

Влияние напряжения

на емкость керамических конденсаторов

В статье исследуется зависимость емкости керамических конденсаторов от приложенного напряжения, поскольку этот параметр имеет важное значение, но часто упускается из виду при проектировании электронных устройств. Особое внимание уделено конденсаторам с диэлектриками X7R, X5R и X8M. Выявлено, что снижение емкости обусловлено нелинейным изменением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов (например, титаната бария) вследствие ориентации доменов в электрическом поле, приводящей к насыщению поляризации.

Экспериментально подтверждено, что типоразмер корпуса оказывает существенное влияние на стабильность характеристик: в миниатюрных конденсаторах (0201, 0402) емкость может падать до 10% от номинала при рабочем напряжении. Кроме того, установлено, что конденсаторы с более высоким номинальным напряжением имеют худшую вольт-фарадную характеристику по сравнению с аналогами меньшего номинала в том же типоразмере.

Для задач, где критична стабильность емкости, предложено рассмотреть материал COG (NPO), который обеспечивает высокую стабильность, но обладает меньшей удельной емкостью и значительно превосходит по стоимости конденсаторы X7R. В статье приведены рекомендации по выбору компонентов с оптимальным балансом между стабильностью параметров, габаритами и стоимостью.

Александр Емельянов¹Ярослав Скитский¹Николай Веретенников¹

Введение

Керамические чип-конденсаторы используют при проектировании любого электронного устройства. Разработчики таких устройств постоянно сталкиваются с необходимостью выбора типоразмера, материала конденсатора и его емкости. Зачастую этот выбор происходит неосознанно — на основе прошлого опыта или уверенности в том, что конденсатор выполнит свою задачу.

В результате устанавливаются компоненты с неоптимальным типоразмером или неподходящим мате-

риалом, что может серьезно повлиять на работоспособность изделия в жестких условиях эксплуатации уже вне стен центра разработки.

Особую критичность эта проблема приобретает в современных компактных устройствах, где широко применяются малые типоразмеры (0201, 0402). В таких случаях даже незначительные отклонения параметров могут привести к сбоям в работе.

В статье авторы анализируют вольт-фарадную характеристику — важный параметр, на который чаще всего забывают обратить внимание.

Так как же типоразмер и материал влияют на стабильность емкости конденсатора?

Ответ на этот вопрос поможет избежать многих распространенных ошибок при выборе керамических конденсаторов.

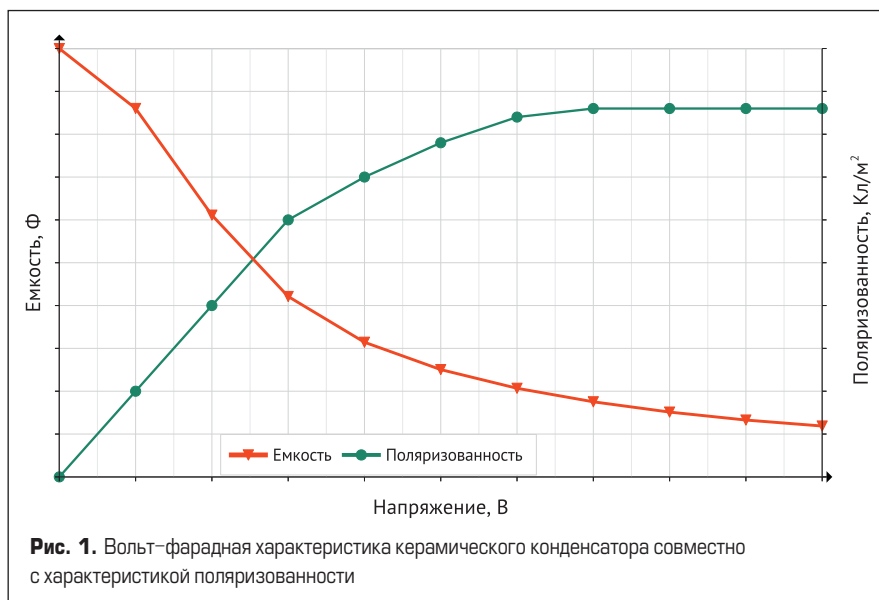
Часть I. Причины снижения емкости конденсатора

Основная причина нестабильности емкости керамического конденсатора кроется в параметре диэлектрической проницаемости диэлектрика, расположенного между обкладками. Емкость связана напрямую с проницаемостью следующим выражением (рис. 1):

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где: C — емкость; ϵ — диэлектрическая проницаемость; S — площадь обкладок; d — расстояние между обкладками.

