

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В LTSPICE

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARASITIC PARAMETERS OF PASSIVE ELEMENTS ON THE SIMULATION RESULTS IN LTSPICE

В статье приведена краткая информация о путях анализа влияния паразитных параметров пассивных компонентов на амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики проектируемых устройств с помощью программы LTspice. Рассмотрен пример проектирования фильтра подавления кондуктивных электромагнитных помех с учетом паразитных параметров пассивных компонентов.

В. Макаренко

Программа LTspice содержит обширную базу пассивных компонентов в моделях которых учтены многие паразитные параметры. Например, для катушек индуктивности это активное сопротивление и паразитная емкость. Для конденсаторов одним из важнейших параметров является ESR (Equivalent Series Resistance) – эквивалентное последовательное сопротивление. Этот параметр конденсатора, характеризующий его активные потери в цепи переменного тока. В эквиваленте его можно представить, как включенный последовательно с конденсатором резистор, сопротивление которого определяется, главным образом, диэлектрическими потерями, а также сопротивлением обкладок, внутренних контактных соединений и выводов.

Рассмотрим примеры пассивных компонентов и значения их основных и паразитных параметров. На рис. 1 приведена модель катушки индуктивности и окно выбора типа катушки. Чтобы открыть окно параметров катушки необходимо поместить курсор на ее изображение и нажать правую кнопку мышки.

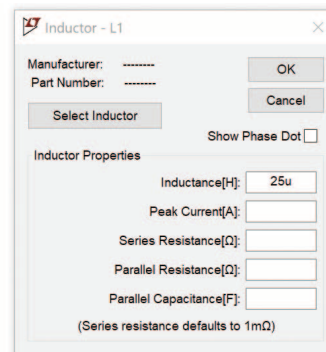
Откроется окно (на рис. 1 верхнее) в котором можно задать все параметры катушки. Однако, если использовать катушки, выпускаемые различными производителями, то необходимо в этом окне нажать кнопку **Select Inductor**. Откроется окно **Select Stock Inductor** (на рис. 1 нижнее окно).

В окне выбора типа катушки выводятся доступные типы катушек с заданной и близкой к ней индуктивностями. Если нажать кнопку **List All Inductors in Database**, то будет выведена вся база доступных

Abstract – The article provides brief information on ways to analyze the influence of parasitic parameters of passive components on the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the designed devices using the LTspice program. An example of designing a filter for suppressing conducted electromagnetic interference is considered, taking into account parasitic parameters of passive components.

V. Makarenko

для выбора катушек. В окне выбора катушек (кроме индуктивности и пикового тока) из паразитных параметров выводится только активное сопротивление.



L[μH]	Mfg.	Part No.	Ipk[A]	Rser[Ω]
25.0	Gowanda	050AT2502V	2.000	0.020
25.0	Gowanda	GT10-100	2.500	0.040
25.0	Gowanda	121AT2502V	4.000	0.025
25.0	Gowanda	059AT2502V	6.000	0.020
25.0	Gowanda	894AT2502V	10.000	0.015
24.0	Wärth Elektronik	7447043 WE-FI	1.000	0.450
24.0	Wärth Elektronik	7447798241 WE-PDF 10	3.250	0.035
26.0	Coilcraft	SPT50L-263	4.600	0.028

Рис. 1. Модель катушки индуктивности и окно выбора типа катушки

После выбора катушки в окне ее параметров выводятся все паразитные параметры. Для иллюстрации выбрана катушка компании Würth Elektronik ин-

дуктивностью 24 мкГн (рис. 2).

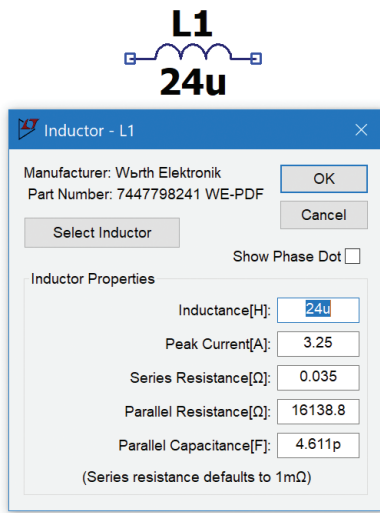


Рис. 2. Параметры катушки индуктивности 24 мкГн компании Würth Elektronik

Как следует из рис. 2, в окне параметров выводятся значения параллельно емкости и параллельного сопротивления. Особенно большое влияние может оказать параллельная емкость, что будет продемонстрировано ниже.

Конечно в окно параметров можно вписать свои значения, если катушка изготавливается самостоятельно.

Рассмотрим какие параметры конденсаторов можно учесть при моделировании в LTspice. На рис. 3 показано окно выбора типа конденсатора, а на рис. 4 – параметры конденсатора емкостью 1 мкФ компании KEMET.

Рассмотрим как влияют паразитные параметры на характеристики частотно избирательных цепей при работе их на активную и комплексную нагрузку. Рассмотрим это на примере однозвенного LC-фильтра нижних частот (ФНЧ). На рис. 5 приведена модель ФНЧ с идеальными пассивными элементами.

Зададим частоту среза фильтра 2 кГц и его сопротивление нагрузки 50 Ом. Для минимизации отражений волновое сопротивление фильтра выбираем равным сопротивлению нагрузки.

Из известного соотношения для волнового сопротивления $\rho = \sqrt{L/C}$ выразим индуктивность катушки фильтра

$$L_{\phi} = \rho^2 C_{\phi} \quad (1)$$

где L_{ϕ} , C_{ϕ} – индуктивность и емкость фильтра, соответственно.

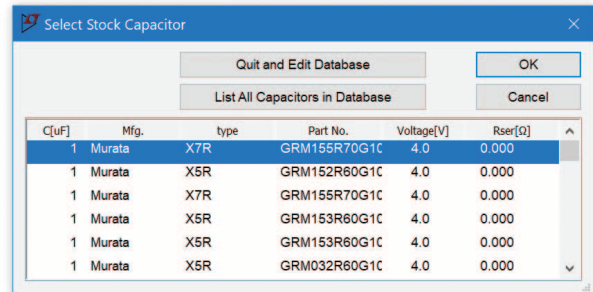
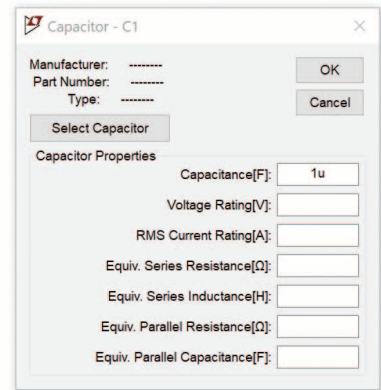
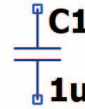


