных способов уменьшения сложности проектирования и ускорения разработки источников питания заключается в использовании готовых модульных решений или использовании ИМС, объединяющих множество дискретных компонентов. Такой подход обеспечивает целый ряд важных преимуществ – сокращаются сроки разработки устройств и уменьшаются их габариты.

Значительным шагом на пути миниатюризации стало увеличение частоты коммутации ключей импульсных преобразователей. Рост частоты привел к существенному снижению индуктивности и габаритов катушек преобразователей и фильтров. Однако использование более высоких частот переключения ключей часто приводит к проблемам с электромагнитной совместимостью (ЭМС). При разработке модулей питания проблеме ЭМС приходится уделять большое внимание.

Большинство производителей модулей питания в настоящее время предлагают семейства модулей и микросхем, что дополнительно упрощает проектирование систем электропитания. Но, как и во всех других областях, не все модули одинаковы. Они отличаются габаритами, КПД, способом и качеством отвода тепла, сложностью их использования.

Компания Analog Devices выпускает целую серию понижающих DC/DC-преобразователей, реализующих технологию Silent Switcher 2 [1]. Отличительной чертой этих преобразователей является очень низкий уровень электромагнитных помех, создаваемых ими при работе. Рассмотрим работу таких преобразователей, параметры которых приведены в табл. 1.

Рассмотрим кратко основные характеристики этих преобразователей.

SILENT SWITCHER®2 DC/DC CONVERTERS FROM ANALOG DEVICES

Abstract – The article provides brief information about the main parameters of step-down converters made using Silent Switcher 2 technology, characterized by a low level of electromagnetic interference. The simulation results of these converters in the LTspice program are presented.

V. Makarenko

LT8648S

Низкое значение ЭМП при размещении на печатной плате любой конструкции. Возможность работы в режиме расширения спектра. Основные параметры преобразователя [2]:

- высокая эффективность на высокой частоте
 - ◆ КПД до 95.5% при частоте коммутации ключей 1 МГц, $U_{вх} = 12$ В, $U_{вых} = 5$ В
 - ◆ КПД до 93% при частоте коммутации ключей 2 МГц, $U_{вх} = 12$ В, $U_{вых} = 5$ В
- широкий диапазон входного напряжения от 3 до 42 В
- максимальный выходной ток 15 А
- пульсации выходного напряжения <10 мВ (от пика до пика)
- малое время переходного процесса
- время включения из спящего режима не более 25 нс
- возможность работы в принудительном непрерывном режиме
- диапазон изменения частоты коммутации ключей (регулируемый и синхронизируемый) от 200 кГц до 2,2 МГц
- формирование сигнала Power Good
- безопасно выдерживает значительный обратный ток
- диапазон рабочих температур
 - ◆ –40...125 °С для ИМС LT8648SEV
 - ◆ –40...150 °С для ИМС LT8648SJV, LT8648SHV
- корпус LQF-36
- габаритны размеры 7×4 мм.

Типовая схема включения LT8648S приведена на рис. 1, а на рис. 2 зависимости КПД и рассеиваемой мощности от тока нагрузки при различных значениях частоты коммутации ключей. С функциональной схемой преобразователя можно ознакомиться в [2].

