

## К ПРОБЛЕМЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА: IGBT-ТРАНЗИСТОННЫЙ ИНВЕРТОР – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*Шаповал В.П., инж.*

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта*

*Синчук И.О., асп., Черная В.О., асп.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского*

*39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

*E-mail: [energy@polytech.poltava.ua](mailto:energy@polytech.poltava.ua)*

В статті розглянуто можливість застосування фільтрів з метою вирішення проблеми електромагнітної сумісності тягового електроприводу з мережею живлення та навантаженням, запропоновано методику розрахунку параметрів фільтра-обмежувача градієнта модульованих імпульсів напруги.

**Ключові слова:** фільтр, тяговий електропривод, широтно-імпульсна модуляція.

In article the opportunity of application of filters is considered with the purpose of the sanction of a problem of electromagnetic compatibility of the traction electric drive with a power line and loading, the design procedure of parameters of the filter - terminator of a gradient of the modulated pulses of a voltage is offered.

**Keywords:** filter, traction electric drive, pulse-width modulation.

**Введение.** Вопросы оптимального использования электрической энергии (ЭЭ) важны, и требуют своего разрешения во всех отраслях, в т.ч. и на электрифицированных видах транспорта.

**Анализ предыдущих исследований.** Замена существующих резисторных систем управления (СУ) тяговым электроприводом (ТЭП) позволит экономить около 5-6 млрд. кВт ч ЭЭ, что соответствует более 50 % от ежегодно потребляемой всеми видами электрифицированного транспорта страны [1].

Вместе с тем, внедрение в практику работы электрифицированных видов транспорта, каковыми являются системы с IGBT-преобразователями и асинхронными двигателями (АД), не может быть достаточно эффективным без решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) последних с питающей сетью и нагрузкой. Одно из направлений разрешения проблемы лежит в сфере структурно-параметрической оптимизации электрических фильтров, как электротехнических устройств, способных осуществить фильтрацию гармонических составляющих токов и напряжений при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) до нужных уровней.

**Цель работы** - разработка методики расчета фильтра-ограничителя градиента модулирующих импульсов выходного напряжения IGBT-транзисторного преобразователя.

**Материал и результаты исследований.** Иско-

жение формы кривых тока и напряжения при ШИМ напряжения питания тяговых электрических двигателей являются причиной:

- снижения срока эксплуатации изоляции двигателей и соединительных кабелей;

- в статоре двигателя наводятся высокочастотные токи, замыкающиеся через станину, ротор и подшипники, что приводит к досрочному износу подшипников;

- генерируются радиопомехи, ведущие к нарушению работы устройств связи.

Исключить высокочастотные токи, а следовательно и их вышеотмеченное одиозное влияние, можно механически – изолировав торцевые подшипниковые щиты от станины. Однако, для тяговых двигателей это не приемлемо, так как снижает прочность конструкции.

В общепромышленном электроприводе для улучшения ЭМС инвертора и двигателя между ними устанавливают общеизвестные LC-фильтры, ограничивающие скорость нарастания модулирующих импульсов напряжения (рис.1). Однако эти фильтры формируют крутизну фронтов импульсов в зависимости от длины кабеля между инвертором и двигателем, тем самым исключают перенапряжения на двигателе из-за эффекта отраженной волны. В транспортных установках длина кабеля мала для проявления эффекта отраженной волны, поэтому такой подход неприемлем для решения отмеченных

проблем. Величина градиента импульсов, при которой сохраняется живучесть изоляции, и блуждающие токи сводятся до приемлемого значения, не определена, в технической литературе данных по этому вопросу не обнаружено. Единственное, что может гарантировать нормальные условия работы изоляции и исключить блуждающие токи, так что синусоидальное напряжение с искажением высшими гармониками не более 10 % по стандарту для промышленных сетей. Поскольку синусный фильтр имеет значительный объем, размещение его в транспортной установке маловероятно. Поэтому при разработке фильтра-ограничителя принято: в рамках габаритов, отводимых под фильтр, рассчитывать его параметры, имея в виду минимальные искажения. Наибольшие искажения синусоиды при ШИМ дает гармоника с частотой модуляции  $f_M$ , которую следует блокировать.