Рис. 3. Модель конденсатора и окно выбора его типа

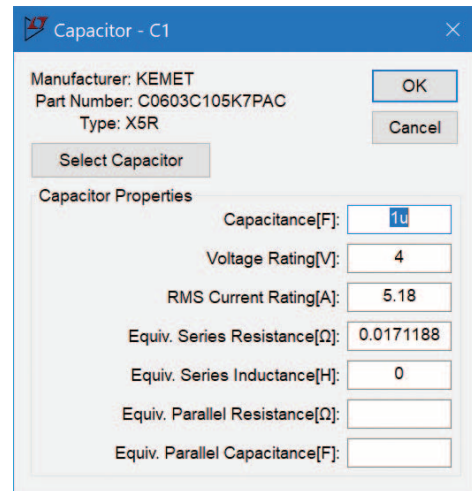


Рис. 4. Параметры конденсатора емкостью 1 мкФ компании KEMET

Частота среза фильтра определяется соотношением $f_c = 1/(2\pi\sqrt{L_{\phi}C_{\phi}})$ из которого несложно получить соотношение для C_{ϕ} с учетом (1)

$$C_{\phi} = 1/(2\pi f_c \rho). \quad (2)$$

После подстановки значений частоты среза и волнового сопротивления получим

$$C_{\phi} = 1/(2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 50) = 1.59 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Приняв значение емкости 1.5 мкФ рассчитаем индуктивность $L_{\phi} = 50 \cdot 1.5 \cdot 10^{-6} = 75 \cdot 10^{-6}$ Гн.

На рис. 5,а приведена модель фильтра с идеальными пассивными компонентами, нагруженного на сопротивление 50 Ом, а на рис. 5,б – модель ФНЧ с согласующим резистором.

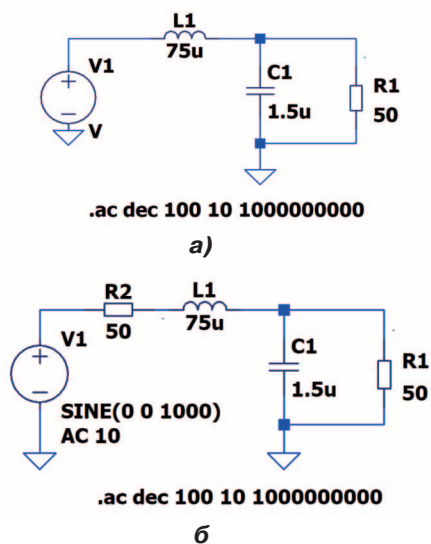


Рис. 5. Модель ФНЧ с идеальными компонентами без согласующего резистора (а) и с согласующим сопротивлением (б)

АЧХ и ФЧХ фильтра с идеальными пассивными компонентами без согласующего резистора приведены на рис. 6, а с согласующим резистором – на рис. 7.

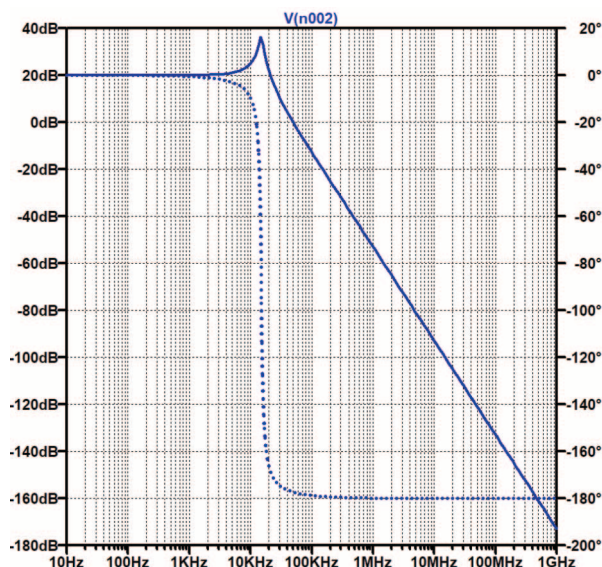


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот без согласующего резистора и использовании пассивных компонентов с идеальными характеристиками

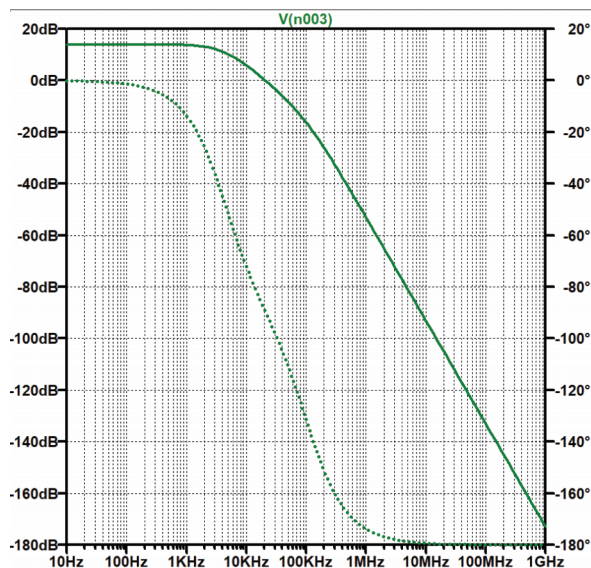


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот с согласующим резистором и использованием пассивных компонентов с идеальными характеристиками

Как известно из теории фильтров, источник сигнала и нагрузка должны иметь одинаковое сопротивление для того чтобы в фильтре не было отражений на приемном конце (от нагрузки). В модели на рис. 5,а источник сигнала имеет нулевое внутренне сопротивление, чем и объясняется выброс в частотной характеристике на частоте примерно 15 кГц. Чтобы избежать отклонения АЧХ от заданной введен резистор R2 в модели, показанной на рис. 5,б.

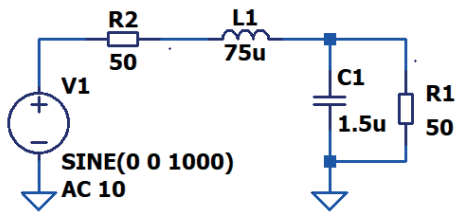
Как следует из рис. 7 параметры фильтра совпадают с заданными при расчете.

Для проверки влияния паразитных параметров элементов использована модель, приведенная на рис. 8. На этом же рисунке показаны параметры катушки индуктивности и конденсатора фильтра.

АЧХ и ФЧХ, полученные в результате моделирования приведена на рис. 9.

Анализ полученной АЧХ свидетельствует о том, что на частотах выше 6 МГц затухание фильтра резко падает. Если ФНЧ на идеальных компонентах на частоте 100 МГц обеспечивает затухание 135 дБ, то при использовании реальных компонентов с показанными на рис. 8 параметрами, затухание составляет всего 65 дБ.

Если использовать компоненты с другими параметрами, то получим совершенно другую характеристику. Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что при разработке фильтров электромагнитных помех (ЭМП), устанавливаемых на входе преобразователей напряжения (как DC/DC- так и AC/DC), необходимо учитывать не только паразит-



.ac dec 100 10 100000000

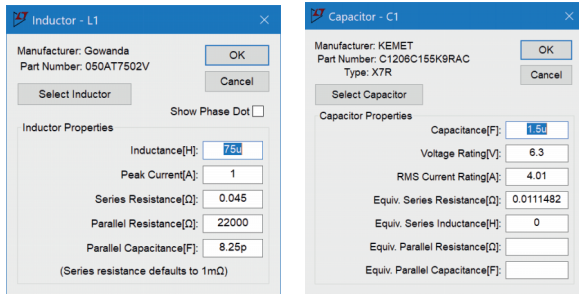


Рис. 8. Модель и параметры пассивных компонентов ФНЧ

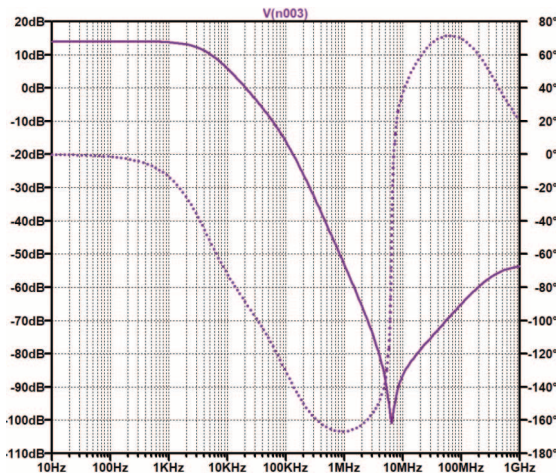


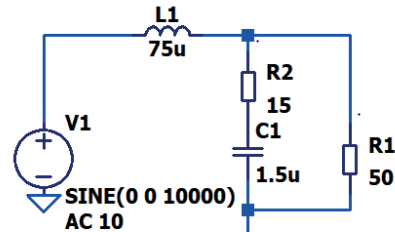
Рис. 9. АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот с согласующим резистором и использованием пассивных компонентов с реальными параметрами

ные параметры пассивных компонентов, но и степень согласования входного и выходного сопротивления фильтров.

Но и это еще не все факторы, которые следует учесть при проектировании фильтров ЭМП. Поскольку фильтры помех должны иметь малое сопротивление на постоянном токе для сохранения высокого значения КПД преобразователей напряжения, то такой метод сглаживания выбросов в АЧХ для таких устройств неприемлем.

Сгладить выброс в АЧХ возможно путем снижения добротности колебательного контура, образованного катушкой и конденсатором фильтра. Для этого достаточно последовательно с конденса-

ром включить резистор с небольшим сопротивлением. На рис. 10 приведена модель ФНЧ с идеальными пассивными компонентами и его АЧХ при работе на активную нагрузку с дополнительным резистором, включенным последовательно с конденсатором.



.ac dec 100 10 100000000

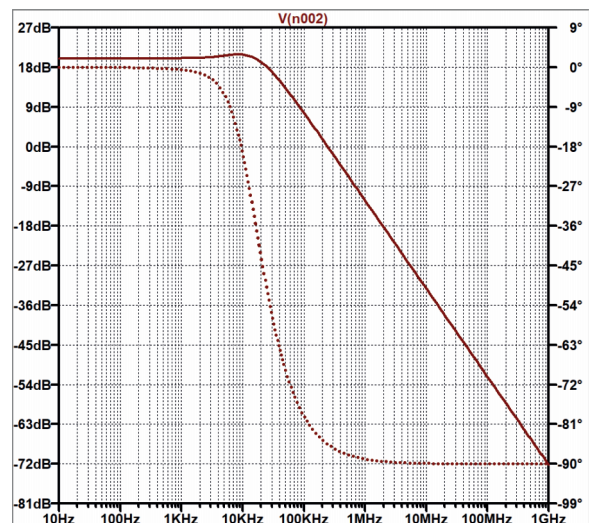


Рис. 10. Модель и АЧХ ФНЧ с идеальными пассивными компонентами и со сглаживанием выброса АЧХ с помощью дополнительного резистора, снижающего добротность контура

Сравнение АЧХ на рис. 7 и 10 позволяет сделать два вывода:

1. Частота среза фильтра с согласующим резистором, включенным последовательно с конденсатором, примерно в 10 раз выше, заданной при расчете.
2. Крутизна спада АЧХ фильтра, приведенного на рис. 5,б составляет 40 дБ/декаду, а фильтра на рис. 10 – приблизительно 17 дБ/декаду.

При проектировании фильтров ЭМП следует учесть что измерение помех осуществляется с помощью эквивалентов сети AMN/LISN. Как известно для разных стандартов электромагнитной совместимости (ЭМС) для измерения уровня ЭМП ис-

пользуются разные AMN/LISN-устройства, приводящие к различиям входных сопротивлений этих устройств в широком диапазоне частот. Классическая теория LC-фильтров предполагает их расчеты при постоянном сопротивлении источника сигнала, который равен сопротивлению нагрузке. Сложность проектирования фильтров для уменьшения уровня электромагнитных помех связана с тем, что фильтр нагружен на комплексное сопротивление, которое изменяется в широком диапазоне частот, а сопротивление источника помех также зависит от частоты и имеет совершенно другие значения.

На рис. 11 приведена схема подключения AMN/LISN к источнику питания для проведения измерения уровней ЭМП и проверки на соответствие требованиям стандарта CISPR 25.

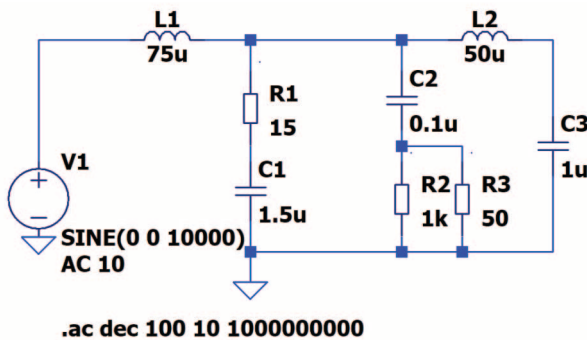


Рис. 11. Упрощенная схема подключения AMN/LISN для измерения дифференциальной составляющей кондуктивной помехи на соответствие требованиям стандарта CISPR 25

Для более полного представления о параметрах AMN/LISN измерим его частотную характеристику в схеме максимально приближенной к реальному режиму работы. Модель для измерения АЧХ и результаты измерения приведены на рис. 12 и 13, соответственно.

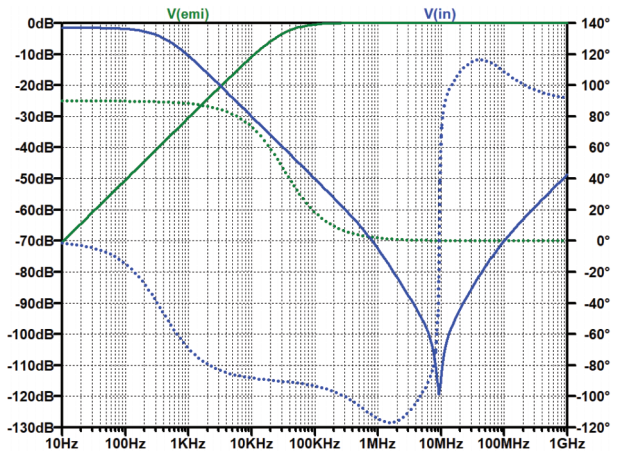


Рис. 13. АЧХ узла AMN/LISN стандарта CISPR25 в точке EMI (зеленая) и на входе IN (синяя)

АЧХ, измеренная в точке подключения источника входного постоянного напряжения V_{in} с внутренним сопротивлением 0.1 Ом (точка IN), имеет ярко выраженный провал на частоте около 10 МГц, с последующим значительным подъемом на более высоких частотах. Следует заметить, что внутреннее сопротивление на форму АЧХ не влияет, а влияет только на коэффициент передачи от генератора испытательного сигнала V2 к генератору входного напряжения.

