УДК 621.316.721.1

М.С. ЛУРЬЕ, д.т.н., профессор (СибГТУ)
А.С. ФРОЛОВ, к.т.н., доцент (СибГТУ)
О.М. ЛУРЬЕ, к.т.н., доцент (СибГТУ)
г. Красноярск

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОЩНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Современным системам точного электропривода а также автоматизированным установкам необходимы мощные источники питания магнитных систем (более 10 кВт). К таким источникам питания должны предъявляться следующие требования: малые пульсации тока и напряжения (менее 0,01); широкий диапазон изменения тока в нагрузке (до 100).

Такие источники могут строятся на управляемых выпрямителях (УВ) или широтно-импульсных преобразователях (ШИП).

На выходе УВ и ШИП всегда присутствуют пульсации напряжения, которые существенно возрастают при регулировании выходного напряжения преобразователей [1].

Недостатком ШИП является высокий уровень электромагнитных помех, которые нарушают работу расположенной поблизости электронной аппаратуры, что вынуждает принимать сложные меры по экранированию всего силового оборудования.

В УВ при глубоком регулировании частота пульсаций значительно ниже, чем в ШИП, поэтому они создают меньше электромагнитных помех, но требуют специальных мер по снижению пульсаций напряжения и тока в нагрузке.

Нагрузкой в данных устройствах является мощный электромагнит с сердечником. Индуктивный характер нагрузки способствует снижению пульсаций тока, но наличие потерь энергии в цельном сердечнике и значительная индуктивность рассеяния приводит к тому, что реальная проводимость такой нагрузки для первой гармоники пульсаций может быть значительно больше, чем у идеальной активно-индуктивной цепи.

Так, например, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) электромагнита ядерного магнитного анализатора на ток 100 А, показана на рисунке 1 (сплошная линия). Для сравнения, пунктирной линией показана АЧХ идеальной активно-индуктивной цепи с теми же параметрами активного сопротивления и индуктивности. Там же приведена схема замещения электромагнита.

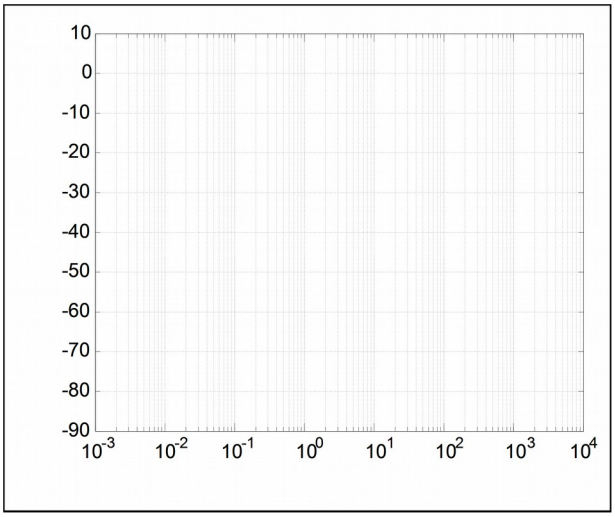


Рисунок 1 – АЧХ и схема замещения мощного электромагнита: RM и LM -сопротивление и индуктивность обмотки электромагнита; LS и RS – индуктивность рассеяния и эквивалентное сопротивление потерь в сердечнике

Как известно, использование пассивных фильтров для снижения пульсаций в мощных выпрямителях нецелесообразно, так как требует наличия дросселей со значительной индуктивностью и конденсаторов большой емкости.

В работе [2] нами рассмотрена возможность применения компенсаторов пульсаций (КП), которые представляют собой генераторы переменного компенсирующего напряжения, которое направлено в противофазе к напряжению пульсаций. Такие генераторы могут включаться параллельно и последовательно с нагрузкой. Можно показать [1], что в большинстве случаев, когда внутреннее сопротивление выпрямителя мало по отношению к сопротивлению нагрузки, предпочтительна последовательная схема КП, поэтому, далее мы будем рассматривать только данную схему.

Для введения компенсирующего напряжения в силовую цепь можно использовать трансформаторы.

Основным недостатком последовательной компенсации пульсаций являются необходимость применения трансформатора рассчитанного на полный ток нагрузки и подмагничивание его сердечника. Поэтому трансформатор изготавливается с зазором или размагничивающей обмоткой.

Очевидно, что амплитуда компенсирующего напряжения должна быть равна, а фаза сдвинута на $180° \cdot (2k - 1)$ по отношению к компенсируемой гармонике пульсаций.

Определим требования, которые должны предъявляться к амплитудам и фазам компенсирующих напряжений. Для этого можно

найти результирующее напряжение, полученное как разность напряжений i-й гармоники компенсируемого и компенсирующего напряжений (ΔU_i), и получить выражение для коэффициента подавления напряжения i-й гармоники K_i;

