

Синфазные дроссели для высокоскоростных интерфейсов: рекомендации по выбору

Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

Так сложилось, что в технической литературе, посвященной вопросам подавления электромагнитных помех (ЭМП) и связанной с ними проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС), основное внимание уделяется цепям питания (например, в детальной публикации по данной теме [1]). Однако проблема гораздо глубже.

Согласно двум обширным публикациям [2, 3], проблема ЭМП и ЭМС, кроме цепей питания, затрагивает и линии связи, и линии передачи сигналов. Причем это касается как коммерческого оборудования [2], так и оборудования специального назначения [3]. В обоих случаях к излучению собственных ЭМП и устойчивости к разнообразным внешним воздействиям, определяющим ЭМС, предъявляются довольно жесткие требования. Настоящая статья, написанная на базе документа компании Coilcraft [4], для решения указанных проблем предлагает эффективное решение по выбору основного помехоподавляющего элемента, а именно синфазного дросселя (Common Mode Choke), который может работать в высокоскоростных интерфейсах. Именно он является наиболее эффективным и широко используемым компонентом таких решений.

Что такое и как работает синфазный дроссель

Особенностью синфазного дросселя (Common Mode Choke) является то, что он имеет две обмотки, намотанные в противоположных направлениях (рисунок).

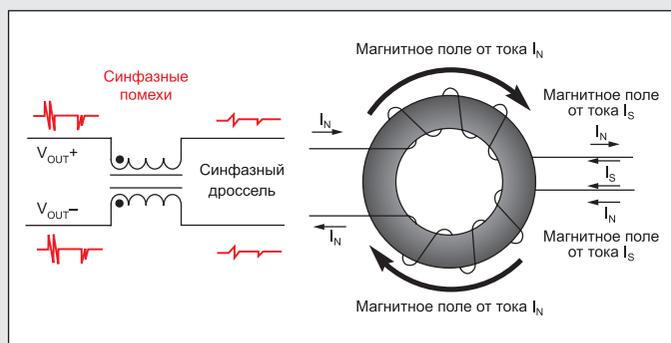


Рисунок. Принцип работы синфазного дросселя

Благодаря наличию противофазных обмоток синфазные токи I_S будут генерировать разностный магнитный поток в сердечнике, поскольку они текут в одном направлении. Таким образом, возникающий при этом импеданс эффективно гасит синфазные составляющие тока. Асинхронные, дифференциальные токи, проходя через дроссель, формируют возвращаемые токи I_N , которые не производят разностный магнитный поток и, следовательно, не затухают в таком дросселе. Данный подход имеет существенное преимущество: сердечник дросселя не входит в насыщение даже при наличии очень больших дифференциальных токов, поэтому для подавления синфазных составляющих в синфазных дросселях могут быть использованы сердечники с высокой магнитной проницаемостью без риска их перегрева из-за прохождения дифференциальных составляющих тока [1].

Вступление

Высокоскоростные интерфейсы данных, такие как USB, HDBaseT, HDMI, DVI и DisplayPort, для обеспечения их надежного функционирования требуют тщательного рассмотрения проблемы электромагнитных помех (ЭМП) и гарантированного выполнения нормативов по электромагнитной совместимости (ЭМС). Из множества инструментов, доступных разработчику в комплексном решении этой проблемы — устранения собственных ЭМП и влияния внешних на линии передачи сигнала, вход/выход интерфейса и размещения составляющих его компонентов, — наиболее действенным, несомненно, является дроссель синфазного фильтра. При этом необходимо выбрать такой дроссель, который будет эффективно использоваться для самых разнообразных видов сигналов, в широком температурном диапазоне изменений и в условиях высокой спектральной плотности, характерной для высокоскоростных каналов передачи. Синфазные дроссели должны не только осуществлять подавление помех, но и поддерживать целостность передачи информации по высокоскоростным каналам связи. Как уже говорилось, они могут быть необходимы для выполнения требований стандартов FCC и международных стандартов соответствия с конкретными нормативными требованиями. Так, один из основных стандартов FCC CFR 47 применяется, как правило, к радиочастотным устройствам (Часть 15), а также устанавливает определенные регламенты функционирования промышленного, научного и медицинского оборудования (Часть 18). В дополнение к общепринятым стандартам могут быть и другие условия, обязательные для точно указанных приложений. Например, крупные автопроизводители поддерживают собственные требования к ЭМП и ЭМС для оборудования транспортных средств [8].