Диэлектрическая проницаемость — нелинейный параметр, уменьшение которого приводит к сниже-



нию емкости конденсатора. Эта величина напрямую связана с диэлектрической восприимчивостью — способностью диэлектрика поляризоваться под действием электрического поля:

$$\epsilon_c = \epsilon - 1,$$

где ϵ_c — диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая восприимчивость падает с ростом поля при максимальной поляризованности — физической величине, характеризующей степень поляризации диэлектрика. Когда поляризованность диэлектрика достигает насыщения с ростом напряженности внешнего поля, снижается его восприимчивость и, как следствие, диэлектрическая проницаемость, что ведет к уменьшению емкости конденсатора:

$$P = \epsilon_c \times \epsilon_0 \times E,$$

где: $P = const$ — поляризованность; E — напряженность внешнего поля. Именно этот процесс объясняет наблюдаемую вольт-фарадную характеристику для керамических конденсаторов с диэлектриком X7R и подобных материалов, чья емкость существенно снижается с ростом приложенного напряжения. Вольт-фарадная характеристика керамического конденсатора совместно с характеристикой поляризованности приведены на рис. 1.

Дополнительно возникает логичный вопрос: почему поляризованность становится максимальной и падает восприимчивость? Возьмем в качестве примера материал X7R. В его основе лежит титанат бария, кристаллическая решетка которого содержит участки спонтанной поляризации, называемые доменами.

Под действием внешнего электрического поля ориентация доменов перестраивается, что приводит к изменению общей поляризованности материала [1], как показано на рис. 2.

При достижении максимальной поляризованности все домены выстраиваются вдоль направления внешнего поля и больше не могут вносить вклад в изменение поляризации. В результате восприимчивость материала падает, а вместе с ней уменьшаются диэлектрическая проницаемость и емкость конденсатора.

Таким образом, емкость керамического конденсатора напрямую зависит от того, как изменяется диэлектрическая проницаемость диэлектрика под воздействием внешних условий, в частности, приложенного напряжения.

Зная напряжение на конденсаторе и ток, протекающий через него, можно вычислить импеданс на определенной частоте. Емкость конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c},$$

где: C — емкость конденсатора, Ф; f — частота, Гц; X_c — импеданс на частоте f Ом.

Прикладывая к конденсатору различные напряжения смещения с помощью источника И1, можно измерить изменение емкости от приложенного напряжения. Сопротивление резистора R1 выбирали значительно больше, чем импеданс конденсатора на частоте анализа, чтобы минимизировать влияние внутреннего сопротивления источника питания на результаты измерений.

