

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА

В данной статье рассмотрена методика проведения гармонического анализа тока и напряжения циклоконвертора (с прямоугольной модуляцией, с естественной коммутацией, при работе на эквивалентную двигателю RL нагрузку в режиме непрерывного тока) с учетом как выпрямительного, так и инверторного режима работы вентиля преобразователя.

Формирование кривых тока и напряжения (рис. 1) на выходе такого циклоконвертора происходит следующим образом. Сначала на вентили преобразователя подаются управляющие импульсы с углом α (ток возрастает), что соответствует выпрямительному режиму работы, а затем – с углом β (ток начинает уменьшаться), что соответствует инверторному режиму работы вентиля. Когда ток становится равным нулю, последний проводивший вентиль закрывается, а в систему управления подается от датчика тока сигнал, разрешающий переходить к формированию отрицательной полуволны выходного тока циклоконвертора. Через промежуток времени ψ_{Π} , не меньший времени восстановления запирающих свойств вентиля, подаются управляющие импульсы с углом α при отрицательной полярности анодного напряжения и начинается формирование отрицательной полуволны выходного тока циклоконвертора в той же последовательности, как при формировании положительной полуволны тока.

Напряжение и ток на выходе циклоконвертора (рис. 1) в течение полупериода выходного тока $T_2/2$ можно записать в виде:

$$u_2 = \sum_{n=0}^N U_m \sin(\omega_1 t + \theta_B - n\lambda) + \sum_{n=N+1}^F U_m \sin[\omega_1 t + \theta_{\Pi} - (n-1)\lambda - \lambda_{\Pi}]; \quad (1)$$

$$i_2 = \sum_{n=0}^N \left\{ I_m \sin(\omega_1 t + \theta_B - \varphi - n\lambda) + [i_n(0) - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -I_m \sin(\theta_B - \varphi) \Big] e^{-\left(\omega_1 t - n\lambda\right) \operatorname{ctg} \varphi} \Big\} + \\
 & + \sum_{n=N+1}^F \left\{ I_m \sin\left(\omega_1 t + \theta_{II} - \varphi - (n-1)\lambda - \lambda_{II}\right) + \right. \\
 & \left. + \left[i_n(0) - I_m \sin(\theta_{II} - \varphi) \right] e^{-\left[\omega_1 t - (n-1)\lambda - \lambda_{II}\right] \operatorname{ctg} \varphi} \right\} (2) ,
 \end{aligned}$$

где для участков проводимости вентилях $n = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$ на интервале выпрямления $n\lambda \leq \omega_1 t \leq (n+1)\lambda$; для участка ($n = N$) перехода от выпрямительного режима к инверторному $n\lambda \leq \omega_1 t \leq n\lambda + \lambda_{II}$; для участков $n = (N + 1), (N + 2), \dots, (F - 1)$ на интервале инвертирования $(n - 1)\lambda + \lambda_{II} \leq \omega_1 t \leq n\lambda + \lambda_{II}$; для участка ($n = F$) в конце полупериода выходного тока $(n - 1)\lambda + \lambda_{II} \leq \omega_1 t \leq (n - 1)\lambda + \lambda_{II} + \lambda_K$; N, M - количество участков проводимости вентилях соответственно на интервалах выпрямления и инвертирования (без участка перехода от выпрямительного режима к инверторному); $F = N + M$; $\omega_1 = 2\pi f_1$; U_m, f_1 - амплитудное значение напряжения и частота питающей сети циклоконвертора; θ_B, θ_{II} - углы отпирания вентилях соответственно в выпрямительном и инверторном режимах; $\theta_B = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha$; $\theta_{II} = \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \beta$; m - число фаз питающей сети циклоконвертора; $\lambda = \frac{2\pi}{m}$ - длительность участков проводимости вентилях как в выпрямительном, так и в инверторном режимах работы; λ_{II} - длительность участка перехода от выпрямительного режима к инверторному; $\lambda_{II} = \pi + \frac{2\pi}{m} - (\alpha + \beta)$; $\lambda_K \leq \frac{2\pi}{m}$ - длительность участка проводимости в конце полуволны выходного тока; $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2}}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega_1 L}{R}$; $i_n(0)$ - начальное значение тока на n -м участке проводимости вентилях.