Проблема выбора синфазного дросселя

Выбор оптимального синфазного дросселя для конкретного приложения зависит от целого ряда факторов, которыми ни в коем случае нельзя пренебрегать. Первый шаг при выборе наиболее подходящего дросселя — определение именно тех вариантов его исполнений, которые не будут ослаблять и оказывать негативное влияние на передачу дифференциального (полезного) сигнала. Для этого необходимо учитывать скорости передачи данных в рамках используемого интерфейса, для справки они приведены в таблице.

Скорость передачи данных определяет протокол связи, следовательно, он определяет и нужную полосу пропускания для работы в дифференциальном режиме, то есть непосредственно в режиме передачи информации.

Очень важно, хотя и относительно просто, выбрать синфазный дроссель с подходящим ослаблением дифференциального сигнала для

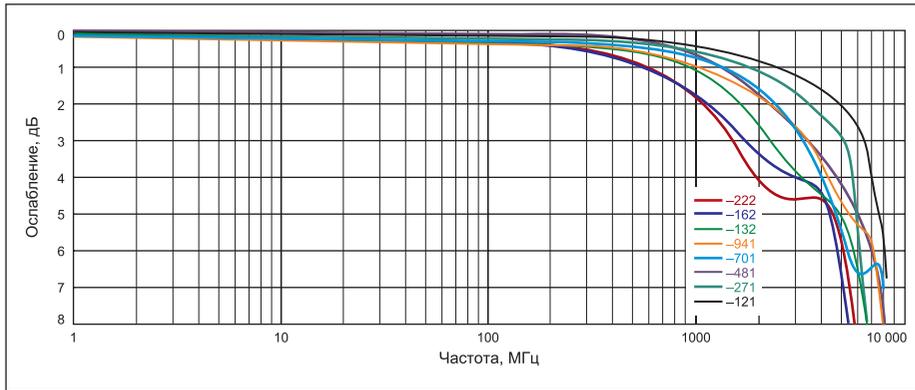


Рис. 1. График, показывающий затухания для дифференциального высокочастотного сигнала на примере синфазных дросселей серии 0805USBN компании Coilcraft



Рис. 2. Синфазные дроссели серии 0805USBN компании Coilcraft

диапазона частот в соответствии с используемым интерфейсом. На рис. 1 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), позволяющая определить частоту среза для дифференциального сигнала, вносимую синфазными дросселями серии 0805USBN компании Coilcraft. Если определять ее по стандартному уровню -3 дБ, то частота среза, а значит, и полоса пропускания для дифференциального сигнала расположена выше 1 ГГц и в зависимости от типа дросселя простирается вплоть до 6,5 ГГц. Таким образом, частотные искажения дифференциального высокочастотного сигнала могут быть минимизированы, и что немаловажно, с сохранением его гармонических составляющих — это делает синфазные дроссели компании Coilcraft серий 0805USBN и 0805USBF, типоразмера 0805 и серии 0603USB, типоразмера 0603 подходящими для типичных скоростей передачи данных USB3.1 Gen 1. Пример исполнения дросселей показан на рис. 2. Однако здесь есть проблема. Разработчику необходимо учитывать не только частотные, но и нагрузочные характеристики дросселя, то есть номинальный рабочий ток, а иногда и устойчивость изоляционного барьера, о чем мы будем говорить ниже.

Если для используемой скорости передачи данных относительно требований к влиянию дросселя на дифференциальный сигнал все достаточно просто и предсказуемо, то для подавления синфазного сигнала не все

так очевидно. Поэтому этой части проблемы необходимо уделить особое внимание. Глубина требуемой фильтрации здесь также зависит от скорости передачи данных, но ее сложнее прогнозировать из-за влияния всех возможных физических аспектов конкретного приложения, способных воздействовать на уровень нежелательных генерируемых ЭМП и ограничить устойчивость в рамках определения ЭМС. Оказать влияние на конечную конструкцию могут не только чисто схемные решения интерфейса в рамках его протокола, но и конструктивное решение, включающее такие моменты, как согласование входного/выходного импеданса, импеданс контактов самого разъема, ширина печатного проводника линии подключения и влияние экранирования.