Таблица 1. Параметры понижающих преобразователей Silent Switcher 2

Тип	Число выходов	Увх.мин., В	Увх.макс., В	Iвых, А	Ток ключа, А	Iпотр., мкА	Корпус
LTC3307A *	1	2.25	5.5	3	3.6	40	LQFN-12, 2x2x0.74 мм
LTC3308A *	1	2.25	5.5	4	6.4	40	LQFN-12, 2x2x0.74 мм
LTC3309A *	1	2.25	5.5	6	7.8	40	LQFN-12, 2x2x0.74 мм
LTC3310S	1	2.25	5.5	10	16	1300	LQFN-18, 3x3x0.94 мм
LT8609S	1	3	42	2	4.75	1.7	DFN -10, 3x3 мм
LT8640S	1	3.4	42	6	10	1.7	DFN -8, 2x2 мм
LT8640S-2	1	3.4	42	6	10	1.7	LQFN-24, 4x4x0.94 мм
LT8642S	1	2.8	18	10	18	230	LQFN-24, 4x4x0.94 мм
LT8643S	1	3.4	42	6	10	1.7	LQFN-24, 4x4x0.94 мм
LT8643S-2	1	3.4	42	6	10	1.7	LQFN-24, 4x4x0.94 мм
LT8645S	1	3.4	65	8	14	1.7	LQFN-32, 6x4x0.94 мм
LT8646S	1	3.4	65	8	14	17	LQFN-32, 6x4x0.94 мм
LT8648S *	1	3	42	15	30	320	LQFN-36, 7x4x0.94 мм
LT8650S	2	3	42	4	8,5	3.7	LQFN-32, 6x4x0.94 мм
LT8650S-1	2	3	42	4	8,5	3.7	LQFN-32, 6x4x0.94 мм
LT8652S *	2	3	18	8.5	28.5	210	LS8, 4x7x1.45 мм
LTC7150S	1	3.1	20	20	24	2000	BGA-42, 6x5x1.3 мм
LTC7151S	1	3.1	20	15	18	2000	LQFN-28, 4x5x0.74 мм

* Преобразователи, которые были освоены в производстве в четвертом квартале 2019 г.

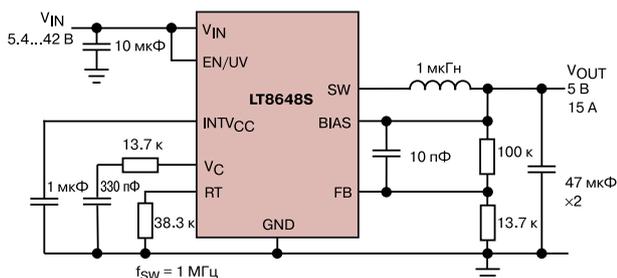


Рис. 1. Типовая схема включения преобразователя LT8648S

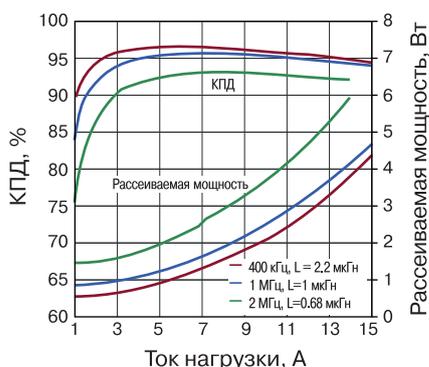


Рис. 2. Зависимости КПД и рассеиваемой мощности LT8648S от тока нагрузки при различных значениях частоты коммутации ключей

Проверить работу этого преобразователя можно с помощью моделирования в программе LTspice компании Analog Devices [3-7]. На рис. 3 приведена модель для исследования преобразователя LT8648S.

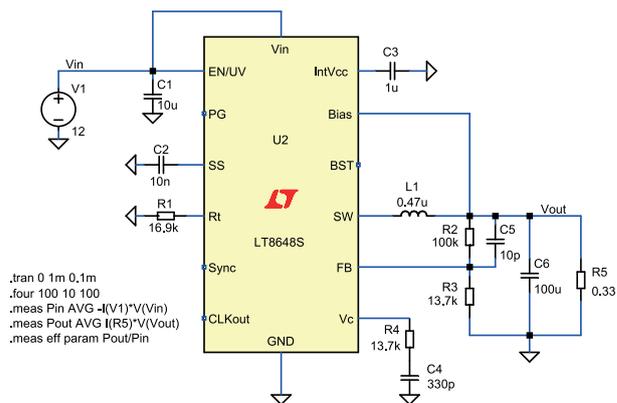


Рис. 3. Модель для исследования преобразователя LT8648S

Модель позволяет контролировать форму токов и напряжений в различных точках схемы, измерять спектр и рассчитывать КПД.

Директива `.tran 0 1m 0.1m` задает время анализа 1 мс и начало фиксации результатов моделиро-

вания через 0.1 мс после начала работы. Длительность переходного процесса для LT8648S составляет примерно 70 мкс при выходном напряжении 5 В, токе нагрузки 15 А и входном напряжении 12 В.

Для анализа спектрального состава тока источника входного напряжения и оценки КПД преобразователя необходимо:

- начать регистрацию результатов моделирования после завершения переходного процесса
- добавить директиву анализа спектрального состава исследуемых сигналов
- добавить директиву для измерения КПД преобразователя.

Набор директив для указанных типов анализа имеет вид:

- **.four 100 10 100**
- **.meas Pin AVG -I(V1)*V(Vin)**
- **.meas Pout AVG I(R3)*V(Vout)**
- **.meas eff param Pout/Pin**

Преобразование Фурье осуществляется с разрешающей способностью 100 Гц (первая цифра в директиве **.four**).

Для расчета КПД вычисляется мощность, отбираемая от источника входного напряжения, с помощью директивы **.meas Pin AVG -I(V1)*V(Vin)** и мощность, рассеиваемая на сопротивлении нагрузки, с помощью директивы **.meas Pout AVG I(R3)*V(Vout)**. КПД рассчитывается как отношение выходной мощности к мощности, потребляемой от источника входного напряжения, с помощью директивы **.meas eff param Pout/Pin**.

Временные диаграммы тока источника входного напряжения и напряжения на нагрузке приведены на рис. 4.

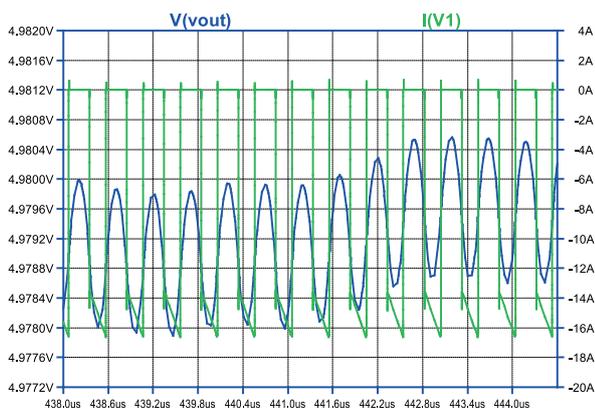


Рис. 4. Временные диаграммы тока источника входного напряжения (зеленая кривая) и напряжения на нагрузке преобразователя на ИМС LT8648S

Как следует из рис. 4, амплитуда пульсаций выходного напряжения не превышает 10 мВ (от пика до пика). Спектры выходного напряжения преобразователя и тока источника входного напряжения приведены на рис. 5 и 6, соответственно.

