

УДК 621.313.3

А. С. Коваль, канд. техн. наук, доц., Б. Б. Скарыно, канд. техн. наук

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ СИСТЕМЫ ТРН-АД С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ПО ТОКУ

Проведен сравнительный гармонический анализ напряжений и токов нагрузки систем ТРН-АД с синхронизацией по напряжению и по току. Показано, что при синхронизации по току с ростом угла нагрузки гармонический состав выходного напряжения при постоянном угле управления тиристорами ухудшается, что в ТРН с синхронизацией по току коэффициент искажения тока определяется только углом управления в отличие от ТРН с синхронизацией по напряжению, где на этот коэффициент влияет и момент нагрузки.

В настоящее время, несмотря на широкое применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода, существует тенденция использования, с целью управления пускотормозными режимами, а также для реализации эффекта энергосбережения, в асинхронном электроприводе тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). Стимулом к этому являются все возрастающие требования к обеспечению энерго- и ресурсосбережения на производстве. Большая часть электрической энергии, потребляемой электроприводами, приходится на долю самого массового, нерегулируемого по скорости асинхронного электропривода. Для оптимизации энергетических показателей таких приводов целесообразно применение тиристорных регуляторов напряжения [1].

Система ТРН-АД является потребителем реактивной мощности. Эта величина наряду с другими факторами определяется и углом смещения первой гармоники напряжения относительно напряжения сети из-за зоны нечувствительности преобразователя, при синхронизации тиристоров по напряжению. При синхронизации тиристоров ТРН по току зона нечувствительности отсутствует, соответственно, и потребляемая реактивная мощность при этом способе управления будет зависеть в меньшей степени от нагрузки [2].

Для сравнения систем ТРН-АД с синхронизацией по напряжению и по току по потребляемой реактивной мощности необходимо выполнить сравнительный гармонический анализ напряжений и токов нагрузки.

Гармонический анализ выходного напряжения ТРН. Выходное напряжение ТРН, например для фазы А, с помощью единичных функций может быть записано:

- при синхронизации по напряжению:

$$\begin{aligned} \overline{u_A(\omega t)} = & u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1(\omega t - \alpha) - 1\left(\omega t - \left(\alpha + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right\} + \frac{u_{AB}(\omega t)}{2} \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\alpha + \lambda + \frac{\pi}{3}\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right) \right\} + \\ & + u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\alpha + \lambda - \frac{\pi}{3}\right)\right) \right\} + \frac{u_{AC}(\omega t)}{2} \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\alpha + \lambda - \frac{\pi}{3}\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right\} + \\ & + u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right) - 1(\omega t - (\alpha + \lambda)) \right\}; \end{aligned}$$

- при синхронизации по току:

$$\begin{aligned} \overline{u_A(\omega t)} = & u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1\left(\omega t - (\gamma + \delta)\right) - 1\left(\omega t - \left(\frac{\pi}{3} + \delta\right)\right) \right\} + \frac{u_{AB}(\omega t)}{2} \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\frac{\pi}{3} + \delta\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\frac{\pi}{3} + \delta + \gamma\right)\right) \right\} + \\ & + u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\frac{\pi}{3} + \delta + \gamma\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3} + \delta\right)\right) \right\} + \frac{u_{AC}(\omega t)}{2} \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3} + \delta\right)\right) - 1\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3} + \delta + \gamma\right)\right) \right\} + \\ & + u_A(\omega t) \cdot \left\{ 1\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3} + \delta + \gamma\right)\right) - 1(\omega t - (\pi + \delta)) \right\}. \end{aligned}$$

Тригонометрический ряд Фурье для выходного напряжения ТРН имеет вид:

$$\overline{u_A(\omega t)} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где n – номер гармонической составляющей напряжения, $n = 1, 5, 7, 11, \dots$; A_n – амплитудное значение n -й гармоники; φ_n – фаза n -й гармоники функции.