Разумеется, когда возникает проблема, важно определить ее источник и принять правильное решение. Самый простой способ — подобрать дроссели, специально разработанные для конкретного приложения. То есть фильтрующие дроссели, созданные с учетом требований конкретных приложений, скажем, синфазные дроссели для USB. Наглядный пример от компании Coilcraft был представлен выше.

Однако поскольку проблемы ЭМП и ЭМС в реальной жизни не всегда вписываются в заранее подготовленные решения, ключом к их решению является доступ к данным по эффективности фильтрации. Выбор нужного синфазного дросселя может быть облегчен с помощью интерактивного инструмента CM Choke Finder (полное наименование инструмента Common Mode Choke Finder), предложенного компанией Coilcraft.

Инструмент доступен с домашней страницы компании (www.coilcraft.com) через меню Design Tools с переходом на CM Choke Finder. Активировать его можно и по прямой ссылке (www.coilcraft.com/apps/finder/cmffinder.cfm). При этом не требуется ни регистрация, ни подписка на рассылку новостей. После активации откроется окно, интересующая нас часть которого представлена на рис. 3.

Для начала следует указать требования к фильтрации для своего приложения, а именно нужный импеданс в омах (в этом случае ставите флажок на Impedance) или затухание на определенной частоте или частотном диапазоне в децибелах (ставьте флажок на Attenuation). Если же вам необходим синфазный дроссель с конкретной индуктивностью, то ставите флажок на Inductance и задаете ее в микрогенри. Этот вариант используется в качестве альтернативы и сверки, когда значение индуктивности уже определено, но по некоторой причине потребовало корректировки.

Кроме данных параметров, надо указать рабочий ток (Current) в амперах и частоту среза для синфазного режима (Frequency to attenuate). Это может быть либо частота среза (ставьте флажок перед окошком MHz) в мегагерцах, либо в полосе частот в мегагерцах «от и до» (to), при этом диапазон частот ограничен полосой частот 0,1–3000 МГц (максимум), что и указано ниже окошек установки диапазона.

Через Mounting можно также задать соответствующий вариант конструктивного исполнения SMT (для монтажа на поверхность) или Leaded (с выводами, для установки в отверстия). Или ограничить вы-

Таблица. Типичные скорости передачи данных

Сигнальный интерфейс	Скорость передачи
USB2.0 (High Speed)	480 Мбит/с
USB3.1 Gen 1 (SuperSpeed) (бывший USB3.0)	5 Гбит/с
USB3.1 Gen 2 (SuperSpeed+)	10 Гбит/с
HDMI	1,65–6 Гбит/с
HDBaseT	До 10,2 Гбит/с
FireWire 800/S800T (IEEE 1394b-2002/IEEE 1394c-2006)	До 800 Мбит/с
FireWire S1600/S3200	1,57 и 3,15 Гбит/с
LVDS per ANSI/TIA/EIA-644-A	До 1,9 Гбит/с
PCI Express 2.0	500 Мбит/с
SATA 1.0/2.0/3.0/3.1/3.2	1,5; 3; 6; 16 Гбит/с
DVI	До 3,96 Гбит/с
DisplayPort	До 8,1 Гбит/с



Рис. 3. Окно задания параметров для выбора синфазного дросселя в симуляторе CM Choke Finder

Recommended chokes E-mail results

Actual size	Free sample	Graph	Part number	CM attenuation 1 MHz dB min	DM attenuation 1 MHz dB max	Inductance min μ H	DCR per line Ohms	Rated current A rms	Isolation voltage Vrms	Lines	Mount	Length mm	Width mm	Height mm	Price @1000	AEC grade
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1048-103	4	0	8	0.053	1.5	200	2	SM	10.30	10.30	5.00	\$0.72	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LPD5010-822	3	0	6.56	0.7	0.5	100	2	SM	4.80	4.80	0.90	\$0.93	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1514-103	3	0	8	0.018	6.8	500	2	SM	15.50	15.50	14.20	\$1.71	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1278-822	3	0	6.56	0.05	2.76	500	2	SM	12.30	12.30	8.05	\$0.76	3
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LPD4012-103	3	0	8	0.75	0.5	100	2	SM	4.02	4.02	1.20	\$0.45	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1206USB-872	3	0	0.51	0.39	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1206USB-113	3	0	0.623	0.44	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1583-103	3	0	8	0.031	3.68	500	2	SM	15.50	15.50	8.60	\$1.10	

Can't find what you need? [Help](#)

Рис. 4. Рекомендованные по заданным параметрам синфазные дроссели

Recommended chokes E-mail results

Actual size	Free sample	Show all parts	Line color	Part number	CM attenuation 1 MHz dB min	DM attenuation 1 MHz dB max	Inductance min μ H	DCR per line Ohms	Rated current A rms	Isolation voltage Vrms	Lines	Mount	Length mm	Width mm	Height mm	Price @1000	AEC grade
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	■	LPD4012-103	3	0	8	0.75	0.5	100	2	SM	4.02	4.02	1.20	\$0.45	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	■	1206USB-872	3	0	0.51	0.39	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	■	1206USB-113	3	0	0.623	0.44	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	

Рис. 5. Перечень выбранных для сравнения синфазных дросселей

бор дросселями, отвечающими требованиям к автомобильному оборудованию AEC-Q200. Здесь предусмотрены два критерия: Grade 1 (125°) и Grade 3 (85°) — имеется в виду рабочая температура +125 и +85 °С.

Допустим, нам необходим синфазный дроссель поверхностного монтажа, обеспечивающий бесперебойное в части ЭМП и требований по ЭМС функционирование интерфейса USB 2.0. Как известно, рабочий ток здесь ограничен 0,5 А, а частота среза может быть выбрана равной 1 МГц. Именно эти условия указаны на рис. 3.

После того как условия заданы, нажимаем на виртуальную кнопку поиска подходящих вариантов FIND (она справа), и открывается перечень соответствующих синфазных дросселей (рис. 4).

Относительный недостаток инструмента Common mode Choke Finder — нельзя ограничить выбор дросселя, например, нужным типоразмером, поэтому список получается обширный и разбираться в нем приходится вручную: либо прокруткой, либо, на наше счастье, через «правка-поиск» на странице, с указанием, скажем, 0805 (если это, конечно, поддерживается вашим браузером). В данном случае нас ждет разочарование — синфазных дросселей такого типоразмера, отвечающих заданным требованиям, нет, но есть два дросселя типоразмера 1206.

В новой, открывшейся вкладке вы получаете весьма обширную информацию. Фотографии внешнего вида (причем в масштабе, близком к фактическому), гиперссылку через обозначение для заказа на спецификацию (колонка Part number); частоту среза для синфазного сигнала по уровню -3 дБ (CM attenuation 1 MHz dB min); затухание для дифференциального сигнала на частоте среза (DM attenuation 1 MHz dB max); индуктивность в микрогенри (Inductance min μ H); сопротивление катушки по постоянному току в омах (DCR per line Ohms); рабочий ток в амперах (Rated current Arms); напряжение изоляции (Isolation voltage Vrms). И кроме того, конструктивные параметры — размеры в миллиметрах, рекомендуемую цену и соответствие требованиям для оборудования, используемого в автомобильной промышленности.

Первыми в таблице указаны дроссели с наибольшим импедансом/ослаблением синфазных сигналов на заданной вами частоте. Далее можно отсортировать результаты по другим критериям — по току, сопротивлению по постоянному току (DCR) или габаритам.

Одна из самых мощных функций этого инструмента — возможность сравнивать на одном и том же графике до шести разных дросселей, что делает выбор оптимального продукта намного проще, чем когда

их частотные характеристики приводятся на разных графиках — каждый на своем. Кривые импеданса и затухания показаны для каждого дросселя в нужном диапазоне частот. Перемещая курсор по графику, вы можете видеть точную точку и считать данные на любой интересующей частоте через небольшое всплывающее окно. Активация этой функции осуществляется установкой флажков в колонке Graph Pick 6 max возле выбранных компонентов.

