

УДК 621.318.4

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-53-59

СИНФАЗНЫЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДРОССЕЛИ

канд. техн. наук, доц. Д. А. ДОВГЯЛО, В. А. ТИХОНОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);

канд. физ.-мат. наук, доц. К. Х. БАБАМУРАТОВ
(Термезский инженерно-технологический институт, Узбекистан)

Описаны типы помех в источниках питания и преобразователях DC/DC. Приведены принцип работы, параметры и конструктивные исполнения синфазных и дифференциальных дросселей. Установлены особенности фильтров, применяемых в цепях питания и в сигнальных интерфейсах. Приведенные данные могут использоваться для проектирования синфазных дросселей и электротехнических устройств их содержащих.

Ключевые слова: синфазные дроссели, дифференциальные дроссели, источники питания, синфазный сигнал, дифференциальный сигнал, электромагнитные помехи.

Введение. Стабильная работа слаботочной и логической части электротехнических устройств во многом зависит от надёжности и качества электрического питания. Ко вторичным источникам питания цифровой части оборудования предъявляются повышенные требования по стабильности и значению формируемого напряжения. Уровень электромагнитных помех должен быть минимальным и не оказывать дестабилизирующего влияния на работу электрической схемы.

В настоящее время для снижения уровня электромагнитных помех, а также решения вопросов электромагнитной совместимости электротехнических устройств применяются следующие конструктивные и схемотехнические методы:

- использование экранов в качестве корпусов электронных приборов;
- экранирование отдельных частей, защитные оплетки;
- грамотное проектирование печатных плат для снижения паразитных параметров;
- использование фильтров помехоподавления.

Цель работы: изучение принципов действия, характеристик, областей применения и особенностей синфазных и дифференциальных дросселей для использования их в современных электронных устройствах.

Синфазные дроссели являются эффективными фильтрами помехоподавления и включаются в состав аналоговых и импульсных блоков питания. Синфазные дроссели выполняют функцию защиты электрооборудования, обеспечивают качественную фильтрацию и стабилизацию электрического тока, уменьшают шумы и гармоники в электросети, а также препятствуют дальнейшему распространению электромагнитных помех [1].

Кроме эффективного подавления помех в аналоговых схемах, синфазные дроссели также применяют в цифровых устройствах (например, в интерфейсах USB, CAN, LVDS, DVI, HDMI и др.).

Основными источниками помех являются импульсные преобразователи одного постоянного напряжения в другое (DC/DC) и источники питания, преобразующие переменное напряжение питающей сети в постоянное напряжение (AC/DC). Существует несколько способов уменьшения коммутационных помех, создаваемых импульсными преобразователями: увеличение длительности фронтов коммутации силовых ключей, оптимальная топология печатной платы, применение помехоподавляющих компонентов, использование топологии силовых каскадов с аккумулярованием энергии индуктивности рассеяния трансформаторов [2].

На рисунке 1 в качестве примера приведены нормируемые уровни кондуктивных помех в стандарте ГОСТ 30805.22–2013 (CISPR 22:2006) для оборудования классов А (рисунок 1, а) и Б (рисунок 1, б) [2].

Принцип работы любого дросселя, вне зависимости от места применения дросселя в схеме, заключается в использовании его реактивного сопротивления. Реактивное сопротивление X_L зависит от частоты протекающего через него тока I_H и индуктивности:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (1)$$

где L – индуктивность обмотки дросселя, Гн;
 f – частота сигнала, Гц.