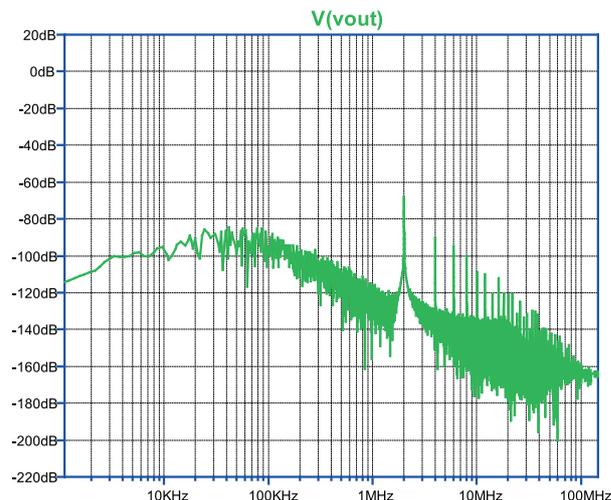


Рис. 5. Спектр выходного напряжения преобразователя на ИМС LT8648S

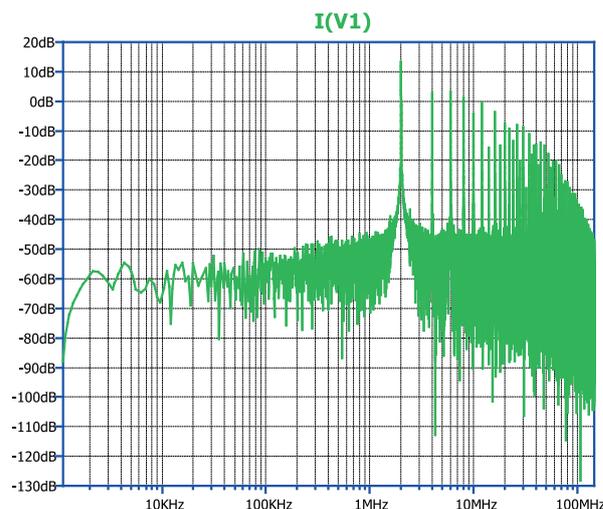


Рис. 6. Спектр тока источника входного напряжения преобразователя на ИМС LT8648S

Коэффициент полезного действия, рассчитанный программой можно прочесть, открыв пункт меню Spice Error Log (рис. 7).

Фрагмент файла Spice Error Log приведен ниже.
pin: AVG(-i(v1)*v(vin))=78.9441 FROM 0 TO 0.0009
pout: AVG(i(r5)*v(vout))=75.1396 FROM 0 TO 0.0009
eff: pout/pin=0.951808

Полученный при моделировании КПД равен 95.18%, а в datasheet (рис. 2) при частоте коммутации силовых ключей 2 МГц КПД составляет пример-

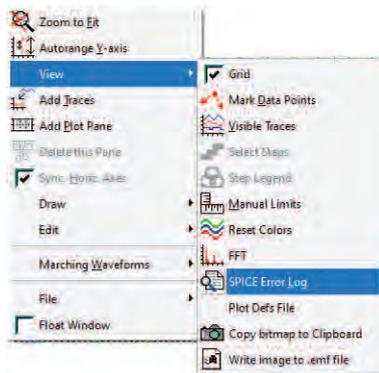


Рис. 7. Выбор пункта меню Spice Error Log

но 92%. Т.е. результаты моделирования показывают более высокий КПД и это нужно учитывать при оценке параметров преобразователя.

В [2] для уменьшения уровня помех рекомендуется использовать фильтр нижних частот, включенный между источником питания и входом преобразователя, как показано на рис. 8. В результате применения фильтра КПД уменьшился незначительно, до 95%, характер спектра выходного напряжения практически не изменился (рис. 9), а спектр тока потребляемого от источника питания существенно изменился (рис. 10). Уровень спектральной составляющей с максимальной амплитудой с 15 дБ уменьшился до -32 дБ. Изменился и характер спектра. Уровень составляющей с частотой коммутации ключей 2 МГц снизился до -85 дБ.

ИМС LTC8648S может работать в трех различных режимах, устанавливаемых изменением напряжения на входе MODE/SYNC:

1. Режим пропуска импульсов. На вывод MODE/SYNC необходимо подать напряжение, величина которого превышает напряжение на выводе

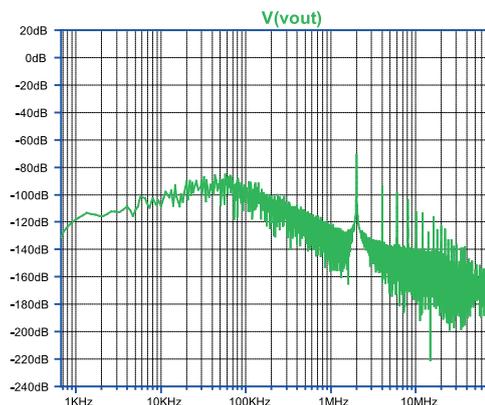


Рис. 9. Спектр напряжения на нагрузке при использовании ФНЧ в преобразователе на ИМС LT8648S