Итак, давайте сравним два подходящих нам дросселя типоразмера 1206, специально разработанных для USB-интерфейса, — 1206USB-113, 1206USB-872 [5] и один LPD4012-103 [6]. Результат мы получим, активировав виртуальную кнопку **Graph Pick 6 max**. Первым мы увидим, что в таблице остались лишь выбранные нами дроссели и показан цвет линии, которым будут отображаться их частотные характеристики (рис. 5).

Ниже будут представлены графики, первый по умолчанию — это АЧХ, а вернее зависимость затухания (Attenuation) относительно выбранной частоты (рис. 6), в данном случае относительно 1 МГц. Вторым — зависимость импеданса от частоты (рис. 7) и также относительно 1 МГц. Чтобы не использовать прокрутку, графики можно переключать, кликнув мышкой

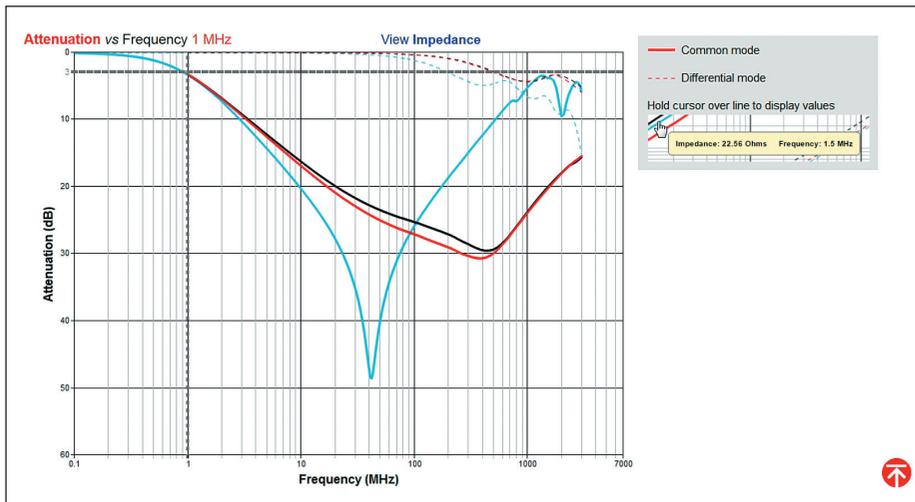


Рис. 6. График зависимости затухания от частоты для выбранных типов синфазных дросселей

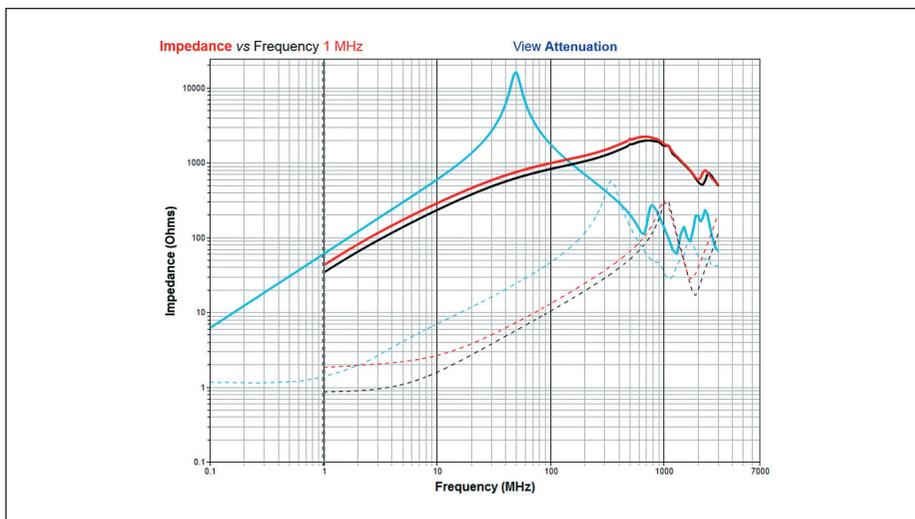


Рис. 7. График зависимости импеданса от частоты для выбранных типов синфазных дросселей

тров ЭМП и выполнение непростых требований в части ЭМС. С его помощью можно выбрать синфазный дроссель, наиболее эффективный для решения конкретных задач.