Из рис. 13 следует, что AMN/LISN для источника напряжения помех представляет собой ФНЧ с частотой среза 300 Гц и скоростью спада АЧХ примерно равной 20 дБ/декаду. Однако, начиная с частоты 10 МГц, эта цепь работает как фильтр верхних частот, что иллюстрирует влияние паразитной емкости катушки индуктивности L1 и паразитной индуктивности конденсатора C2.

При измерении уровня помех в точке EMI узел AMN/LISN выполняет функцию ФВЧ с частотой среза 30 кГц.

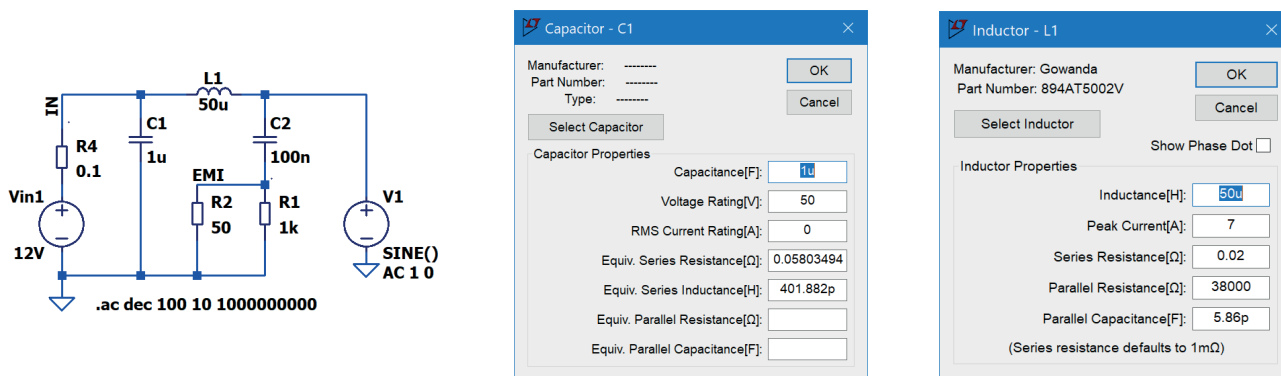


Рис. 12. Модель для измерения АЧХ AMN/LISN стандарта CISPR25 с неидеальными пассивными компонентами

Из проведенных экспериментов следует сделать вывод о том, что в каждом конкретном случае необходимо проводить анализ влияния паразитных параметров пассивных компонентов на получаемый результат.

Частично проблему проектирования фильтров ЭМП позволяет решить программа LTpowerCADII [3]. На рис. 14 приведен пример, показывающий результат проектирования фильтра ЭМП с помощью модуля EMI Filter Design этой программы.

Однако применение этой программы ограничено несколькими факторами. Во-первых она поддерживает проектирование только с некоторыми преобразователями (с ограниченным числом) и только компании Analog Devices. Во-вторых, однозвенный фильтр нижних частот не всегда позволяет подавить помехи до требуемого стандартом ЭМС уровня.

В таких случаях единственным выходом при проектировании является использование поэтапного проектирования фильтра подавления помех с моделированием и проверкой его эффективности на каждом шаге проектирования. Такой путь показан в работе [4], а способы измерения уровня ЭМП в LT-spice – в работе [5].

Рассмотрим подробно такой путь проектирования на примере. Поскольку для разных стандартов электромагнитной совместимости используют разные AMN/LISN с разной топологией, то на предва-

рительном этапе проектирования необходимо определять входное сопротивление этого узла.

На первом этапе рассчитывается волновое сопротивление AMN/LISN, а затем проектируется фильтр нижних частот (ФНЧ) с таким же волновым сопротивлением с учетом необходимого затухания на заданной частоте.

Рассмотрим процесс определения волнового сопротивления AMN/LISN на примере оборудования, соответствующего стандарту CISPR 25 [1, 2].

Волновое сопротивление контура AMN/LISN определяется значением емкости конденсатора C1 и индуктивности L1 (рис. 12). Емкость C1 можно в расчете не учитывать в связи с тем, что последовательно с конденсатором включен резистор 50 Ом (входное сопротивление анализатора спектра). Конденсатор C2 с резистором R2 образуют фильтр верхних частот с частотой среза 30 кГц.

Следовательно волновое сопротивление AMN/LISN равно

$$\rho = \sqrt{L_1/C_1} = (5 \cdot 10^{-6}) / (1 \cdot 10^{-6}) = 7.1 \text{ Ом.} \quad (3)$$

На втором этапе проектирования необходимо сформулировать требования к параметрам фильтра ЭМП. Для этого необходимо либо измерить уровень помех реального преобразователя, либо провести моделирование такого преобразователя. На рис. 15