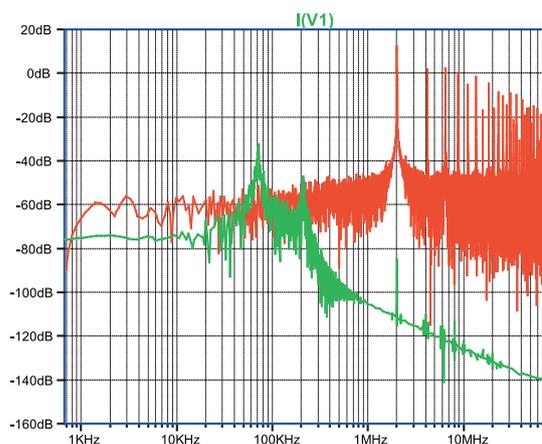


Рис. 10. Спектр тока, потребляемого от источника питания при использовании ФНЧ (зеленый) и без ФНЧ (красный) в преобразователе на ИМС LT8648S

обратной связи FB на величину не менее 7.7% от UFB.

2. Принудительный непрерывный режим. Вывод MODE/SYNC не подключен (плавающий потенциал).

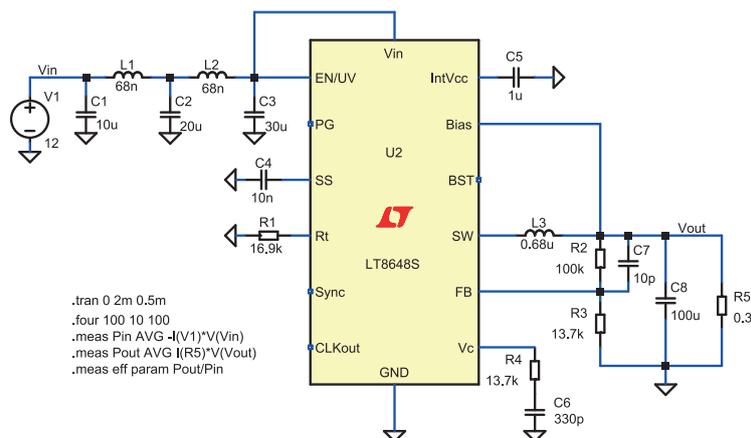


Рис. 8. Схема включения преобразователя LT8648S с дополнительным фильтром нижних частот

3. Прерывистый режим (Burst Mode). Вывод MODE/SYNC подключен к общему проводу или к выходу логической ИМС с низким напряжением логического нуля (не более 0.7 В).

В режиме пропуска импульсов генератор работает непрерывно, а для регулирования выходного напряжения некоторые импульсы управления силовыми ключами пропускаются. В этом режиме обратный ток через катушку индуктивности не протекает.

В принудительном непрерывном режиме (FCM – Forced Continuous Mode) генератор работает непрерывно. Верхний транзисторный ключ открывается при поступлении каждого импульса от генератора, а регулировка выходного напряжения осуществляется реверсом направления протекания тока через катушку при малых токах в нагрузке. В этом режиме обеспечивается минимальный уровень пульсаций выходного напряжения.

В преобразователе LT8648S в принудительном непрерывном режиме сокращается время переходного процесса при скачкообразном изменении нагрузки. На рис. 11 проиллюстрирована эффективность использования режима FCM.

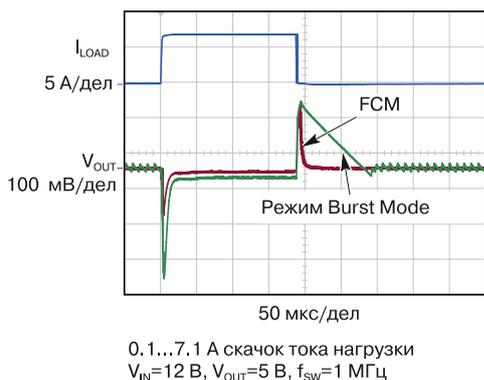


Рис. 11. Временные диаграммы выходного напряжения при скачкообразном изменении нагрузки в преобразователе на ИМС LT8648S

В режиме Burst Mode при малых токах нагрузки выходной конденсатор заряжается до напряжения немного выше требуемого. Затем преобразователь переходит в состояние сна, а выходной конденсатор обеспечивает необходимый ток в нагрузке.

