

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ТОКАРНОГО ВЕРСТАТУ НА БАЗІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ**

У статті досліджено систему електроприводу токарного верстату 1Е61М, який широко використовується на металооброблюючих підприємствах. Існуюча система живлення передбачає наявність трифазної мережі, не забезпечує плавний пуск та регулювання швидкості головного руху верстату. В роботі запропоновано забезпечити підвищення ефективності системи електроприводу токарного верстату 1Е61М за рахунок впровадження частотно-регульованого електроприводу на базі широко розповсюдженого перетворювача частоти АЕ200-4.0 G. Основні його переваги – низька вартість та можливість живлення від однофазної мережі. Використання цього перетворювача частоти дозволило зменшити споживання струму від мережі на 56%, що свідчить про підвищення ефективності; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу. Для аналізу електромагнітної сумісності з електричною мережею було проведено дослідження з використанням аналізатору якості електроенергії Metrel MI 2885 Master Q4 та спеціалізоване програмне забезпечення Metrel PowerView. Вказаний аналізатор забезпечує відповідність стандарту якості електроенергії МЕК 61000-4-30, клас S, вимогам стандартів МЕК 61557-12 і IEEE 1459-2010 (об'єднана потужність (основна і додаткові гармоніки), основна потужність (основна гармоніка), неосновна потужність (додаткові гармоніки) і МЕК 62053-21 (енергія). Було встановлено, що використання перетворювача частоти АЕ200-4.0 G не задовольняє вимогам електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання з мережею. Крім того, використання перетворювача частоти без вихідного синусного фільтра погіршує енергоефективність системи електроприводу за рахунок зниження ресурсу електричного двигуна, який не розрахований на роботу у складі частотно-регульованого електроприводу. Вибір та розрахунок вхідного та вихідного фільтрів дасть змогу забезпечити підвищення ефективності систем електроприводу на базі перетворювачів частоти.

Ключові слова: токарний верстат, асинхронний двигун, перетворювач частоти, електромагнітна сумісність.

S.K. Podnebenna, V.G. Kysliak, O.M. Bondaruk. Improving the efficiency of the electric drive system of a lathe based on frequency converters. The article investigates the electric drive system of the 1E61M lathe, which is widely used at metalworking enterprises. The existing power system assumes the availability of a three-phase grid, it does not provide a smooth start and speed control of the main movement of the machine. The paper proposes to increase the efficiency of the electric drive system of the 1E61M lathe through the use of a variable frequency drive based on the widespread frequency converter AE200-4.0 G. Its main advantages are low cost and the ability to supply power from a single-phase grid. The use of this frequency converter made it possible to reduce the current consumption from the grid by 56%, which indicates an increase in efficiency; to ensure a smooth start of the electric motor and to improve the control characteristics of the electric drive system. To analyze the electromagnetic compatibility with the electri-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0878-1492, podsvet@gmail.com

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, kysliak.volodymyr@ukr.net

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, olegbond87@gmail.com

cal network, a study was carried out using the Metrel MI 2885 Master Q4 power quality analyzer and the Metrel PowerView specialized software. This analyzer provides the power quality standard IEC 61000-4-30, class S, compatibility to the standards IEC 61557-12 and IEEE 1459-2010 and IEC 62053-21 requirements. It has been found that the use of the AE200-4.0 G frequency converter does not meet the requirements of the electromagnetic compatibility of the electrical equipment of the network. Besides the use of a frequency converter without an output sine filter degrades the energy efficiency of the electric drive system by reducing the resource of the electric motor, which is not designed to operate as part of a variable frequency drive. The selection and calculation of input and output filters will improve the efficiency of electric drive systems based on frequency converters.

Keywords: *lathe, induction motor, frequency converter, electromagnetic compatibility.*

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності будь-якого технологічного процесу є актуальною та важливою задачею. Системи електроприводу для металооброблюючих верстатів не є виключенням. Використання частотно-регульованого електроприводу є перспективним напрямком для розв'язання цієї задачі, але потребує дослідження питання електромагнітної сумісності такої системи з мережею та питання забезпечення енергоефективності при роботі асинхронного двигуна в системі частотно-регульованого електроприводу [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням електромагнітної сумісності систем частотно-регульованого електроприводу з мережею та забезпечення енергоефективності при роботі асинхронного двигуна в системі частотно-регульованого електроприводу присвячено досить багато сучасних досліджень [1, 2]. Але при модернізації металооброблюючих верстатів більше уваги приділяють практичним критеріям: технічним, до яких відноситься можливість забезпечення регулювання швидкості двигуна у широкому діапазоні, можливість живлення від однофазної мережі, та економічним, основний з яких це вартість. Слід зазначити, що вибір перетворювача частоти лише за критерієм вартості зазвичай призводить до зниження ефективності всієї системи.

Мета статті – дослідження і підвищення ефективності системи електроприводу токарного верстату 1Е61М за рахунок впровадження частотно-регульованого електроприводу та дослідження шляхів забезпечення електромагнітної сумісності з електричною мережею.

Виклад основного матеріалу. Верстат 1Е61М відноситься до групи токарних агрегатів високої точності. Як правило, він використовується для виконання різьбонарізальних і різних токарних процедур – напівчистових і чистових [3].

Технічні параметри верстатного устаткування є головним показником того, наскільки якісно і ефективно воно дає можливість виконувати ті чи інші роботи. Для верстатів, що відносяться до токарно-гвинторізної групи, такими параметрами є кількість оборотів (в одну хвилину) шпинделя, максимальна довжина виробу, яку може обробити агрегат, і її максимальний діаметр.

Описуваний токарно-гвинторізний верстат дозволяє працювати з деталями діаметром до 320 мм над станиною, довжиною до 710 мм, а частота обертання шпинделя верстата досягає величини в 1335 об/хв [3-5]. Електропривод верстата здійснюється від індивідуального електродвигуна потужністю 4,5 кВт. Клиноремінною передачею рух передається на приймальний шків коробки швидкостей. Від коробки швидкостей шістьма клиновими ремнями рух передається далі – на шків передньої бабки, а потім за допомогою зубчастої муфти – на шпиндель [4, 5]. Реверсування головного руху верстата – електричне. Гальмування обертання шпинделя виробляється протиструмом в електродвигуні. Застосований на верстаті електродвигун з підвищеним ковзанням забезпечує підвищення частоти реверсування при нарізанні різьби [4, 5].

При обробці заготовок на верстаті здійснюється два робочих рухи:

- головний рух – обертання шпинделя разом із заготівлею;
- рух подачі;
- поздовжня подача різця, закріпленого у різцетримачі;
- поперечна подача різця;
- поздовжня (осьова) подача свердла, закріпленого в пінолі задньої бабки [4, 5].

Згідно паспортним даним, на верстаті встановлені три трифазних короткозамкнених асинхронних електродвигуна на напругу 220/380 В (рис. 1):

- Д1 – головний електродвигун типу АОС 51/4 виконання Щ-2 потужністю 4,5 кВт, 1335 об/хв;
- Д2 – електронасос мастила типу ПА-22 потужністю 0,125 кВт, 2800 об/хв;
- Д3 – електронасос подачі охолоджуючої рідини типу ПА-22 потужністю 0,125 кВт, 2800 об/хв.

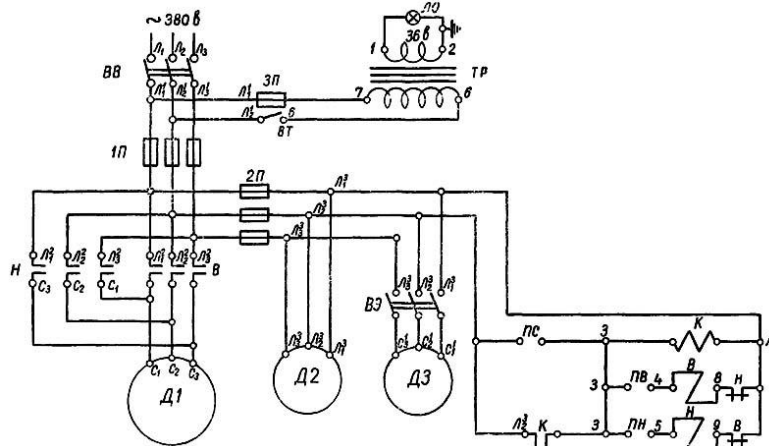


Рис. 1 – Електрична схема токарного верстату 1Е61М

Для здійснення головного руху верстату служить асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором з підвищеним ковзанням типу АОС-51/4 в закритому виконанні. Вмикання та вимикання його відбувається за допомогою реверсивного магнітного пускача через барабанний перемикач за допомогою рукоятки правої чи лівої.

При поданні струму від зовнішньої мережі на верстат вмикається мастильний насос до вмикання головного двигуна таким чином, що виключена можливість роботи шпиндельної бабки без змащування.

