

© В.С. Ткачов¹, А.В. Ужеловський¹, В.О. Ужеловський¹, Г.В. Кравець²

¹Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна

²Фаховий коледж зварювання та електроніки імені Є.О. Патона, Дніпро, Україна

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

© V. Tkachov¹, A. Uzhelovsky¹, V. Uzhelovsky¹, G. Kravets²

¹Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

²Yevhen PATON applied college of welding and electronics, Dnipro, Ukraine

CONSTRUCTION OF THE MODEL OF A THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

Мета. Розробка шляхом імітаційного моделювання спрощеної моделі трифазного асинхронного короткозамкнутого двигуна з частотним керуванням, що дозволяє досліджувати динамічні властивості механічного обладнання та аналізувати роботу системи частотного електропривода в умовах різних експлуатаційних навантажень.

Методика досліджень. Запропонована методика базується на комплексному підході, що включає проведення експериментальних досліджень для визначення залежності моменту двигуна від частоти напруги живлення та навантаження, аналіз отриманих даних за допомогою регресійного аналізу для формування статистичних залежностей, а також розробку імітаційної моделі системи частотного електропривода. Використання програмного середовища MATLAB забезпечує точність та зручність моделювання перехідних процесів і дозволяє виконувати чисельні експерименти для оцінки поведінки системи в динаміці.

Результати досліджень. В результаті проведеної роботи створена спрощена імітаційна модель трифазного асинхронного короткозамкнутого двигуна з частотним керуванням, яка дозволяє досліджувати динамічні властивості електроприводів і механічного обладнання. Модель враховує основні параметри та залежності, що впливають на роботу системи, забезпечуючи адекватність моделювання реальних процесів. Також розроблена модель дозволяє оцінити вплив частотного регулювання на ключові характеристики двигуна та системи в цілому.

Наукова новизна. Розроблена модель дозволяє виконувати імітаційне моделювання системи частотного електропривода з метою аналізу її поведінки в перехідних режимах. На основі проведених експериментальних досліджень отримано регресійні залежності з високим коефіцієнтом кореляції, які враховують вплив частоти напруги живлення та навантаження на момент двигуна. Використання даної моделі в MATLAB забезпечує швидкий і точний аналіз характеристик системи, що сприяє її оптимізації та підвищенню ефективності роботи електропривода.

Практична значимість. Вперше запропоновано підхід до моделювання частотного електропривода, який базується на використанні спрощеної моделі реактивного моменту опору. Ця модель дозволяє з високою точністю досліджувати динамічну поведінку системи керування електроприводом в умовах змінного навантаження та частоти напруги живлення. Використання сучасних програмно-технічних засобів дало змогу оптимізувати процес розробки моделі та забезпечити її інтеграцію в MATLAB для подальших досліджень.

Ключові слова: експериментальне дослідження, електропривод з частотним керуванням, регресійний аналіз, імітаційне моделювання, статистична залежність, динамічні характеристики, реактивний момент опору.

Постановка проблеми. Сучасні системи керування приводами повсюдно використовують асинхронні короткозамкнуті електродвигуни із управління швидкістю обертання ротора зміною частоти напруги живлення за допомогою частотних перетворювачів.

При розробці раціональних структур електроприводів, оптимізації їхньої роботи застосовується моделювання.

Існуючі моделі асинхронних двигунів з частотним керуванням описують як механічні, і електромагнітні процеси які здійснюються у ньому [1].

Трифазні асинхронні електродвигуни є дуже поширеними і використовуються в різних галузях і сферах діяльності завдяки їхнім перевагам, таким як висока надійність, простота у використанні і ефективність. Трифазні асинхронні електродвигуни використовуються:

Промислові застосування:

Машинобудування: Електродвигуни використовуються для приводу верстатів, конвеєрів, пресів та інших обладнань у виробництві.

Вентиляція та кондиціонування повітря: Великі електродвигуни встановлюються в системах вентиляції та кондиціонування для руху повітря.

Насоси: Електродвигуни використовуються для приводу водяних насосів у системах водопостачання, каналізації та водопідготовки.

Сільське господарство:

Сільськогосподарські машини: Електродвигуни використовуються в сільськогосподарських машинах, таких як трактори, комбайни та інші обладнання.

Електромобілі: Трифазні асинхронні електродвигуни також використовуються у сучасних електромобілях для приводу коліс та інших систем.

Енергетика: Електродвигуни використовуються в енергетичних станціях для приводу генераторів, турбін і насосів.

Транспорт та логістика: Трифазні асинхронні електродвигуни застосовуються у системах транспорту та логістики для приводу конвеєрів, підйомників, сміттєвозів і багатьох інших пристроїв.

Побутове використання: Електродвигуни можуть бути встановлені в побутових приладах, таких як пральні машини, посудомийні машини, вентиляційні системи та інші.

Інші галузі: Трифазні асинхронні електродвигуни можуть бути знайдені у різних інших галузях, таких як нафтогазова промисловість, гірничо-промисловість, суднобудування і багато інших.

Виклад основного матеріалу дослідження. Завдяки своїй універсальності та надійності трифазні асинхронні електродвигуни залишаються важливими компонентами для багатьох видів обладнання і систем у всьому світі.

При регулюванні частоти необхідно прагнути до того, щоб характеристики у всьому діапазоні відрізнялися високою жорсткістю, а двигун мав достатню переважувальну здатність. Цього можна досягти, зберігаючи постійним магнітний потік. Для асинхронного двигуна можна приблизно прийняти, що $U = f_1 \cdot \Phi$.

Тому для збереження постійного магнітного потоку здійснюють регулювання з незмінним співвідношенням

$$U/f = \Phi = \text{const.} \quad (1)$$

Жорсткість механічних характеристик робочої зони при цьому способі регулювання зберігається порівняно високою. Величина критичного моменту у зоні високих частот порівняно мало змінюється [2–8].

Дослідження механічних характеристик трифазного короткозамкнутого асинхронного електродвигуна при різних частотах напруги живлення проведені на стенді (рис. 1) що складається з двигуна АВ-042, регульованого частотного перетворювача CFM110, генератора постійного струму, що використовується як навантажувальна машина та тахогенератора. Обертний момент двигуна контролювався цифровим приладом струму навантаження генератора.

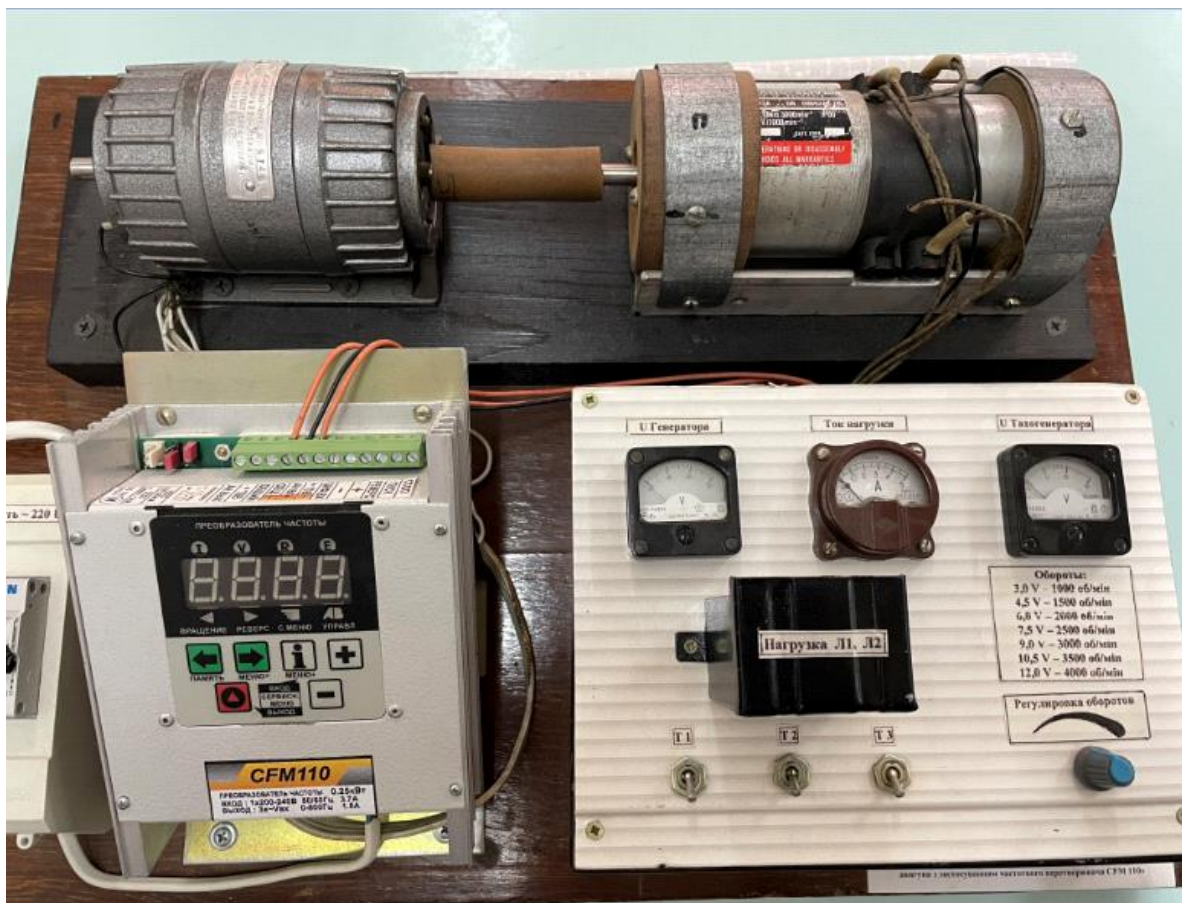


Рис. 1. Стенд дослідження трифазного короткозамкнутого асинхронного електродвигуна при керуванні зміною частоти напруги живлення

Момент навантаження електродвигуна регулювався шляхом зміни опору ланцюга генератора.

У процесі досліджень отримані механічні характеристики двигуна для різних частот напруги живлення з незмінним співвідношенням $U/f = \text{const.}$

Сімейство отриманих механічних характеристик наведено на рисунку 2.

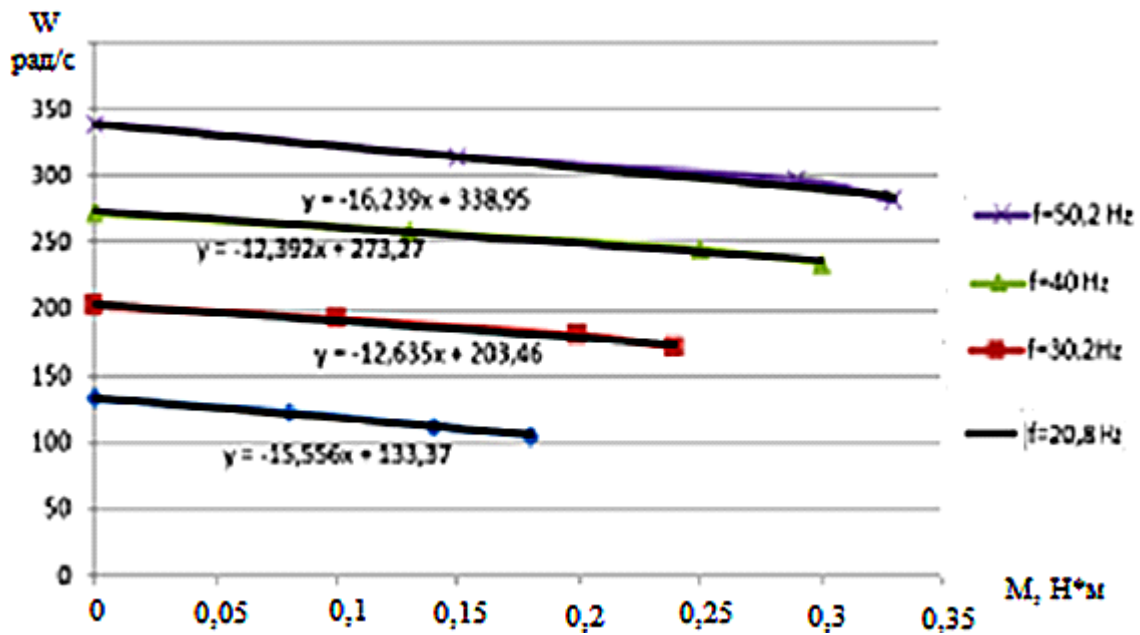
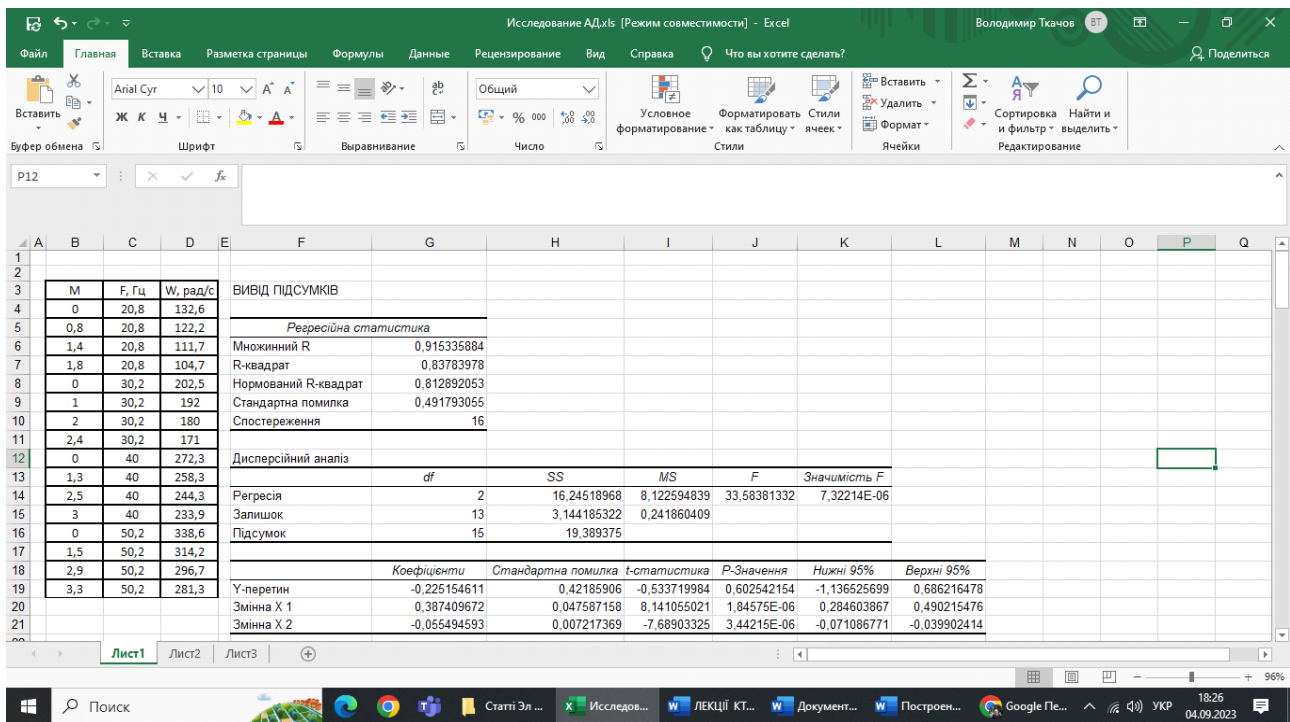
Рис. 2. Механічні характеристики двигуна для різних частот напруги живлення f 

Рис. 3. Обробка експериментальних даних в середовищі Excel

За отриманими експериментальними даними знайдено рівняння регресії, що зв'язує момент двигуна, частоту напруги живлення і швидкість обертання ротора (рис. 3)

$$M = -0,225 + 0,387 \cdot f - 0,055 \cdot \omega, \quad (2)$$

де: M – крутний момент валу двигуна, Н · м; f – частота напруги живлення, Гц; ω – частота обертання ротора двигуна, рад/с.

Коефіцієнт множинної кореляції рівняння регресії 0,915 показує досить високу тісноту зв'язку цих змінних, що багато в чому визначається точністю вимірювань.

На стадії розробки систем керування підйомно-транспортним обладнанням з використанням асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором та частотним керуванням доцільно використовувати модель системи електроприводу, що враховує вплив як механічних параметрів обладнання, так і електричні процеси у статорі та роторі. Проте, враховуючи, що постійні часу механічних процесів устаткування значно перевищують постійні часу електричних процесів електроприводу, то спрощення моделювання динаміки поведінки системи ними можна знехтувати.

Використовуючи отриману залежність крутного моменту асинхронного двигуна від моменту навантаження і частоти напруги живлення (2) можна побудувати просту модель його роботи. У цьому випадку керування електродвигуном здійснюється частотним перетворювачем, що забезпечує сталість співвідношення ($U/f = \text{const}$).

Моделювання реактивного моменту опору можна виконати з інженерною точністю, використовуючи блоки MatLAB Simulink (рис. 4).

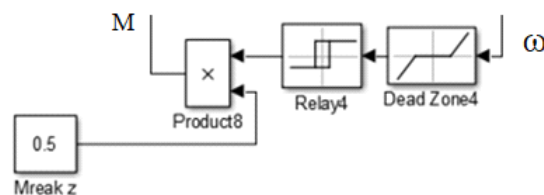


Рис. 4. Моделювання реактивного моменту опору в середовищі MatLAB Simulink

В результаті отримано просту модель асинхронного двигуна при управлінні зміною частоти напруги живлення в середовищі MatLAB Simulink (рис.5).

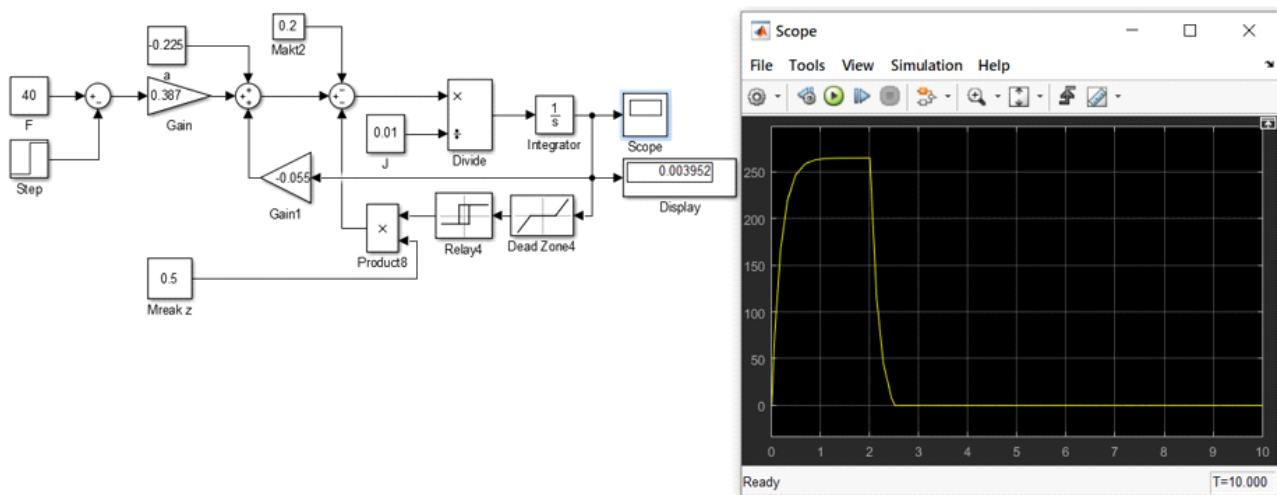


Рис. 5. Модель асинхронного двигуна при управлінні зміною частоти напруги живлення в середовищі MatLAB Simulink

Аналіз моделювання пуску та зупинки асинхронного короткозамкнутого двигуна з частотним керуванням продемонстрував високу ефективність цієї моделі для дослідження динамічних процесів. Це особливо важливо для технологічних установок, де необхідна точна оцінка поведінки системи при змінних умовах. Модель підтвердила можливість її використання у розробці систем керування обладнанням, що потребують гнучкого підходу до керування динамічними режимами.

Отримана структура моделі враховує всі ключові чинники, такі як:

- Активні та реактивні моменти опору, які впливають на ефективність роботи двигуна.
- Момент інерції, наведених до валу двигуна, що дозволяє точно моделювати реальну поведінку системи під час зміни частоти живлення.
- Залежність моменту двигуна від частоти напруги живлення і швидкості обертання ротора, що є критично важливим для забезпечення стабільної роботи в широкому діапазоні частот.

Така структура може бути адаптована для дослідження аналогічних технологічних установок, що дозволяє розширити область застосування моделі.

Результати моделювання дозволяють використовувати модель як інструмент для оптимізації роботи технологічних систем у промисловості. Її застосування можливе у виробництвах із підвищеними вимогами до точності регулювання швидкості, таких як:

- Автоматизовані виробничі лінії;
- Системи транспортування матеріалів;
- Устаткування з високими динамічними навантаженнями.

Завдяки врахуванню критичних динамічних параметрів модель сприяє створенню систем керування, що забезпечують мінімізацію втрат енергії та стабільну роботу обладнання навіть у складних умовах експлуатації.

Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення систем частотного керування асинхронними двигунами. Це включає розвиток методів адаптивного керування, які могли б враховувати зміну динамічних характеристик у реальному часі.

Зважаючи на універсальність структури моделі, її можна ефективно інтегрувати в існуючі системи автоматизації для аналізу і оптимізації технологічних процесів, що потребують точного регулювання швидкості обертання та моменту двигуна.

Таким чином, отримані результати та структура моделі є цінним інструментом для розробки та впровадження ефективних систем керування в технологічних установках, що дозволить підвищити їх продуктивність, надійність та енергоефективність.

Висновки:

Аналіз результатів моделювання пуску та зупинки асинхронного короткозамкнутого двигуна з частотним керуванням підтвердив можливість використання цієї моделі для дослідження динамічних процесів у технологічних установках при розробці систем керування обладнанням.

Отримана структура моделі, що враховує активні та реактивні моменти опору, момент інерції мас, наведених до валу двигуна, а також залежність моменту двигуна від частоти напруги живлення і швидкості обертання ротора може бути використана в аналогічних технологічних установках.

Перелік посилань

1. Klyuev, O.V., & Sadovoi, A.V. (2011). Energeticheskie kharakteristiki asinkhronnogo elektroprivoda s dvukhkanalnoi sistemoi upravleniya. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, 2(17), 174–181.
2. Jouili, M., Jarray, K., Koubaa, Y., & Boussak, M. (2012). Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. *Electric Power Systems Research*, 89, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.02.014>
3. Alonge, F., D'Ippolito, F., Fagiolini, A., & Sferlazza, A. (2014). Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor. *Control Engineering Practice*, 27, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.007>.
4. Chin-Chih, O., Chun-Jung, C., & Tien-Chi, C. (2010). Modelling and design a power assisted wheelchair used torque observer. *International Symposium Computer Communication Control and Automation*, 2, 63–66. <https://doi.org/10.1109/3ca.2010.5533763>
5. Guzinski, J., Diguët, M., Krzeminski, Z., & Lewicki, A. (2010). Speed and load torque observer application in high-speed train electric drive. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 57(2), 565–574. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2029582>
6. Попович, М.Г., Лозинський, О.Ю., & Клепиков, В.Б. (2005). *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник*. Київ.
7. Kuznetsov, V., & Nikolenko, A. (2015). Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8). 37–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36755>
8. Kuznetsov, V., Tryputen, M., Kuznetsova, Y., Babyak, M., Artemchuk, V., & Kovzel, M. (2020). Ways to Improve Power Quality under the Conditions of Industrial Enterprises. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240801>

ABSTRACT

Goal. The development of a simplified model of a three-phase asynchronous short-circuit motor with frequency control through imitation modeling.

Research methodology. The proposed methodology involves constructing a model of a frequency-controlled electric motor by combining experimental research, regression analysis, and imitation modeling. Experimental research focuses on determining the dependence of the motor's torque on the supply voltage frequency and load. The obtained data is analyzed using regression techniques to establish statistical relationships with a high correlation coefficient. This enables the development of an imitation model that accurately reflects the motor's dynamic behavior.

Research findings. For the first time, the construction of an imitation model of a frequency-controlled electric drive system is proposed, utilizing modern software and technical tools. The study introduces a simplified model of the reactive resistance torque, which is critical for studying the motor's dynamic behavior. The approach combines experimental torque measurement data with frequency and load dependency to construct a model that enhances the understanding of the electric drive's operational dynamics.

Scientific novelty. A simplified model of a three-phase asynchronous short-circuit motor with frequency control has been successfully developed and studied. This model enables the investigation of the dynamic properties of mechanical equipment under various operating conditions. The imitation model allows for the analysis of transient processes in the electric drive system, thereby providing insights into its performance characteristics.

Practical significance. Based on experimental research, a regression relationship with a high correlation coefficient has been derived for the main characteristics of the electric drive. The developed model, implemented in the MATLAB software package, allows the simulation of transient processes in the frequency-controlled motor system. This makes it a valuable tool for designing and optimizing electric drive systems in various industrial applications.

Keywords: *experimental research, frequency-controlled electric drive, regression analysis, imitation modeling, statistical dependency, dynamic characteristics, reactive resistance torque.*