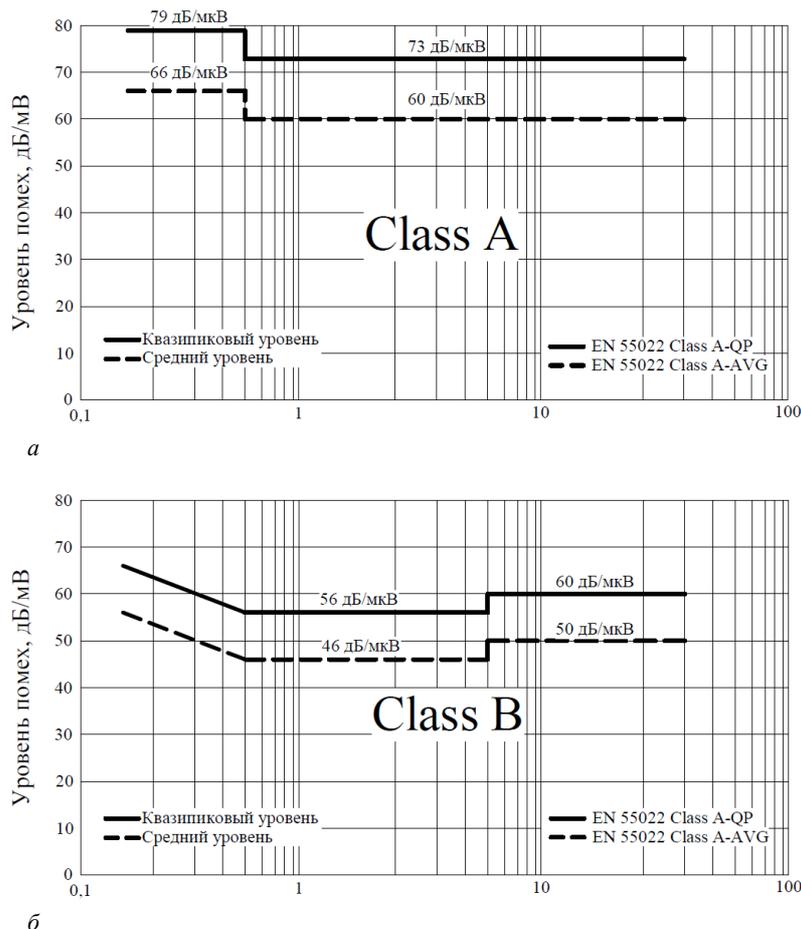


Рисунок 1. – Уровни кондуктивных помех в ГОСТ 30805.222013 (CISRP 22:2006) для оборудования классов А (а) и Б (б)

Схема электрическая и схема намотки тороидального синфазного дросселя показаны на рисунке 2.

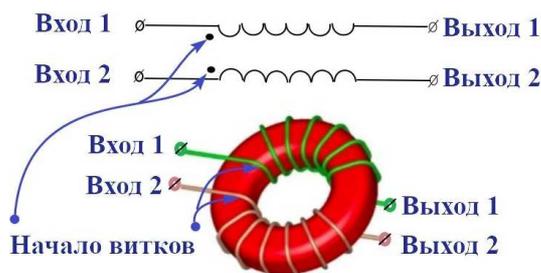


Рисунок 2. – Схема электрическая и схема намотки тороидального синфазного дросселя

Электромагнитные помехи разделяются на две категории: дифференциальные помехи и синфазные помехи (помехи от земли).

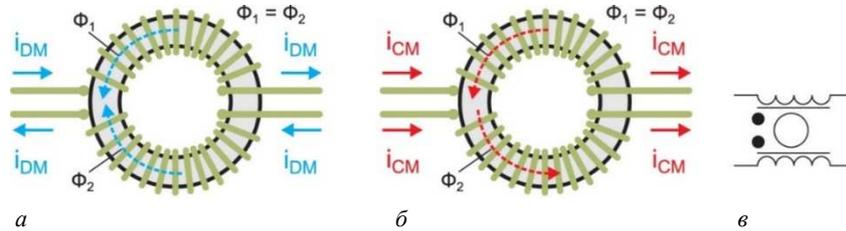
Дифференциальная помеха – помеха, наведённая между проводами цепи. Ток дифференциального режима действует между двумя сигнальными линиями, а направление его проводимости и форма волны соответствуют сигнальному току. Дифференциальные помехи имеют одинаковую амплитуду и сдвиг фаз, равный 180° [3].

Синфазная помеха – помеха, наводящаяся одновременно на обоих проводах линии связи относительно земли. Ток синфазной помехи действует между сигнальной линией и заземляющим проводом, и половина его протекает через две сигнальные линии отдельно в одном направлении, при этом заземляющий провод является общей цепью. Синфазные помехи имеют одинаковую амплитуду и фазу.

Схема включения дросселя для фильтрации синфазной помехи приведена на рисунке 3. При таком включении рабочие токи i_{DM} и соответственно, магнитные потоки в этих катушках текут в противоположных направлениях, поэтому магнитное поле в сердечнике уравнивается. Синфазные помехи (токи i_{CM})

при таком включении наводят магнитные потоки, которые действуют в одном направлении. При этом дроссель как магнитная система оказывает сопротивление изменению магнитных потоков и, как следствие, ослабляет действие синфазных помех.

Для дифференциальной помехи (по природе такой же, как полезный сигнал) магнитные потоки «самоуничтожаются» и индуктивное сопротивление отсутствует [4].