Целое число F определяется из рис. 1:

$$F = \frac{\pi \nu - \lambda_{II}}{\lambda} - \epsilon , \quad (3)$$

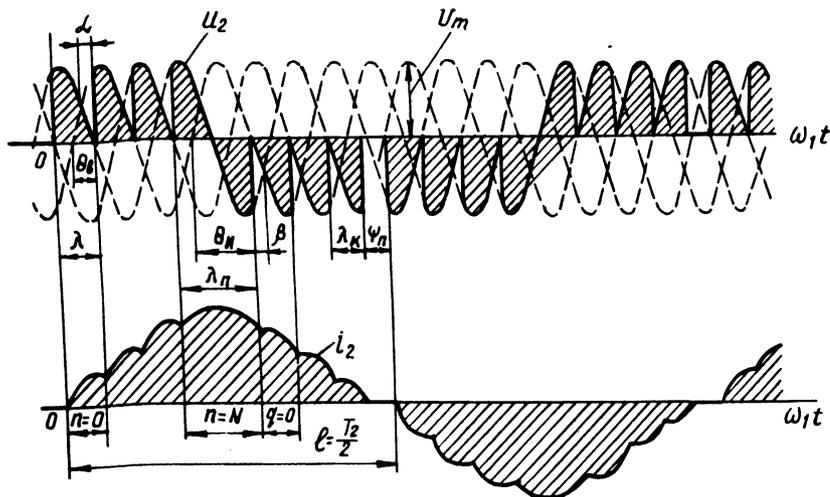


Рис. 1. Характер изменения во времени выходного напряжения (U_2) и тока (i_2) трехфазного циклоконвертора при работе на RL нагрузку в режиме непрерывного тока.

где ϵ - дробное число ($\epsilon < 1$), учитывающее наличие паузы φ между работой анодной и катодной групп вентилей циклоконвертора; $\nu = f_1 / f_2$ - кратность частот на входе (f_1) и выходе (f_2) циклоконвертора.

Начальный ток $i_n(0)$ для любого участка проводимости вентилей может быть определен с помощью решетчатых функций и уравнений в конечных разностях [1]:

$$i_n(0) = A \left[\frac{1 - e^{-B \cdot n}}{1 - e^{-B}} + i_0(0) \right] e^{-B \cdot n}, \quad (4)$$

где $B = \lambda \cdot \text{ctg} \varphi$; $A = I_m [\sin(\lambda + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) e^{-B}]$
 $n = 0, 1, 2, \dots$ - номер участка проводимости вентилей; $i_0(0)$ - значение начального тока на первом участке рассматриваемого процесса, т.е. значение тока в начале интервала выпрямления или инвертирования; θ - угол отпирания вентилей.

Начальный ток на первом участке ($n = 0$) интервала выпрямления $i_{0В}(0) = 0$, а начальный ток на первом участке ($q = 0$) интервала инвертирования $i_{0И}(0)$ равен

значению тока в конце участка перехода от выпрямительно - го режима к инверторному и определяется из выражения [2]:

$$i_{0и}(0) = C + A_B e^{-D} \frac{1 - e^{-B \cdot N}}{1 - e^{-B}}, \quad (5)$$

где $C = I_m [\sin(\lambda_{II} + \theta_B - \varphi) - \sin(\theta_B - \varphi) e^{-D}]$;

$$D = \lambda_{II} \times \text{ctg} \varphi ; A_B = I_m [\sin(\lambda + \theta_B - \varphi) - \sin(\theta_B - \varphi) e^{-B}] .$$

Тогда на основе (4) значение тока в начале любого n -го участка проводимости вентилей на интервале выпрямления $i_n(0)$ и значение тока в начале любого q -го участка проводимости вентилей на интервале инвертирования $i_q(0)$ можно определить по формулам:

$$i_n(0) = A_B \int \frac{1 - e^{-B \cdot n}}{1 - e^{-B}} ; \quad (6)$$

$$i_q(0) = A_{и} \int \frac{1 - e^{-B \cdot q}}{1 - e^{-B}} + i_{0и}(0) \int e^{-B \cdot q}, \quad (7)$$

где $A_{и} = I_m [\sin(\lambda + \theta_{и} - \varphi) - \sin(\theta_{и} - \varphi) e^{-B}]$; $n = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$; $q = 0, 1, 2, \dots, (M - 1)$.