Конечно, если вам не жалко своего времени, вы можете осуществить выбор синфазного дросселя и обычным путем, просматривая веб-страницы и изучая массу спецификаций. Но время, как известно, деньги. А потому лучше не тратить его попусту, а использовать с максимальной пользой. Для этого компания Coilcraft сделала еще один весьма удачный шаг в упрощении выбора описанных в настоящей статье компонентов — она разместила их на одной удобной странице (www.coilcraft.com/prod_em.cfm), с которой также открывается инструмент CM Choke Finder.

В заключение хочу отметить, что проблемы ЭМП и ЭМС не решаются сами по себе, их нельзя оставлять «на потом» и надеяться на авось. Практически все изделия подлежат обязательной сертификации на соответствие этим требованиям, и чем раньше вы займетесь решением проблемы, тем быстрее ваше изделие окажется на рынке, опередив или потеснив конкурентов. Помните, что затраты на доработку изделия уже на начальной стадии производства, в результате его несоответствия нормам по ЭМП/ЭМС, могут оказаться просто катастрофическими [7].

Литература

1. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
2. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
3. Петит Г. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
4. Common Mode Filter Chokes for High Speed Data Interfaces Document 1009-2 Revised 07/01/16. www.coilcraft.com/pdfs/Doc1009_cm_chokes_hi_speed.pdf
5. USB 2.0 Common Mode Choke 1206, Document 386-1 Revised 06/01/1, Coilcraft Inc. 2017. www.coilcraft.com/pdfs/1206usb.pdf
6. Common Mode Chokes LPD4012, Document 1327-1 Revised 07/13/1 Coilcraft Inc. 2017. www.coilcraft.com/pdfs/lpd4012_cm.pdf
7. Ле Февр П. Электропитание и проблемы электромагнитной совместимости оборудования при работе в медицинских средах // Компоненты и технологии. 2016. № 5.
8. Зауэрвальд М. Десять советов для успешного проектирования автомобильной электроники с выполнением требований по ЭМС/ЭМП // Компоненты и технологии. 2016. № 5.

на **Impedance** (в опции View Impedance) или **Attenuation** (в опции View Attenuation), тип графика изменится. Кроме того, справа имеется указание, как изображаются графики для синфазного (Common mode) и дифференциального (Differential mode) режимов, и пример того, как пользоваться курсором.

Из дополнительных опций доступны: корректировка начальных условий (виртуальная кнопка **Revise Input**), отправка результатов по электронной почте (e-mail results), сохранение результатов в виде pdf-файла (пиктограмма) и помощь (виртуальная кнопка **Help**) в виде запроса в службу технической поддержки. Что касается сохранения результатов, если вы не сделали выбор и не вывели графики, то в pdf-файл сохранится только весь перечень предложенных дросселей, без начальных условий. Если выбор был сделан — сохранится таблица выбора и графики и вы получите ссылку на ваш проект. Начальные условия

не сохраняются, что можно считать некоторым неудобством. Что касается пересылки результатов по почте, придет не pdf-файл с результатами, а ссылка на страницу с начальными условиями и полной таблицей рекомендованных дросселей, что тоже не слишком удачно. Хотя здесь нет регистрации и опции типа «Кабинет» или «Мой Coilcraft», результаты проектирования сохраняются и доступны вам по ссылке, полученной по электронной почте или сохраненной вместе с pdf-файлом. Если вы об этом не позаботились, то выбор придется повторять с нуля. И хотя он прост и не затратен по времени, делать одну и ту же работу дважды — несерьезно.

Несмотря на выявленные неудобства, Common Mode Choke Finder компании Coilcraft — это самый сложный, но и наиболее простой в использовании онлайн-инструмент, доступный в отрасли. Он будет весьма полезным и хорошим дополнением при разработке проектов, упрощая создание филь-