

Н. М. Куравська, М. О. Попов, Д. С. Шелякін, Р. О. Плошко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИНХРОННОЇ ЧАСТОТИ ІЗ СКЛАДУ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ЇХ МОДЕРНІЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ДОСВІДУ ОПЕРАЦІЇ ОБ'ЄДНАНИХ СИЛ

В статті розглядається спосіб модернізації перетворювача синхронної частоти, заснований на удосконаленні підшипникових вузлів. Де енергетичні втрати в підшипниках складаються в основному з втрат на тертя, що виникають внаслідок проковзування в місцях контакту тіл кочення з кільцями і сепаратором, недосконалою якістю матеріалу тіл кочення і кільця а також механічних втрат змащувальному матеріалі. Вони не є постійними у часі і визначаються конструкцією підшипника, режимами його роботи і мастилом, а тому потужність в деякій мірі витрачається на подолання тертя в підшипнику. **Мета статті.** Визначення впливу коефіцієнта тертя підшипників на роботу перетворювачів частоти та надати пропозиції, щодо модернізації перетворювачів синхронної частоти. **Висновки.** Запропоновані нові підшипники суттєво знижують коефіцієнт тертя при цьому збільшуючи час напрацювання перетворювачів синхронної частоти. Завдяки модернізації ПСЧ можливо забезпечити стабільність частоти перетвореної напруги та забезпечити потрібну надійність в електропостачанні та зменшити втрати майже 1,5 рази. Запропоноване технологічне рішення удосконалення ПСЧ з новими типами підшипників, вони мають суттєвий недолік пов'язаний з труднощами, які можуть виникнути при виготовленні, але мають порівняно високий строк служби. Удосконалення підшипника заключається у зміні конструкції зі збереженням технічних вимог до них, але вже без сепаратора та мастил (змащення).

Ключові слова: перетворювач синхронної частоти, коефіцієнт тертя підшипників, механічні втрати, безперебійність, збільшення напрацювання перетворювачів синхронної частоти.

Вступ

Постановка проблеми. Участь Збройних Сил України в операції об'єднаних сил (ООС) та подальша інтеграція Збройних Сил України в структури НАТО підтверджуються важливістю модернізації зразків озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ (ЗРВ) та відносяться до першочергових завдань розвитку Збройних Сил України.

Система електропостачання є одною з важливих ланок, що забезпечує високу бойову готовність зенітних ракетних комплексів. Гарантоване, якісне, економне та безпечне постачання електричною енергією озброєння та військової техніки є внеском у підтримання постійної бойової готовності та боєздатності військ (сил). Вимоги до надійності систем електропостачання військових об'єктів постійно зростають за рахунок розвитку та використання складної обчислювальної техніки.

Потрібну надійність та мобільність електропостачання забезпечують автономні джерела живлення, на ряду з перетворювачами синхронної частоти (ПСЧ). Такі перетворювачі повинні забезпечувати необхідні параметри змінного струму, а тому при виборі ПСЧ, необхідно порівнювати їх технічні дані, що мають бути враховані в переліку переваг. Одним з головних механізмів, на що треба не менш звертати увагу є підшипниковий вузол, який може істотно погіршувати енергетичні показники в ПСЧ.

Аналіз літератури. В відомій літературі багато уваги приділяється системі управління ПСЧ, але не розглядається проблема з підшипниковими вузлами. Більшість робіт, особливо [1–4] вказує на необхідність вдосконалити систему діагностування та захисту ПСЧ. Математичні методи, необхідні для досягнення результату, описані у [5–13].

Мета статті. Визначення впливу коефіцієнта тертя підшипників на роботу перетворювачів частоти та надати пропозиції, щодо модернізації перетворювачів синхронної частоти.

Основна частина

Взагалі ПСЧ можуть бути побудовані за різними структурними схемами. Принципи їх побудови визначаються вимогами відповідальних електроприймачів по надійності, безперебійності та якості електропостачання. Вибір конкретного типу ПСЧ визначається її цільовим призначенням та особливостями експлуатації. Розглядаючи питання удосконалення ПСЧ доцільно застосувати часові показники, а саме масу – m , питомий об'єм – V , вартість – C та ККД – η . Запропоновані характеристики визначаємо з урахуванням даних про систему електропостачання при цьому мають місце такі вирази (1):

$$\begin{aligned} m &= m_{nc} + m_{ncs} + m_{nep}; V = V_{nc} + V_{ncs} + V_{nep}; \\ C &= C_{nc} + C_{ncs} + C_{nep}, \end{aligned} \quad (1)$$

де m_{nc}, V_{nc}, C_{nc} – питомі характеристики маси, об'єму та вартості ПЧ; $m_{ncs}, V_{ncs}, C_{ncs}$ – питомі характеристики маси, об'єму та вартості управління ПСЧ; $m_{nep}, V_{nep}, C_{nep}$ – питомі характеристики маси нових підшипників, об'єму та вартості перетворювачів частоти у складі системи автономного електропостачання.

Аналіз техніко-економічних характеристик ПСЧ в системі автономного електропостачання об'єктів із застосуванням співвідношень дозволяє визначити шляхи удосконалення ПСЧ живлення з новими підшипниками. Кожна з ПСЧ має свої переваги та недоліки, які визначаються вимогами відповіда-

льних електроприймачів до якості електроенергії, надійності та безперебійності електропостачання. В свою чергу показники якості електроенергії суттєво залежать від способу зв'язку установки з основним джерелом, від енергетичних характеристик електромашинного перетворювача, величини кінетичної енергії, що накопив маховик, а також його конструктивних характеристик.

Розглянемо більш детально можливі шляхи удосконалення ПСЧ-50 з маховичними накопичувачами енергії. Раніш було з'ясовано, що за способом зв'язку з основним джерелом всі існуючі схемні рішення ПСЧ з маховичними накопичувачами енергії можливо розподілити їх на дві групи: ПСЧ паралельного підключення та ПСЧ послідовного підключення. ПСЧ в кожній з цих груп відрізняються складом обладнання, типом електромашинних перетворювачів і алгоритмами управління.

Загальними недоліками ПСЧ з маховичними накопичувачами енергії паралельного підключення є безпосередній вплив на функціонування відповідальних електроприймачів якості електроенергії, яка надходить від зовнішньої мережі. В той же час в ПСЧ послідовного підключення відсутній електричний зв'язок електроприймачів з зовнішньою мережею і якість електроенергії зовнішньої мережі безпосередньо не впливає на роботу відповідальних електроприймачів, однак їм притаманні такі недоліки, як:

- менша, ніж в мережі, частота струму генератора, обумовлена ковзанням синхронного двигуна;
- збільшена потужність синхронного двигуна, що викликана прагненням пом'якшити вплив коливань напруги і частоти мережі на споживачі і зменшити ковзання електродвигуна з метою підвищення верхнього значення частоти струму генератора;
- недостатньо економічне живлення електроприймачів, тому що останні отримують електроенергію не безпосередньо від зовнішньої мережі, а через каскад двигун-генератор.

Другою важливою задачею є забезпечення потрібного рівня надійності, що по-перше провал частоти можливо знизити шляхом моменту інерції маховика, що досягається збільшенням його маси. По-друге, зменшення маси маховика досягається, як підвищенням частоти обертанням, так і збільшенням діапазону зменшення частоти обертання. Однак, в підшипниках на основі синхронних машин підвищення частоти обмежено конструктивно-технологічними і електромагнітними можливостями електромашинних перетворювачів, що застосовуються, а збільшення діапазону зміни частоти обмежено показниками якості виробленої напруги. Розглядаючи задачу удосконалення електромашинних силових перетворювачів, як підвищення надійності та безперебійності і якими способами досягти очікуємі результати де мають місце втрат напруг що обумовлені в підшипникових вузлах ПСЧ. У ПСЧ є необхідність у використанні підшипників з чудовими експлуатаційними характеристиками. Такі характеристики, як підвищена частота обертання, високий ступінь точності обертання, висока жорсткість системи, мале тепловиділення, а також низькі рівні шуму і

вібрацій, – це лише деякі з переваг, якими повинні володіти ці підшипники.

Підшипники кочення що в даний момент стоять на синхронних перетворювачах частоти призначення як вже з часом експлуатації можуть тільки частково відповідати цим вимогам. Для задоволення цих вимог необхідно аналізувати сучасний асортимент прецизійних підшипників.

Прецизійні підшипники відкривають перед виробниками обладнання і кінцевими користувачами нові можливості по оптимізації робочих параметрів їх обладнання. Але ці підшипники мають різні переваги, які залежать від серії і сфери застосування, але для всіх прецизійних підшипників характерні високі частоти обертання і вантажопідйомність, тривалий термін служби, збільшені інтервали техобслуговування і низьке енергоспоживання а також має великий недолік це дуже висока вартість на виготовлення спеціального призначення.