Когда выходное напряжение падает ниже заданного значения, преобразователь включается и опять начинается заряд конденсатора пакетом импульсов (рис. 12). Длительность интервала сна уменьшается с увеличением тока нагрузки.

При значительном увеличении тока нагрузки преобразователь переходит в режим непрерывной

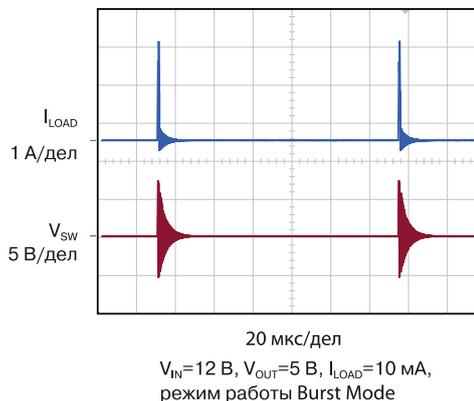


Рис. 12. Временные диаграммы сигналов при малых токах нагрузки в режиме Burst Mode преобразователя на ИМС LT8648S

работы с регулировкой выходного напряжения с помощью ШИМ-модуляции.

Преобразователь LT8648S может работать в режиме внешней синхронизации, сигнал которой подается на вход MODE/SYNC. Длительность импульсов сигнала внешней синхронизации должна быть не менее 50 нс и период следования не менее 100 нс.

Для уменьшения уровня ЭМП предусмотрен режим расширения спектра (Spread Spectrum Mode) сигнала управления силовыми ключами преобразователя. Чтобы включить режим Spread Spectrum вывод SYNC/MODE нужно соединить с выводом INTVCC. В этом режиме сигнал управления модулируется по частоте треугольным сигналом 3 кГц. К сожалению, в модели, приведенной на рис. 3 режим Spread Spectrum не поддерживается.

Выходное напряжение устанавливается делителем напряжения R2 и R3 (рис. 3), подключенным к выводу обратной связи FB. Сопротивление резисторов можно рассчитать по формуле

$$R_2 = R_3[(V_{OUT}/0.6 \text{ В}) - 1].$$

Если сопротивление резистора R2 больше 20 кОм, то параллельно резистору следует подключать конденсатор емкостью 4.7...47 пФ. Рекомендуется сопротивления резисторов выбирать из ряда E192 с точностью 0.1%.

Частота коммутации силовых ключей задается внутренним генератором, построенном на основе системы ФАПЧ, и может изменяться в диапазоне от 200 кГц до 2.2 МГц. Частота сигнала на выходе генератора определяется сопротивлением резистора, подключенного к выводу RT (резистор R1 на рис. 3),

величину которого можно рассчитать по формуле

$$R_T = (44.8/f_{sw}) - 5.9,$$

где R_T задается в кОм, f_{sw} – в МГц в диапазоне от 0.2 до 2.2 МГц.

Для уменьшения влияния входной емкости цепи обратной связи на длительность переходного процесса, параллельно резистору R2 (рис. 8) включается дополнительный корректирующий конденсатор C7. Значение емкости этого конденсатора может находиться в диапазоне 1...22 пФ и определяется экспериментально либо путем моделирования. Значения емкости для типовых случаев применения LTC8648A можно найти в [2].