$$R \gg X_c.$$

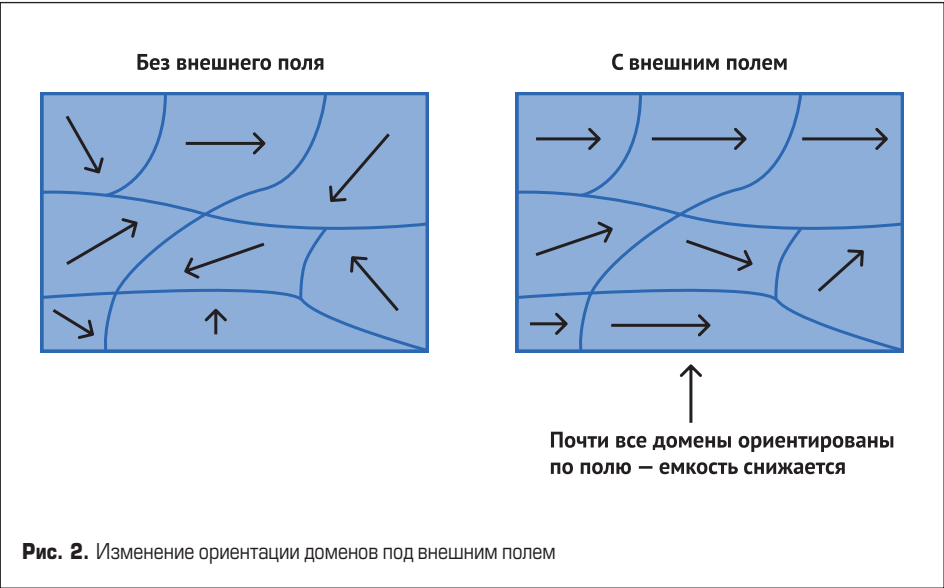


Рис. 2. Изменение ориентации доменов под внешним полем

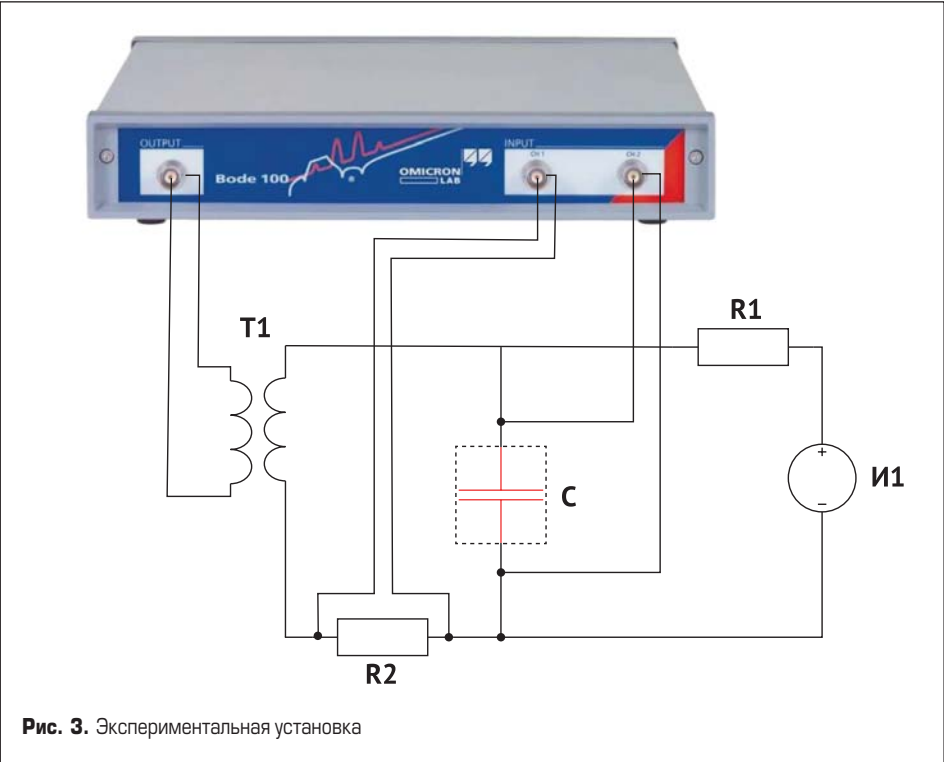


Рис. 3. Экспериментальная установка

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование:

- внешний источник питания на 50 В;
- векторный анализатор цепей Bode 100;
- специальная экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3, а характеристики приведены в таблице 1.

В основе измерения вольт-фарадной характеристики лежит импедансный метод анализа:

Таблица 1. Характеристики компонентов схемы

Элемент схемы	Номинал	Назначение
T1	B-WIT100 (1:1)	Развязка цепи генератора
R1	2,2 кОм	Развязка источника напряжения по импедансу
R2	10 Ом	Измерение тока
И1	0–50 В	Источник напряжения смещения
C	В соответствии с экспериментом	Исследуемый конденсатор

Часть II. Влияние типоразмера на снижение емкости

Емкость керамического конденсатора зависит от его типоразмера следующим образом: чем больше типоразмер конденсатора, тем меньше изменяется емкость при увеличении приложенного напряжения.

Для экспериментальной проверки этого утверждения были измерены характеристики пяти конденсаторов с номинальной емкостью 100 нФ, изготовленных с диэлектриком X7R, номинальным напряжением 50 В, но различающихся типоразмером. Результаты измерений представлены на рис. 4.

Результаты измерений показали значительные различия в стабильности емкости. На максимальном рабочем напряжении у конденсатора типоразмера 1206 сохранилось 65% первоначальной емкости, тогда как у типоразмера 0201 осталось лишь 10% от номинального значения.

Причиной подобных отличий становятся различные напряженности электрического поля в конденсаторах разного типоразмера. В малогабаритных конденсаторах напряженность поля выше, чем в крупных типоразмерах, что приводит к более раннему достижению состояния максимальной поляризованности материала.