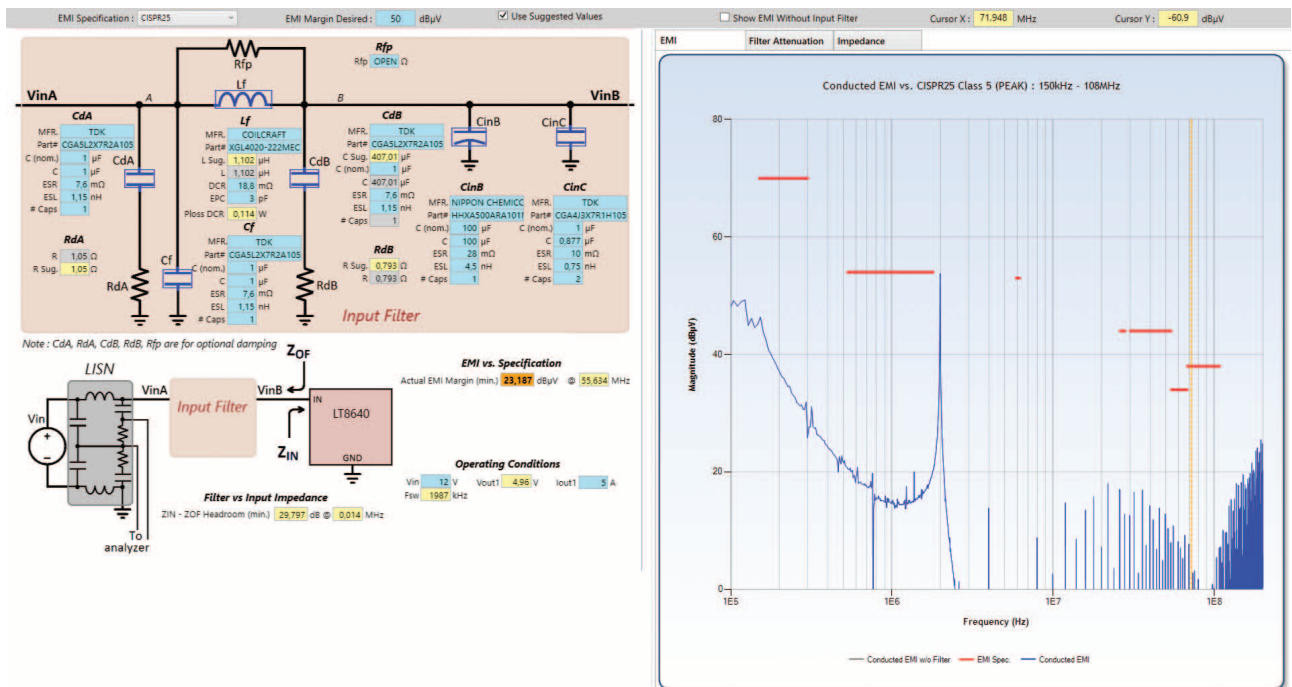


Рис. 14. Окно Input EMI Filter Design с результатами проектирования фильтра после выбора компонентов фильтра при установленном стандарте CISPR25

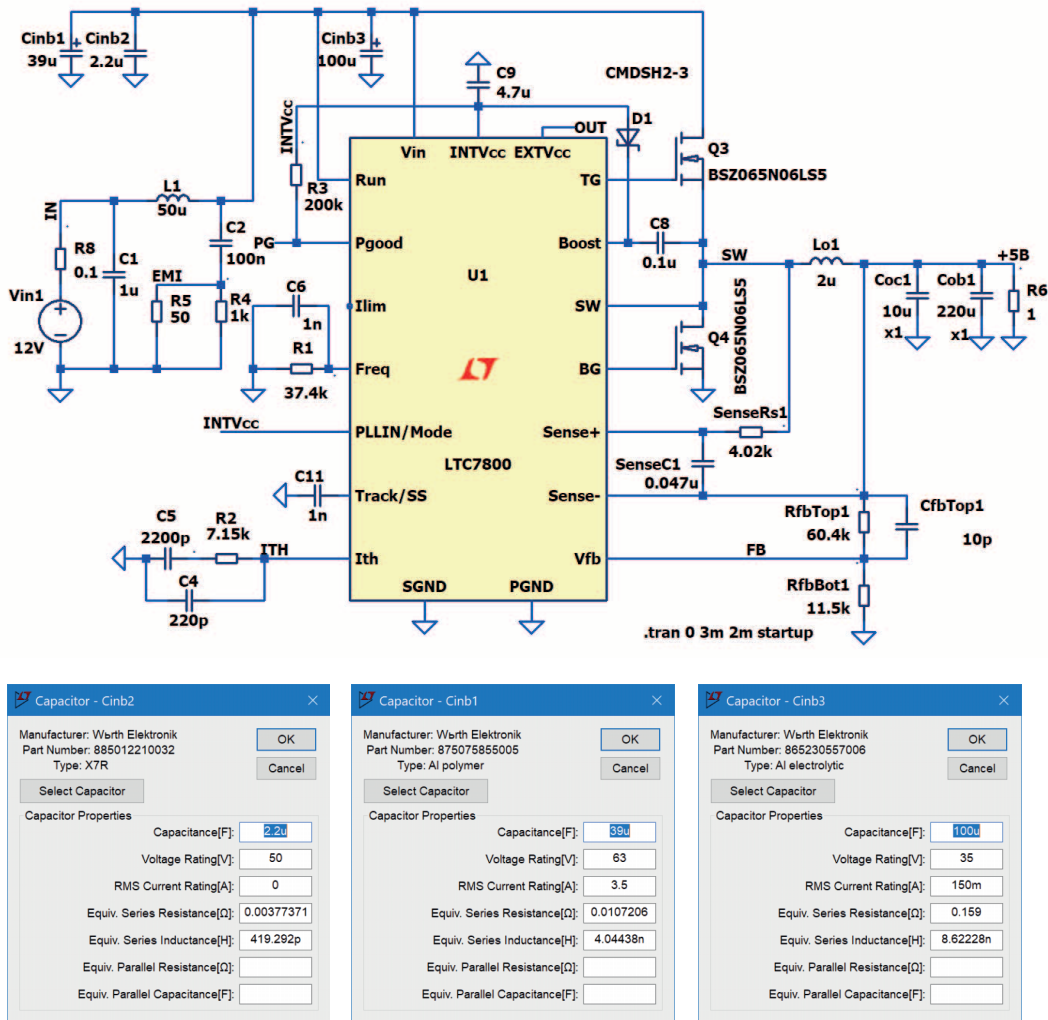


Рис. 15. Модель понижающего DC/DC-преобразователя на основе LTC7800 с узлом AMN/LISN стандарта CISPR25 и параметрами входных фильтрующих конденсаторов

приведена модель DC/DC-преобразователя на основе ИМС LTC7800 Analog Devices в рекомендованном производителем включении.

Минимальный уровень помех такой преобразователь обеспечивает при использовании полимерного конденсатора Cinb1 39 мкФ, параллельно подключенных керамического конденсатора Cinb2 емкостью 2.2 мкФ и электролитического конденсатора 100 мкФ Cinb3.

Спектр помех, измеренный в точке EMI, приведен на рис. 16. Для измерения спектра помех в дБмкВ следует воспользоваться рекомендациями, приведенными в работе [5] и ввести в поле V(emi) делитель 1u (1 мкВ). В этом случае вертикальная шкала будет соответствовать дБмкВ, хотя на графике сохраняются надписи dB (дБ). На рис. 16 и всех последующих рисунках спектров этот делитель введен.

На этом же рис. 16 показано как изменится спектр помехи при отключении электролитического конденсатора Cinb3. Красными и желтыми линиями показаны допустимые уровни пиковых значений ЭМП для устройств класса 5 в соответствии со стандартом CISPR25.

Сравнение двух спектров позволяет оценить влияние электролитического конденсатора на уровень помех в области нижних и верхних частот. Хотя включение этого конденсатора приводит к росту уровня помех на частотах выше 100 кГц примерно на 6 дБ, зато в области частот до 50 кГц снижает максимальный уровень помехи со 115 до 83 дБ. Следовательно использование трех различных конденсаторов на входе преобразователя предпочтительно. Комбинируя сочетание различного типа конденсаторов можно минимизировать уровень ЭМП, отдаваемых преобразователем в линию связи с источ-

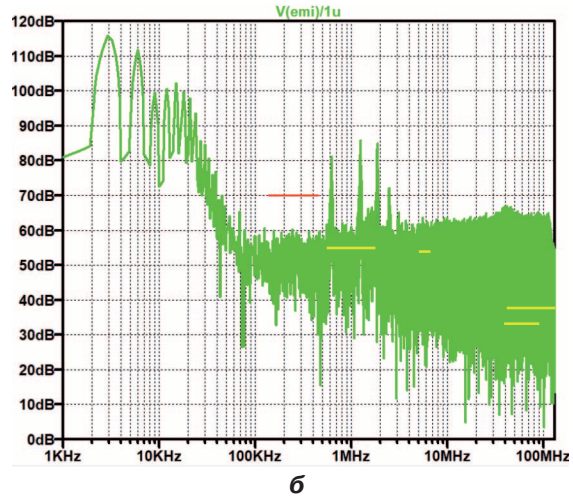
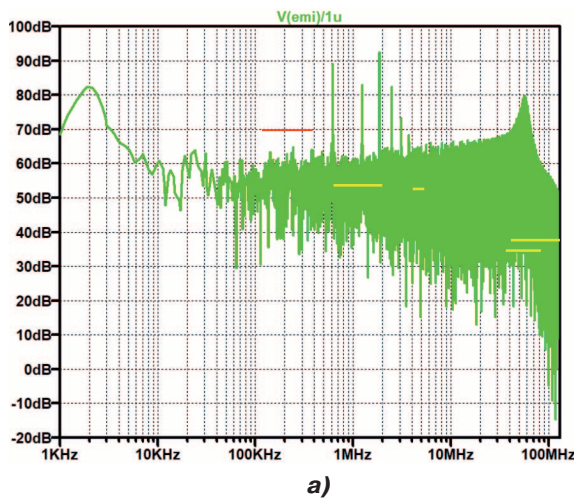


Рис. 16. Спектр ЭМП понижающего DC/DC-преобразователя на основе LTC7800 при отсутствии фильтра ЭМП и наличии трех входных конденсаторов (а) и при отключенном конденсаторе C_{inb3}

ником входного напряжения.

Уровень спектральной составляющей с частотой коммутации ключей 600 кГц составляет 90 дБмкВ и превышает допустимый пиковый уровень (рис. 14) для диапазона частот 0.5...2 МГц (в соответствии с CISPR25) на 35 дБ. Измеренное значение позволяет сформулировать требования к АЧХ фильтра помех.

Так как уровень первой гармоники превышает допустимое значение на 35 дБ, то фильтр должен обеспечить ослабление этой составляющей на величину 40 дБ (с небольшим запасом 5 дБ).

Частоту среза фильтра с учетом того, что Г-образное звено LC-фильтра, нагруженное на AMN/LISN, имеет скорость спада частотной характеристики примерно 20 дБ/декаду (как следует из рис. 10), можно ориентировочно рассчитать по формуле

$$f_c \geq f_1 / 10^{20} = 600 \cdot 10^3 / 10^{20} = 600 \cdot 10^3 / 100 = 6000 \text{ Гц,}$$

Зная волновое сопротивление AMN/LISN, можно перейти к расчету элементов фильтра ЭМП. Выразим индуктивность фильтра через волновое сопротивление, воспользовавшись соотношением (1). Рассчитаем значение емкости фильтра по формуле (2)

$$C_\phi = 1/(2\pi f_c) = 1/(2\pi \cdot 6000 \cdot 7.1) = 3.74 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

приняв значение С_ф = 3.9 мкФ, можно найти значение индуктивности

$$L_\phi \rho^2 C_\phi = 7.12 \cdot 3.9 \cdot 10^{-6} \text{ 195 мкГн.}$$

Модель для анализа АЧХ фильтра, нагруженного

на AMN/LISN, приведена на рис. 17, а АЧХ, измененная в точках соединения L1 и L2 и отмеченной как EMI, – на рис. 18. Для моделирования выбрана катушка индуктивности 220 мкГн с допустимым током 7.6 А и активным сопротивлением 10.5 мОм и конденсатор с сопротивлением потерь 4.1 мОм.

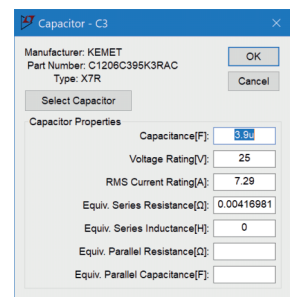
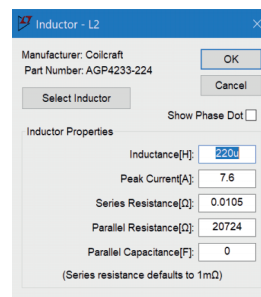
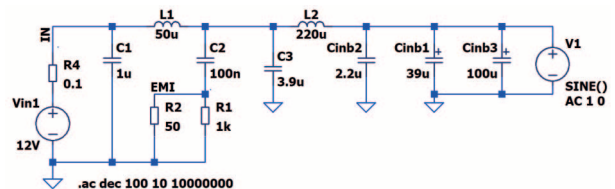


Рис. 17. Модель для анализа АЧХ фильтра, нагруженного на AMN/LISN, и параметры пассивных компонентов фильтра

Модель преобразователя с фильтром ЭМП приведена на рис. 19, а спектр помех, создаваемых преобразователем с использованием помехоподавляющего фильтра – на рис. 20. На рис. 19 элементы фильтра обозначены как L2, C3.

Для контроля уровня помех при моделировании в табл. 1 приведен фрагмент таблицы допустимых уровней кондуктивных помех для двух классов

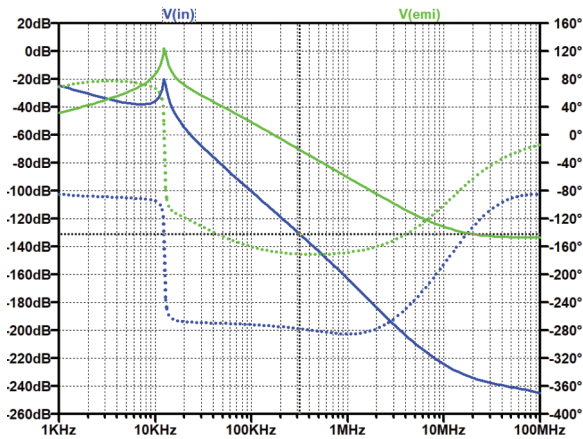


Рис. 18. АЧХ фильтра ЭМП в точке соединения L1 и L2 (синяя), и в точке измерения EMI (зеленая)

устройств в соответствии со стандартом CISPR25, а на рис. 20 нанесены красные линии предельных значений помех для устройств класса 5.

Как следует из рис. 20 уровень помех в диапазоне выше 40 МГц превосходит допустимый уровень на 20 дБ и максимальный уровень помехи формируется на частоте 55 МГц. Следовательно потребуется установить второе звено фильтра ЭМП. На частоте 55 МГц фильтр должен обеспечить затухание не менее 20 дБ.

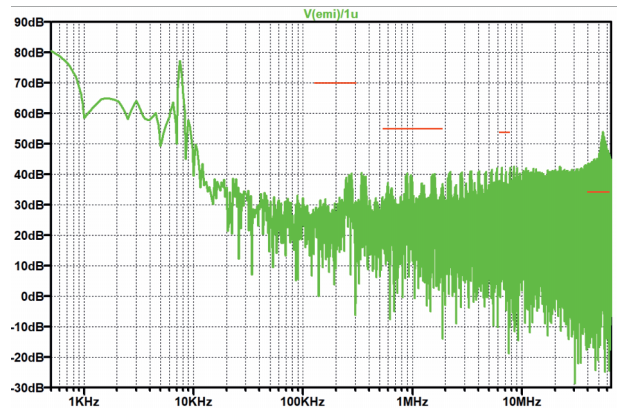


Рис. 20. Спектр помех, создаваемых преобразователем с использованием помехоподавляющего фильтра

С учетом скорости спада АЧХ одного звена ФНЧ 20 дБ/декаду частоту среза второго звена ФНЧ зададим равной 5 МГц, а волновое сопротивление равно волновому сопротивлению первого звена 7.1 Ом.

Рассчитаем значение емкости второго звена фильтра по формуле (2)

$$C_{\phi 2} = 1 / (2\pi f_{c2}) = 1 / (2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 7.1) = 4.48 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

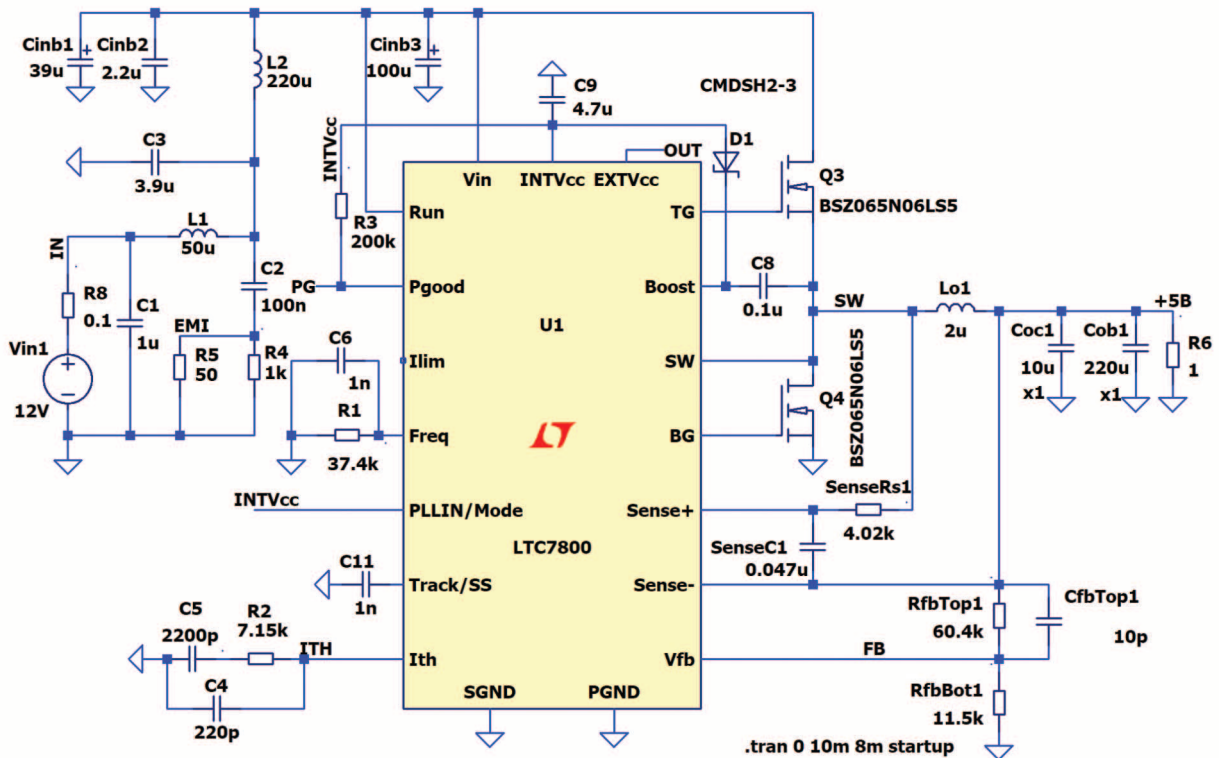


Рис. 19. Модель преобразователя с фильтром ЭМП

Таблица 1. Допустимые уровни кондуктивных помех для двух классов устройств

Полоса частот, МГц	Уровень кондуктивных помех, дБмкВ (пик.)	
	Класс 5	Класс 4
0.15...0.3	70	80
0.53...1.8	54	62
5.9...6.2	53	58
76...108	38	44
41...88	34	40

Приняв значение $C_{\phi 2} = 4.7$ мкФ, можно найти значение индуктивности

$$L_{\phi 2} \rho^2 C_{\phi 2} = 7.12 \cdot 4.7 \cdot 10^{-9} \approx 235 \text{ нГн.}$$

На рис. 21 приведена модель преобразователя с двухзвенным фильтром ЭМП (элементы второго звена L3, C7), а спектр помех – на рис. 22.

Как следует из рис. 22 уровень помех во всем диапазоне частот, регламентированном стандартом CISPR25, лежит ниже допустимых значений для устройств класса 5. Выброс на частоте 10.2 кГц обусловлен высокой добротностью последовательно-колебательного контура, образованного элемен-

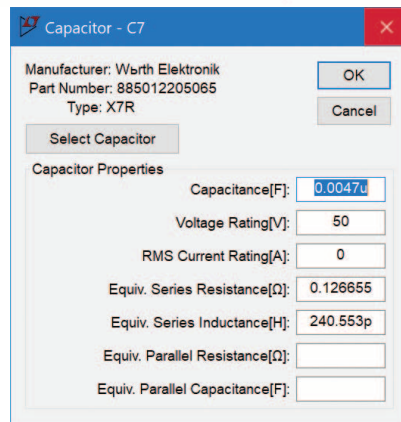
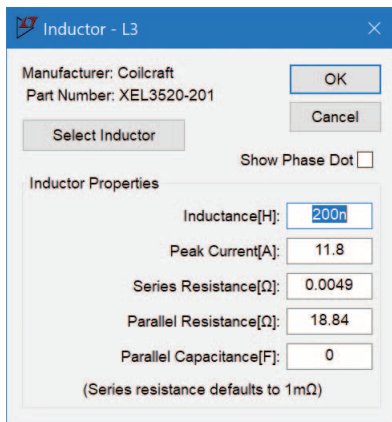
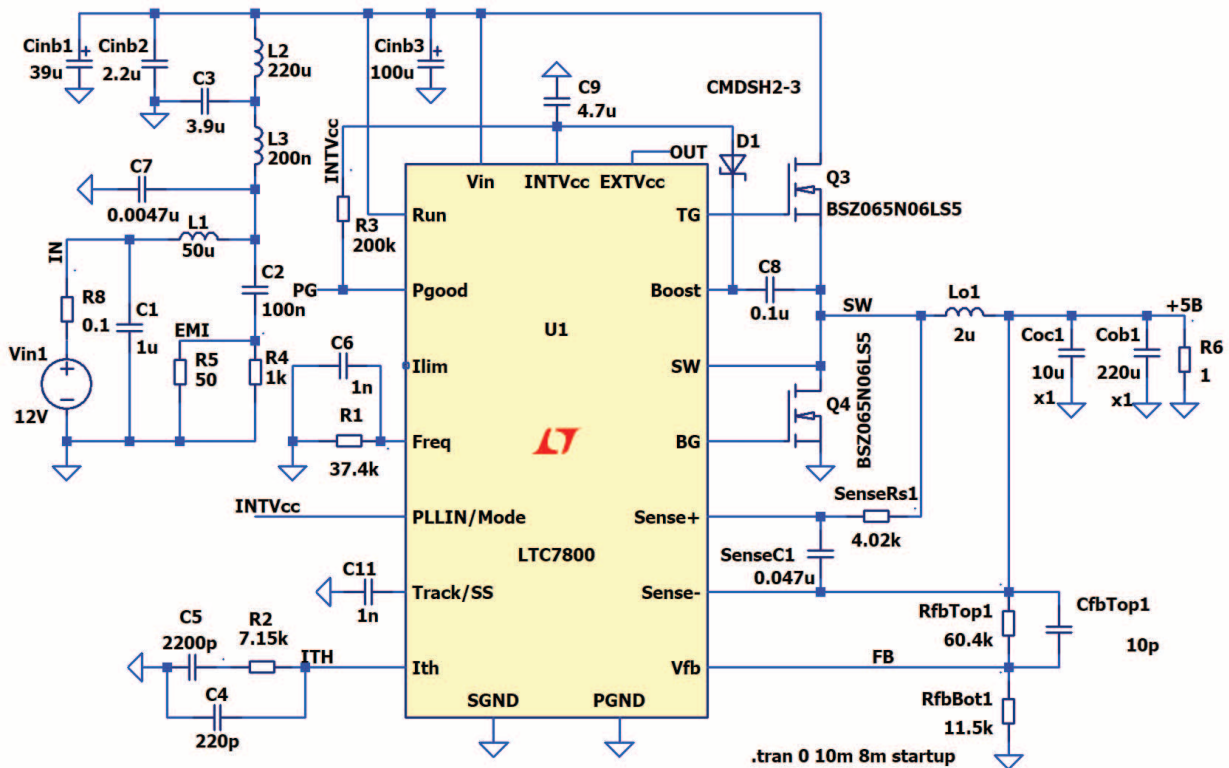


Рис. 21. Модель преобразователя с двухзвенным фильтром ЭМП и параметры элементов второго звена фильтра

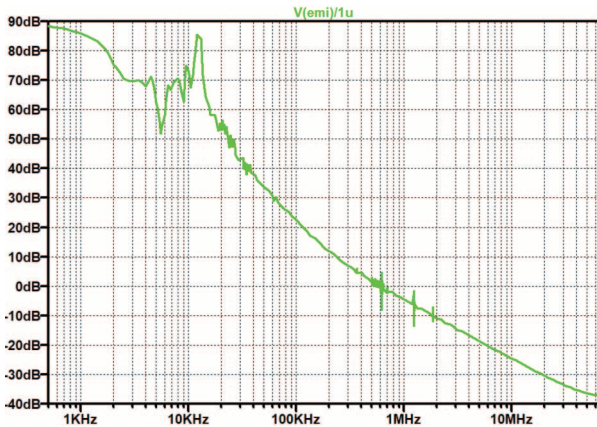


Рис. 22. Спектр помех преобразователя с двухзвенным фильтром ЭМП

тами первого звена фильтра L2, C3. И хотя в этом диапазоне частот уровень помех не нормируется, при необходимости снизить уровень помех на низких частотах достаточно последовательно с конденсатором C3 ввести постоянный резистор, как показано на рис. 23.

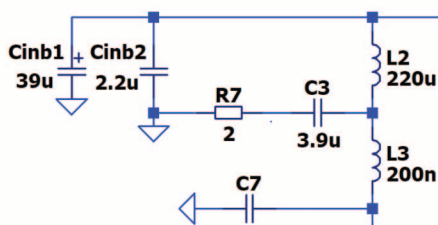


Рис. 23. Добавление резистора R7 для снижения добротности контура L2, C3

Спектр помех при добавлении резистора последовательно с конденсатором C3 приведен на рис. 24.

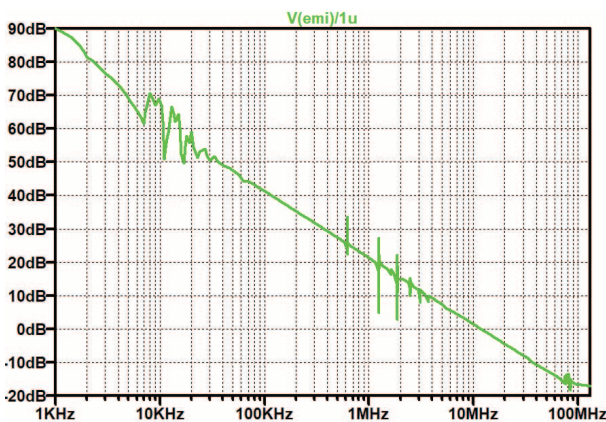


Рис. 24. Спектр помех при добавлении резистора последовательно с конденсатором C3

Как следует из рис. 24, снижение затухания первого звена фильтра на высоких частотах не привело к повышению уровня помех в регламентированных диапазонах выше допустимых значений.

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показывают, что при проектировании частотно-зависимых цепей необходимо обязательно учитывать паразитные параметры пассивных компонентов.

При проектировании широкополосных фильтров, состоящих из нескольких звеньев, следует на каждом этапе проектирования контролировать полученный результат, что позволит более обоснованно выбирать пассивные компоненты для реализации фильтра и корректировать получаемые результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Timothy Hegarty The Engineer’s Guide To EMI In DC-DC Converters (Part 1): Standards Requirements And Measurement Techniques. How2Power Today, December 2017 issue. url: http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1712/articles/H2PToday1712_design_TexasInstruments_Part%201.pdf
2. International standard CISPR 25, Edition 4.0, 2016-10.
3. В. Макаренко Основные возможности программы проектирования импульсных источников питания в LTpowerCADII / Электронные компоненты и системы, №3(231), 2020. с. 37-51. url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/_2020/3_2020/V.Makarenko_Basic%20features%20of%20the%20LTpowerCADII%20switching%20power%20supply%20design%20program.pdf
4. V.V. Makarenko, V.V. Pilinsky, V.K. Gurin The DC/DC converters EMI filters calculation method using LTspice / Технічна електродинаміка, 2022, №2. с. 35-42. <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.035>
5. В. Макаренко Измерение уровня кондуктивных помех с помощью LTspice / Электронные компоненты и системы, №1(233), 2021. с. 51-54. url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2021/1_2021/V.Makarenko_Conducted_Emission_Measurement_with_LTspice_EKIS_1_2021.pdf