При выборе катушки индуктивности следует учитывать среднеквадратическое значение выходного тока, номинальное значение тока насыщения и сопротивление катушки. Индуктивность катушки можно рассчитать по формулам

$$L \geq \frac{V_{OUT}}{Kf_{sw}} \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN,max}} \right) \quad \text{для } V_{OUT}/V_{IN,max} \leq 0.5 \quad (1)$$

и

$$L \geq \frac{0.25V_{IN,max}}{Kf_{sw}} \quad \text{для } V_{OUT}/V_{IN,max} \geq 0.5, \quad (2)$$

где $K = 1.2 \text{ A}$, f_{sw} – подставляется в Гц.

Например, для выходного напряжения 1.2 В при максимальном значении входного напряжении 5.5 В значение индуктивности, рассчитанное по формуле (1) составит 0.39 мкГн.

Катушку следует выбирать так, чтобы ток насыщения катушки (обычно обозначается I_{SAT}) был больше чем сумма максимального ожидаемого тока нагрузки и половины амплитудного значения тока пульсаций ΔI_L , протекающего через катушку. Ток через катушку можно рассчитать по формуле

$$I_{L(PEAK)} = I_{LOAD(MAX)} + 0.5\Delta I_L.$$

Ток пульсаций можно рассчитать по формуле

$$\Delta I_L \geq \frac{V_{OUT}}{Lf_{sw}} \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MAX)}} \right).$$

Многие из ИМС преобразователей позволяют соединять их параллельно для увеличения выходного тока. Например, на рис. 13 приведена функциональная схема соединения двух ИМС LT8648S, позволяющая сформировать выходной ток 30 А.

Более подробно с параметрами преобразовате-

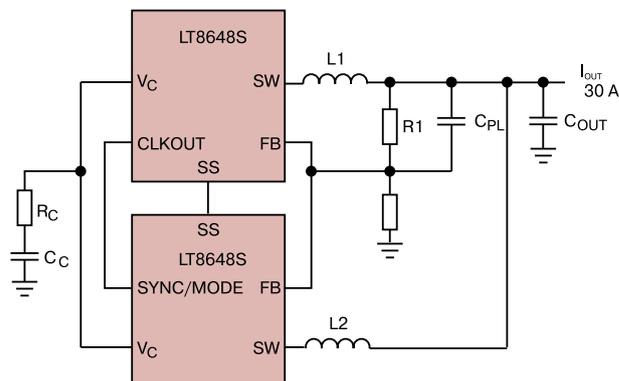


Рис. 13. Функциональная схема соединения двух ИМС LT8648S параллельно

лей, схемами их включения и рекомендациями по расчету параметров элементов можно найти в [1] и на сайте компании Analog Devices.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11001#/>
2. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LT8648S.pdf>
3. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
4. В. Макаренко Программа моделирования электронных схем LTspice от Linear Technology, часть 1/ Электронные компоненты и системы, №4(220), 2017. с. 46-56. Url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2017_4/V.Makarenko_The_software_for_modeling_electronic_circuits_LTspice_part_1_EKIS_4_2017.pdf
5. В. Макаренко Программа моделирования электронных схем LTspice от Linear Technology, часть 2/ Электронные компоненты и системы, №1(221), 2018/ с. 36-47. Url: [http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_1/EKIS_1\(221\)_2018s.pdf](http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_1/EKIS_1(221)_2018s.pdf)
6. В. Макаренко Программа моделирования электронных схем LTspice, часть 3 / Электронные компоненты и системы, №2(222), 2018/ с. 52-62. Url: [http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_2/Makarenko_V._The_software_for_modeling_electronic_circuits_LTspice_part_3_EKIS_2\(222\)_2018.pdf](http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_2/Makarenko_V._The_software_for_modeling_electronic_circuits_LTspice_part_3_EKIS_2(222)_2018.pdf)
7. В. Макаренко Программа моделирования электронных схем LTspice, часть 4 / Электронные компоненты и системы, №3(223), 2018. с. 52-62. Url: [http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_3/Makrenko_V.V._LTspice_part4_EKIS_3\(223\)_2018.pdf](http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2018_3/Makrenko_V.V._LTspice_part4_EKIS_3(223)_2018.pdf)