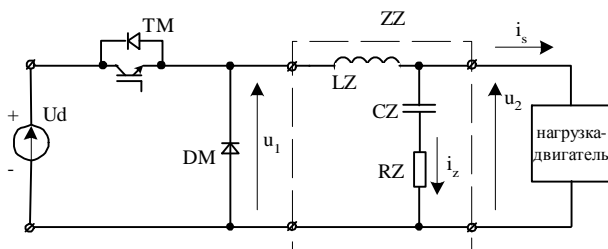


Рисунок 1 – Принципиальная схема фильтра-ограничителя скорости нарастания модулирующих импульсов в однофазном исполнении:

$U_d$  – питающая контактная сеть;  
 ТМ – IGBT-преобразователь с ШИМ напряжения питания; DM – шунтирующий диод;  
 ZZ – выходной фильтр

Такой негативный фактор, как генерация радиопомех, не является определяющим для выходного фильтра, поскольку радиопомехи нижнего уровня частично экранируются, а верхнего уровня блокируются фильтром гармоники модуляции.

Нижний уровень допустимой частоты промышленной радиопомехи по различным данным составляет  $f_v = 9-10-15$  кГц. Примем  $f_v = 8$  кГц с запасом. Собственная (резонансная) частота фильтра обычно вдвое меньше граничной частоты, в нашем случае это  $f_v / 2 = 4$  кГц, т.е. совпадает с частотой модуляции, что недопустимо. Поэтому принимаем собственную частоту фильтра-ограничителя  $f_z = 8$  кГц, по крайней мере, вдвое больше частоты модуляции, а для демпфирования колебаний в фильтре ZZ служит резистор RZ. В общем случае:

$$f_z = k_f \cdot f_M, \quad (1)$$

где  $k_f \geq 2$ ,  $f_M \leq 4$  кГц.

Тогда, круговая частота колебательного контура:

$$\omega_z = 2\pi f = 2\pi k_f \cdot f_M = k_f \omega_M. \quad (2)$$

Откуда

$$L_z C_z = \frac{1}{(2\pi f_z)^2}. \quad (3)$$

Принимаем амплитуду импульса напряжения на выходе фильтра (на зажимах двигателя), рис. 2:

$$U_{2m} \leq k_U \cdot U_d. \quad (4)$$

С учетом допустимого искажения коэффициент превышения напряжения:

$$k_U = 1,1-1,2. \quad (5)$$

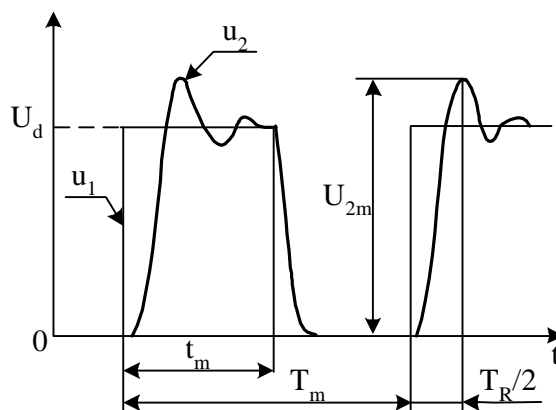


Рисунок 2 – Диаграммы импульсов напряжений:  $u_1$  – на входе фильтра,  $u_2$  – на выходе фильтра

При установке фильтра на выходе инвертора IGBT-транзисторные модули дополнительно нагружаются током  $i_z$ , протекающим в контуре LZ-CZ-RZ (рис.1).

Общепромышленные электроприводы с IGBT-транзисторными инверторами формируют синусоидальный ток с пульсацией, регламентированной стандартами:

- номинальная амплитуда, пульсации не более 5% амплитуды основной (первой) гармоники тока  $I_{S(1)m}$ ;
- максимальная 10%.

С учетом этого выбираются номиналы IGBT-транзисторных модулей. Поэтому, когда существующий электропривод дополняется фильтром, в расчет параметров фильтра принимают условие, чтобы сумма амплитуды колебательного тока и тока двигателя не превышала максимального значения, т.е. чтобы амплитуда колебательного тока была не более двойной амплитуды пульсации  $I_{Zm} \geq 2 \cdot \Delta I$ .

Для ТЭП такой подход не рационален, поскольку разработка инвертора и фильтра производится в комплексе и амплитуда колебательного тока и номинал IGBT- транзисторного модуля принимается из их общего оптимума.

В общем случае:

$$I_{Zm} = \frac{U_d}{\rho_z} \leq k_i \cdot I_{S(1)m}, \quad (6)$$

где  $I_{S(1)m}$  - амплитуда первой (основной) гармоники тока двигателя, формируемой инвертором посредством синусной ШИМ напряжения;

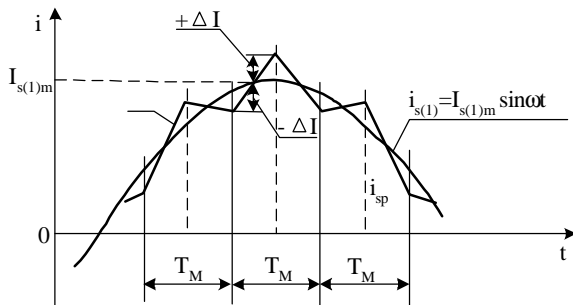
$k_i$  - коэффициент дополнительной нагрузки IGBT-транзисторного модуля по току;

$\rho_z = \sqrt{\frac{L_z}{C_z}}$  - волновое сопротивление колебательного контура.

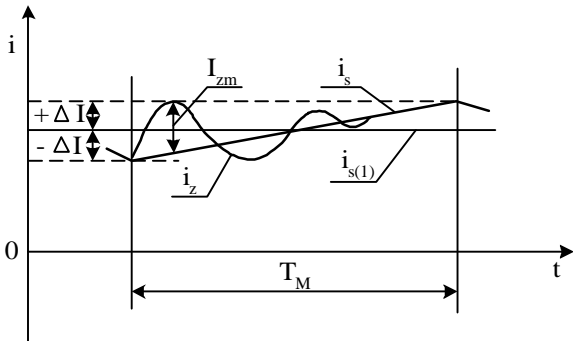
Причем, должно быть

$$R_z < 2\rho_z. \quad (7)$$

$$\text{Из (6) следует } \frac{L_z}{C_z} \geq \left( \frac{U_d}{k_i \cdot I_{S(1)m}} \right)^2. \quad (8)$$



а)



б)

Рисунок 3 - Диаграммы токов:

а) двигателя; б) фильтра (развертка)  $I_{Zm} \approx 2 \cdot \Delta I$

Во избежание «раскачки» колебательного контура переходной процесс в нем, возникающий каждый раз при подаче моделирующего прямоугольного импульса, должен завершаться к концу периода модуляции  $T_M = 1/f_M$ , т.е. должно соблюдаться условие:

$$\delta_z T_M = 2\pi \frac{\delta_z}{\omega_M} \geq k_R, \quad (9)$$

где  $k_R$  - коэффициент демпфирования, обычно

$k_R = 4,6$ ;  $\delta_z = \frac{R_z}{2L_z}$  - коэффициент затухания колебательного процесса.

$$R_z \geq \frac{1}{\pi} k_R \cdot \omega_M \cdot L_z = 2 \cdot k_R \cdot f_M \cdot L_z. \quad (10)$$

Рассмотрим подробнее выражение (4). В реальном колебательном контуре изменение напряжения на конденсаторе фильтра CZ описывается уравнением:

$$U_c = U_d \left[ 1 - \frac{\omega_z}{\omega_R} \exp(-\delta_z t) \cdot \sin(\omega_R t + \psi_R) \right] \quad (11)$$

где  $\omega_R = \sqrt{(\omega_z^2 - \delta_z^2)}$  - круговая частота реального контура при соблюдении (7);

$T_R = \frac{2\pi}{\omega_R}$  - период реального колебания;

$\psi_R = \arctg \frac{\omega_R}{\delta_z}$  - фазовый сдвиг.