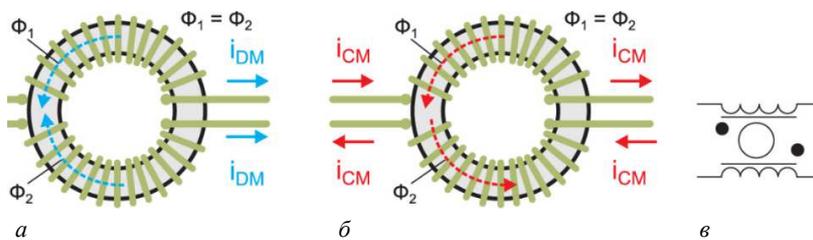


***a* – полезный сигнал; *б* – синфазная помеха; *в* – фазировка**

Рисунок 3. – Схема синфазного дросселя (фильтрация синфазной помехи)

Схема включения дросселя для фильтрации дифференциальной помехи приведена на рисунке 4. При таком включении рабочие токи i_{DM} и, соответственно, магнитные потоки в этих катушках текут в одинаковом направлении, поэтому магнитное поле в сердечнике уравнивается. Дифференциальные помехи (токи i_{CM}) при таком включении наводят магнитные потоки, которые действуют в одном направлении. При этом дроссель, как магнитная система, оказывает сопротивление изменению магнитных потоков и, как следствие, ослабляет дифференциальные помехи.

Для синфазной помехи потоки «самоуничтожаются» и индуктивное сопротивление отсутствует.



***a* – полезный сигнал; *б* – дифференциальная помеха; *в* – фазировка**

Рисунок 4. – Схема дифференциального дросселя (фильтрация дифференциальной помехи)

Рассмотрим требования, предъявляемые к синфазным и дифференциальным дросселям, для их практического применения в блоках питания аппаратуры.

1. Высокая начальная магнитная проницаемость. Дроссель должен иметь большое индуктивное сопротивление, в этом случае эффект подавления помех проводимости намного выше.

2. Высокая магнитная сила насыщения (индукция): в 2-3 раза выше, чем у феррита, т. к. сердечник не должен входить в насыщение в случае воздействия на него сильных токовых помех.

Насыщение сердечника приводит к снижению магнитной проницаемости μ и индуктивности дросселя L , которые приводят к искажению формы тока, протекающего через дроссель.

На рисунке 5 показано искажение формы тока синусоидального напряжения дросселя на разных участках кривой намагничивания: насыщенном и ненасыщенном [5].

Коэффициент искажения формы сигнала зависит также от отношения реактивного сопротивления дросселя к активному сопротивлению нагрузки X_L / R_H [6]. То есть, при насыщении сердечника, чем меньше данное соотношение, тем меньше степень искажения формы напряжения [7].

Максимальная рабочая индукция в сердечнике B_m , находится из условия

$$B_m \leq (0,7 \dots 0,9) B_S, \tag{2}$$

где B_S – индукция насыщения сердечника;

$$B_m = \frac{\mu_e \mu_0 \omega I_m}{l}, \tag{3}$$

где μ_e – относительная магнитная проницаемость сердечника;

- μ_0 – магнитная постоянная, $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;
 I_m – максимальный ток в дросселе, А;
 ω – количество витков в обмотке;
 l – длина средней линии магнитопровода, м.
 3. Широкий диапазон рабочих частот фильтрации.

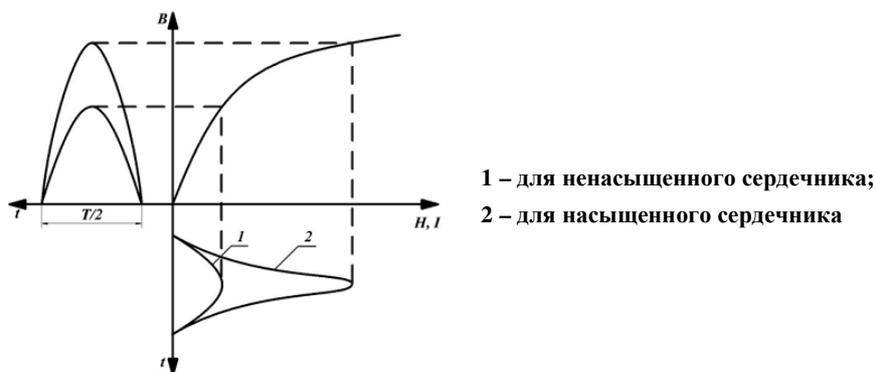


Рисунок 5. – Форма тока, протекающего через дроссель

Качественное применение синфазных и дифференциальных дросселей не представляется возможным без учета и анализа их основных технических характеристик.

1. Индуктивность дросселя L определяет его способность ограничивать изменения тока [8]. Чем выше индуктивность, тем лучше дроссель способен фильтровать высшие гармоники:

$$L = \frac{\mu_e \mu_0 \omega^2 S}{l}, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода;
 l – длина средней линии магнитопровода.

При проектировании часто используется понятие индуктивности одного витка A_L , Гн. Данное значение является зачастую справочным и находится по формуле [4]

$$A_L = \frac{\mu_e \mu_0 S}{L_e}. \quad (5)$$

При использовании данного параметра индуктивность L , Гн, рассчитывается следующим образом:

$$L = A_L \cdot N^2. \quad (6)$$

где N – количество витков дросселя.

2. Сопротивление дросселя, Ом, включает в себя как активное, так и индуктивное сопротивление обмоток (справочно указывается импеданс на тестовой частоте 100 МГц).

3. Максимальный ток, который дроссель способен переносить без потери эффективности.

4. Напряжение, при котором дроссель может безопасно работать. Уровень напряжения определяется требованиями конкретной системы.

Напряжение на дросселе определяется индуктивностью дросселя L и параметрами тока, протекающего через дроссель, а именно его частотой и величиной:

$$U_L = 2\pi f L I, \quad (7)$$

где I – ток в обмотке дросселя, А;

L – индуктивность обмотки дросселя, Гн;

f – частота сигнала, Гц.

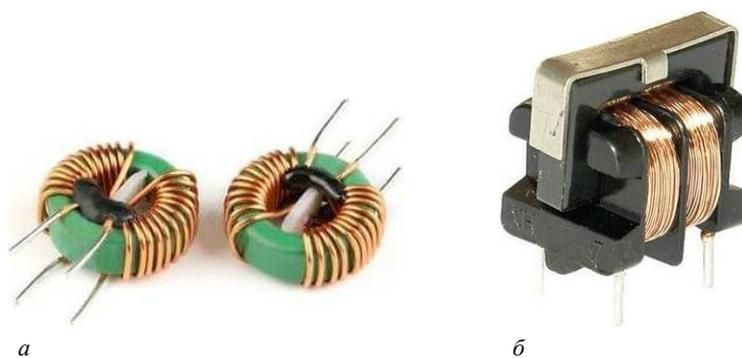
С учетом (3) – (5) формула для напряжения (7) примет вид

$$U_L = 2\pi f L I = \frac{2\pi f \omega S B_m}{k_a}, \quad (8)$$

где k_a – коэффициент амплитуды тока (напряжения) дросселя.

5. Частота работы системы, для которой предназначен дроссель.
6. Температурные характеристики дросселя определяют его способность поддерживать работоспособное состояние в различных температурных режимах.
7. Эффективность дросселя определяет, как мало потерь электрической энергии происходит при его использовании. Она может выражаться в процентах и зависит от конструкции и материалов дросселя.
8. Тип монтажа, конструкция, размеры (для портативных устройств с высокой степенью интеграции весьма важна высота профиля над печатной платой).

При выборе сердечника для синфазного дросселя следует учитывать форму (рисунок 6), геометрические размеры, диапазон сигнальных частот, работоспособность в условиях повышенных температур и экономические показатели. Обычно используемые сердечники имеют U-образную, E-образную и кольцевую форму. Возможны исполнения сердечников дросселей из таких материалов, как High Flux, MPP, Kool Mμ, Sendust, Amoflux, Powder Iron, ферритах [9].



а – тороидальный; б – с Ш-образным сердечником

Рисунок 6. – Синфазный дроссель [10]

В таблице 1 представлено сравнение синфазных дросселей с тороидальным и Ш-образным сердечниками.

Таблица 1. – Сравнение характеристик синфазных дросселей с различными типами сердечников

| Тип сердечника | Достоинства | Недостатки |
|----------------|--|---|
| Тороидальный | Меньшие потери из-за оптимальной тороидальной формы | Требуется сложное оборудование для намотки, либо ручная намотка |
| | | При деформации витков сердечника возможно уменьшение начальной магнитной проницаемости |
| | | Необходимость разделения обмоток друг от друга для соблюдения требований по пробивному напряжению |
| | | При установке на печатную плату требуется дополнительная подложка |
| Ш-образный | | Необходимость изоляции сердечника |
| | Обмотки разделены секциями каркаса, что уменьшает их влияние друг на друга | Необходимость использования каркаса |
| | Возможность автоматизации намотки | Повышенный нагрев |
| | Конструкция предназначена для установки на печатную плату | |
| | Низкая стоимость | |

На рисунке 7 показан пример использования синфазного дросселя для фильтрации выходного напряжения в DC/DC-преобразователях.

Первая обмотка дросселя включена последовательно в цепь выходного напряжения V_{OUT+} , вторая обмотка включена также последовательно в цепи обратного тока V_{OUT-} . Сопротивление дросселя для устранения синфазных помех выбирается таким образом, чтобы его максимальное значение попало в спектр синфазных помех с самой большой мощностью. Как правило, диапазон частот помех составляет от 10 до 100 МГц, однако благодаря высокой проницаемости материала сердечника синфазные дроссели эффективно подавляют синфазные помехи и шумы в более широком диапазоне частот.

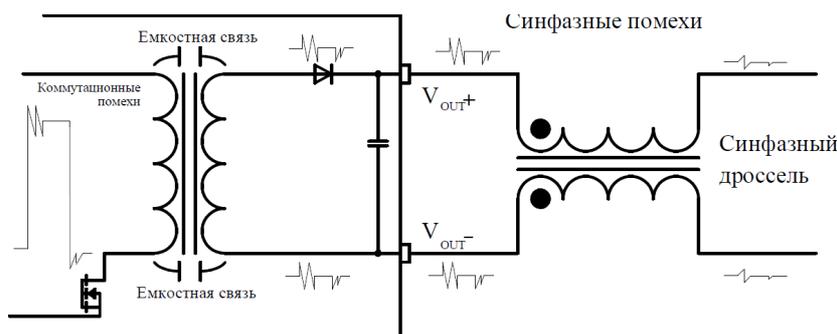


Рисунок 7. – Пример использования синфазного дросселя для фильтрации выходного напряжения в DC/DC-преобразователях [10]

Размещение дросселя на печатной плате. Для эффективного функционирования входного и выходного фильтров решающее значение имеет их компоновка на печатной плате. Входной конденсатор должен быть установлен как можно ближе к входным выводам преобразователя. Чтобы избежать ухудшения фильтрации необходимо использовать конденсаторы хорошего качества с ESR в миллиомах, а импеданс любого соединения между конденсатором и входами преобразователя не должен превышать нескольких мОм. Используя приведенное ниже уравнение, можно выполнить расчет активного сопротивления печатного проводника R_{Π} :

$$R_{\Pi} = \frac{\rho l}{hb} [1 + \alpha_R (T - 25)], \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление меди;
 l – длина печатного проводника;
 h – толщина печатного проводника;
 b – ширина печатного проводника;
 α_R – температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha_R = +0,393 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$);
 T – температура печатного проводника.

В таблице 2 приведена информация по применению синфазных и дифференциальных дросселей.

Таблица 2. – Применение синфазных и дифференциальных дросселей

| Синфазный дроссель | Дифференциальный дроссель |
|---|---|
| в качестве ЭМИ-фильтров (предназначенных для подавления высокочастотных шумов и помех) в любой электронной аппаратуре | в сетевых фильтрах электромагнитной совместимости (ЭМС) |
| в цепях CAN-интерфейсов автомобильных систем | для входных и выходных фильтров ЭМС AC/DC и DC/DC импульсных источников питания |
| в сигнальных цепях xDSL-модемов | выходной дроссель (индуктор) в импульсных источниках питания |
| | дроссель корректора коэффициента мощности |

Заключение. Синфазные дроссели, работают в цепях фильтров постоянного или переменного тока низкой частоты, их преимуществом является низкое сопротивление постоянному току, поэтому их с успехом можно применить в низковольтных цепях, практически без падения напряжения на обмотках.

Фильтры сигнального типа, реализованные на основе синфазных дросселей, не критичны к сопротивлению обмотки, т. к. нагрузка в таких цепях является высокоомной и обмотки рассчитываются на небольшие токи. В таких дросселях обмотки наматывают из эмаль-проводов небольшого диаметра и габариты сердечников выбирают минимальными. Для фильтров сигнального типа характерно исполнение в корпусах для smd-монтажа.

Синфазный дроссель, по сути, представляет собой двусторонний фильтр: с одной стороны, он должен фильтровать синфазные электромагнитные помехи в сигнальной линии, с другой стороны, он должен подавлять излучение электромагнитных помех, чтобы не влиять на нормальную работу других устройств – электронного оборудования, находящегося в той же электромагнитной среде.