Величины A_n и φ_n выражаются через коэффициенты Фурье a_n и b_n :

$$A_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2}, \quad \varphi_n = -\arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (2)$$

Коэффициенты Фурье a_n и b_n с учетом интегрирования по пределам и последующих тригонометрических преобразований определяются выражениями:

– при синхронизации тиристоров ТРН по напряжению:

$$a_n = U \cdot \frac{1 + \cos \frac{\pi \cdot n}{3}}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{n-1} \cdot \sin \frac{n-1}{2} (2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \frac{n-1}{2} \lambda - \frac{2}{n+1} \cdot \sin \frac{n+1}{2} (2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \frac{n+1}{2} \lambda \right], \quad (3)$$

$$b_n = U \cdot \frac{1 + \cos \frac{\pi \cdot n}{3}}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{n+1} \cdot \cos \frac{n+1}{2} (2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \frac{n+1}{2} \lambda - \frac{2}{n-1} \cdot \cos \frac{n-1}{2} (2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \frac{n-1}{2} \lambda \right]; \quad (4)$$

– при синхронизации тиристоров ТРН по току:

$$a_n = U \cdot \frac{1 + \cos \frac{\pi \cdot n}{3}}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{n-1} \cdot \sin \frac{n-1}{2} (2 \cdot \delta + \gamma) \cdot \sin \frac{n-1}{2} \gamma - \frac{2}{n+1} \cdot \sin \frac{n+1}{2} (2 \cdot \delta + \gamma) \cdot \sin \frac{n+1}{2} \gamma \right], \quad (5)$$

$$b_n = U \cdot \frac{1 + \cos \frac{\pi \cdot n}{3}}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{n+1} \cdot \cos \frac{n+1}{2} (2 \cdot \delta + \gamma) \cdot \sin \frac{n+1}{2} \gamma - \frac{2}{n-1} \cdot \cos \frac{n-1}{2} (2 \cdot \delta + \lambda) \cdot \sin \frac{n-1}{2} \gamma \right]. \quad (6)$$

Действующее значение гармонических составляющих напряжения определяются:

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_n^2(\omega t) \, d\omega t}, \quad (7)$$

где $u_n(\omega t)$ – мгновенные значения гармонических составляющих напряжения; n – номер гармонической составляющей напряжения, $n = 1, 5, 7, 11, \dots$.

Действующее значение первой гармоники напряжения:

– при синхронизации тиристоров ТРН по напряжению:

$$U_1 = U \cdot \sqrt{\left[\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \lambda \right]^2 + \left[\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \alpha - \frac{1}{2} - \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(2 \cdot \alpha + \lambda) \cdot \sin \lambda \right]^2}; \quad (8)$$

– при синхронизации тиристоров ТРН по току:

$$U_1 = U \cdot \sqrt{\left[\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(2 \cdot \delta + \gamma) \cdot \sin \gamma \right]^2 + \left[1 - \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \gamma + \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(2 \cdot \delta + \gamma) \cdot \sin \gamma \right]^2}, \quad (9)$$

где U – действующее значение питающего фазного напряжения ($U = 220$), В.

На рис. 1 и 2 представлены рассчитанные зависимости действующего значения 1, 5, 7 и 11 гармоник выходного напряжения ТРН от угла управления при синхронизации тиристоров по напряжению и по току соответственно.

Как показано в [3] в ТРН с синхронизацией по напряжению первая гармоника напряжения смещена относительно напряжения сети из-за зоны нечувствительности преобразователя, что приводит к дополнительному потреблению реактивной мощности.

Влияние высших гармоник оценивается коэффициентом искажения напряжения:

$$v_U = \frac{U_1}{U} = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_n U_n^2}}. \quad (10)$$

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента искажения напряжения от угла нагрузки при различных углах управления тиристорами для случая синхронизации тиристоров по напряжению (а) и по току (б).