Напряжение на конденсаторе CZ достигает максимума, т.е. амплитудного значения в момент времени  $t_m = \frac{T_R}{2} = \frac{\pi}{\omega_R}$ , при котором в формуле (11) с

учетом (9) имеем:

$$\sin(\omega_R t_m + \psi_R) = \sin(\pi + \psi_R) = -\sin \psi_R;$$

$$\psi_R = \arctg \sqrt{\left( \frac{2\pi \cdot k_f}{k_R} \right)^2 - 1};$$

$$\sin \psi_R = \frac{\text{tg} \psi_R}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \psi_R}} = \sqrt{1 - \left( \frac{k_R}{2\pi \cdot k_f} \right)^2};$$

$$\frac{\omega_z}{\omega_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{k_R}{2\pi \cdot k_f} \right)^2}};$$

$$\exp(-\delta_z t_m) = \exp\left(-\delta_z \frac{\pi}{\omega_R}\right) = \exp\left[-\frac{\pi}{\sqrt{\left( \frac{2\pi \cdot k_f}{k_R} \right)^2 - 1}}\right]$$

В итоге, получаем выражение для проверки принятых ограничений:

$$\frac{U_{cm}}{U_d} = \frac{U_{2m}}{U_d} = k_U = 1 + \exp\left[-\frac{\pi}{\sqrt{\left( \frac{2\pi \cdot k_f}{k_R} \right)^2 - 1}}\right] \quad (12)$$

В нашем случае  $k_f = 2$ ,  $k_R = 4,6$ . Находим  $k_U = 1,29$ , что более принято согласно (5). Поскольку коэффициент превышения напряжения в (6)

задан произвольно, то при расчете параметров фильтра-ограничителя можно либо принять  $k_U = 1,29$  и иметь заданный колебательный характер переходного процесса, либо увеличить сопротивление  $R_z$  согласно (10), тем самым увеличить демпфирование колебаний и понизить выброс напряжения на выходе фильтра до любого уровня.

На основании изложенного, предлагается следующая методика расчета параметров фильтра-ограничителя градиента модулированных импульсов напряжения:

1. Исходные данные электропривода:  $U_d$ ,  $I_{S(1)m}$ ,  $f_m$ ,  $k_i$ ,  $k_u$ .

2. Задаем  $f_z = 8$  кГц.

3. Находим  $k_f$ .

4. Принимаем  $L_z C_z$ .

5. Находим  $\frac{L_z}{C_z}$ .

6. Решая совместно (3) и (8) находим  $L_z$  и  $C_z$ .

7. Задаем  $k_R$ .

8. Находим  $R_z$  из (10).

9. Определяем  $k_U$  из (12).

10.1. Если  $k_U$  приемлем, расчет окончен.

10.2. Если  $k_U$  неприемлем, корректируем  $k_R$  и повторяем расчет с п.8 до приемлемого результата.

**Выводы.** 1. Проблемы ЭМС тяговых IGBT-преобразователей и АД с учетом транспортной специфики разрешаются путем применения фильтров оптимальной структуры и параметров.

2. Разработанная методика расчета фильтра-ограничителя градиента модулирующих импульсов выходного напряжения IGBT-транзисторного преобразователя позволяет оптимизировать параметры

фильтра по условиям минимизации гармонических составляющих тока и напряжения на входе IGBT-преобразователя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. М. «Энергия», 1968, 264 с.

2. Вороновський Г.К., Денисюк С.П., Кириленко О.В., Стогній Б.С., Шидловський А.К. Енергетика світу та України. Цифри та факти. – Київ: Українські енциклопедичні знання. – 2005. – 404 с.

3. Шидловський А.К. Проблеми стабілізації та подальшого розвитку електроенергетичного комплексу та електротехніки, як його технологічної складової // Технічна електродинаміка. Спец. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». ч.1. – 2000. – с.3-7.

4. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А., Синчук И.О. и др. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. Под редакцией О.Н. Синчука. К.: 2006. Национальная академия наук Украины, Институт электродинамики НАН Украины. 250с.

5. Шаповал В.П. К проблеме электромагнитной совместимости тягового IGB-транзисторного инвертора и асинхронного электродвигателя // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – с.456-457.

5. Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка. Підручник. – ч.2./ За редакцією Руденко В.С. – Харків. – «Фоліо». – 2000. – 360 с.

Стаття надійшла 25.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.