Численные значения N и M можно определить по выражениям [3]:

$$N = \text{ЦЧ} \left(\frac{\ln F_1}{-B} \right); M = F - N, \quad (8)$$

$$\text{где } F_1 = \frac{1 - H \cdot C - \frac{A_B}{A_{и}} e^{-D}}{e^{FB} - \frac{A_B}{A_{и}} e^{-D}} ; H = \frac{1 - e^{-B}}{A_{и}} ;$$

ЦЧ - целая часть.

Длительность λ_k последнего участка в конце полуволны выходного тока вычисляется из уравнения

$$I_m \sin(\lambda_k + \theta_{и} - \varphi) + [i_q(0) - I_m \sin(\theta_{и} - \varphi)] e^{-\lambda_k \cdot \text{ctg} \varphi} = 0, \quad (9)$$

при этом $i_q(0)$ на данном участке определяется по выражению (7) при $q = M - 1$.

Кривые выходного напряжения и тока циклоконвертора (рис. 1) симметричны относительно оси абсцисс, поэтому разложения их в ряд Фурье содержат только нечетные гармоники, причем коэффициенты Фурье, например, для тока

$$\left. \begin{aligned} A_{ik} &= \frac{2}{1} \int_0^1 i_2(\omega_1 t) \sin\left(\frac{k\pi}{1} \omega_1 t\right) d(\omega_1 t); \\ B_{ik} &= \frac{2}{1} \int_0^1 i_2(\omega_1 t) \cos\left(\frac{k\pi}{1} \omega_1 t\right) d(\omega_1 t), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k = 1, 3, 5, 7, \dots, \infty$; $1 = \pi \nu$.

Подставив в (10) выражение (2) для относительного тока \bar{i}_2 (по отношению к I_m), после интегрирования и преобразований получим следующие общие выражения для определения \bar{A}_{ik} и \bar{B}_{ik} :

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ik} &= \frac{2}{\pi \nu} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\nu}{\nu - k} \cos \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 - \frac{k}{\nu} \right) + \right. \right. \\ &+ d_n \left. \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 - \frac{k}{\nu} \right) \right] - \\ &- \frac{\nu}{\nu + k} \cos \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 + \frac{k}{\nu} \right) + d_n \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 + \right. \right. \\ &+ \left. \left. \frac{k}{\nu} \right) \right] + \frac{\bar{A}_n \nu^2 c}{\nu^2 c^2 + k^2} \left[\sin \frac{k}{\nu} a_n + \right. \\ &+ \left. \frac{k}{\nu c} \cos \frac{k}{\nu} a_n - e^{-(b_n - a_n)c} \left(\sin \frac{k}{\nu} b_n + \right. \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{\kappa}{\nu c} \cos \frac{\kappa}{\nu} b_n) \left. \right\} ; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_{ik} = & \frac{2}{\pi \nu} \sum_{n=0}^F \left\{ \frac{\nu}{\nu - \kappa} \sin \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 - \frac{\kappa}{\nu} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + d_n \right] \cdot \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 - \frac{\kappa}{\nu} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\nu}{\nu + \kappa} \sin \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 + \frac{\kappa}{\nu} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + d_n \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 + \frac{\kappa}{\nu} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\bar{A}_n \nu^2 c}{\nu^2 c^2 + \kappa^2} \left[\cos \frac{\kappa}{\nu} a_n - \frac{\kappa}{\nu c} \sin \frac{\kappa}{\nu} a_n - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-(b_n - a_n) c} \left(\cos \frac{\kappa}{\nu} b_n - \frac{\kappa}{\nu c} \sin \frac{\kappa}{\nu} b_n \right) \right] \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $\nu \neq \kappa$; $c = \operatorname{ctg} \varphi$; для участков проводимости вентилей на интервале выпрямления $a_n = n\lambda$; $b_n = (n+1)\lambda$; $\bar{A}_n = \bar{i}_n(0) - \sin(\theta_B - \varphi)$; $d_n = \theta_B - \varphi - n\lambda$; для участка ($n = N$) перехода от выпрямительного режима к инверторному $a_n = N \cdot \lambda$; $b_n = N\lambda + \lambda_{II}$; $d_n = \theta_B - \varphi - N\lambda$; $\bar{A}_n = \bar{i}_N(0) - \sin(\theta_B - \varphi)$; для участков проводимости вентилей на интервале инвертирования $a_n = (n-1)\lambda + \lambda_{II}$; $b_n = n\lambda + \lambda_{II}$; $d_n = \theta_{II} - \varphi - (n-1)\lambda - \lambda_{II}$; $\bar{A}_n = \bar{i}_n(0) - \sin(\theta_{II} - \varphi)$; для участка ($n = F$) в конце полуволны выходного тока $a_n = (n-1)\lambda + \lambda_{II}$; $b_n = (n-1)\lambda + \lambda_{II} + \lambda$; $d_n = \theta_{II} - \varphi - (n-1)\lambda - \lambda_{II}$; $\bar{A}_n = \bar{i}_n(0) - \sin(\theta_{II} - \varphi)$.