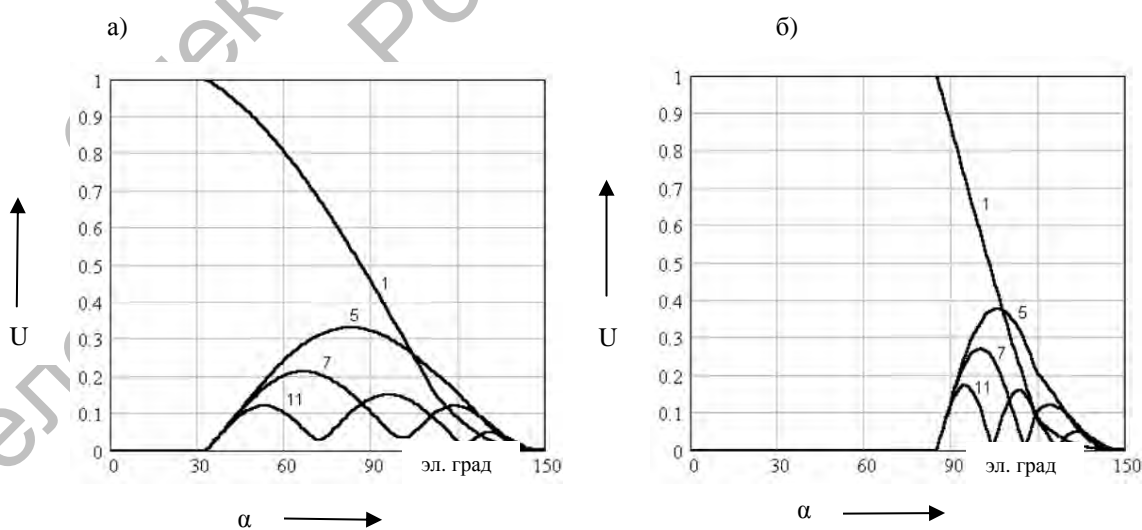


Рис. 1. Зависимости действующего значения 1, 5, 7, 11 гармоник выходного напряжения ТРН от угла управления α (угол нагрузки): а – $\varphi = \varphi_{\min} = 33$ эл. град; б – $\varphi \approx \varphi_{\max} = 85$ эл. град

Анализ рассчитанных зависимостей показывает, что в отличие от синхронизации по напряжению в ТРН с синхронизацией по току с ростом угла нагрузки гармонический состав выходного напряжения при постоянном угле управления тиристорами ($\gamma = \text{const}$) ухудшается.

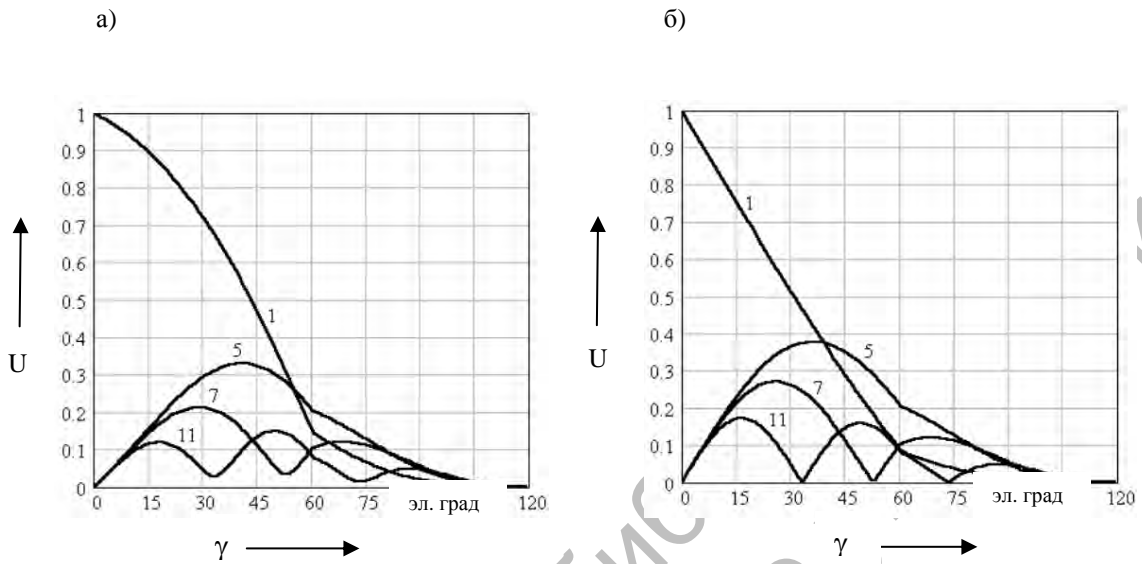


Рис. 2. Зависимости действующего значения 1, 5, 7, 11 гармоник выходного напряжения ТРН от угла управления γ (угол нагрузки): а – $\varphi = \varphi_{\min} = 33$ эл. град; б – $\varphi \approx \varphi_{\max} = 85$ эл. град

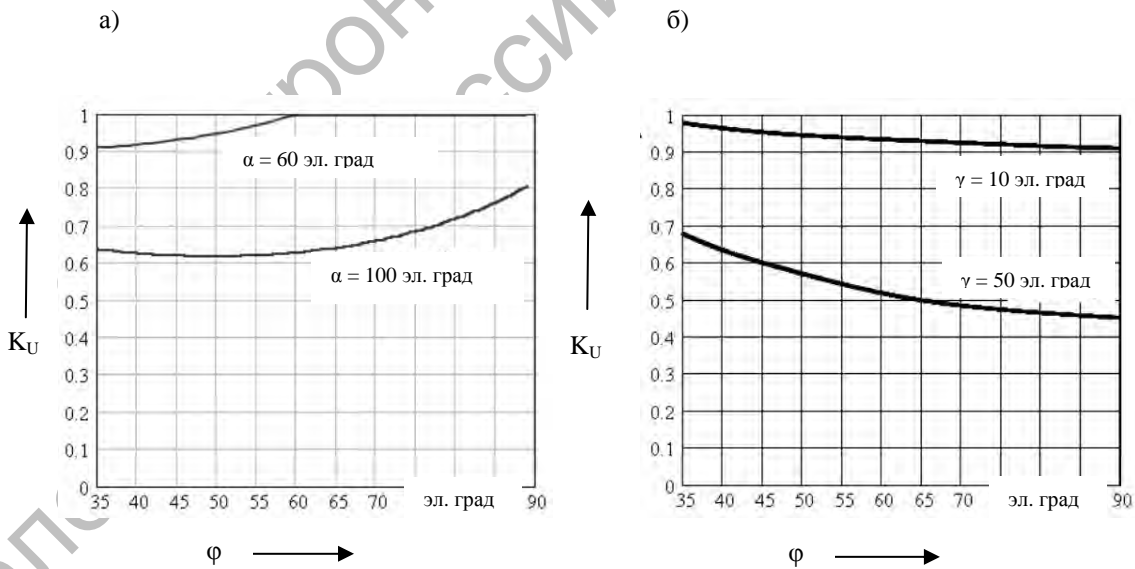


Рис. 3. Зависимости коэффициента искажения напряжения от угла нагрузки φ при постоянных углах открытия тиристорov: а – для случая синхронизации по напряжению; б – для случая синхронизации по току

Гармонический анализ токов нагрузки. Ряд Фурье для определения гармонических токов нагрузки имеет вид:

$$i_n(\omega t) = a_n \cdot \cos(n \cdot \omega t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega t). \quad (11)$$

Выражения для коэффициентов Фурье a_n и b_n ввиду их громоздкости и ограниченного объема статьи опущены [4].

Действующее значение гармонической составляющей тока нагрузки определяется по выражению

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\pi} [i_n(\omega t)]^2 d\omega t \right)}, \quad (12)$$

где $i_n(\omega t)$ – мгновенные значения n -й гармоники тока; n – номер гармонической составляющей, $n = 1, 5, 7, 11, \dots$.

Качественно оценить влияние высших гармоник тока можно с помощью коэффициента искажения тока:

$$v_I = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_n I_n^2}}, \quad (13)$$

где I_1 – действующее значение первой гармоники тока нагрузки; I – действующее значение полного тока нагрузки; I_n – действующее значение n -й гармоники тока нагрузки.

На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости коэффициента искажения тока от угла нагрузки при углах управления тиристорами (а) и относительные максимальные действующие значения 1, 5, 7, 11 и 13 гармоник тока нагрузки (б) для ТРН с синхронизацией по напряжению. На рис. 5 приведены аналогичные зависимости для ТРН с синхронизацией по току.

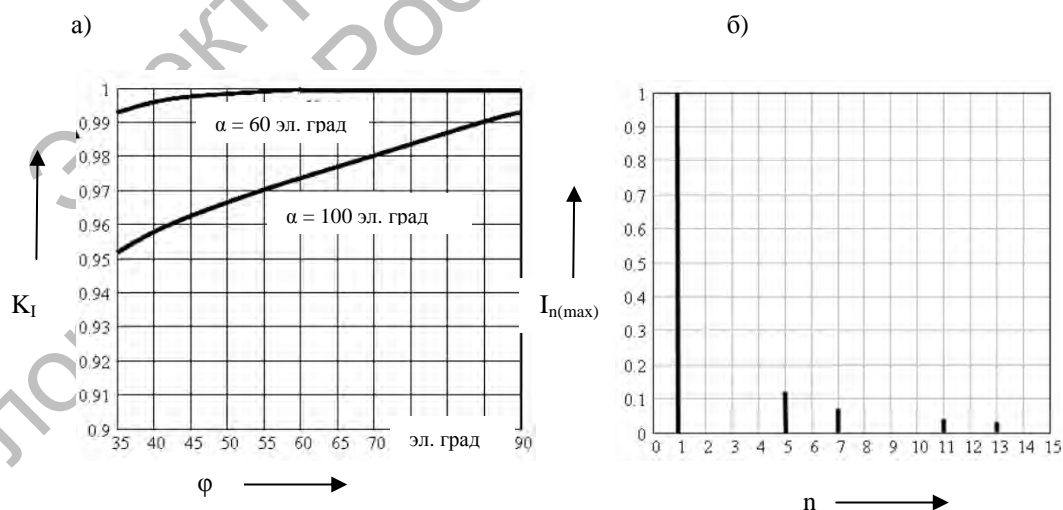


Рис. 4. Зависимости коэффициента искажения тока от угла нагрузки φ при постоянных углах открытия тиристорov α : а – максимальные действующие значения 1, 5, 7, 11, 13 гармоник тока нагрузки в пределах $\varphi = 35 \dots 85$ эл. град; б – для ТРН с синхронизацией по напряжению

С ростом угла нагрузки (при синхронизации тиристоров по напряжению) гармонический состав тока улучшается и при $\varphi \geq \alpha$ в спектре тока нагрузки не присутствуют высшие гармонические составляющие. С ростом же угла управления тиристорами гармонический состав тока нагрузки ухудшается, о чем свидетельствует уменьшение значения коэффициента искажения тока (см. рис. 4).

При синхронизации ТРН по току нагрузки, при постоянном угле управления тиристорами ($\gamma = \text{const}$) с ростом угла нагрузки (т.е. при уменьшении нагрузки на валу АД) гармонический состав тока не изменяется, коэффициент искажения тока постоянный на всем диапазоне изменения угла нагрузки φ . С ростом угла управления тиристорами γ гармонический состав тока нагрузки, как и в случае синхронизации ТРН по напряжению, ухудшается, и это очевидно.

