

Найменша ширина стрічок  $b_{\text{Пinf}}$  провідникових матеріалів первинної та проміжної обмоток при заданій величині площі обкладок компенсуючої ємності  $S_E$  буде при  $w_1 = w_{\text{П}}$ , тоді, підставляючи (10) у (9), маємо:

$$b_{\text{inf}} = \frac{S_E - w_1^2 \cdot \pi (q_1 + q_{\text{П}})}{2\pi w_1 (w_1 \cdot d_{\text{IZE}} + R_0)}. \quad (11)$$

Оскільки металургійні підприємства виробляють провідникові стрічки та фольгу шириною, що визначається відповідними стандартами, величину  $b_{\text{Пinf}}$ , як правило, доводиться заокруглювати до найближчої більшої величини зі стандартного ряду. Тому пакет стрічок проміжної обмотки, як правило, коротший за пакет стрічок первинної обмотки, тобто  $w_1 > w_{\text{П}}$ .

**Висновок.** Через постійне зростання радіуса витків в процесі намотки котушок зі стрічкових матеріалів постійно зростає їх довжина, а загальна довжина стрічок обмотки пов'язана квадратичною залежністю з кількістю витків обмотки.

Якщо обмотка складається з декількох пакетів стрічкових матеріалів, провідникові стрічки яких з'єднано послідовно, то загальна кількість витків такої обмотки не залежить від черговості намотки цих пакетів.

При визначенні площі обкладок компенсуючої ємності трансформатора найменша ширина провідникових стрічок первинної та проміжної обмоток, яка має місце при однакових кількостях витків цих обмоток, визначається початковим радіусом витка сумарною площею перетину провідникових стрічок обмоток та товщиною ізоляційних стрічок між ними.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Коваль И.К. Исследование и разработка рудничного трансформаторного устройства для регулирования напряжения в участковых сетях: дисс. ... канд. техн. наук / Коваль И.К. – Днепропетровск, 1978. – 208с.

*Надійшла до редколегії 24.09.2013.*

УДК 621.312.323

ЧЕРНОИВАН В.П., к.т.н, доцент  
МЕДЬЕШИ М.В., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

#### УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Введение.** Общеизвестные технико-экономические преимущества сделали в настоящее время тиристорный привод основным типом регулируемого электрического источника энергии. Однако с ростом количества и установленной мощности тиристорных приводов все сильнее сказываются и их основные недостатки: низкий коэффициент мощности при работе их в зарегулированных режимах, существенные искажения питающей сети, а также появление в выпрямленном напряжении токов гармоник неканонических порядков. В ряде случаев эти гармоники приходится принимать во внимание, поэтому возникает задача анализа выпрямленного напряжения при проектировании автоматизированного электропривода с тиристорным преобразователем постоянного тока.

**Постановка задачи.** Задачей работы является исследование и анализ выпрямленного напряжения с учетом режимов работы электроприводов, а также уменьшение их влияния на питающую сеть.

**Результаты работы.** Кривая выпрямленного напряжения любой схемы всегда содержит две составляющие: постоянную, равную среднему значению выпрямленного напряжения, и переменную, которая состоит из определенного спектра гармоник. Гармоники в питающей сети могут причинить неприятности, создавая потери для другого электрооборудования. Для электропривода гармоники тока создают дополнительные потери мощности, нагрев электродвигателя и понижают коэффициент мощности, а поэтому знание их природы, а также умение оценить их величину дает возможность при проектировании получить электропривод с более высокими техническими показателями [1].

Напряжение на нагрузке управляемого выпрямителя состоит из постоянного напряжения с наложением на него гармоник переменного тока, которые могут быть представлены в виде ряда Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(n\omega_1 t - \psi_n), \quad (1)$$

где  $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  – амплитуда n-ой гармоники;  $a_n$ ,  $b_n$  – коэффициенты разложения в ряд:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad (4)$$

$$\psi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (5)$$

При разложении в ряд Фурье кривой выпрямленного напряжения необходимо ввести ряд обозначений.

