

НАЛАШТУВАННЯ ІНВЕРТОРА СЕРІЇ GT ДЛЯ ШПИНДЕЛІВ 400 HZ

Інструкція з підготовки живильної мережі, програмування параметрів інвертора без двигуна, силового підключення кабелю та проведення пробного пуску й автоналаштування.

- **Обладнання:** перетворювач частоти серії GT (однофазні 1~220V та трифазні 3~380V)
- **Сумісність:** високошвидкісні трифазні шпинделі 400 Hz (водяне та повітряне охолодження)
- **Керування:** режими V/F (скалярний закон) та SVC (векторний безсенсорний)

ЗМІСТ ІНСТРУКЦІЇ

Запобіжні заходи: захист шпинделя від пошкодження

Етап I: Підготовка до програмування (БЕЗ шпинделя)

Етап II: Програмування параметрів інвертора (БЕЗ шпинделя)

Крок 1: Скидання до заводських налаштувань (P0.17 = 1) та що не скидається

Крок 2: Встановлення частотної бази 400 Hz (P0.03–P0.06)

Крок 3: Встановлення типу навантаження (P2.00) та номінальної потужності (P2.01)

Крок 4: Введення паспортних характеристик шпинделя (P2.02–P2.05)

Крок 5: Крива V/F, підйом моменту та частота ШІМ

Крок 6: Розгін, гальмування та режим зупинки

Крок 7: Налаштування функцій захисту двигуна (Група Pb)

Крок 8: Вибір схеми керування (Пульт / Mach3 / LinuxCNC)

Етап III: Знеструмлення та силове підключення шпинделя

Етап IV: Перший безпечний пробний пуск шпинделя

Етап V: Автоналаштування характеристик двигуна

Статичне автоналаштування двигуна (P0.16 = 2, нерухомий вал)

Динамічне (обертальне) автоналаштування двигуна (P0.16 = 1, холостий хід)

Орієнтовні параметри для шпинделів з повітряним та водяним охолодженням

Діагностика типових несправностей і помилок

Запобіжні заходи: захист шпинделя від пошкодження

ЗАСТЕРЕЖЕННЯ: НЕБЕЗПЕКА ПОШКОДЖЕННЯ ОБМОТОК ШПИНДЕЛЯ

Заводські налаштування інвертора встановлюють базову номінальну частоту двигуна 50.00 Hz. За лінійного закону регулювання V/F інвертор формує повну вихідну напругу (220 V або 380 V) вже на частоті 50 Hz.

Високошвидкісний шпиндель 400 Hz розрахований на співвідношення напруги до частоти $V/f = 220 \text{ V} / 400 \text{ Hz} = 0.55 \text{ V/Hz}$. Подача напруги 220 V на частоті 50 Hz створює співвідношення 4.4 V/Hz (у 8 разів більше норми). Це викликає миттєве магнітне насичення статора, падіння індуктивного опору, різкий стрибок струму до 40–80 A і тепловий пробій ізоляції обмоток шпинделя протягом 3–5 s.

Фундаментальне правило введення в експлуатацію: перше включення та програмування параметрів інвертора проводиться **СУВОРО БЕЗ підключеного шпинделя!**

ВІДПОВІДНІСТЬ НАПРУГИ ШПИНДЕЛЯ ТА МОДЕЛІ ІНВЕРТОРА

Більшість стандартних шпинделів ЧПУ потужністю 0.8 kW, 1.5 kW та 2.2 kW є трифазними на напругу 220 V (3-phase 220VAC).

- Інвертори з однофазним входом 1~220V (моделі **GT-xxxG-2**) видають 3 фази по 220 V (між фазами U-V-W), що підходить для шпинделів 220 V.
- Інвертори з трифазним входом 3~380V (моделі **GT-xxxG-4**) видають міжфазну напругу 380 V. Підключати шпиндель на 220 V до такого інвертора без попереднього обмеження вихідної напруги (**P2.04 = 220V**) заборонено через ризик пробою ізоляції.

Етап I: Підготовка до програмування (БЕЗ шпинделя)

Перед першим поданням живлення на частотний перетворювач необхідно забезпечити повну ізоляцію навантаження та перевірити якість живильної мережі.

2.1. Ізоляція силового виходу інвертора:

- Повністю від'єднайте кабель шпинделя від вихідних клем інвертора (**U, V, W**), якщо він був підключений, або залиште клеми вільними.
- **Перший запуск та програмування параметрів інвертора проводиться СУВОРО БЕЗ підключеного двигуна!**
- Це правило гарантує 100% захист обмоток шпинделя від випадкового пуску або подачі струму з частотою 50 Hz у процесі налагодження та скидання параметрів.

2.2. Перевірка мережі живлення та заземлення:

- Перевірте напругу живлення на виході стабілізатора або ввідного автоматичного вимикача за допомогою мультиметра:
 - На виході трифазного стабілізатора напруга між фазами повинна становити: **380 V $\pm$ 15%** (діапазон 323–437 V).
 - На виході однофазного стабілізатора фазна напруга повинна становити: **230 V $\pm$ 15%** (діапазон 195–264 V).
- Переконайтеся в надійності підключення захисного заземлення корпусу верстата та інвертора до загального контуру заземлення будівлі.
- Вимірний опір контуру заземлення повинен становити **< 10 Ω** (Ом). Якісне заземлення є критично важливим для скидання електромагнітних завад ШІМ та безпеки персоналу.

Етап II: Програмування параметрів інвертора (БЕЗ шпинделя)

Первинне налаштування інвертора серії GT для високошвидкісного шпинделя 400 Hz проводиться при **від'єднаних силових клеммах U, V, W**. Послідовно виконайте наведені нижче 8 кроків для введення частотної бази, типу навантаження, паспортних параметрів двигуна та захисних блокувань.

Крок 1: Скидання до заводських налаштувань (P0.17 = 1) та що не скидається

Подайте живлення на інвертор (клеми R, T для однофазних моделей або R, S, T для трифазних) **без підключеного шпинделя**. Перед початком програмування скиньте параметри перетворювача до заводського стану, щоб очистити випадкові значення попереднього користувача.

Порядок скидання:

1. Натисніть клавішу **PRG/ESC** для переходу до списку груп параметрів (на екрані з'явиться **P0**).
2. Натисніть **DATA/ENT** для входу в групу P0 (на екрані з'явиться **P0.00**).
3. Стрілками **▲** / **▼** перейдіть до параметра **P0.17** та натисніть **DATA/ENT**.
4. Змініть значення з **0** на **1** і натисніть **DATA/ENT**.
5. Інвертор виконає відновлення стандартних параметрів (значення автоматично повернуться в 0).

ЩО САМЕ НЕ СКИДАЄТЬСЯ КОМАНДОЮ P0.17 = 1

Команда **P0.17 = 1** відновлює більшість параметрів інвертора до заводських значень за замовчуванням для загальнопромислового двигуна 50 Hz. Проте деякі важливі системні дані **не скидаються**:

- **Журнал несправностей та історія помилок:** коди останніх трьох аварій та збережені параметри на момент виникнення несправності (струм, вихідна напруга, частота під час аварії) **не видаляються** командою **P0.17 = 1**. Для повного очищення журналу помилок передбачено окрему команду: **P0.17 = 2**.
- **Пароль користувача (параметр P7.00):** якщо в інверторі активовано захист паролем (**P7.00 ≠ 0**), скидання налаштувань заблоковано. Спочатку необхідно ввести правильний пароль доступу, інакше зміна P0.17 не збережеться.
- **Заводські апаратні калібрування:** коефіцієнти калібрування вбудованих датчиків струму (датчиків Холла), нульові точки аналогових входів (AI1/AI2) та внутрішня таблиця апаратного типорозміру інвертора захищені від скидання та зміни користувачем не підлягають.
- **Лічильники загального часу напрацювання приводу:** сумарний час роботи інвертора під напругою та під навантаженням зберігається в енергонезалежній пам'яті (EEPROM) і не обнуляється.
- **Параметри електродвигуна (Група P2):** команда **P0.17 = 1** **НЕ скидає групу параметрів P2** (від P2.00 до P2.10) до заводських значень! Паспортні характеристики шпинделя (потужність P2.01, базова частота P2.02, швидкість P2.03, напруга P2.04, струм P2.05) та визначені автоналаштуванням константи обмоток (P2.06–P2.10) зберігаються в енергонезалежній пам'яті інвертора. Повна ініціалізація та скидання параметрів P2.02–P2.10 до типових значень відбувається лише за прямої зміни номінальної потужності двигуна в параметрі **P2.01**.

Крок 2: Встановлення частотної бази 400 Hz (P0.03–P0.06)

Дотримуйтесь наведеної послідовності введення, оскільки внутрішня логіка інвертора контролює умову **P0.03** ≥ **P0.04** ≥ **P0.05** (верхня межа не може перевищувати максимальну частоту).

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та обґрунтування
P0.03	Максимальна вихідна частота	400.00 Hz	Встановлює верхню межу формування вихідної частоти інвертора (за замовчуванням 50.00 Hz). Вводиться першим.
P0.04	Верхня межа робочої частоти	400.00 Hz	Максимальна робоча частота за завданням. Не може бути вищою за P0.03.
P0.05	Нижня межа робочої частоти	100.00 Hz	Захист від перегріву. Для шпинделів 24000 rpm робота нижче 100 Hz (6000 rpm) не рекомендується через низьку ефективність охолодження та малий опір ротора.
P0.06	Опорна цифрова частота	100.00 Hz	Початкова задана швидкість при запуску з цифрової панелі. Рекомендується 100.00 Hz для безпечного старту.

Крок 3: Встановлення типу навантаження (P2.00) та номінальної потужності (P2.01)

Цей етап виділено в окремий обов'язковий крок через особливості архітектури прошивки перетворювачів частоти серії GT.

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та вимоги
P2.00	Тип навантаження інвертора	0 (Модель G)	• 0: Модель G: Постійний крутний момент (Constant torque). Перевантажувальна здатність 150% струму протягом 60 s. Призначений для шпинделів верстатів ЧПУ, фрезерних та токарних операцій. • 1: Модель P: Змінний крутний момент (Variable torque) для насосів та вентиляторів зі зниженою перевантажувальною здатністю 120%.
P2.01	Номінальна потужність двигуна	Значення з шильдика	Паспортна потужність шпинделя: наприклад, 2.2 kW (або 1.5 kW, 3.0 kW). Встановлюється суворо до введення інших параметрів групи P2!

РОЗ'ЯСНЕННЯ: ЩО ВІДБУВАЄТЬСЯ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРА P2.00 ТА ЧИ ВПЛИВАЄ ВІН НА ГРУПУ P2?

Частотні перетворювачі серії GT використовують уніфіковану платформу шасі G/P (Constant Torque / Fan & Pump):

- **Вплив на захисні характеристики:** зміна параметра **P2.00** перемикає внутрішній алгоритм теплового захисту силових ключів IGBT та вимірювальні межі струму. Для типу G струмовий захист налаштовано на перевантаження до **150% протягом 60 s**, а для типу P — лише на **120% протягом 60 s** (при цьому допустима тривала потужність навантаження збільшується на один щабель у тому ж корпусі).
- **Чи змінює P2.00 параметри електродвигуна?** Сама по собі зміна **P2.00** **не перезаписує автоматично** значення параметрів P2.02–P2.05, але перемикає допустимий базовий діапазон потужності P2.01. Інструкція виробника зазначає: якщо обирається модель P (**P2.00 = 1**), користувач зобов'язаний після цього скоригувати потужність двигуна **P2.01** під вентиляторний двигун на ступінь вище.
- **Чому для шпинделя ЧПУ суворо обов'язково P2.00 = 0?** Робота фрези шпинделя супроводжується значними стрибками навантаження при врізанні в заготовку (постійний крутний момент). Якщо встановити **P2.00 = 1**, інвертор перейде на положу квадратичну характеристику моменту і знижений поріг перевантаження, через що шпиндель втрачатиме оберти під навантаженням і постійно викликатиме аварію надструму **OC**.

КАТЕГОРИЧНЕ ЗАСТЕРЕЖЕННЯ: ЗМІНА P2.01 АВТОМАТИЧНО СКИДАЄ ВСЮ ГРУПУ P2!

У мікропрограмі інвертора GT параметр **P2.01** є кореневим базовим конфігуратором математичної моделі двигуна.

Будь-яка зміна або повторне підтвердження параметра P2.01 автоматично ініціалізує параметри P2.06–P2.10 стандартними розрахунковими значеннями для загальнопромислового двигуна 50 Hz, а також скидає базову частоту P2.02 до 50.00 Hz, оберти P2.03 до 1440 rpm та номінальний струм P2.05!

Золоте правило налаштування:

1. Встановіть **P2.00 = 0** і введіть паспортну потужність **P2.01** (наприклад, 2.2 kW). Інвертор ініціалізує базу для цієї потужності.
2. Лише **після цього** переходьте до Кроку 4 та послідовно вводьте **P2.02 = 400.00 Hz (з шильдика)**, **P2.03 (оберти з шильдика)**, **P2.04** та **P2.05**.
3. **Категорично заборонено чіпати параметр P2.01 після того, як ви ввели P2.02–P2.05 або виконали автоналаштування!** Якщо ви зміните P2.01 пізніше, вся ваша конфігурація шпинделя 400 Hz буде миттєво знищена і перезаписана 50-герцовими значеннями за замовчуванням!

Крок 4: Введення паспортних характеристик шпинделя (P2.02–P2.05)

Після фіксації номінальної потужності P2.01 введіть робочі електричні характеристики шпинделя строго за паспортною табличкою (шильдиком):

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та обґрунтування
P2.02	Номінальна базова частота двигуна	400.00 Hz (Значення з шильдика)	Критичний параметр. Визначає базову точку перегину характеристики $V/F (f_b)$, на якій досягається повна номінальна вихідна напруга P2.04. Встановлюється строго за шильдиком (для більшості високошвидкісних шпинделів ЧПУ — 400.00 Hz). За замовчуванням в інверторі 50.00 Hz. Обов'язково ввести значення з шильдика!
P2.03	Номінальна швидкість обертання	Значення з шильдика (типово 24000 rpm)	Номінальна швидкість обертання ротора під навантаженням строго за паспортною табличкою (шильдиком). Чи всі шпинделі 400 Hz мають 24000 rpm? Ні! Оберти ротора визначаються кількістю пар полюсів p за формулою $n = (60 \times f) / p$: • 2-полюсні шпинделі ($p = 1$): мають швидкість $(60 \times 400)/1 =$ 24000 rpm (стандартні високошвидкісні шпинделі для деревообробки та пластику). • 4-полюсні шпинделі ($p = 2$): на частоті 400 Hz мають номінальну швидкість $(60 \times 400)/2 =$ 12000 rpm! Такі шпинделі застосовуються для силового фрезерування та обробки сталі, де критично потрібен подвійний крутний момент на нижчих швидкостях. • Асинхронне ковзання: на шильдиках часто вказують фактичну швидкість під номінальним навантаженням з урахуванням ковзання (наприклад, 23400 rpm, 23600 rpm або 23800 rpm). Введення точних обертів із шильдика необхідне інвертору для коректної компенсації ковзання та стабілізації швидкості у векторному режимі SVC.

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та обґрунтування
P2.04	Номінальна робоча напруга	220 V / 380 V (Значення з шильдика)	Паспортна робоча напруга обмоток шпинделя за шильдиком. Для шпинделів 220 V встановлюється 220 V (або точне значення з шильдика); для промислових шпинделів 380 V встановлюється 380 V . Категорично заборонено подавати 380 V на обмотки, розраховані на 220 V!
P2.05	Номінальний струм двигуна	Значення з шильдика	Паспортний струм шпинделя: наприклад, 8.5 A (для 2.2 kW 220 V) або 6.5 A (для 3.0 kW 380 V). За цим значенням працює захист від перевантаження.

Крок 5: Крива V/F, підйом моменту та частота ШІМ

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та рекомендації
P0.00	Режим керування швидкістю	0 (Керування V/F)	0: Скалярне керування V/F (рекомендовано для першого безпечного пуску). Режим 1 (Векторний SVC) активується лише після автоналаштування.
P4.00	Форма характеристики V/F	0 (Лінійна)	0: Пряма лінійна характеристика напруги від частоти. Забезпечує стабільний магнітний потік у діапазоні 100–400 Hz.
P4.01	Підйом крутного моменту (Torque Boost)	0.5% ~ 1.0%	Заводське значення (2.0% ~ 4.0%) розраховане на двигуни 50 Hz і спричиняє сильний надлишковий струм на низьких обертах. Для шпинделя 400 Hz встановлюйте не більше 0.5% ~ 1.0% (при перегріві на холостому ході знижуйте до 0.0%).
P4.02	Частота зрізу підйому моменту	100.00 Hz	Частота, до якої діє додаткова компенсація напруги. Не повинна перевищувати 200.00 Hz.
P0.14	Несуча частота ШІМ (Carrier Frequency)	8.0 ~ 10.0 kHz	Заводська частота 2–4 kHz створює чутний високочастотний писк в обмотках. Збільшення до 8–10 kHz забезпечує тихий хід і зменшує пульсації струму. Не встановлюйте понад 12 kHz без примусового охолодження радіатора інвертора.
P0.15	Автоматичне регулювання напруги (AVR)	1 (Увімкнено)	1: Функція AVR увімкнена. Стабілізує вихідну напругу на шпинделі при коливаннях живильної мережі 220 V / 380 V.

Крок 6: Розгін, гальмування та режим зупинки

Код	Назва параметра	Встановити	Пояснення та обґрунтування
P0.11	Час розгону (Acceleration Time 1)	8.0 ~ 15.0 s	Час розгону від 0.00 Hz до максимальної частоти P0.03. Спроба розігнати шпиндель за 2–3 s спричиняє аварійне відключення за надструмом (помилка OC). Для шпинделів 2.2–3.0 kW оптимально 8–15 s.
P0.12	Час уповільнення (Deceleration Time 1)	10.0 ~ 15.0 s	Час гальмування від максимальної швидкості до зупинки. Ротор шпинделя має відчутний момент інерції. При занадто швидкому уповільненні двигун переходить у генераторний режим, напруга на шині DC зростає і вибиває помилку перенапруги (OV).
P1.06	Режим зупинки	0 або 1	0: Гальмування з уповільненням (за часом P0.12). 1: Зупинка самовибігом (інвертор миттєво знімає напругу, шпиндель зупиняється за рахунок власного тертя). Рекомендується при частих помилках OV під час зупинки.

Крок 7: Налаштування функцій захисту двигуна (Група Pb)

Код	Назва параметра	Встановити	Призначення
Pb.01	Захист від обриву вихідної фази (SPO)	1	1: Увімкнено. При порушенні контакту в роз'ємі GX16 інвертор відключає вихід, запобігаючи перегріву двигуна від неповнофазного режиму.
Pb.02	Захист від теплового перевантаження (OL1)	2	2: Двигун зі змінною частотою та примусовим охолодженням.
Pb.03	Коефіцієнт захисту від перевантаження	100.0%	Базовий захисний струм відповідає номінальному значенню, введеному в параметр P2.05.
Pb.08	Поріг автообмеження струму (OC)	110.0%	Автоматичне обмеження струму при різкому врізанні в матеріал для запобігання аварійному вимкненню за надструмом (помилка OC).
Pb.09	Швидкість зниження частоти при обмеженні	20.00 Hz/s	Темп тимчасового скидання робочої частоти під час спрацьовування обмеження струму Pb.08 (швидке розвантаження без стрибка напруги OV).
Pb.10	Дія при обмеженні струму	0	0: Дозволено постійно (обмеження струму активне як під час розгону/гальмування, так і на сталій робочій швидкості обробки 24000 rpm).
Pb.11	Реакція на перевантаження за моментом (OL3)	2	2: Аварійна зупинка за помилкою OL3 для негайного захисту підшипників, цанги та фрези при заклинюванні інструменту.
Pb.12	Рівень виявлення перевантаження за моментом	110.0%	Поріг крутного моменту відносно номінального значення двигуна для фіксації неприпустимого механічного перевантаження.
Pb.13	Час виявлення перевантаження за моментом	0.1 s	Час затримки виявлення перевантаження за моментом (фільтрація безпечних короточасних динамічних сплесків навантаження).

Крок 8: Вибір схеми керування (Пульт / Mach3 / LinuxCNC)

Режим експлуатації	Параметр P0.01 (Пуск/Стоп)	Параметр P0.07 (Частота)	Комутація та перемички
Варіант А: Автономний (пульт інвертора)	0 (Кнопки RUN / STOP)	0 або 1	Для керування вбудованим потенціометром пульта джампер J1 встановлюється в положення 1-2.
Варіант Б: Керування від системи ЧПУ (Mach3 / LinuxCNC)	1 (Клеми S1 - COM)	2 (Аналоговий вхід AI2)	1. Джампер J16 встановлюється в положення V (0–10 V). 2. Сигнал увімкнення шпинделя (реле плати) підключається до клем S1 і COM. 3. Аналоговий сигнал 0–10 V швидкості підключається до клем AI2 (+) та GND (-).

Етап III: Знеструмлення та силове підключення шпинделя

Після успішного завершення базового програмування частотної бази 400 Hz та збереження параметрів перейдіть до монтажу кабелю шпинделя.

ПРАВИЛО БЕЗПЕКИ: ПОВНЕ ЗНЕСТРУМЛЕННЯ ТА РОЗРЯД КОНДЕНСАТОРІВ

1. Вимкніть ввідний автомат живлення інвертора.

2. Зачекайте не менше 5–10 хвилин до повного згасання світлодіодного індикатора **CHARGE** на платі інвертора. Внутрішні електролітичні конденсатори шини постійного струму зберігають небезпечну для життя напругу (до 400–600 V DC) навіть після відключення мережі!

3. Переконайтеся мультиметром, що напруга між силовими клемми (+) та (-) впала нижче безпечного рівня 36 V DC, перш ніж торкатися клемної колодки.

Вимоги до силового кабелю та заземлення:

- Для з'єднання інвертора зі шпинделем застосовується екранований чотирижильний кабель (TRVV або RVVP перерізом **4×1.5 mm²** для потужностей до 2.2 kW або **4×2.5 mm²** для 3.0 kW і більше).
- Екран кабелю заземлюється з боку інвертора на клему **PE**. З боку шпинделя екран ізолюється та не з'єднується з фазними клемми.
- Перевірте надійність захисного заземлення:** корпус верстата, корпус інвертора та корпус шпинделя повинні мати надійне металеве з'єднання із загальним контуром заземлення (вимірний опір заземлення **< 10 Ω**).

ОБОВ'ЯЗКОВА ПЕРЕВІРКА ПІНА ЗАЗЕМЛЕННЯ МУЛЬТИМЕТРОМ

У багатьох шпинделях завод-виробник розпаює всередині штекера лише три фазні дроти 1, 2 і 3, залишаючи контакт 4 непідключеним до металевого корпусу.

- Перевірте мультиметром опір між контактом 4 роз'єму та металевим корпусом шпинделя.
- Якщо ланцюг розімкнений (опір нескінченний), обов'язково розберіть задню кришку роз'єму шпинделя та надійно з'єднайте провід від контакту 4 з металевим корпусом шпинделя. Без належного заземлення шпинделя робота категорично заборонена через небезпеку ураження електричним струмом та сильні завади на крокові двигуни й плату ЧПУ!

Етап IV: Перший безпечний пробний пуск шпинделя

Оскільки інвертор уже запрограмований на частотну базу 400 Hz, а силове підключення перевірено, подайте живлення та виконайте тестовий пуск.

Контрольний перелік перед пуском:

- Охолодження: для водяного шпинделя помпа увімкнена, рідина вільно циркулює сорочкою охолодження без повітряних пробок. Для повітряних шпинделів повітрязбірники вільні від пилу.
- Механічна частина: ріжучий інструмент (фреза) знятий, гайка цанги надійно затягнута, вал вільно обертається вручну без заїдань.
- Контроль уставок: повторно перевірте на екрані, що параметр P0.03 = 400.00 Hz, P0.04 = 400.00 Hz та P2.02 = 400.00 Hz.
- Початкова уставка: на дисплеї виставлено частоту 100.00 Hz (6000 rpm).

Порядок запуску:

1. Натисніть кнопку **RUN** на пульті керування.
2. Шпиндель плавно розганяється до 100 Hz протягом встановленого часу (8 s).
3. Перевірте напрямок обертання: з боку цанги вал повинен обертатися за годинниковою стрілкою (CW). Якщо обертання зворотне, вимкніть інвертор кнопкою **STOP**, дочекайтеся повної зупинки, зніміть живлення і поміняйте місцями проводи фаз U та V.
4. Клавішею **SHIFT** перемкніть відображення дисплея на струм. Струм холостого ходу на 100 Hz повинен бути в межах 1.2–2.5 A (залежно від потужності). За наявності аномального шуму чи струму понад 4 A зупиніть двигун кнопкою **STOP** і перевірте уставки P2.02 та P4.01.
5. За нормальної роботи плавно підвищуйте частоту (ручкою вбудованого потенціометра або кнопкою **▲**, залежно від обраного в **P0.07** джерела завдання): 200 Hz (12000 rpm) → 300 Hz (18000 rpm) → 400 Hz (24000 rpm). Обертання має бути рівномірним, плавним, без вібрацій та сторонніх стукотів підшипників на максимальних 24000 rpm.
6. Натисніть **STOP/RST** та переконайтеся у штатному уповільненні без помилок.

Етап V: Автоналаштування характеристик двигуна

Процедура автоналаштування (Motor Autotuning) забезпечує автоматичне вимірювання внутрішніх параметрів еквівалентної схеми двигуна (активний опір обмоток, індуктивність та струм холостого ходу) для точного безсенсорного векторного керування (SVC). Оберіть один із двох режимів залежно від умов монтажу:

Статичне автоналаштування двигуна ($P0.16 = 2$, нерухомий вал)

Статичне автоналаштування визначає внутрішні електричні константи обмоток двигуна: активний опір статора R_1 ($P2.06$), опір ротора R_2 ($P2.07$) та індуктивність розсіювання L_σ ($P2.08$) без обертання вала двигуна.

Застосовується, коли шпиндель змонтований у шпиндельному вузлі верстата, підключений до аспірації або демонтаж є недоцільним.

Порядок виконання статичного автоналаштування:

1. Перевірте відповідність параметрів двигуна ($P2.01$ – $P2.05$) даним шильдика.
2. Переконайтеся, що контур охолодження увімкнений, а шпиндель надійно закріплений.
3. У меню параметрів виберіть $P0.16$, встановіть значення 2 та підтвердіть клавішею **DATA/ENT**.
4. На дисплеї почне блимати індикація **-TUN-** (очікування пуску).
5. Натисніть кнопку **RUN** на пульті інвертора.
6. Засвітиться індикатор **RUN/TUNE**, на табло з'явиться **TUN-0**. Інвертор подає випробувальні імпульси струму в обмотки. Вал залишається нерухомим, чути високочастотний звук роботи ШІМ. Процедура триває 20–40 с.
7. Після завершення на дисплеї відобразиться **-END-**, і перетворювач повернеться у стандартний режим. Параметр $P0.16$ скидається в 0.
8. Перевірка: у параметрах $P2.06$, $P2.07$ та $P2.08$ з'являються виміряні значення в Омах (Ω) та мілігенрі (mH).

РУЧНЕ ВВЕДЕННЯ $P2.09$ ТА $P2.10$ ПРИ ЛИШЕ СТАТИЧНОМУ АВТОНАЛАШТУВАННІ

У статичному режимі (вал нерухомий) інвертор автоматично вимірює опори R_1 , R_2 та індуктивність L_σ ($P2.06$ – $P2.08$), але **не може виміряти взаємну індуктивність L_m ($P2.09$) та струм холостого ходу I_0 ($P2.10$)**.

Якщо динамічне (обертальне) калібрування не проводиться (наприклад, шпиндель встановлений на верстаті, змонтована аспірація чи затиснута цанга), а ви плануєте використовувати векторний режим SVC ($P0.00 = 1$), параметри $P2.09$ та $P2.10$ необхідно обов'язково ввести вручну:

- **Струм холостого ходу двигуна ($P2.10$)**: встановіть на рівні **30% ~ 40%** від номінального струму з шильдика ($P2.05$), або виміряйте фактичний струм: запустіть шпиндель на холостому ході на частоті 400 Hz у режимі V/F ($P0.00 = 0$), перемкніть екран кнопкою **SHIFT** на індикацію струму і введіть отримане число в $P2.10$ (типово 2.0–3.0 А для 2.2 kW; 1.8–2.5 А для 3.0 kW на 380 V).
- **Взаємна індуктивність ($P2.09$)**: введіть паспортне значення з документації на шпиндель (mH). Якщо воно невідоме, залиште розрахункове значення інвертора для вашої потужності (після встановлення $P2.01$). Завищене значення $P2.09$ призводить до надструму (OC) та перегріву в режимі SVC!
- **Практичне правило**: якщо ви не виконували динамічне автоналаштування і не знаєте точних характеристик $P2.09/P2.10$, найнадійнішим є використання скалярного режиму V/F ($P0.00 = 0$), для якого ці параметри не є критичними.

Динамічне (обертальне) автоналаштування двигуна (P0.16 = 1, холостий хід)

Динамічне автоналаштування виконує вимірювання активних опорів обмоток, після чого розганяє вал шпинделя на холостому ході для точного визначення струму холостого ходу I_0 (P2.10) та взаємної індуктивності L_m (P2.09).

Застосовується для роботи в режимі векторного керування без датчика швидкості (SVC, P0.00 = 1), який забезпечує жорстке утримання обертів під навантаженням під час обробки деревини твердих порід та кольорових металів на середніх швидкостях (8000–16000 rpm).

ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ДИНАМІЧНИМ АВТОНАЛАШТУВАННЯМ

- Шпиндель має бути вільний від навантаження: зніміть ріжучий інструмент, затягніть або зніміть цангову гайку.
- Вал шпинделя не повинен мати механічного зчеплення з матеріалом чи пристроями.
- Увімкніть циркуляцію охолоджувальної рідини або перевірте відсутність перешкод для повітряного потоку.

Порядок виконання динамічного автоналаштування:

- Перевірте паспортні параметри двигуна (P2.01–P2.05) (потужність, струм, напруга, базова частота 400 Hz, оберти 24000 rpm).
- Перевірте, що час розгону і гальмування (P0.11, P0.12) встановлено не менше 8–10 s.
- У параметрі P0.16 виставте значення 1 та натисніть DATA/ENT.
- На дисплеї почне блимати індикація -TUN-.
- Переконайтеся у безпеці навколишньої зони та натисніть кнопку RUN.
- Фаза 1 (TUN-0): шпиндель нерухомий приблизно 15–25 s, виконуються вимірювання опорів обмоток.
- Фаза 2 (TUN-1): інвертор плавно розганяє вал шпинделя до робочої швидкості на холостому ході, вимірює магнітні характеристики, після чого плавно зупиняє двигун.
- Після завершення зупинки на табло висвітиться -END-, параметр P0.16 повернеться в 0.
- Перевірка: константи P2.06–P2.10 автоматично заповнені розрахунковими параметрами даного шпинделя.
- Активація режиму SVC: перемкніть параметр P0.00 на значення 1 (Sensorless Vector Control).

Орієнтовні параметри для шпинделів з повітряним та водяним охолодженням

Зведена таблиця орієнтовних базових налаштувань інвертора серії GT для двох поширених конфігурацій шпинделів ЧПУ: з повітряним (2.2 kW, 220 V) та водяним (3.0 kW, 380 V) охолодженням. Зверніть увагу: наведені параметри є базовими орієнтирами, точні паспортні дані напруги, струму та швидкості завжди перевіряйте за шильдиком вашого конкретного двигуна.

Код	Назва параметра	Шпиндель 2.2 kW (220 V, повітряне охолодження)	Шпиндель 3.0 kW (380 V, водяне охолодження)
P0.00	Режим керування двигуном	0 (V/F) або 1 (SVC після калібрування)	0 (V/F) або 1 (SVC після калібрування)
P0.03	Максимальна вихідна частота	400.00 Hz	400.00 Hz
P0.04	Верхня межа робочої частоти	400.00 Hz	400.00 Hz
P0.05	Нижня межа робочої частоти	120.00 Hz (повітряне охолодження)	100.00 Hz (водяне охолодження)
P0.06	Базова цифрова уставка частоти	400.00 Hz	400.00 Hz
P0.11	Час прискорення (ACC)	8.0 s	10.0 s (більший момент інерції)
P0.12	Час уповільнення (DEC)	10.0 s	12.0 s (або 2–4 s з гальмівним резистором)
P0.14	Несуча частота ШІМ	8.0 ~ 10.0 kHz	8.0 kHz
P0.15	Режим ШІМ з модуляцією (AVR)	1 (Увімкнено)	1 (Увімкнено)
P2.00	Тип навантаження двигуна	0 (Тип G — постійний момент)	0 (Тип G — постійний момент)
P2.01	Номінальна потужність	2.2 kW (вводиться першим!)	3.0 kW (вводиться першим!)
P2.02	Номінальна базова частота	400.00 Hz	400.00 Hz
P2.03	Номінальна швидкість обертання	24000 rpm (або за шильдиком)	24000 rpm (або за шильдиком)
P2.04	Номінальна напруга	220 V (3 фази U-V-W по 220 V)	380 V (3 фази U-V-W по 380 V)
P2.05	Номінальний робочий струм	8.5 A (типово 8.0 ~ 9.0 A)	6.5 A (типово 6.0 ~ 7.0 A)
P4.00	Тип кривої V/F	0 (Лінійна характеристика)	0 (Лінійна характеристика)
P4.01	Підйом моменту (Torque Boost)	0.5% ~ 1.0%	0.0% ~ 0.5%

Код	Назва параметра	Шпиндель 2.2 kW (220 V, повітряне охолодження)	Шпиндель 3.0 kW (380 V, водяне охолодження)
Pb.01	Захист від обриву вихідної фази	1 (Увімкнено)	1 (Увімкнено)
Pb.02	Захист від теплового перевантаження	2 (Примусове охолодження)	2 (Примусове охолодження)
Pb.03	Коефіцієнт струмового захисту	100%	100%
Pb.08	Поріг автообмеження струму (OC)	110.0%	110.0%
Pb.09	Швидкість зниження частоти при обмеженні	20.00 Hz/s	20.00 Hz/s
Pb.10	Дія при обмеженні струму	0 (Дозволено постійно)	0 (Дозволено постійно)
Pb.11	Реакція на перевантаження за моментом (OL3)	2 (Аварійна зупинка OL3)	2 (Аварійна зупинка OL3)
Pb.12	Рівень виявлення перевантаження за моментом	110.0%	110.0%
Pb.13	Час виявлення перевантаження за моментом	0.1 s	0.1 s

Технічні особливості шпинделя 2.2 kW (220 V, повітряне охолодження):

- **Нижня межа частоти P0.05 = 120 Hz (7200 rpm):** крильчатка охолодження жорстко закріплена на валу ротора. Продуктивність вентилятора падає пропорційно квадрату швидкості. Тривала робота на частотах нижче 120 Hz призводить до швидкого перегріву ізоляції навіть без механічного навантаження.
- **Контроль струму:** струм холостого ходу на частоті 400 Hz не повинен перевищувати 2.0–2.8 А. При підвищеному струмі зменшіть параметр P4.01 до 0.0%.
- **Частота ШІМ:** установка P0.14 = 8.0 ~ 10.0 kHz знижує високочастотний акустичний писк та зменшує нагрів магнітопроводу статора.

Технічні особливості шпинделя 3.0 kW (380 V, водяне охолодження):

- **Підключення до трифазної мережі 380 V:** вхід інвертора (моделі GT-xxxG-4) підключається до трьох фаз мережі 380 V на клеми R, S, T. Вихід U-V-W формує міжфазну напругу 380 V (параметр P2.04 = 380).
- **Номінальний струм:** струм шпинделя 3.0 kW на 380 V становить приблизно 6.5 А, що менше за струм шпинделя 2.2 kW на 220 V (8.5 А) за рахунок вищої напруги ($P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$). Не встановлюйте завищений струм у параметрі P2.05.
- **Інерція ротора та гальмівний резистор:** ротор двигуна 3.0 kW має більшу масу. Час розгону P0.11 встановлюється не менше 10 s. Для швидкого гальмування без аварійного вимкнення за перенапругою (OV) рекомендується підключити зовнішній гальмівний резистор (номіналом 200–400 W, 150–250 Ω) до клем (+) та PB.
- **Рідинне охолодження:** перед пуском переконайтеся у безперервній циркуляції теплоносія (витрата не менше 3–4 L/min).

Діагностика типових несправностей і помилок

Код / Симптом	Найбільш імовірна причина	Метод усунення
OC (Overcurrent) Струмове перевантаження при пуску або розгоні	1. Базова частота P2.02 або P0.03 залишилася на значенні 50 Hz. 2. Занижений час розгону P0.11. 3. Завищений підйом моменту P4.01. 4. Порушення ізоляції або замикання кабелю U-V-W.	1. Перевірте, що P0.03 = 400, P0.04 = 400, P2.02 = 400. 2. Збільште час розгону P0.11 до 8–15 s. 3. Знизьте P4.01 до 0.0%. 4. Перевірте кабель і штекер шпинделя на відсутність міжфазного замикання.
OV (Overvoltage) Перенапруга на шині DC при гальмуванні	Генераторний режим двигуна під час скидання обертів за відсутності гальмівного резистора.	1. Збільште час гальмування P0.12 до 12–15 s. 2. Або активуйте самовибіг (P1.06 = 1). 3. Для швидкої зупинки підключіть гальмівний резистор до клем (+) та РВ.
SPO (Output Phase Loss) Втрата вихідної фази	Порушення контакту в кабелі або в роз'ємі GX16.	Перевірте затяжку силових клемних гвинтів інвертора та якість пайки проводів у штекері шпинделя GX16.
Підвищений нагрів на холостому ході	1. Завищений підйом моменту P4.01. 2. Недостатній потік теплоносія. 3. Занижена несуча частота ШІМ.	1. Встановіть P4.01 = 0.0%. 2. Перевірте роботу помпи і відсутність повітряних пробок у сорочці. 3. Збільште частоту ШІМ P0.14 до 8.0 або 10.0 kHz.
Електромагнітні завади на плату ЧПУ під час пуску	Високочастотні наведення від силового кабелю шпинделя на сигнальні ланцюги.	1. Використовуйте екранований кабель шпинделя. 2. Заземліть екран кабелю з боку інвертора на клему РЕ. 3. Перевірте з'єднання контакту 4 роз'єму GX16 з корпусом шпинделя. 4. Прокладайте силові дроти на відстані не менше 20 см від слабкострумових ліній датчиків і крокових приводів.