Вимоги до приводів головного руху і подачі:

- 1) забезпечення потужності різання, необхідної для приводу;
- 2) збереження сталості крутного моменту і потужності різання в коробках швидкостей;
- 3) великий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- 4) забезпечення заданого діапазону регулювання швидкості;
- 5) надійність;
- 6) малі розміри і простота обслуговування.

На рис. 2 наведена схема керування швидкістю шпинделя токарного верстата за допомогою частотно-регульованого електроприводу [6].

Перетворювач частоти 1 регулює швидкість обертання асинхронного двигуна 2 головного приводу шпинделя 3. Система працює за замкнутою схемою зі зворотним зв'язком за швидкістю обертання. Швидкість обертання вимірюється імпульсним датчиком 5. Режим роботи частотно-регульованого приводу задається з пульта управління 4. Різець плавно переміщається справа наліво уздовж деталі, що обертається [6-7].

До впровадження частотно-регульованого приводу швидкість обертання двигуна була незмінною, а швидкість шпинделя можна було змінювати тільки дискретно за допомогою коробки передач.

Оснащення обробних верстатів частотно-регульованим електроприводом дозволяє задовольнити найжорсткіші і суперечливі вимоги, що пред'являються технологією обробки різних матеріалів. Використання частотно-регульованого приводу дозволяє полегшити управління верстатом за рахунок можливості плавної зміни числа обертів шпинделя без його зупинки, розширити діапазон числа оборотів. Використання коробки передач і частотно-регульованого приводу дозволяє оптимально встановлювати число обертів шпинделя і отримати максимальний крутний момент при малих обертах [6-7].

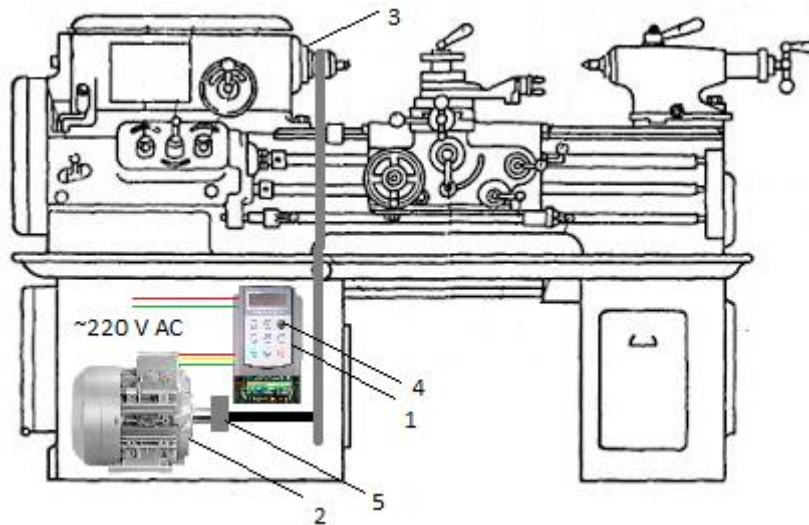


Рис. 2 – Схема керування швидкістю шпинделя токарного верстата за допомогою частотно-регульованого електроприводу з частотним перетворювачем

Застосування частотно-регульованого приводу крім того забезпечує:

- підвищення якості обробки деталей та зниження кількості поломок ріжучого інструменту за рахунок точної підтримки швидкості обертання шпинделя;
- зменшення кількості поломок обладнання за рахунок зниження ударних навантажень на електропривод і механічну передачу при пуску і зупинці.

Особливу увагу слід приділити можливості використання однофазних перетворювачів частоти, які дозволяють забезпечити живлення трифазних двигунів від однофазної мережі без втрати моменту. Принципова схема підключення двигуна до мережі через однофазний перетворювач частоти залишиться такою ж, як зображено на рис. 3, а фотографії реального об'єкту дослідження – на рис. 4. Окрім основного ПЧ, встановлений перетворювач частоти CFM-110 ACPrивод потужністю 0,18 кВт для живлення електродвигуна мастильної станції ПА-22.

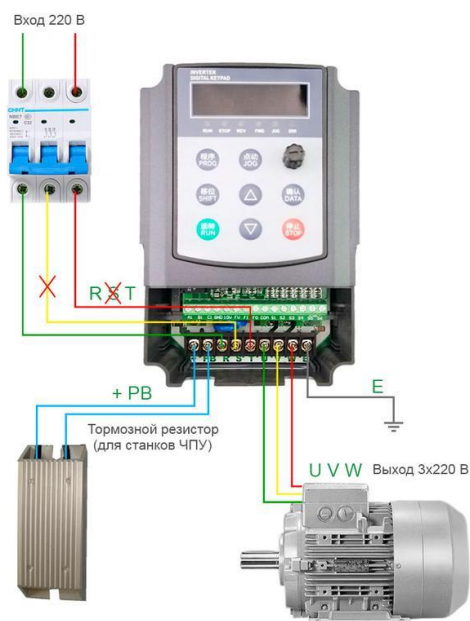


Рис. 3 – Схема підключення перетворювача частоти



Рис. 4 – Фото системи електроприводу токарного верстату 1Е61М з перетворювачем частоти

Для забезпечення неможливості роботи основного механізму без змащування спочатку вмикається електродвигун мастильної станції ПА-22, а з затримкою в 8 с вмикається основний двигун. Затримка часу виконана за допомогою встановлення додатково реле часу та проміжного реле (рис. 4). Час розгону перетворювача частоти встановлений таким, що дорівнює 2 с. Споживаний від мережі в режимі навантаження струм склав 9 А (середньоквадратичне значення), що в 1,78 разів менше за номінальний, що зменшує в 3,1 рази втрати потужності в електричній мережі.

Використання частотно-регульованого електроприводу дозволило вирішити наступні проблеми: реалізувати живлення верстату від однофазної мережі; зменшити споживання струму від мережі на 56%; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу.

Для аналізу і дослідження електричних параметрів системи електроприводу з частотними перетворювачами використаний аналізатор якості електроенергії Metrel MI 2885 Master Q4 та спеціалізоване програмне забезпечення Metrel PowerView. Вказаний аналізатор забезпечує відповідність стандарту якості електроенергії МЕК 61000-4-30, клас S, вимогам стандартів МЕК 61557-12 і IEEE 1459-2010 (об'єднана потужність (осн. і доп. гармоніки), основна потужність (осн. гармоніка), неосновна потужність (додаткові гармоніки) і МЕК 62053-21 (енергія).

Осцилограми споживаного від мережі струму (а) та його спектр (б) наведені на рис. 5. При збільшенні навантаження відбувалося зростання споживаного струму та, відповідно, потужності. При цьому зміни спектрального складу струму практично не відбувалось. Коефіцієнт спотворення форми кривої напруги коливався в діапазоні 5-6%, відповідно, струму – 88-93%.

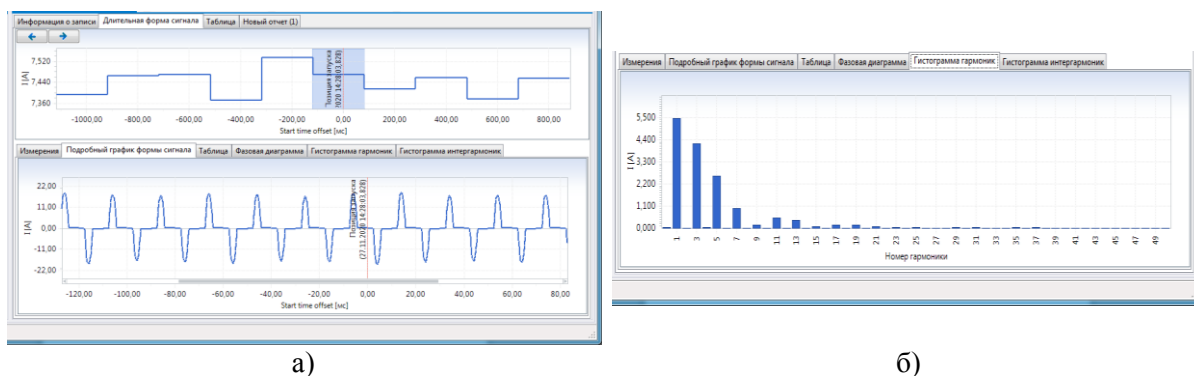


Рис. 5 – Осцилограма споживаного ПЧ від мережі струму (а) та його спектр (б)

З аналізу споживаного від мережі струму видно, що мережевий фільтр (вхідний фільтр, мережевий дросель) у складі частотного перетворювача AE200-4.0 G відсутній. Це призводить до того, що проілюстровано на рис. 5, – струм, який споживається від мережі, носить несинусоїдний характер, коефіцієнт гармонік складає близько 90%. При цьому в слабкій мережі коефіцієнт несинусоїдності напруги зростає з 1,5% при відсутності навантаження у вигляді частотного перетворювача до 5,5% (а подекуди і більше 8%), що супроводжується одночасно відхиленням напруги на 5-10%.

Висновки

Використання перетворювача частоти дозволило підвищити ефективність системи електроприводу токарного верстату, реалізувати живлення верстату від однофазної мережі; зменшити споживання струму від мережі на 56%; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу.

При цьому було встановлено, що використання перетворювача частоти AE200-4.0 G призводить до погіршення якості електроенергії мережі, не задовольняє вимогам електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання з мережею. Крім того, використання перетворювача частоти без вихідного синусного фільтра погіршує енергоефективність системи електроприводу за рахунок зниження ресурсу електричного двигуна, який не розрахований на роботу у скла-

ді частотно-регульованого електроприводу. Вибір та розрахунок вхідного та вихідного фільтрів дасть змогу забезпечити підвищення ефективності систем електроприводу на базі перетворювачів частоти, що є предметом наступних досліджень.

Перелік використаних джерел:

1. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навчальний посібник / М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калінов, А.І. Гладир, В.Г. Ковальчук. – 2-е вид., переробл. і доповн. – Харків : Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
2. Поднебенна С.К. Забезпечення електромагнітної сумісності судових електричних мереж / Р.К. Яшаров, С.К. Поднебенна // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць. – Маріуполь, 2018. – Вип. 37. – С. 158-164. – (Серія: Технічні науки). – Mode of access: DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280.
3. 1E61M – высокоточный токарный станок [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://tutmet.ru/tokarno-vintoreznyi-standok-1e61m-tehnicheskie-harakteristiki.html>.
4. 1E61M Станок токарно-винторезный повышенной точности [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://stanki-katalog.ru/sprav_1e61m.htm.
5. Токарно-винторезный станок 1E61M повышенной точности. Руководство к станку. – Саратов : Центральное бюро технической информации, 1965. – 64 с.
6. Примеры типовых применений частотно-регулируемого привода в металлообрабатывающих станках и технологических линиях [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.electrolibrary.info/chastotnik/7-primery-ispolzovaniya-chastotno-reguliruemogo-privoda.html>.
7. Махнев П.С. Асинхронный электродвигатель для частотно регулируемого привода металлообрабатывающего оборудования / П.С. Махнев. – Тольятти, 2018. – 91 с.

References:

1. Zagirniak M.V., Koren'kova T.V., Kalinov A.P., Gladir A.I., Koval'chuk V.G. *Suchasni peretvoriuvachi chastoti v sistemakh elektroprivoda : navch. posibnik* [Modern frequency converters in electric drive systems: textbook]. Kharkiv, Tochka Publ., 2017. 206 p. (Ukr.)
2. Yasharov R.K., Podnebennaya S.K. Zabezpechennia elektromagnitnoi sumisnosti sudovikh elektrichnikh merezh [Ensuring of ship electrical networks electromagnetic compatibility]. *Visnik Priazovskogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, vol. 37, pp. 158-164. doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280.
3. 1E61M – vysokotochnyi tokarnyi stanok (1E61M – high-precision lathe) Available at: <https://tutmet.ru/tokarno-vintoreznyi-standok-1e61m-tehnicheskie-harakteristiki.html> (accessed 15 July 2020). (Rus.)
4. 1E61M Stanok tokarno-vintoreznyi povyshennoi tochnosti (1E61M High-precision screw-cutting lathe) Available at: http://stanki-katalog.ru/sprav_1e61m.htm (accessed 23 July 2020). (Rus.)
5. Tokarno-vintoreznyi stanok 1E61M povyshennoi tochnosti. Rukovodstvo k stanku [Screw-cutting lathe 1E61M of increased accuracy. Machine manual]. Saratov, Tsentral'noe biuro tekhnicheskoi informatsii Publ., 1965. 64 p. (Rus.)
6. Primery tipovykh primenenii chastotno-reguliruemogo privoda v metalloobra-batyvaiushchikh stankakh i tekhnologicheskikh liniakh (Examples of typical applications of a variable frequency drive in metal-working machines and technological lines) Available at: <http://www.electrolibrary.info/chastotnik/7-primery-ispolzovaniya-chastotno-reguliruemogo-privoda.html> (accessed 03 July 2020). (Rus.)
7. Makhnev P.S. *Asinkhronnyi elektrodvigatel' dlia chastotno reguliruemogo privoda metallobrabatyvaiushchego oborudovaniia* [Asynchronous electric motor for variable frequency drive of metalworking equipment]. Tolyatti, 2018. 91 p. (Rus.)