Постоянная составляющая  $\frac{a_0}{2}$  есть среднее значение выпрямленного напряжения:  $E_{d0}$  – для неуправляемого и  $E_{d0} \cdot \cos \alpha$  – для управляемого выпрямителя.

Коэффициент разложения синусного ряда  $b_n$  обозначим через максимальную э.д.с. n-ой гармоники  $E'_{n \max}$ , а коэффициент разложения косинусного ряда  $a_n$  – через  $E''_{n \max}$ .

Для решения выражений (3) и (4) выпрямленное напряжение можно представить на графике (рис.1) с учетом того, что интегрирование производится не в течение периода сетевого напряжения  $T$ , а в течение его части  $T/m$ .

Тогда коэффициенты разложения синусного и косинусного рядов будут:

$$E'_{n \max} = \frac{m}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \sqrt{2} E_2 \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{m} + \alpha\right) \cdot \sin(km\theta) d\theta = E_{d0} \frac{2km}{k^2 m^2 - 1} \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

$$E''_{n \max} = \frac{m}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \sqrt{2} E_2 \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{m} + \alpha\right) \cdot \cos(km\theta) d\theta = E_{d0} \frac{2km}{k^2 m^2 - 1} \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $km$  – кратность гармоники по отношению к сетевому напряжению;

$m$  – число пульсаций выпрямленного напряжения за период;

$k = 1, 2, 3, \dots, \infty$  – порядковый номер гармоники в выпрямленном напряжении.

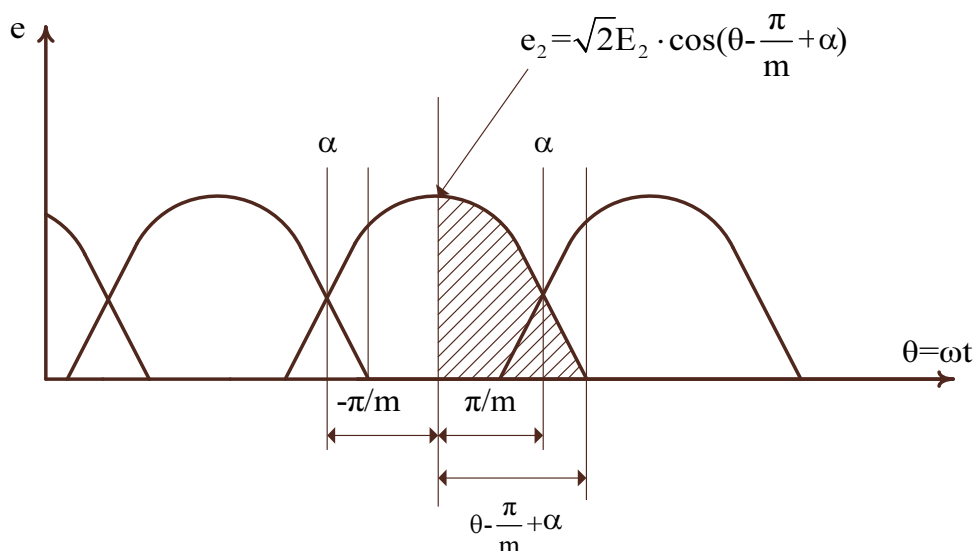


Рисунок 1 – График выпрямленной э.д.с. для трехпульсной нулевой схемы

Используя выражения (1), (6), (7), можно получить амплитуду n-ой гармоники в относительных единицах:

$$E_{n\max} = \frac{E_{n\max}}{E_{d0}} = \sqrt{\left(\frac{E'_{n\max}}{E_{d0}}\right)^2 + \left(\frac{E''_{n\max}}{E_{d0}}\right)^2} = \frac{2\cos\alpha}{k^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) дает возможность определить амплитуду n-ой гармоники для неуправляемого выпрямителя ( $\alpha = 0$ ):

$$E_{n\max} = \frac{2}{k^2 m^2 - 1}. \quad (9)$$

Используя выражение (9), можно рассчитать амплитуду и частоту гармоник для некоторых типовых схем:

- |  |   |
|--|---|
| <p>1. Трехпульсная нулевая схема:</p> <p>а) первая гармоника <math>m=3</math>; <math>k=1</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,25</math> или 25%;</p> <p>б) вторая гармоника <math>m=3</math>; <math>k=2</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,057</math> или 5,7%;</p> <p>в) третья гармоника <math>m=3</math>; <math>k=3</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,025</math> или 2,5%.</p> | <p>2. Трехпульсная мостовая схема:</p> <p>а) первая гармоника <math>m=6</math>; <math>k=1</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,057</math> или 5,7%;</p> <p>б) вторая гармоника <math>m=6</math>; <math>k=2</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,014</math> или 1,4%;</p> <p>в) третья гармоника <math>m=6</math>; <math>k=3</math>:<br/> <math>E_{n\max} = 0,006</math> или 0,6%.</p> |
|--|---|

Энергетические показатели электропривода также существенно зависят от режимов работы тиристорного преобразователя.

Следует отметить, что в цепях с несинусоидальными токами системы тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-ДПТ) коэффициент мощности не равен коэффициенту сдвига между первой гармоникой сетевого тока  $I_{1(1)}$  и сетевым током  $I_1$  и определяется формулой [2, 3]

$$\chi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{I_{1(1)} \cdot \cos\varphi_1}{I_1}, \quad (10)$$

где  $P_1 = 3E_1 I_{1(1)} \cos \varphi_1$  – активная мощность;

$S_1 = 3E_1 I_1$  – полная мощность сетевых обмоток трансформатора преобразователя;

$\varphi_1$  – угол сдвига между  $U_1$  и  $I_{1(1)}$ ;

$I_{1(1)}$  – первая гармоника сетевого тока  $I_1$ .

Коэффициент мощности (10) можно выразить через коэффициент искажения  $v$ :

$$\chi = v \cdot \cos \varphi_1. \quad (11)$$

Для понятия физической сущности коэффициента искажения на рис.2 показано разложение первичного тока для мостовой схемы на первую гармонику  $i_{1(1)}$  и функцию искажения  $i_{\text{иск}}$ .

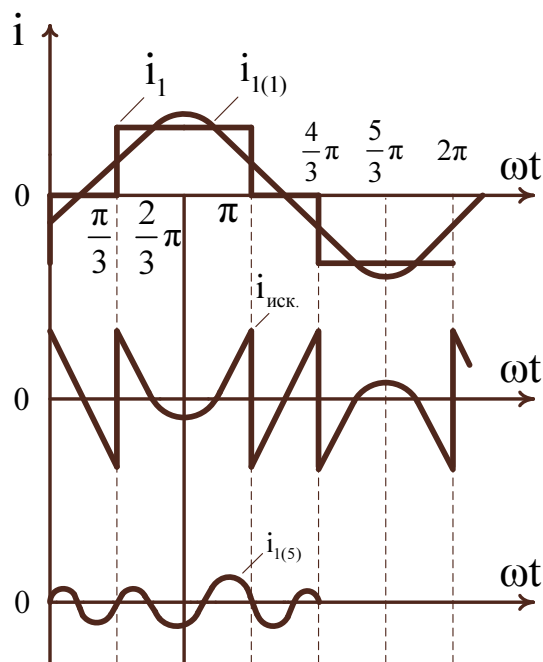


Рисунок 2 – Разложение первичного тока на гармоники n-го порядка ( $i_1 = i_{1(1)} + i_{\text{иск}}$ )

В свою очередь  $i_{\text{иск}}$  содержит третью гармонику и гармоники более высокого порядка.

Величина коэффициента искажения  $v$  определяется той гаммой гармоник, которые содержат в себе ток управляемого тиристорного преобразователя.

Если предположить, что ТП работает в режиме: угол регулирования напряжения  $\alpha = 0$ ; угол коммутации  $\gamma = 0$ ; угол сдвига  $\varphi_1 = 0$ , то, используя выражение (10), получим:

$$\chi_0 = v = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_d}{S_1}, \quad (12)$$

где  $P_d$  – выпрямленная мощность.

Тогда для типовых схем можно определить коэффициент мощности  $\chi_0$  [3]:

а) для трехпульсной нулевой схемы  $\chi_0 = 0,83$ ;

б) для трехпульсной мостовой и

шестифазной с уравнивающим реактором  $\chi_0 = 0,955$ ;

в) для двенадцатипульсной с уравнивающим реактором  $\chi_0 = 0,988$ .

В тоже время при работе управляемого выпрямителя в режиме, когда  $\alpha \leq \frac{\pi}{6}$  и  $\gamma > 0$ , коэффициент мощности можно определить:

$$\chi = v_0 \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\gamma\right), \quad (13)$$

где  $\gamma$  – угол коммутации тиристорov.

При работе ТП в режиме, когда  $\alpha > \frac{\pi}{6}$  и  $\gamma > 0$ , более точные результаты расчета коэффициента мощности можно получить, используя выражение [2]

$$\chi = v_0 \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (14)$$

Таким образом, угол  $\varphi_1 = \alpha + \frac{2}{3}\gamma$  в выражении (13) и угол  $\varphi_1 = \alpha + \frac{\gamma}{2}$  в выражении (14) определяют сдвиг фаз между  $I_{1(1)}$  и  $U_1$ .

**Пример.**

Электропривод по системе ТП-ДПТ, где применяется трехпульсная нулевая схема, трехпульсная мостовая и двенадцатипульсная схемы, работает в режиме:

1.  $\alpha = 0^\circ$ ;  $\gamma = 35^\circ$ ;
2.  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\gamma = 41^\circ$ ;
3.  $\alpha = 40^\circ$ ;  $\gamma = 20^\circ$ .

Коэффициенты мощности электроприводов будут:

– трехпульсной нулевой схемы:

1.  $\chi = v \cdot \cos\left(\frac{2}{3}\gamma\right) = 0,83 \cdot \cos\left(\frac{2}{3} \cdot 35^\circ\right) = 0,747$ ;
2.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\gamma\right) = 0,83 \cdot \cos 57^\circ = 0,598$ ;
3.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = 0,83 \cdot \cos 50^\circ = 0,664$ ;

– трехпульсной мостовой схемы:

1.  $\chi = v \cdot \cos\left(\frac{2}{3}\gamma\right) = 0,955 \cdot \cos\left(\frac{2}{3} \cdot 35^\circ\right) = 0,900$ ;
2.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\gamma\right) = 0,955 \cdot \cos 57^\circ = 0,690$ ;
3.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = 0,955 \cdot \cos 50^\circ = 0,667$ ;

– двенадцатипульсной схемы:

1.  $\chi = v \cdot \cos\left(\frac{2}{3}\gamma\right) = 0,988 \cdot \cos 20^\circ = 0,950$ ;
2.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\gamma\right) = 0,988 \cdot \cos 50^\circ = 0,790$ ;
3.  $\chi = v \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = 0,988 \cdot \cos 50^\circ = 0,790$ .

**Выводы.** Увеличение m-фазности управляемых выпрямителей уменьшает количественный состав гармоник тока, а, следовательно, и уменьшаются потери мощности. В управляемых выпрямителях с увеличением угла регулирования ( $\alpha = 0$ ) возрастают амплитуды гармоник согласно выражению (8), а, следовательно, ухудшается коэффициент мощности. Увеличение угла коммутации ( $\gamma$ ) за счет увеличения анодной индуктивности трансформатора ухудшает коэффициент мощности электропривода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов / Соколов М.М. – М.: Энергия, 1969. – 567с.
2. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / Ключев В.И. Терехов В.М. – М.: Энергия, 1980. – 358с.
3. Беркович Е.И. Полупроводниковые выпрямители / Беркович Е.И. – М.: Энергия, 1967. – 478с.

Поступила в редколлегию 14.10.2013.