Під довговічністю роботи підшипника беремо до уваги максимально можливу кількість обертів, які виконають тіла кочення навколо осі підшипника до моменту появи ознак зносу матеріалу на кільцях або безпосередньо на тілах кочення з супутніми змінами в його роботі (шум, надмірна перегрів і, в кінцевому рахунку, руйнування виробу).

Два майже однакових за маркуванням підшипника можуть істотно відрізнятися [1, 14] за показником довговічності, тому застосовується розрахунок цього параметра по ISO 281, а в якості бази береться основна довговічність (яка надається терміном роботи (шум, надмірна перегрів і, в кінцевому рахунку, руйнування виробу). Рівняння розрахунку основної довговічності виглядає наступним чином:

$$L_{10} = (C/P)^p \text{ або } C/P = (L_{10})^{1/p} \quad (2)$$

де L_{10} - основна довговічність; C — динамічні показники kN ; P — еквівалентне динамічне навантаження, kN ; p — індекс, в залежності від конструкції, для кулькових підшипників $p = 3$, для роликів $p = 10/3$

В табл. 1 нижче приведена залежність довговічності в 10^6 обертів у відповідності з $n_{об}$.

Таблиця 1 – Залежність довговічності L_{10} від частоти обертання $n_{об}$ кулькових підшипників

№	L_{10} , год	n , об /хв	
		3600	4300
1	2000	5,94	6,36
2	4000	7,30	7,82

Енергетичні втрати в підшипниках складаються в основному з втрат на тертя, що виникають внаслідок проковзування в місцях контакту тіл кочення з кільцями і сепаратором, недосконалою якістю матеріалу тіл кочення і кілець а також механічних втрат змащувальному матеріалі. Вони не є постійними у часі і визначаються конструкцією підшипника, режимами його роботи і мастила, а тому потужність в деякій мірі витрачається на подолання тертя в підшипнику. Підшипники мають у складі кульки [3, 4, 13], що знаходяться між кільцями де вони необхідні для зниження тертя між рухливими ділянками

ми де ще сепаратор теж впливає на опір кочення. Але якщо використовувати кульки без сепаратора, вони будуть наздоганяти і проходити тертя один з одним, що навпаки призведе до підвищенню тертя. В результаті, любі підшипники потребують змазки, а деякі підшипники без сепараторів обмежені у швидкості обертання із-за підвищеного тертя. Таке явище представляє собою особливий вид тертя з виникненням на одній з обох поверхонь тонкої пластичної плівки метала, в якій виникає зсувна деформація. Що виникає при наявності синтетичних мастил, прикладом є високонавантаженим вузлом тертя сталі по бронзі, на котрому з'являється шар міді товщиною $s < 1$ мкм. При цьому коефіцієнт тертя ковзання $TP < 0,01$, на порядок стає меншим.

Переходячи в теплоту, ці втрати викликають підвищення температури підшипникових вузлів. Вони не є постійними в часі і визначаються конструкцією підшипника, режимами його роботи і мастила. Потужність $P_{тр}$ (Вт), що витрачається на подання тертя в підшипнику (1)

$$P_{mp} = 0,10477 T_{mp} n, \quad (4)$$

де $T_{тр}$ – момент тертя, Нм; n – частота обертання.

За підрахунками нового підшипника зробили висновок, що він буде відповідати тим же технічним параметрам, але з меншим коефіцієнтом тертя і як наслідок більшим часом напрацювання.

Наближено оцінити момент тертя при дії результуючого навантаження, що не перевищує 10-20% динамічного навантаження:

$$T_{mp} = f_{mp} F_{pez} \cdot d / 2, \quad (5)$$

При аналізі зроблено висновок, що якщо проблема тільки в терті кульок, то можливо зробити так щоб вони не зустрічалися. Тобто, таким чином щоб у зовнішньому кільці заглиблення, то кульки, проходячи ці виїмки, будуть уповільнюватися, а за цим

прискорюватися. У результаті цього «рваного» ритму кульки не здоганяють один одного, і не мають тертя. В такій конструкції не потрібні: мастильні речовини та сепаратор.

З табл. 2 видно, що запропонований нами підшипник має такий же зовнішній та внутрішній діаметр $d_{зов.}$, $d_{вн.}$, тобто на базі 76-310К вносимо деякі конструктивні зміни які підвищують безвідмовність, довговічність. Де безвідмовність роботи перетворювачів повинна забезпечуватися без місцевого обслуговування періодами по 4 000 год за умови обов'язкового обслуговування через 2000 год вузли підшипникові електромашинних перетворювачів типу АТО, АТТ. Довговічність гарантійний термін експлуатації - 5 років з дня введення об'єкта в експлуатацію в межах гарантійного терміну зберігання; призначений ресурс до списання 35 000 год для ресурсних перетворювачів). Таким чином удосконалюючи підшипниковий вузол ми подовжуємо термін гарантійної експлуатації та збільшуємо час напрацювання без технічного обслуговування.

Висновки

1. Запропонований такий підшипник суттєво знижує коефіцієнт тертя при цьому збільшуючи час напрацювання ПСЧ.

2. Завдяки модернізації ПСЧ можливо забезпечити стабільність частоти перетворюваної напруги та забезпечити потрібну надійність в електропостачанні та зменшити втрати майже 1,5 рази.

3. Запропоноване технологічне рішення удосконалення ПСЧ з новими типами підшипників, вони мають суттєвий недолік пов'язаний з труднощами, які можуть виникнути при виготовленні, але мають порівняно високий строк служби.

4. Удосконалення підшипника заключається у зміні конструкції зі зберіганням технічних вимог до них, але вже без сепаратора та мастил (змащення).

Таблиця 2. Технічні характеристики підшипника 76-310К на базі ПСЧ-50, ПСЧ-15

	Тип підшипника	$d_{зов.}$, мм	$d_{вн.}$, мм	$n_{ном}$ обертання(при рідкому змащенню)	$n_{ном}$ при пластичному змащенню	$n_{ном}$ без змащення	$T_{пер.}^{\circ}$ С	$F_{тр}$
1	76-310К	180	85	4300	3600	–	45	0,008
2	Підшипник нового зразка	180	85	–	–	4300	60	0,002

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Перетворювальна техніка. Кононов Б.Т., Лагутін Г.І., Нечаус А.О., Ручка О.О. Харків: ХУНПС, 2018. – 478 с.
2. Малыш А.Н. Способы получения трехфазного переменного тока повышенной частоты и их сравнительный анализ, Система обробки інформації.ХУПС, 2007. Вип. 5(63). С. 73-76.
3. Лушик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты. – К.: Техника, 1993. – 203 с.
4. Попов В.И. Электромагнитное совмещение преобразователей частоты. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
5. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *International Conference on Information and Digital Technologies*. 2015. P. 266-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>
6. Коваленко А.А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2018. – Вип. 1(47). – С. 110-113. DOI : <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.110>
7. Mohammed, A. S. Optimal Forecast Model for Erbil Traffic Road Data. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017. **Vol. 29, No 5. P.** 137–145. DOI: <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.29.5.15>
8. Saravana, Balaji B., Karthikeyan, N.K. and Raj Kumar, R.S., (2018), "Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation", *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 69, pp. 435–446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.09.013>

9. Gomathi B, Karthikeyan N K, Saravana Balaji B, "Epsilon-Fuzzy Dominance Sort Based Composite Discrete Artificial Bee Colony optimization for Multi-Objective Cloud Task Scheduling Problem", International Journal of Business Intelligence and Data Mining, Volume 13, Issue 1-3, 2018, pages 247-266, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2018.088435>
10. Dhivakar B., Saravanan S.V., Sivaram M., Krishnan R.A. Statistical Score Calculation of Information Retrieval Systems using Data Fusion Technique". *Computer Science and Engineering*. 2012. Vol. 2, Issue 5. pp.43-45. doi: <http://doi.org/10.5923/j.computer.20120205.01>
11. Sivaram M., Yuvaraj D., Amin Salih Mohammed, Porkodi, V., Manikandan V. The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018. Vol. 8, iss. 2. pp. 95-100.
12. Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т., Скворцов Ю.А. и др. Системы автономного электроснабжения. Учебник. – МО СССР, 1989. – 386 с.
13. Шакарян Ю.Г. Вопросы теории синхронной машины с двумя системами статорных обмоток // *Электричество*. – 1996. – № 11.
14. Диагностика и техническое обслуживание машин.: учебник для студентов высших учебных заведений / [Ананьин А.Д., Михлин В.М., Габитов И.И. и др.]. – К. : Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б. Г. Любарський,
Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», Харків

Received (Надійшла) 08.02.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.03.2019

Анализ преобразователей синхронной частотой из состава вооружения и военной техники для их модернизации с учетом опыта операции объединенных сил

Н.М. Куравська, М.О. Попов, Д.С. Шелякин, Р.О. Плошко

В статье рассматривается способ модернизации преобразователя синхронной частоты, основанный на совершенствовании подшипниковых узлов. Нужную надежность и мобильность электроснабжения обеспечивают автономные источники питания, наряду с преобразователями синхронной частоты (ПСЧ). Такие преобразователи должны обеспечивать необходимые параметры переменного тока, а потому при выборе ПСЧ, необходимо сравнивать их технические данные, которые должны быть учтены в перечне преимуществ. Одним из главных механизмов, на что надо не меньше обратить внимание подшипниковый узел, который может существенно ухудшать энергетические показатели в ПСЧ, где энергетические потери в подшипниках состоят в основном из потерь на трение, возникающие вследствие проскальзывания в местах контакта тел качения с кольцами и сепаратором, несовершенной качеством материала тел качения и колец а также механических потерь смазочном материале. Они не являются постоянными во времени и определяются конструкцией подшипника, режимами его работы и смазки, а поэтому мощность в некоторой степени расходуется на преодоление трения в подшипнике. **Цель статьи.** Определение влияния коэффициента трения подшипников на работу преобразователей частоты и предоставить предложения по модернизации преобразователей синхронной частоты. **Выводы.** Предложены новые подшипники существенно снижают коэффициент трения при этом увеличивая время наработки преобразователей синхронной частоты. Благодаря модернизации ПСЧ возможно обеспечить стабильность частоты преобразуемого напряжения и обеспечить нужную надежность в электроснабжении и уменьшить потери почти 1,5 раза. Предложенное технологическое решение усовершенствования ПСЧ с новыми типами подшипников, они имеют существенный недостаток связан с трудностями, которые могут возникнуть при изготовлении, но имеют сравнительно высокий срок службы. Совершенствование подшипника заключается в изменении конструкции с сохранением технических требований к ним, без сепаратора и масел (смазки).

Ключевые слова: преобразователь синхронной частоты, коэффициент трения подшипников, механические потери, бесперебойность, увеличение наработки преобразователей синхронной частоты.

Analysis of converters synchronous frequency with the composition of weapons and military equipment for their modernization, taking into account the experience of environmental protection

N. Kuravska, M. Popov, D. Shelyakin, R. Ploshko

The article discusses a method for upgrading a synchronous frequency converter based on the improvement of bearing assemblies. The necessary reliability and mobility of power supply is provided by autonomous power sources, along with synchronous frequency converters (PRN). Such converters should provide the necessary parameters of alternating current, and therefore when choosing a frequency inverter, it is necessary to compare their technical data, which should be taken into account in the list of advantages. One of the main mechanisms, on which it is necessary to pay attention to the bearing unit, which can significantly worsen the energy performance in the frequency response system. Where the energy losses in bearings consist mainly of friction losses resulting from slipping at the points of contact of the rolling bodies with rings and separator, the imperfect quality of the material of the rolling bodies and rings, as well as mechanical losses of the lubricant. They are not constant in time and are determined by the design of the bearing, its modes of operation and lubrication, and therefore the power is to some extent spent on overcoming friction in the bearing. **The purpose of the article.** Determination of the influence of the coefficient of friction of bearings on the work of frequency converters and provide suggestions for the modernization of transducers of synchronous frequency. **Conclusions.** New bearings are proposed to significantly reduce the coefficient of friction while increasing the operating time of synchronous frequency converters. Thanks to the modernization of the PSF it is possible to ensure the stability of the frequency of the converted voltage and provide the necessary reliability in the supply of electricity and reduce losses by almost 1,5 times. The proposed technological solution to improve the PSF with the new types of bearings, they have a significant drawback due to the difficulties that may arise in the manufacture, but have a relatively high life span. Improvement of the bearing is reserved for changing the design with the storage of technical requirements for them, but without a separator and lubricants (lubrication).

Keywords: synchronous frequency converter, bearing friction coefficient, mechanical losses, uninterrupted operation, increase in operating time of synchronous frequency converters.