Коэффициенты ряда Фурье \bar{A}_{uk} и \bar{B}_{uk} кривой напряжения на выходе циклоконвертора определяются формулами (11) и (12) при подстановке в них $\varphi = 0$, т.е.

$$\bar{A}_{ук} = \frac{A_{ук}}{U_m} = \frac{2}{\pi v} \sum_{n=0}^F \left\{ \frac{v}{v-k} \cos \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 - \frac{k}{v} \right) + \theta_{n-a_n} \right] \cdot \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 - \frac{k}{v} \right) \right] - \frac{v}{v+k} \cos \left[\frac{b_n + a_n}{2} \left(1 + \frac{k}{v} \right) + \theta_{n-a_n} \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} \left(1 + \frac{k}{v} \right) \right] \right\}; \quad (13)$$

$$\bar{B}_{ук} = \frac{2}{\pi v} \sum_{n=0}^F \left\{ \frac{v}{v-k} \sin \left[\frac{b_n + a_n}{2} x \right] \times \left(1 - \frac{k}{v} \right) + \theta_{n-a_n} \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} x \right] \times \left(1 - \frac{k}{v} \right) \right] + \frac{v}{v+k} \sin \left[\frac{b_n + a_n}{2} x \right] \times \left(1 + \frac{k}{v} \right) + \theta_{n-a_n} \right] \sin \left[\frac{b_n - a_n}{2} x \right] \times \left(1 + \frac{k}{v} \right) \right\}. \quad (14)$$

По выражениям (13), (14) была составлена программа и произведены расчеты на ЦВМ численных значений гармоник выходного напряжения трехфазного циклоконвертора. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшую амплитуду имеют высшие гармоники порядка $k = 3$ и $k = m v \pm 1$; наличие паузы ψ_{Π} в кривой напряжения приводит к уменьшению первой гармоники, особенно существенно при малых значениях v ; учет в кривой напряжения как выпрямительного, так и инверторного режима работы вентиля цикло-

конвертора позволяет точнее определить не только первую гармонику, но и высшие, а соответственно, и энергетические показатели системы электропривода.

Л и т е р а т у р а

1. Ровинский П.А. Особенности регулируемых приводов с асинхронными двигателями и тиристорными преобразователями частоты с непосредственной связью. - В сб.: Статические преобразователи в электроприводах переменного тока. Л.: Наука, 1968. 2. Павлович С.Н. Определение числа включений вентилей НПЧ в интервалах выпрямления и инвертирования. - Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1974, №6. 3. Павлович С.Н. Аналитическое определение числа включений вентилей циклоконвертора в интервалах выпрямления и инвертирования. Деп. в Информэлектро, 1978, № 39-д/1-61.

УДК 621.313.22.019.3

В.Н.Горбарук, В.С.Лившиц, О.А.Дементьев

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН АВАРИЙНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На Минском камвольном комбинате примерно через год после начала эксплуатации начали выходить из строя двигатели постоянного тока прядильных машин: наблюдался пробой изоляции обмоток якоря и возбуждения. Для выявления причин аварий проведено было исследование, результаты которого излагаются в данной статье.

Двигатель постоянного тока имеет следующие характеристики:

Номинальная мощность, кВт	- 18
Номинальная частота вращения, об/мин	- 3000
Наибольшее напряжение на якоре, В	- 370
Наибольший ток якоря, А	- 55
Класс изоляции обмоток по нагревостойкости	- Е
Наибольшая длительно допустимая температура обмоток, °С	- 115.

Исполнение двигателя закрытое, охлаждение - воздушное с самовентилирующей по замкнутому циклу.

Анализ возможных причин пробоя изоляции обмоток выдвинул на первый план следующие варианты: