

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

У статті наведено результати дослідження впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії вентильного двигуна. Показники якості перетворення енергії вентильним двигуном оцінюються показниками струму, напруги і потужності. Показано, що зі збільшенням навантаження двигуна коефіцієнти форми, амплітуди і гармонічні коефіцієнти прагнуть до значень характерних для синусоїдального струму. Для інженерних розрахунків при орієнтовній оцінці якості перетворення енергії вентильним двигуном показники струму досить визначити з урахуванням основної і кількох перших гармонік. Показники, які характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонічний склад, знаходяться в складній функціональній залежності від способу керування приводом, а також кутів випередження, комутації і запасу. Показники якості напруги погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. Для реальних кутів комутації і способу керування в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні, показники якості напруги та потужності вентильного двигуна відповідають кращим показникам частотно-регульованого привода з асинхронними двигунами. У статті показано, що так само, як і показники напруги, показники перетворення потужності значно вищі для способу керування підтримання сталої величини кута запасу на мінімальному рівні, ніж для підтримання сталого значення кута випередження. Розрахунки показують, що у разі реалізації способу керування в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні втрати у вентильних двигунах від вищих гармонічних складників невеликі і можуть бути зменшені за рахунок збільшення індуктивності згладжувального дротеля.

**Ключові слова:** вентильний двигун, якість перетворення енергії, перетворювач, кут випередження, комутації та запасу.

**Вступ.** Одним з критеріїв вибору типу регульованого електропривода є якість перетворення електричної енергії, яка характеризується формою і гармонічним складом струмів і напруг на виході комутатора (перетворювача) [1]. Показники якості перетворення енергії вентильним двигуном (ВД) оцінюються показниками струму, напруги і потужності.

Смуга пропускання перетворювача, керованого за положенням ротора синхронного двигуна (СД), регулюється зміною кута випередження  $\beta_0$  або  $\beta$  (кути між струмом і відповідно електрорушійною силою (ЕРС) неробочого ходу та напругою двигуна).

**Аналіз попередніх досліджень.** Існують такі способи керування перетворювачем ВД [2].

Перший та другий найпростіші способи керування полягають у підтриманні сталого значення кута випередження  $\beta_0 = \text{const}$  або  $\beta = \text{const}$ , де  $\beta_0 = \beta + \theta$ ;  $\theta$  - кут навантаження СД;  $\beta = \gamma + \delta$ ;  $\gamma$  - кут комутації;  $\delta$  - кут запасу (враховує похибку системи керування і тривалість відновлення замикаючих властивостей електронних ключів перетворювача).

За цими способами керування кут випередження лишається сталим у всіх режимах роботи привода й розраховується відповідно до максимальної величини навантаження. В цьому випадку струму холостого ходу відповідає найбільше значення кута запасу  $40^\circ \dots 50^\circ$ , хоч для відновлення замикаючих властивостей ключів достатньо  $3^\circ \dots 5^\circ$ .

Третій спосіб керування полягає в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$  за умови  $\delta = \delta_{\min} = \text{const}$ .

**Метою роботи** є дослідження впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії ВД.

**Матеріали і результати досліджень.** Для встановлення впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії ВД проведемо аналітичне дослідження. Встановимо такі припущення: перетворювач працює в режимі джерела струму з випереджаючим коефіцієнтом потужності; для комутації ключів інвертора використовується реактивна енергія СД; відсутня широтно-імпульсна модуляція напруги; падіння напруги на ключах перетворювача відсутнє; напруга синусоїдальна, з комутаційними провалами й викидами, амплітуда яких дорівнює середньому значенню двох сусідніх напруг, а тривалість визначається кутом комутації; струм змінюється лінійно в процесі комутації, ідеально згладжений і має трапецеїдальну форму, а напівперіод струму складається з ділянок провідності  $120^\circ + \gamma$  і паузи  $60^\circ - \gamma$ ; кут навантаження, будучи внутрішнім параметром СД, не спричиняє впливу на енергетичні характеристики перетворювача.

Зв'язок між амплітудним  $I_m$ , середнім  $I_d$  і діючим за половину періоду  $I$  значеннями струму визначає  
© О.О. Закладний, 2019

ється коефіцієнтами форми  $k_\phi$  і амплітуди  $k_a$ , обчислюваними за відомими формулами:

$$k_\phi = \frac{I}{I_d}; \quad k_a = \frac{I_m}{I}. \quad (1)$$

Гармонічний склад струму якоря двигуна характеризується коефіцієнтами:

$$k_n = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2}; \quad k_c = \frac{I_{(1)}}{I}; \quad k_r = \frac{1}{I_{(1)}} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2}; \quad i^* = \frac{1}{k_c}, \quad (2)$$

де  $k_n, k_c, k_r$  - коефіцієнти відповідно пульсації, спотворення і гармонік;  $i^*$  - відносна величина діючого значення струму;  $I_{(1)}$  і  $I_{(6p\pm 1)}$  - діючі значення першої і вищих гармонік струму.

Значення коефіцієнтів  $k_\phi, k_a, k_n, k_c, k_r, i^*$  для різних кутів комутації  $\gamma$ , обчислені за формулами (1) і (2) з урахуванням гармонік струму від першої до 43-ї, наведені в чисельнику умовного дробу табл. 1. Аналіз табл. 1 показує, що зі збільшенням навантаження двигуна коефіцієнти форми, амплітуди і гармонічні коефіцієнти прагнуть до значень характерних для синусоїдального струму.

Таблиця 1. Залежність коефіцієнтів струму ВД від кута комутації.

$\gamma$ , град	$k_\phi$	$k_a$	$k_n$	$k_c$	$k_r$	$i^*$
10	<u>1,21</u>	<u>1,242</u>	<u>0,261</u>	<u>0,967</u>	<u>0,222</u>	<u>1,034</u>
	1,169	1,28	0,242	0,9	0,218	1,111
20	<u>1,19</u>	<u>1,26</u>	<u>0,25</u>	<u>0,978</u>	<u>0,215</u>	<u>1,022</u>
	1,164	1,26	0,22	0,917	0,2	1,09
30	<u>1,172</u>	<u>1,28</u>	<u>0,193</u>	<u>0,986</u>	<u>0,167</u>	<u>1,014</u>
	1,147	1,307	0,183	0,937	0,168	1,067
40	<u>1,155</u>	<u>1,299</u>	<u>0,142</u>	<u>0,992</u>	<u>0,124</u>	<u>1,008</u>
	1,146	1,306	0,141	0,961	0,129	1,041
50	<u>1,137</u>	<u>1,319</u>	<u>0,092</u>	<u>0,997</u>	<u>0,081</u>	<u>1,003</u>
	1,133	1,32	0,094	0,982	0,087	1,018
60	<u>1,125</u>	<u>1,342</u>	<u>0,052</u>	<u>0,999</u>	<u>0,046</u>	<u>1,001</u>
	1,117	1,34	0,048	0,995	0,045	1,005

Для інженерних розрахунків при орієнтовній оцінці якості перетворення енергії ВД показники струму досить визначити з урахуванням основної і кількох перших гармонік [3]. В такому випадку коефіцієнти струму мають вигляд:

$$k_\phi = \frac{3\sqrt{6}\sin\frac{\gamma}{2}}{\pi\gamma}; \quad k_a = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{6}\sin\frac{\gamma}{2}}; \quad k_n = \frac{0,1}{\gamma}\sin 5\frac{\gamma}{2}; \quad k_c = \frac{\sin\frac{\gamma}{2}}{\sqrt{\sin^2\frac{\gamma}{2} + 0,01\sin^2 5\frac{\gamma}{2}}}; \quad k_r = 0,045 \frac{\sin 5\frac{\gamma}{2}}{\sin\frac{\gamma}{2}}. \quad (3)$$

Правомірність такого підходу підтверджується порівнянням чисельника і знаменника умовного дробу (табл. 1), в знаменнику якого наведені значення відповідних коефіцієнтів, обчислених за формулами (3). Похибка, яка допускається при такому розрахунку, не перевищує в середньому 5...10%, що цілком задовольняє вимогам орієнтовної оцінки.

Показники, які характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонічний склад, знаходяться в складній функціональній залежності від способу керування приводом, а також кутів випередження, комутації і запасу. Отримати аналітичні залежності для них, зважаючи на громіздкість виразів для діючих значень першої гармоніки  $U_{(1)}$ , вищих гармонічних  $U_{(2k+1)}$  і напруги  $U$ , не є можливим. Тому з метою полегшення інженерних розрахунків в табл. 2. наведені значення коефіцієнтів, розрахованих з урахуванням гармонік напруги від першої до 41-ї за формулами:

$$k'_\phi = \frac{U}{U_\phi}; \quad k'_a = \frac{U_m}{U}; \quad k'_n = \frac{1}{U_d} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad k'_c = \frac{U_{(1)}}{U}; \quad k'_r = \frac{1}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad U^* = \frac{1}{k'_c},$$

де  $U_d = k_{cx} U \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \cos\frac{\gamma}{2}$ ;  $k_{cx} = 1,35$  – коефіцієнт схеми трифазного мостового перетворювача.

Невиправдане збільшення кута запасу призводить до збільшення коефіцієнтів, які характеризують змінну складову напруги ( $k'_n, k'_r$ ), і зменшення коефіцієнту спотворення, що особливо виявляється в

номінальному режимі роботи привода ( $\gamma \approx 20$ ). Порівняння даних табл. 2 з опублікованими даними [4] показує, що для реальних кутів комутації і способу керування  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  показники якості напруги ВД відповідають кращим показникам частотно-регульованого привода (ЧРП) з асинхронними двигунами.

Таблиця 2. Залежність коефіцієнтів напруги ВД від кутів випередження, комутації і запасу

$\beta$ , град	$\gamma$ , град	$\delta$ , град	$k'_{\phi}$	$k'_a$	$k'_{II}$	$k'_c$	$k'_r$	$U^*$
20	10	10	0,8	1,355	0,252	0,949	0,331	1,054
	30	10	0,913	1,339	0,349	0,924	0,413	1,082
30	20	10	0,831	1,364	0,293	0,936	0,377	1,068
	10	30	0,934	1,374	0,344	0,93	0,396	1,075
	20	20	0,886	1,387	0,343	0,922	0,42	1,085
40	30	10	0,856	1,4	0,317	0,929	0,4	1,076
	10	40	1,109	1,34	0,518	0,884	0,528	1,131
	20	30	0,977	1,421	0,418	0,904	0,474	1,106
50	30	20	0,91	1,461	0,356	0,919	0,428	1,088
	40	10	0,87	1,48	0,309	0,935	0,38	1,07
	10	50	1,348	1,358	0,663	0,871	0,564	1,148
60	20	40	1,186	1,394	0,645	0,839	0,647	1,192
	30	30	1,032	1,487	0,508	0,872	0,56	1,147
	40	20	0,956	1,523	0,429	0,895	0,499	1,117
	50	10	0,852	1,558	0,327	0,926	0,407	1,08
70	10	60	1,81	1,38	0,914	0,862	0,588	1,16
	20	50	1,485	1,433	0,867	0,812	0,72	1,23
	30	40	1,287	1,466	0,842	0,79	0,777	1,266
	40	30	1,12	1,55	0,64	0,83	0,674	1,2
	50	20	1,04	1,57	0,542	0,854	0,61	1,17

Як видно з табл. 2, показники якості напруги погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. При цьому за способом керування  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  ці показники значно вищі, ніж за  $\beta=\text{const}$  (рис. 1).

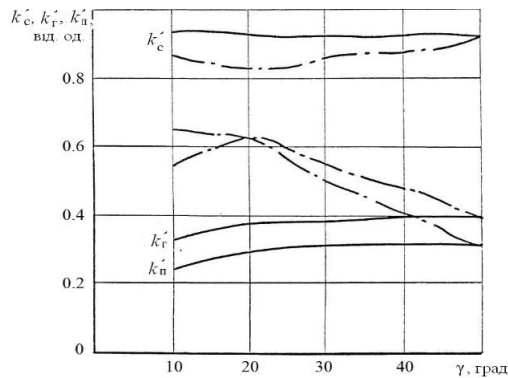


Рис. 1. Криві залежності коефіцієнтів  $k'_c, k'_r, k'_II$  від кута комутації: —  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  за умови  $\delta=10^\circ$ ; - -  $\beta=60^\circ=\text{const}$

Корисною потужністю у ВД є не сумарна активна потужність  $P_{\Sigma}$ , а потужність  $P_{(1)}$  перших гармонік напруги і струму. Поведінка ВД характеризується коефіцієнтами відносної активної потужності  $p^*$ , корисного застосування споживаної потужності  $C_k$  і термічним коефіцієнтом перевантаження  $C_t$ , які обчислюються за формулами [3]:

$$p^* = \frac{P_{\Sigma}}{P_{(1)}}; C_k = \frac{1}{p^*}; C_t = 1 + \frac{\sum_{k>1}^{\infty} P(k)}{\Sigma P}, \quad (4)$$

де  $P_{\Sigma} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U I_m \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma}{2}$ ;  $P_{(1)} = 3U_{(1)} I_{(1)} \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})$ ;  $\Sigma P$  - сума втрат активної потужності в міді і сталі СД;  $\sum_{k>1}^{\infty} P(k)$  - додаткові втрати активної потужності від вищих гармонічних складників.

Оскільки в кожній фазі ВД за один оберт валу струм протікає протягом  $2\left(\frac{2}{3}\pi + \gamma\right)$ , статорні обмотки використовуються гірше, ніж у звичайного СД. Тому при заданому моменті обертання фазні обмотки двигуна нагріватимуться сильніше, тобто ККД привода  $\eta_{вд}$ , що розраховується за виразом

$$\eta_{вд} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma p}{P_m \chi}} = \frac{\eta_c \chi}{\eta_c (\chi - 1) + 1}, \quad (5)$$

стане нижчим [3]. У виразі (5):  $\eta_c$ ,  $\chi$  - відповідно ККД СД і коефіцієнт використання ВД;  $P_m$  - механічна потужність.

Значення коефіцієнта використання  $\chi$  можна отримати з виразу потужності ВД за формулою

$$\chi = \frac{\gamma}{2} \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}. \quad (6)$$

Несинусоїдалне живлення СД призводить до необхідності підвищення його габаритної потужності, яке можна врахувати коефіцієнтом цієї потужності

$$C_\Gamma = \sqrt{1 + \frac{p^* - 1}{1 - \eta_c}}. \quad (7)$$

Повна потужність двигуна  $S$  в схемі ВД визначається трьома складниками, які знаходимо за допомогою інтегральних методів:

$$S = \sqrt{P_\Sigma^2 + Q^2 + P_c^2} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi k_c} U I_m; \quad Q = P_\Sigma \operatorname{tg}\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right); \quad P_c = \sqrt{\left(\frac{1}{k_c^2} - 1\right)(P_\Sigma^2 + Q^2)} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U I_m \sqrt{\frac{1}{k_c^2} - 1}, \quad (8)$$

де  $Q$ ,  $P_c$  - відповідно реактивна потужність і потужність спотворення.

Коефіцієнт потужності  $k_p$  на затискачах статора СД розраховується за формулою

$$k_p = \frac{P_{(1)}}{S} = k_c k_3 \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}, \quad (9)$$

де  $k_3 = \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$  - коефіцієнт зсуву двигуна;  $\sin \frac{\gamma}{2} / \frac{\gamma}{2}$  - величина, яка враховує припущення  $U_{(1)} \approx U$ .

Коефіцієнти  $p^*$ ,  $C_k$ ,  $C_t$ ,  $\chi$ ,  $\eta_{вд}$ ,  $C_\Gamma$ ,  $k_3$  і  $k_p$ , розраховані для  $\eta_c = 0,936$  за формулами (4)...(9), наведені в табл.3, з якої видно, що так само, як і показники напруги, показники перетворення потужності значно вищі для способу керування  $\beta_{\min} = f(\gamma)$ , ніж для  $\beta = \text{const}$ .

Таблиця 3. Залежності коефіцієнтів потужності ВД від кутів випередження, комутації і запasu

$\beta$ ,град	$\gamma$ ,град	$\delta$ ,град	$p^*$	$C_k$	$C_t$	$\chi$	$\eta_{вд}$	$C_\Gamma$	$k_3$	$k_p$
20	10	10	1,053	0,95	1,842	0,964	0,934	1,352	0,966	0,934
		20	1,087	0,92	2,351	0,9	0,93	1,536	0,906	0,876
30	10	10	1,06	0,943	1,958	0,93	0,932	1,392	0,94	0,919
		30	1,079	0,927	2,229	0,817	0,923	1,495	0,819	0,792
40	20	20	1,079	0,927	2,233	0,857	0,926	1,495	0,866	0,85
		30	1,04	0,962	1,629	0,886	0,928	1,275	0,906	0,894
50	10	40	1,139	0,878	3,171	0,71	0,912	1,781	0,707	0,684
		20	1,091	0,917	2,425	0,758	0,917	1,556	0,766	0,75
		30	1,046	0,956	1,714	0,8	0,921	1,311	0,819	0,808
		40	1,034	0,967	1,538	0,831	0,924	1,237	0,866	0,86
60	10	50	1,153	0,867	3,4	0,572	0,893	1,841	0,5736	0,555
		20	1,193	0,838	4,0	0,636	0,903	2,004	0,6428	0,63
		30	1,107	0,903	2,661	0,691	0,91	1,635	0,7071	0,697
		40	1,068	0,936	2,06	0,735	0,915	1,436	0,766	0,76
		50	1,008	0,992	1,127	0,77	0,918	1,06	0,8192	0,817
70	10	60	1,1	0,968	2,55	0,422	0,861	1,6	0,423	0,41
		20	1,165	0,858	3,6	0,495	0,88	1,89	0,5	0,489
		30	1,113	0,898	2,755	0,56	0,891	1,663	0,574	0,566
		40	1,083	0,923	2,314	0,616	0,9	1,516	0,643	0,638
		50	1,047	0,955	1,732	0,66	0,906	1,317	0,707	0,705

Так, наприклад, для  $\beta = 60^\circ$  при  $\gamma = 20^\circ$  коефіцієнти мають наступні значення:  $p^* = 1,193$ ;  $C_k = 0,838$ ;  $C_t = 4$ ;  $\chi = 0,636$ ;  $\eta_{вд} = 0,903$ ;  $C_r = 2$ ;  $k_s = 0,6428$ ;  $k_p = 0,63$ .

Для закону  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  при  $\delta = 10^\circ$  і  $\gamma = 20^\circ$  ці величини такі:  $p^* = 1,06$ ;  $C_k = 0,943$ ;  $C_t = 1,958$ ;  $\chi = 0,93$ ;  $\eta_{вд} = 0,932$ ;  $C_r = 1,392$ ;  $k_s = 0,94$ ;  $k_p = 0,919$ . Але ці значення не є максимально можливими.

При  $\gamma \approx 20^\circ$  і малому часі відновлення вентилів коефіцієнти  $p^*$ ,  $C_k$ ,  $\chi$ ,  $k_s$ ,  $k_p$  близькі до одиниці, а  $\eta_{вд} \approx \eta_c$ . Порівняння даних табл. 3 з опублікованими даними [4, 5] показує, що для реальних кутів комутації і способу керування  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  показники якості потужності ВД не гірші за аналогічні показники ЧРП.

На рис. 2...4 наведені залежності коефіцієнтів  $p^*$ ,  $\chi$  і  $\eta_{вд}$  від кутів параметрів і способу керування.

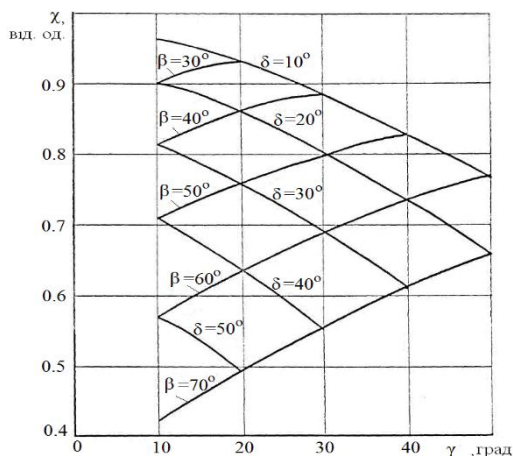


Рис. 2. Залежності коефіцієнта відносної потужності ВД від кутів параметрів і способів керування

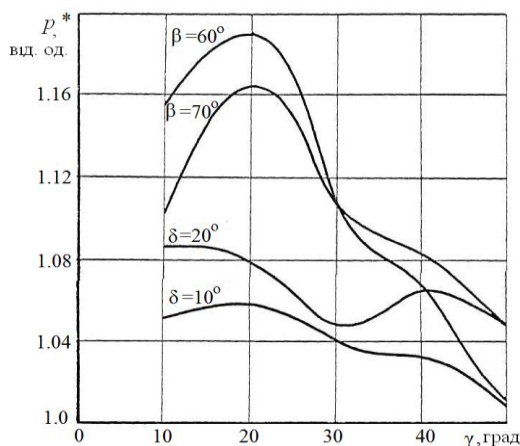


Рис. 3. Залежності коефіцієнта використання ВД від кутів параметрів і способів керування

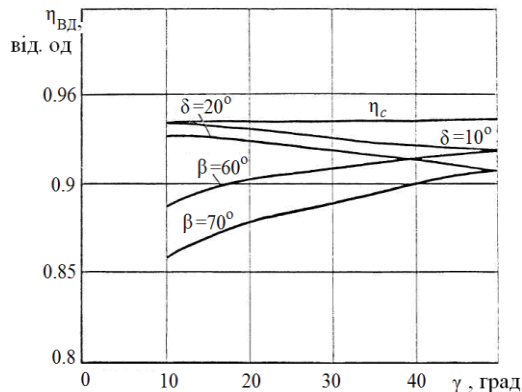


Рис. 4. Залежності ККД ВД від кутів параметрів і способів керування

**Висновки.** Якщо кут випередження підтримувати сталим, то коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = \cos\frac{\gamma}{2}$  залежить від навантаження, і СД працює з найбільшим коефіцієнтом потужності і найкращими енергетичними показниками лише в номінальному режимі. В усіх інших режимах, тобто зі зменшеним навантаженням привод працює з погіршеними енергетичними показниками.

Навпаки, виконання способу керування  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  за умови  $\delta = \delta_{\min} = \text{const}$  забезпечує роботу СД із максимальною величиною коефіцієнта потужності  $\cos\varphi = \cos(\delta_{\min} + \frac{\gamma}{2})$ , тобто з мінімальним споживанням реактивної енергії і найкращими енергетичними показниками при всіх можливих значеннях частот машинної комутації і навантаження.

За реальних кутів комутації і малим часом відновлення ключів коефіцієнт потужності прямує до одиниці, а ККД привода – до ККД двигуна.

Розрахунки показують, що у разі  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  втрати у ВД від вищих гармонічних складників невеликі і можуть бути зменшені за рахунок збільшення індуктивності згладжувального дроселя.

Отримані результати дозволяють конструктору при виборі електропривода і мінімізації встановленої потужності устаткування достатньо просто і з високою точністю врахувати вплив параметрів перетворювача, двигуна і способу керування на якість перетворення енергії у ВД.

#### Список використаної літератури

1. Закладний, О. М., Сучасні методи регулювання якості електроенергії [Текст] / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2007. – №2. – С. 25 – 30.
2. Закладной, А. Н. Разработка и исследования математической модели вентиляльного двигателя [Текст] / А.Н. Закладной, В.Ю. Передрий, В.В. Гром, И.В. Петин // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2004. – №2. – С. 46 – 54.
3. Закладной, А. Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: Монография [Текст] / А.Н. Закладной, О.А. Закладной – К.: Издательство «Либра», 2012. – 185 с.: ил.
4. Алиев, И. И. Коэффициент мощности асинхронного энергосберегающего двигателя [Текст] / И.И. Алиев // Электротехника. – 2004. – №5. – С. 29...31.
5. Фираго, Б. И. Сравнительный анализ качества преобразования электрической энергии силовыми схемами циклоконверторов [Текст] / Б.И. Фираго, З.А. Лисс // Электротехн. пром-сть. Сер. Преобразоват. Техника. – 1978. – №6 (101). – С. 16–19.

**O. Zakladnyi**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692  
**National Technical University of Ukraine**  
**“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## QUALITY OF ELECTRICITY CONVERSION BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR

*The results of the impact study ways to control the switch to electricity conversion quality valve engine. Quality energy conversion brushless estimated parameters of current, voltage and power. It is shown that an increase in engine load factors shape, amplitude and harmonic ratios tend to values characteristic sinusoidal current. For engineering calculations when assessing the quality indicative of power conversion valve motor current can sufficiently identify with the main and first few harmonics. The indicators characterizing the shape of the voltage curve of the engine and its harmonic components, are difficult depending on how functional the drive and advance angles, switching and stock. Quality deteriorate with increasing voltage angles and advancing stock. For real corners and mode switching control to maintain a constant angle stock at a minimum, quality voltage and power brushless correspond best indicator variable-frequency drive with induction motors. The article shows that as well as indicators voltage power conversion rates are much higher for the process control to maintain a constant angle stock at a minimum, to maintain than the angle of sustainable value. Calculations show that in the case of the control method to maintain a constant angle stock at a minimum loss in valve engine from the higher harmonic components are small and can be reduced by increasing the inductance smoothing choke.*

**Key words:** valve engine conversion quality power converter, timing angle, switching and stock.

#### References

1. Zakladnyi, A. and Zakladnyi, O. (2007), “Modern methods of regulating power quality”, *Electricity and electrical industries (Promelectro)*. – Vol. 2, pp. 25 – 30.

2. Zakladnyy, A., Perediy, V., Grom, V. and Petin, I. (2004), "Development and research of the mathematical model of the valve motor", *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, Vol. 2, pp. 46 – 54.

3. Zakladnyy, A., and Zakladnyy O. (2012), *Energy efficient electric drive with valve motors*, Publishing house "Libra", Kyiv.

4. Aliyev, I.I. (2004), The power factor of an asynchronous energy-saving engine, *Electrical engineering*, Vol. 5. pp. 29 – 31.

5. Firago, B.I. and Liss, Z.A. (1978), Comparative analysis of the quality of conversion of electrical energy by power circuits of cycloconverters. - *Electrotechnical industry. Conversion series. Technique*, Vol. 6 (101), pp. 16-19.

**УДК 62-83-52.003(082)**

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*В статье приведены результаты исследования влияния способов управления коммутатором на качество преобразования электроэнергии вентильным двигателем. Показатели качества преобразования энергии вентильным двигателем оцениваются показателями тока, напряжения и мощности. Показано, что с увеличением нагрузки двигателя коэффициенты формы, амплитуды и гармоничные коэффициенты стремятся к значениям характерных для синусоидального тока. Для инженерных расчетов при ориентировочной оценке качества преобразования энергии вентильным двигателем сила тока достаточно определить с учетом основной и нескольких первых гармоник. Показатели, характеризующие форму кривой напряжения двигателя и ее гармоничный состав, находятся в сложной функциональной зависимости от способа управления приводом, а также углов опережения, коммутации и запаса. Показатели качества напряжения ухудшаются с увеличением углов опережения и запаса. Для реальных углов коммутации и способа управления в поддержании постоянной величины угла запаса на минимальном уровне, показатели качества напряжения и мощности вентильного двигателя соответствуют лучшим показателям частотно-регулируемого привода с асинхронными двигателями. В статье показано, что так же, как и показатели напряжения, показатели преобразования мощности значительно выше для способа управления поддержания постоянной величины угла запаса на минимальном уровне, чем для поддержания постоянного значения угла опережения. Расчеты показывают, что в случае реализации способа управления в поддержании постоянной величины угла запаса на минимальном уровне потери в вентильных двигателях от высших гармонических составляющих небольшие и могут быть уменьшены за счет увеличения индуктивности сглаживающего дросселя*

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, качество преобразования энергии, преобразователь, угол опережения, коммутации и запаса.

Надійшла 19.01.2020

Received 19.01.2020