Синфазные дроссели не наматываются бифилярно для уменьшения межобмоточной емкости – синфазные помехи должны взаимно компенсироваться. При секционировании емкость вход-выход, имеющая паразитный характер, будет меньше.

В сетевых фильтрах импульсных источников питания применение синфазного дросселя обязательно. Однако не это является основной сферой их применения, а интерфейсы и каналы связи. В каналах связи различных интерфейсов и цепях питания источников питания синфазные дроссели активно подавляют шумы, в несколько раз превышающие амплитуду полезного сигнала, уровень которого может быть предельно малым.

Фильтры, построенные на синфазных дросселях, эффективнее всего подавляют дифференциальные помехи. При этом сохраняется линейная зависимость пропускных характеристик фильтра, неподконтрольная уровню сигнала. Также сердечник синфазного дросселя не насыщается, из-за чего его параметры остаются неизменными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. – 2017. – № 7. – С. 124–125.
2. Боков Г. Электромагнитные помехи импульсных преобразователей: в 3 ч. // Электронные компоненты. – 2018. – № 3; 7; 8. – С. 8–11; 14–17; 16–18.
3. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. – 3-е изд., пересм. и доп.; пер. с англ. Попова В. В. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 476 с.
4. Белополюский И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: ЁЁ Медиа – 2018. – 161 с.
5. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования: учеб. пособие. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М. – 2013. – 269 с.
6. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: для любителей и профессионалов. – М.: Солон-Р, 2001. – 245 с.
7. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование. – Киев: МК-Пресс; СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2013. – 256 с.
8. Рычина Т. А., Зеленский А. В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы: учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
9. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
10. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. – 2015. – № 8. – С. 74–82.

REFERENCES

1. Rentjuk, V. (2017). Jelektromagnitnaja sovместimost': problema, ot reshenija kotoroj ne uiti. *Komponenty i tehnologii*, (7), 124–125. (In Russ.).
2. Bokov, G. (2018). Jelektromagnitnye pomehi impul'snyh preobrazovatelej: v 3 ch. *Jelektronnye komponenty*, (3), (7), (8), 8–11; 14–17; 16–18. (In Russ.).
3. Makliman, V. (2016). *Proektirovanie transformatorov i drossieli. Spravochnik [Transformer and Inductor Design: Handbook]*. Moscow: DMK Press. (In Russ.).
4. Belopol'skii, I. I. (2018). *Raschet transformatorov i drossieli maloi moshchnosti [Calculation of transformers and low power chokes]*. Moscow: EE Media. (In Russ.).
5. Gruntovich, N. V. (2013). *Montazh, naladka i ekspluatatsiya elektrooborudovaniya [Installation, adjustment and operation of electrical equipment]*. Minsk: Novoe znanie; Moscow: INFRA-M. (In Russ.).
6. Semenov, B. Ju. (2001). *Silovaja jelektronika: dlja ljubitelej i professionalov*. Moscow: Solon-R. (In Russ.).
7. Moskatov, E. A. (2013). *Silovaja jelektronika. Teorija i konstruirovanie*. Kiev: MK-Press; St. Petersburg: KORONA-VEK. (In Russ.).
8. Rychina, T. A., Zelenskij, A. V. (1989). *Ustrojstva funkcional'noj jelektroniki i jelektoradojelementy*. Moscow: Radio i svjaz'. (In Russ.).
9. Volgov, V. A. (1977). *Detali i uzly radiojelektronnoj apparatury*. Moscow: Jenergija. (In Russ.).
10. Roberts, S. (2015). Reshenija problemy pul'sacij i pomeh DC/DC-preobrazovatelej: vhodnaja i vyhodnaja fil'tracija. *Komponenty i tehnologii*, (8), 74–82. (In Russ.).

Поступила 09.02.2024

COMMON-MODE AND DIFFERENTIAL CHOKES

D. DAUHIALA, V. TIKHANOVICH

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk);

K. BABAMURATOV

(Termez Institute of Engineering and Technology, Uzbekistan)

The types of interference in power supplies and DC/DC converters are described. The principle of operation, parameters and design designs of common-mode and differential chokes are given. The features of filters used in power supply circuits and in signal interfaces are established. These data can be used to design common-mode chokes and electrical devices containing them.

Keywords: common-mode chokes, differential chokes, power supplies, common-mode signal, differential signal, electromagnetic interference.