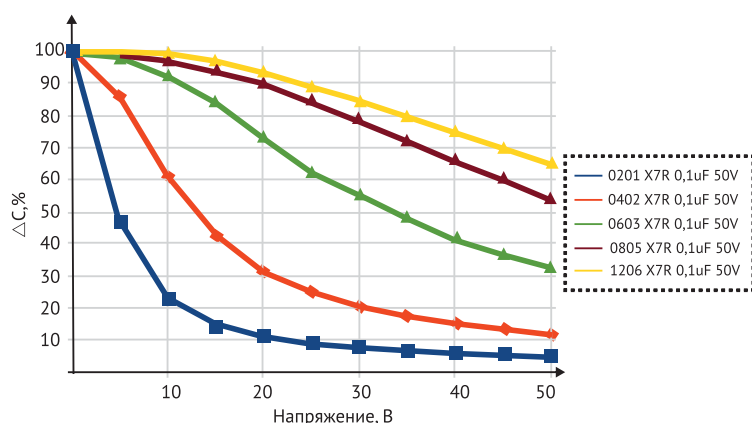


Рис. 4. Зависимость емкости от напряжения и типоразмера

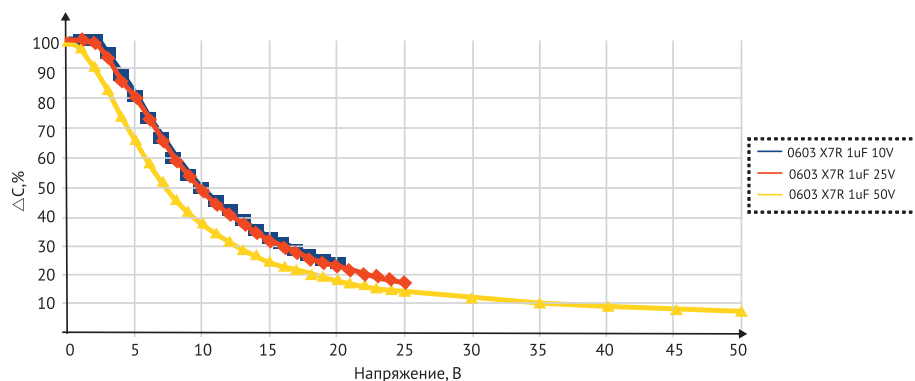


Рис. 5. Сравнение вольт-фарадных характеристик конденсаторов с разными максимальными напряжениями

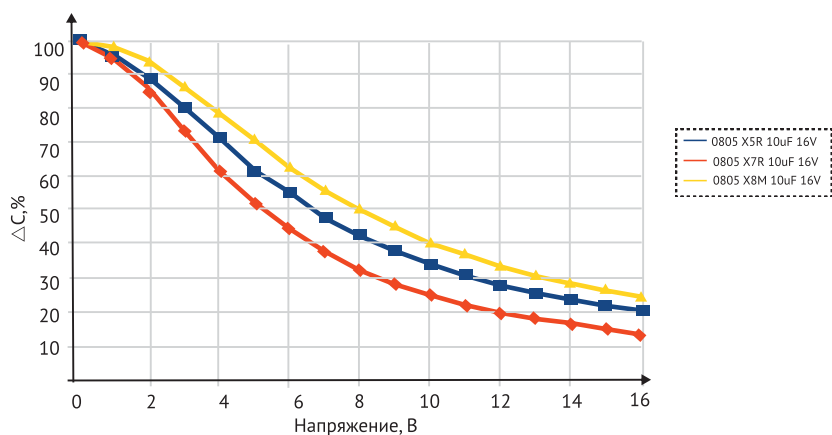


Рис. 6. Сравнение материалов X7R, X5R, X8M

В результате этого процесса емкость малогабаритных конденсаторов снижается значительно быстрее по мере увеличения приложенного напряжения.

Часть III. Влияние максимального напряжения конденсатора на снижения емкости

Интуитивно может показаться, что конденсаторы одного типоразмера, но с разным номинальным напряжением будут демонстрировать лучшую вольт-фарадную характеристику у компонента с более высоким рабочим напряжением.

Проверим, насколько это предположение соответствует реальным характеристикам керамических конденсаторов.

Для эксперимента были взяты три конденсатора с диэлектриком X7R в одинаковом типоразмере 0603, но с разными номинальными напряжениями: 10, 25 и 50 В. Результаты измерений приведены на рис. 5.

Результаты измерений выявили обратную зависимость: чем выше номинальное напряжение конденсатора, тем хуже его вольт-фарадная характеристика. Так, емкость конденсатора на 50 В падает значительно быстрее по мере увеличения приложенного напряжения, чем у аналогичного компонента на 10 В (рис. 5).

Это означает, что, если рабочее напряжение в схеме гарантированно не превысит допустимые пределы, нет необходимости использовать конденсатор с избыточным запасом по напряжению.

Такой выбор приведет к более быстрому снижению емкости при рабочих напряжениях и увеличению стоимости компонента без соответствующих преимуществ в стабильности характеристик.

Часть IV. Влияние материала диэлектрика на снижение емкости

До этого момента мы рассматривали характеристики конденсаторов с диэлектриком X7R — дешевым и популярным в промышленности материалом. Существуют его различные модификации, имеющие разную степень стабильности, например:

- X5R — предназначенный для низкотемпературного диапазона;
- X8M — высокотемпературный конденсатор.

Все эти материалы демонстрируют аналогичную закономерность падения емкости при увеличении приложенного напряжения. Результаты сравнения материалов X7R, X5R, X8M показаны на рис. 6.

Возникает закономерный вопрос: что делать, когда требуется повышенная стабильность емкости конденсатора?

В качестве решения этой задачи можно рассмотреть материал C0G/NP0, который обеспечивает высокую стабильность емкости при изменении напряжения. На рис. 7 представлена вольт-фарадная характеристика конденсатора с этим типом диэлектрика.

Материал C0G (NP0) имеет меньшую диэлектрическую проницаемость по сравнению с X7R, поэтому конденсаторы на его основе обладают более низкой удельной емкостью.

Однако данный материал не образует доменных структур [2], что обеспечивает минимальное изменение параметров диэлектрика под воздействием приложенного электрического поля.

Следует отметить, что такая высокая стабильность достигается значительно более высокой стоимостью по сравнению с аналогичными конденсаторами на основе X7R. Например, при сравнении двух конденсаторов одинакового типоразмера и емкости с диэлектриками X7R и C0G разница в цене может превышать 10 раз (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение стоимости конденсаторов с материалом C0G и X7R на сайте LCSC.com в расчете покупки от 3000 штук

X7R 0402 1 нФ 50В	C0G 0402 1 нФ 50В
0,0032\$	0,0482\$

Поэтому конденсаторы C0G рекомендуется применять только в ответственных цепях, где критична стабильность емкости, например, в частотозадающих каскадах и стабильных фильтрах.

Материал X7R, напротив, оптимален для большинства инженерных задач благодаря своей доступной стоимости и возможности получения высокой емкости при тех же габаритах. Он оптимален для входных и выходных фильтров источников питания, фильтрации высокочастотных помех при питании микросхем, схем умножителей напряжения и других подобных применений. Для подобных задач X7R — лучший вариант в соотношении цены и качества.

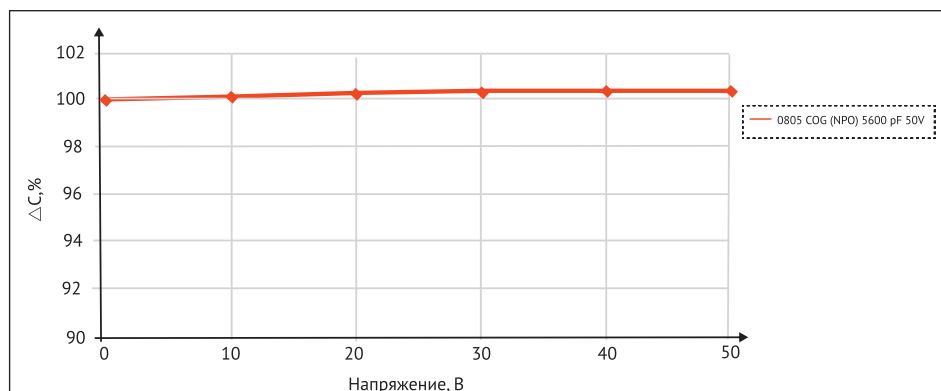


Рис. 7. Вольт-фарадная характеристика конденсатора с диэлектриком C0G NP0

Заключение

Подведем итоги проведенных экспериментов. Дешевые и популярные конденсаторы с диэлектриком X7R демонстрируют значительное падение емкости, особенно в миниатюрных типоразмерах 0201 и 0402. При проектировании устройств, работающих с высокими напряжениями, рекомендуется выбирать типоразмеры 0603 и выше, что позволяет частично компенсировать снижение емкости под нагрузкой.

Номинальное напряжение конденсатора следует подбирать в соответствии с максимальным рабочим напряжением в цепи. Использование компонентов с завышенным номинальным напряжением для компенсации падения емкости не только нецелесообразно, но и может привести к ухудшению характеристик — конденсаторы с более высоким номинальным напряжением демонстрируют худшую вольт-фарадную характеристику по сравнению с аналогами меньшего номинала в том же типоразмере.

Если в схеме требуется абсолютная стабильность емкости, предпочтение следует отдавать конденсаторам с диэлектриком C0G (NP0). Их емкость практически не изменяется при воздействии приложенного напряжения. Однако необходимо учитывать, что стоимость таких компонентов значительно превышает цену аналогичных конденсаторов с материалом X7R, при этом удельная емкость у C0G ниже. Таким образом, применение C0G целесообразно только в ответственных участках схем, где критична стабильность параметров.

Литература

1. www.translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.a14432bb-68b58bc9-0f9d42c2-74722d776562/www.ceramicindustry.com/articles/90304-understanding-dc-bias-characteristics-in-high-capacitance-mlccs/
2. NASA Electronic Parts and Packaging Program Part II: Evaluation of Multilayer Ceramic Capacitors with C0G Dielectric and Base-Metal Electrodes.

Серия EXL промышленных источников питания от DONE



Компания DONE представляет новую серию EXL источников питания, которые обеспечивают 12, 15, 24, 36, 48 В постоянного тока в мощностях 50, 75, 100, 150, 200, 300 Вт с защитой от перенапряжения, перегрузки по току и по мощности, а также короткого замыкания. Конструкция промышленных источников питания этой серии имеет степень защиты IP20 и форм-фактор с расположением входных и выходных клемм на противоположных сторонах продолговатого узкого металлического корпуса высотой 26 мм для моделей до 200 Вт включительно и 30 мм для моделей 300 Вт. При этом ширина корпуса серии составляет 53 мм для моделей до 200 Вт включительно и 60 мм для моделей 300 Вт.

Чтобы предоставить клиентам надежные решения по электропитанию промышленного оборудования, автоматизации, рекламы и вывесок, версия с индексом (В) может обеспечить 200% пиковую мощность в течение 5 с для индуктивных нагрузок, требующих более высокой мощности в момент запуска.

Уровень грозозащиты серии EXL: дифференциальный режим 2 кВ и общий режим грозозащиты 4 кВ. Устройства серии EXL способны ограничить импульсное напряжение до уровня 2 кВ в дифференциальном режиме защиты от перенапряжений, возникающих между проводниками (например, между фазой и нейтралью, фазой и фазой). Источники питания серии EXL выдерживают и ограничивают импульсы до 4 кВ в общем режиме. Такие перенапряжения часто возникают при прямых ударах молнии в землю или близких разрядах.

Серия EXL обеспечивает холодный старт и надежную работу в диапазоне рабочей температуры $-40...+70^{\circ}\text{C}$, что существенно расширяет географию применения этих источников питания в нашей стране.

Серия EXL обладает следующими ключевыми преимуществами:

- диапазон входного напряжения 50/60 Гц для мощностей до 150 Вт включительно: 100–240 В переменного тока;
- диапазоны входных напряжений 50/60 Гц для мощностей от 200 Вт: 100–130 или 200–240 В переменного тока доступны с помощью встроенного переключателя;
- выдерживает пиковую выходную мощность до 200% в течение 5 с при запуске (опциональная версия В);
- КПД: до 92%;
- светодиодный индикатор питания;
- металлический корпус, класс защиты: IP20;
- категория защиты от перенапряжения: III;
- диапазон рабочей температуры: $-40...+70^{\circ}\text{C}$;
- всесторонняя защита: перенапряжение на выходе, перегрузка по току на выходе, защита от короткого замыкания;
- соответствует стандартам IEC/BS EN/EN 60335-1 (PD3) и IEC/BS EN/EN 61558-1,2-16 для бытовой техники;
- гарантия: 3 года.