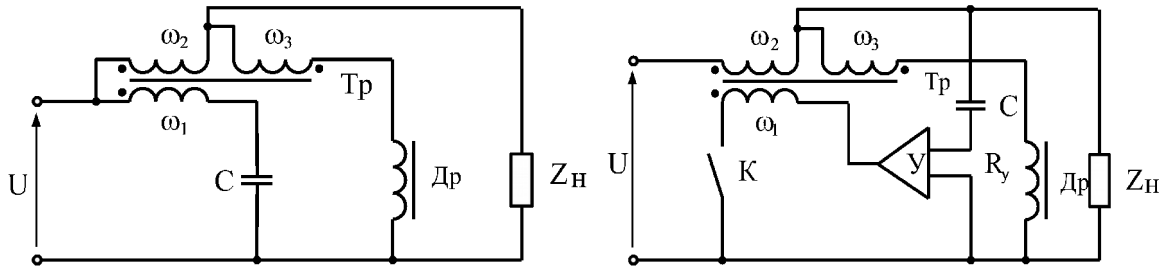
$$K_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + 1 - 2A_i \cos\phi_i}} = \frac{U_i}{\Delta U_i}, \qquad (1)$$

где $A_i = U_{ki}/U_i$ - амплитудная характеристика компенсатора пульсаций на *i*-й гармонике; ΔU_i - амплитуда напряжения *i*-й гармоники; ϕ_i - допустимое рассогласование фаз между компенсируемым и компенсирующим напряжениями.

По формуле (1) можно рассчитать области, в которых должны лежать A_i и ϕ_i - на частоте *i*-и гармоники, чтобы осуществить подавление пульсаций в K_i раз.

По методу получения компенсирующего напряжения схемы КП можно разделить на пассивные и активные.

На рисунке 2 показаны схемы одного из пассивных и активных КП.



а) б)

Рисунок 2 – Пассивный и активный компенсаторы пульсаций

На рисунке 2,а обмотка ω_1 представляет собой датчик пульсаций напряжения выпрямителя. Конденсатор С служит для исключения постоянной составляющей напряжения. Переменная составляющая этого напряжения, трансформируется в обмотку ω_2, которая включена последовательно с нагрузкой. Напряжение данной обмотки, представляет собой компенсирующее напряжение. Обмотка ω_3 с дросселем *Др* является обмоткой размагничивания.

Недостатком этих устройств, является то, что большой коэффициент сглаживания пульсаций может быть получен только в режиме резонанса напряжений первичной обмотки трансформатора.

Для схемы на рисунке 2.а, при равенстве чисел витков обмоток ω_2 и ω_2, потенциалы их правых (по схеме) концов одинаковы, поэтому, конденсатор С не только выполняет функции разделительного в цепи

обмотки ω_1, но и оказывается включен параллельно нагрузке, образуя совместно с индуктивностью обмотки ω_2 LC – фильтр, который дополнительно сглаживает пульсации. Поэтому коэффициент сглаживания для схемы на рисунке 2,а будет

$$K_4 = K_2 \cdot Q, \tag{2}$$

где K_2 - коэффициент сглаживания пульсаций определяемый наличием в цепи нагрузки индуктивности обмотки ω_2 трансформатора Тр и конденсатора С; Q – добротность резонансного контура.

На рисунке 2,б представлен активный компенсатор. В нем, переменная составляющая напряжения на нагрузке выделяется на входном сопротивлении усилителя R_y, усиливается и через трансформатор Тр подается в цепь нагрузки в противофазе с напряжением пульсаций. Как и ранее, обмотка ω_3 служит для размагничивания сердечника.

Ключ *К* служит для включения АКП в работу.

АКП представляет собой замкнутый автоматический контур. Коэффициент сглаживания пульсаций в АКП будет определяться коэффициентом усиления усилителя обратной связи K_y.

Мощность пульсаций равна

$$P_П = U^2 / Z_Н, \tag{3}$$

где U^2 - действующее значение первой гармоники пульсаций напряжения;

$Z_Н$ - полное сопротивление нагрузки на частоте первой гармоники пульсаций.

Поскольку мощность пульсаций составляет 1% – 0,01% мощности нагрузки на постоянном токе то усилитель пульсаций может быть маломощным.

Основной проблемой при разработке АКП, является обеспечение равенства амплитуд компенсирующей и компенсируемой гармоник и сдвига фаз между ними 180°. Трансформатор АКП, нагруженный электромагнитом на частоте первой гармоники, из-за наличия потерь в обмотках и сердечнике не является идеальным устройством для компенсации пульсаций. Целесообразней, дешевле и проще требуемые характеристики магнитных устройств получать не за счет их конструктивного выполнения, а за счет введения электронного усилителя, охватывающего трансформатор цепью отрицательной обратной связи (ООС). Так, после введения усилителя с коэффициентом усиления 100, коэффициент трансформации и фазовый сдвиг приняли значения: 0,9995 и 0,02°, соответственно.

Таким образом, активные КП по своим показателям могут заметно превосходить обычные фильтры, в особенности в цепях питания сильноточных нагрузок с относительно низкими напряжениями, так как при тех же условиях имеют значительно больший коэффициент сглаживания, чем обычные фильтры. Они имеют высокую надежность, просты по конструкции и в настройке.

Для сглаживания высших гармоник в пассивных КП могут вводиться дополнительные первичные обмотки, настроенные в резонанс с заданной гармоникой. Это позволит повысить эффективность работы фильтра, что особенно актуально для управляемых выпрямителей.

Список литературы:

1. Кривцов А.Н. Мощные стабилизаторы тока [Текст] / А. Н. Кривцов, М.С. Лурье, В.П. Николаев – Л.: ЛДНТП, 1976. – 24 с.

2. Лурье, М.С. Снижение пульсаций мощных выпрямителей для питания магнитных систем / М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов // Вестник РГРТУ, 2015. – № 51. – С. 141–145.