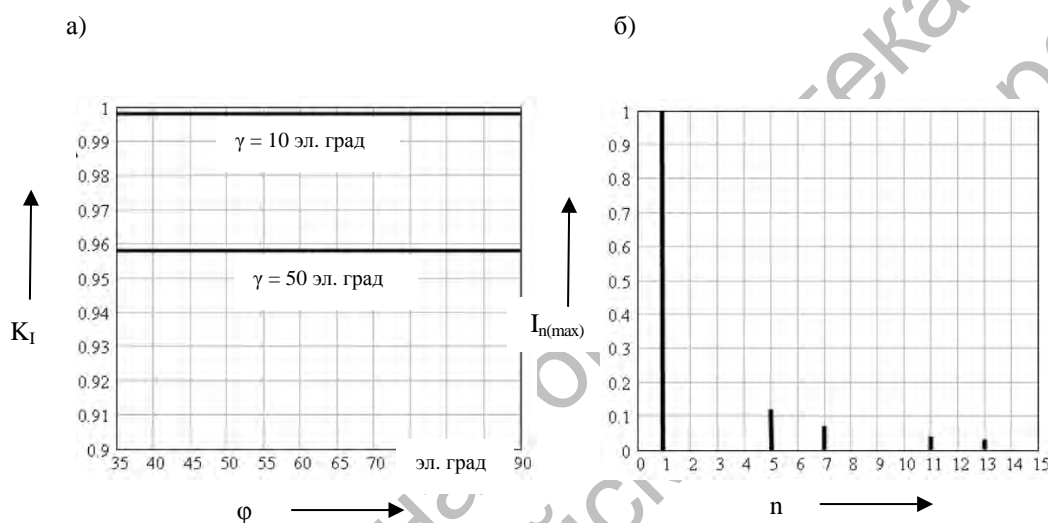


Рис. 5 Зависимости коэффициента искажения тока от угла нагрузки φ при постоянных углах открытия тиристорov α : а – максимальные действующие значения 1, 5, 7, 11, 13 гармоник тока нагрузки в пределах $\varphi = 35 \dots 85$ эл. град; б – для ТРН с синхронизацией по току

При синхронизации тиристорov ТРН по току, как и в случае синхронизации тиристорov по напряжению, наибольшее влияние на ток нагрузки оказывают пятая и седьмая гармоники: пятая гармоника – приблизительно 12 %, седьмая гармоника – приблизительно 6 %, одиннадцатая и тринадцатая меньше 3 %.

Таким образом, на основании проведенных расчетов показано, что при синхронизации тиристорov по току нагрузки коэффициент искажения тока практически не изменяется при изменении угла нагрузки и зависит от угла управления тиристорами, с увеличением которого коэффициент искажения тока уменьшается.

На основании проведенного гармонического анализа напряжений и токов нагрузки систем ТРН-АД с синхронизацией по напряжению и по току можно сделать следующие выводы:

1) в отличие от синхронизации по напряжению в ТРН с синхронизацией по току с ростом угла нагрузки гармонический состав выходного напряжения при постоянном угле управления тиристорами ($\gamma = \text{const}$) ухудшается, но так как при данном способе управления тиристорами отсутствует зона нечувствительности, обусловленная собственно углом нагрузки, то отсутствует и дополнительный сдвиг первой гармоники

напряжения относительно питающего напряжения сети, определяющий дополнительное потребление реактивной мощности системой ТРН-АД;

2) в ТРН с синхронизацией по току коэффициент искажения тока определяется только углом управления γ , в отличие от ТРН с синхронизацией по напряжению, где на этот коэффициент влияет и момент нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грейвулис, Я. П.** Тиристорный асинхронный ЭП для центробежных насосов / Я. П. Грейвулис, Л. П. Рыбицкий. – Рига : Зинатне, 1983 – 228 с. : ил.
2. **Коваль, А. С.** О коэффициенте мощности системы ТРН-АД в установившемся режиме работы при фазовом управлении и при управлении по углу бестоковой паузы / А. С. Коваль, Б. Б. Скарыно // ЭП переменного тока : тр. 12 междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2000. – С. 34-39.
3. **Браславский, И. Я.** Исследование свойств систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» с различными типами синхронизации / И. Я. Браславский, А. М. Зюзев, А. В. Костылев // Электротехника. – 2000. – № 9. – С. 1-5.
4. **Скарыно, Б. Б.** Асинхронный электропривод с тиристорным регулятором напряжения и синхронизацией по напряжению и по току : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск : 2005. – 24 с.
5. **Пат. 2805 РБ, МКП⁶ Н 02Р 7/36, Н 02Р 7/622.** Устройство для управления асинхронным двигателем / А. С. Коваль, Б. Б. Скарыно ; заявитель и патентообладатель Могилев. машиностр. ин-т. - № 950900 ; заявл. 20.10.95 ; опубл. 30.06.99, Бюл. № 2. – 4 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.02.2006

A. S. Koval, B. B. Skaryna
**Comparative harmonic analysis of
the voltages and current of the system
«Thyristor-voltage – asynchronous
electric motor» with synchronizing
on voltage and on current**
Belarusian-Russian University

The comparative harmonic analysis of the voltages and current of the «thyristor-voltage converter - asynchronous electric motor» system with voltage and current synchronizing is done. It is shown that when current synchronizing while torque angle grows and with constant control angle the harmonic composition of the output voltage becomes worse, and that the current distortion factor in the thyristor-voltage converter with current synchronizing depends on control angle only, despite of thyristor-voltage converter with voltage synchronizing where the load torque influences on it.