

УДК 621.396.669.8

А.М. Лакоза, Е.С. Жечев, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий

Экспериментальное исследование комбинированного дросселя для фильтра подавления синфазных и дифференциальных помех

Рассмотрена комбинированная конструкция защитного дросселя, позволяющая уменьшить число используемых индуктивных компонентов. Изготовлен макет дросселя. Выполнены измерения зависимостей индуктивности и S-параметров от частоты. Экспериментально определена полная индуктивность макета.

Ключевые слова: синфазная помеха, дифференциальная помеха, комбинированный дроссель, помехоподавляющий фильтр.

Одной из первоочередных задач при проектировании радиоэлектронных устройств является уменьшение габаритов защитных помехоподавляющих устройств, поскольку от эффективности уменьшения габаритов и количества используемых индуктивных компонентов напрямую зависят конечные габариты устройства. В работе [1] рассмотрена проблема зависимости размеров защитных устройств от их эффективности. Основной методикой подавления помех обоих типов является использование комбинированных фильтров, рассмотренных в работах [2] и [3], однако подобные типовые решения обладают значительными габаритами из-за большого количества используемых индуктивных компонентов. Исходя из этого, была предложена единая комбинированная конструкция помехоподавляющего защитного дросселя, которая дает возможность подавлять дифференциальную и синфазную составляющие помехи одновременно.

Цель работы – реализовать макет помехоподавляющего защитного дросселя комбинированной конструкции, определить полную индуктивность макета и выполнить анализ частотных характеристик.

Ключевые особенности

Типичная компоновка помехоподавляющего фильтра подразумевает собой обособленные индуктивные элементы. На рис. 1 представлен помехоподавляющий фильтр с типичной обособленной компоновкой индуктивных элементов, где L_{CM} – синфазный защитный дроссель, L_{DM} – обособленные дифференциальные защитные дроссели.

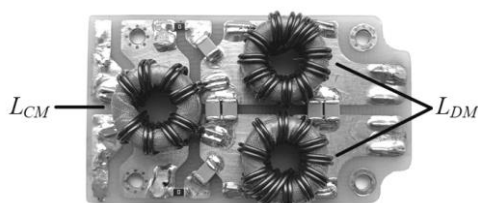


Рис. 1. Помехоподавляющий фильтр

Предложенный комбинированный помехоподавляющий дроссель основан на гибридной структуре, которая объединяет в себе ключевые особенности дифференциальных и синфазных защитных дросселей, позволяя подавлять оба типа помех одновременно при существенном сокращении конечного числа используемых индуктивных компонентов [4].

В сборной конструкции сердечника, при которой в верхней части основного сердечника большего диаметра располагаются два дополнительных сердечника меньших диаметров, обмотки обеих ветвей вместе образуют четыре катушки, из которых две нижние катушки отвечают за подавление помехи синфазного вида, а две верхние – за подавление помехи дифференциального типа [5]. На рис. 2 представлена структурная схема комбинированного дросселя [6, 7].

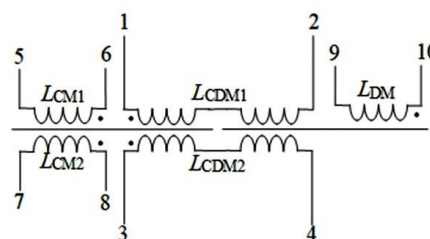


Рис. 2. Структурная схема комбинированного дросселя

Измерение параметров основных магнитосвязанных индуктивностей прототипа комбинированного дросселя выполнено в диапазоне частот 0–200 кГц. Измерения контрольных обмоток на всех участках сердечника производилось на фиксированной частоте 1 кГц [8]. В силу конструктивных особенностей комбинированной конструкции помехоподавляющего дросселя для проверки достоверности полученных значений индуктивности необходимо реализовать дополнительные контрольные обмотки на синфазном (см. рис. 2, L_{CM1} , L_{CM2}) и дифференциальном (см. рис. 2, L_{DM}) участках сердечника. На рис. 3 изображен реализованный прототип комбинированного помехоподавляющего дросселя.

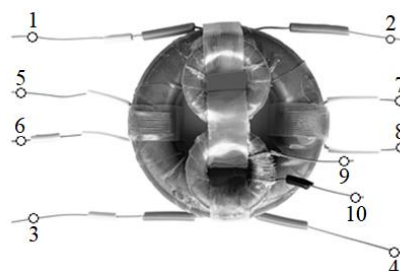


Рис. 3. Прототип комбинированного дросселя

В результате измерения были получены значения индуктивностей для соответствующих частей

прототипа. На рис. 4 изображена частотная зависимость индуктивности основных магнитосвязанных обмоток L_{1-2} и L_{3-4} .

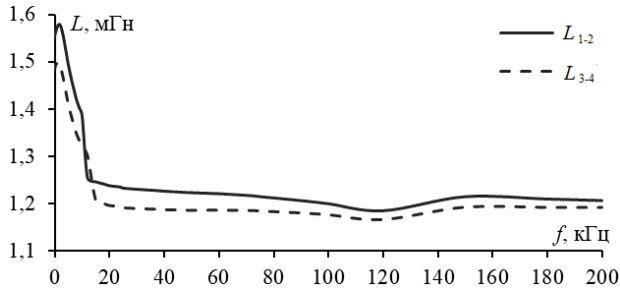


Рис. 4. Частотная зависимость индуктивности основных магнитосвязанных обмоток L_{1-2} и L_{3-4}

Из рисунка видно, что помимо небольшого расхождения параметров основных магнитосвязанных обмоток с ростом частоты происходит слабое уменьшение значения индуктивности. В таблице приведены результаты измерения контрольных обмоток на фиксированной частоте 1 кГц.

Результаты измерений контрольных обмоток

Область сердечника	Индуктивность, мкГн
L_{5-6} (синфазная)	530
L_{7-8} (синфазная)	537
L_{9-10} (дифференциальная)	929

Стоит отметить, что суммарная индуктивность контрольных обмоток L_{5-6} , L_{7-8} и L_{9-10} соответствует полной индуктивности основных магнитосвязанных обмоток $L_{1-2, 3-4}$ на частоте 1 кГц

На рис. 5 изображена частотная зависимость индуктивности основных магнитосвязанных обмоток в синфазном и дифференциальном режимах включения.

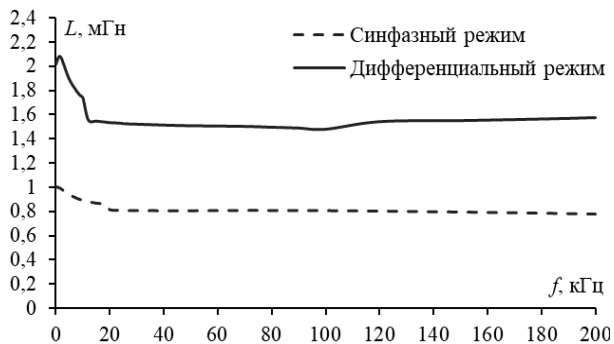


Рис. 5. Частотная зависимость индуктивности основных магнитосвязанных обмоток L_{1-2} и L_{3-4}

Можно отметить, что в дифференциальном режиме включения полная индуктивность основных магнитосвязанных обмоток увеличивается примерно в два раза на всем измеряемом диапазоне частот относительно синфазного режима включения. Наблюдаемое явление обусловливается ключевой особенностью исполнения магнитосвязанных индуктивностей, связанной с тем, что в данном режиме включения магнитные потоки благодаря замкнутому маг-

нитному сердечнику складываются, приводя к увеличению общего значения индуктивности в данном режиме включения. Для оценки рабочего диапазона характеристик прототипа произведено измерение коэффициента передачи в диапазоне 0–10 МГц. На рис. 6 приведена частотная зависимость модуля коэффициента передачи прототипа комбинированного дросселя в синфазном и дифференциальном режимах включения.

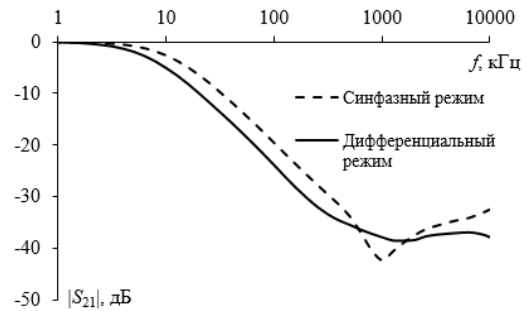


Рис. 6. Частотная зависимость $|S_{21}|$ прототипа комбинированного дросселя в синфазном и дифференциальном режимах включения

Из полученной зависимости видно, что обеспечивается достаточно широкая полоса пропускания: частота среза прототипа составляет около 8 кГц в дифференциальном режиме и около 12 кГц в синфазном режиме, а крутизна спада характеристики — около 20 дБ/дек. Рост характеристики на частотах выше 1 МГц обусловливается перенасыщением материала используемых сердечников.

Заключение

Реализован прототип комбинированного помехоподавляющего дросселя. Определены его основные характеристики и полная индуктивность. Получены экспериментальные данные, необходимые для дальнейших усовершенствований методики изготовления и оценки параметров комбинированных помехоподавляющих защитных дросселей.

Экспериментальное исследование проведено в центре коллективного пользования «Импульс», Россия, Томск. Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEWM-2020-0041).

Литература

- Zare F. EMI issues in modern power electronic systems // IEEE Power Electron. Newsletter. – 2009. – No. 221. – P. 53–58.
- Guo T. Separation of the common-mode and differential-mode-conducted EMI noise / T. Guo, D. Chen, F. Lee // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1996. – Vol. 11, No. 3. – P. 480–488.
- Kamikura M. Investigation on the mode conversion between common-mode and differential-mode noises in EMI filters for power electronics circuits / M. Kamikura, Y. Murata, A. Nishizawa // International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Belgium, 2013.
- Лакоза А.М. Исследование характеристик помехоподавляющих фильтров с различной компоновкой индуктивных элементов / А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий // Матер. докл. XV Между-

нар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 мая 2019 г. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 2. – С. 45–48.

5. Nan L. A common mode and differential mode integrated EMI filter / L. Nan, Y. Yugang // 2006 CES/IEEE 5-th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Shanghai, China, 2006. – 5 p.

6. Kotny J.C. High-frequency model of the coupled inductors used in EMI filter / J.C. Kotny, X. Margueron, X.N. Idir // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27 (6). – P. 2805–2812.

7. Tan W. A common-mode choke using toroid-EQ mixed structure / W. Tan, C. Cuellar, X. Margueron, N. Idir // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28 (1). – P. 31–35.

8. Shiraki Y. Inductance analysis for compact dual-mode choke considering magnetic saturation / Y. Shiraki, S. Yoneda, K. Omae, T. Nagao // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2018. – Vol. 1. – P. 630–635.

Лакоза Александр Михайлович
М.н.с. НИЛ ФИЭМС ТУСУРа
Эл. почта: alexandrlakoza@mail.ru
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Тел.: +7-962-781-10-18

Жечев Евгений Сергеевич
М.н.с. НИЛ ФИЭМС ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Эл. почта: zhechev@tu.tusur.ru

Костелецкий Валерий Павлович
М.н.с. НИЛ ФИЭМС ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Эл. почта: kosteletskiy@tu.tusur.ru

Заболоцкий Александр Михайлович
Д-р техн. наук, профессор каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru