

ДАНИЛЬЧЕНКО ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khipti.edu.ua.

ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: Sergii.Shevchenko@khipti.edu.ua.

ДІВЧУК ТЕТЯНА ЄВГЕНІЙВНА – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-8527>; e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com.

СКРУПСЬКА ЛЮДМИЛА СТЕПАНІВНА – старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9494-1009>; e-mail: lskrupskaya@gmail.com.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЖИВЛЕННІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ВІД ПІДЗЕМНИХ ПІДСТАНЦІЙ

У статті розглянуто питання щодо впливу параметрів кабельної лінії при живленні асинхронних двигунів від підземних електричних підстанцій. Забезпечення надійного пуску асинхронних електродвигунів від підземних трансформаторних підстанцій є критичним завданням. Значна віддаленість споживачів зумовлює використання довгих кабельних ліній, що при прямому пуску призводить до глибоких падіннь напруги. Наявність у мережі нелінійних навантажень, що генерують вищі гармоніки струму та напруги, додатково погіршує енергетичні показники за рахунок збільшення сумарних електричних і магнітних втрат потужності в двигунах і трансформаторах, прискореного теплового старіння та деградації ізоляції в умовах високої вологості та агресивного середовища, зниження динамічної стійкості електроприводів і ризику зриву технологічного процесу. В даному дослідженні проведено комплексне моделювання живлення асинхронних двигунів від дільничних та центральних підземних електричних підстанцій без та за наявності вищих гармонік напруги. Виконано аналіз падіння напруги залежно від довжини та перерізу жил кабелю для мережі 1140 В при прямому пуску асинхронного двигуна для потужностей 100–132 кВт, а також виконано оцінку впливу гармонійного складу напруги живлення на граничну (максимальну) довжину мережі, при якій забезпечується умови нормального прямого пуску при номінальному моменті асинхронного двигуна. Встановлено, що за наявності вищих гармонік зростає значення пускового струму, отже збільшується падіння напруги додатково на 4–6 %, що потребує примусового зниження розрахункової довжини мережі на 15–20 %. Доведено, що для подолання даних обмежень за потреби живлення асинхронного двигуна на дистанціях понад 1 км від підземної підстанції потрібна відмова від прямого пуску на користь застосування пристроїв плавного пуску (тиристорних регуляторів напруги) або локальних систем векторного частотного керування.

Ключові слова: підземна трансформаторна підстанція; підземна мережа; моделювання електромагнітних процесів; асинхронний двигун; втрати; електропривод шахтних установок; енергоефективність.

Вступ. Забезпечення надійного та енергоефективного функціонування електромеханічних комплексів є базовою умовою рентабельності та технологічної безпеки підземних гірничих виробок та тунельних споруд. Основним структурним елементом приводу шахтних підйомних установок, систем водовідливу, головної вентиляції та конвеєрного транспорту є електродвигуни змінного струму. При цьому їхнє електропостачання здійснюється від дільничних та центральних підземних електричних підстанцій, умови роботи яких радикально відрізняються від поверхневих промислових мереж [1].

Незважаючи на існуючу нормативну базу та впровадження сучасних технічних рішень, проблема надійності та якості живлення підземного електроустаткування залишається недостатньо вивченою. Специфіка підземних розподільчих мереж – зокрема їх розгалуженість, значна довжина кабельних ліній при обмеженому перерізі, а також використання мереж із ізолюваною нейтраллю – зумовлює перебіг складних електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів [2].

На сьогоднішній день спостерігається тенденція до ускладнення режимів роботи шахтного обладнання: масово впроваджуються частотно-регульовані електроприводи та потужні напівпровідникові перетворювачі. Це неминуче призводить до спотворення кривих напруги та струму, генерації вищих гармонік та погіршення показників якості електричної енергії. У сукупності з частими пусковими режимами важко навантажених механізмів та падіння напруги [3]. Ці фактори можуть призвести до суттєвого збільшення сумарних електричних і магнітних втрат потужності в двигунах і трансформаторах, прискореного теплового старіння та деградації ізоляції в умовах високої вологості та агресивного середовища, зниження динамічної стійкості електроприводів і ризику зриву технологічного процесу, а також підвищеної ймовірності виникнення однофазних замикань на землю та займання рудничної атмосфери [4].

У зв'язку з цим проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на аналіз особливостей живлення електродвигунів від підземних підстанцій, є дуже актуальним науково-технічним завданням. Існує гостра необхідність у розробці та уточненні математичних моделей, що дозволяють адекватно

© Д. О. Данильченко, С. Ю. Шевченко, Т. Є. Дівчук, Л. С. Скрупська, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

описувати електромагнітний стан систем «підстанція – кабельна мережа – асинхронний двигун (АД)».

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема забезпечення надійності, енергоефективності та електромагнітної сумісності електромеханічних комплексів за умов підземних виробок перебуває у фокусі уваги провідних світових дослідницьких центрів. Специфіка електропостачання підземних електричних підстанцій — розгалуженість кабельних мереж, ізолювана нейтраль, наявність нелінійних навантажень та жорсткі вимоги до вибухобезпеки – потребує комплексного підходу до аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів, що протікають.

Більшість робіт присвячено оцінці впливу якості електричної енергії на шахтне обладнання. У роботах [5, 6] детально аналізують процеси генерації та поширення вищих гармонійних складових в ізолюваних мережах гірничих підприємств. Масове використання частотно-регульованих приводів насосних і конвеєрних установок призводить до спотворення кривих напруги. У роботах [7, 8] доведено, що живлення АД несинусоїдною напругою призводить до появи пульсуючих електромагнітних моментів, прискорене старіння ізоляції обмоток статорів і суттєве зниження експлуатаційного ресурсу електричних машин.

Фундаментальні основи аналізу динамічних режимів електричних машин змінного струму закладено у класичних працях [9, 10]. Однак адаптація цих моделей до умов підземних підстанцій вимагає врахування параметрів мережі живлення. У дослідженнях авторів [11, 12] представлені вдосконалені математичні моделі АД, що дозволяють аналізувати усталені та перехідні процеси при несиметрії та просіданнях напруги. Тим не менш, у більшості сучасних робіт силова мережа (високовольтний трансформатор підстанції та кабельна лінія) розглядається спрощено, без деталізації хвильових процесів.

Питання підвищення енергетичних показників підземних електротехнічних комплексів є критично важливими для рентабельності видобутку. Автори у роботі [13] розглядають методи оптимізації режимів роботи основних вентиляторних установок. При цьому в роботах [14, 15] розглядаються алгоритми скалярного та векторного управління для мінімізації електричних та магнітних втрат потужності безпосередньо у двигуні. У той же час комплексна мінімізація сумарних втрат у всьому колі «трансформатор підстанції – перетворювач частоти – кабельна мережа – двигун» досліджено недостатньо.

На окрему увагу заслуговує проблема перенапруг, що виникають при живленні електродвигунів від перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) через довгі шахтні кабелі. У роботі [16] авторами доведено, що неузгодженість хвильового опору кабелю та вхідного опору двигуна призводить до явища відбитої хвилі, через що напруга на клеммах двигуна може вдвічі перевищувати номінальне значення. Автори пропонують методи демпфування,

проте їх інтеграція до складних моделей електромеханічних комплексів все ще потребує доопрацювання.

Таким чином, незважаючи на глибоке опрацювання окремих аспектів, проблема комплексного математичного моделювання системи електропостачання підземної ділянки як єдиної динамічної структури залишається невирішеною. Існує потреба у розробці адекватних математичних моделей, які дозволять не лише з високою точністю визначити електромагнітний стан асинхронних електродвигунів за спотвореної напруги підземних підстанцій, а й синтезувати науково обґрунтовані алгоритми мінімізації сумарних енергетичних втрат.

Мета статті. Метою даної роботи є розробка та обґрунтування структури схемної математичної моделі, що дозволяє досліджувати перехідні процеси та оцінювати енергетичні показники асинхронних електродвигунів при їх живленні від підземних підстанцій залежно від довжини живильних ліній в умовах спотвореної напруги.

Викладення основного матеріалу статті. Для досягнення поставленої мети застосовується методи теорії електричних кіл та узагальненої теорії електричних машин. Схемне моделювання реалізується шляхом складання систем диференціальних рівнянь, що описують топологію мережі та динаміку АД.

Електромеханічні процеси в АД описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь у фазних координатах (або в системі координат $d-q$, що обертається). У матричній формі для фазних координат рівняння електричної рівноваги обмоток статора та ротора мають вигляд:

$$U_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$U_r = R_r \cdot I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} = 0 \quad (2)$$

де U_s, U_r – вектори фазних напруг статора і ротора (для короткозамкненого ротора $U_r=0$);

I_s, I_r – вектори фазних струмів;

R_s, R_r – діагональні матриці активних опорів фаз.

Вектори потокозчеплень визначаються через матриці індуктивностей, що залежать від кутового положення ротора θ :

$$\Psi_s = L_{ss} \cdot I_s + L_{sr}(\theta) \cdot I_r \quad (3)$$

$$\Psi_r = L_{rr} \cdot I_r + L_{rs}(\theta) \cdot I_s \quad (4)$$

де L_{ss}, L_{rr} – матриці власних та взаємних індуктивностей обмоток статора та ротора;

$L_{sr}(\theta), L_{rs}(\theta)$ – матриці взаємних індуктивностей між статором та ротором, що є періодичними функціями кута θ .

Електромагнітний момент M_{em} обчислюється як похідна коенергії системи за кутом повороту:

$$M_{em} = p \cdot I_s^T \cdot \frac{\partial L_{sr}(\theta)}{\partial \theta} \cdot I_r \quad (5)$$

де p – число пар полюсів.
Рівняння руху механічної підсистеми:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_c - f_v \omega \quad (6)$$

де J – сумарний момент інерції приводу;
 ω – механічна кутова швидкість ротора;
 M_c – момент статичного опору механізму;
 f_v – коефіцієнт в'язкого тертя.

Зовнішня мережа підземної підстанції (високовольтні трансформатори, кабелі з розподіленими параметрами, напівпровідникові перетворювачі) описується стандартними диференціальними та алгебраїчними рівняннями Кірхгофа, згідно [10–12], і мають повний математичний опис в інтегрованій бібліотеці Simscape.

Схемні моделі дозволяють розраховувати тривалі перехідні процеси та формувати розгалужені кабельні мережі підземних ділянок без експоненційного зростання часу чисельного розрахунку.

При прямому пуску АД пусковий струм I_n у 5–7 разів перевищує номінальне значення I_n . При цьому пусковий коефіцієнт потужності $\cos\phi_p$ має низьке значення (зазвичай 0.2–0.4), що зумовлює переважання реактивної складової струму. У класичній синусоїдальній мережі втрати напруги в кабелі визначається виразом:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot L \cdot (R_0 \cdot \cos \phi_{II} + X_0 \cdot \sin \phi_{II}) \quad (7)$$

де R_0 – активний опір кабелю, Ом/км (залежить від перерізу S);

X_0 – поганий індуктивний опір кабелю, Ом/км;

L – довжина кабельної лінії, км.

При живленні від мережі, спотвореної роботою силових перетворювачів, крива напруги містить спектр вищих гармонік. Наявність гармонік порядку ν (5, 7, 11, 13) викликає два критичні ефекти:

Отже, модифіковане рівняння падіння напруги для спотвореної мережі набуває вигляду:

$$\Delta U_{\Sigma} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot L \cdot \dots \cdot \sqrt{\sum_{\nu=1}^{\infty} [I_{\nu} \cdot (R_0 \cdot K_R(\nu) \cos \phi_{\nu} + X_0 \cdot \nu \cdot \sin \phi_{\nu})]^2} \quad (8)$$

Для кількісної оцінки процесів було реалізовано модель електромеханічного комплексу серед MATLAB/Simulink. Як об'єкт дослідження прийнято типовий шахтний АД потужністю 110 кВт, що живиться від підземної підстанції напругою 1140 В через гнучкий екранований кабель.

На рис. 1 представлені результати моделювання прямого пуску АД при синусоїдальній (коефіцієнт нелінійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) становить 0 %) та несинусоїдальній

(THD = 12 %) напругах, з перерізом кабелю $S = 50 \text{ мм}^2$ і довжиною $L = 500 \text{ м}$, що підводиться від підземної підстанції.

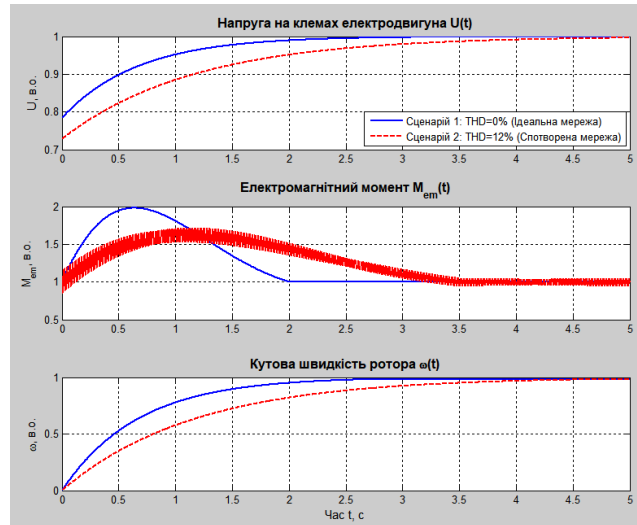


Рисунок 1 – Результати моделювання прямого пуску АД при синусоїдальній (THD = 0 %) та несинусоїдальній (THD = 12 %) напругах

Як показує аналіз отриманих результатів, при чистій синусоїдальній напрузі (THD = 0%), падіння напруги на клеммах двигуна в момент пуску досягає 18 %. Оскільки електромагнітний момент двигуна пропорційний квадрату напруги ($M_{em} \sim U^2$) зниження U на 18 % призводить до падіння пускового моменту на 32,7 %. АД успішно виходить на природну механічну характеристику, проте час розгону зростає на 2.4 с. Під час прямого пуску АД при спотвореній напрузі (THD = 12%) через зростання реактивного опору кабелю на високих частотах і збільшення сумарного значення струму, сумарна втрата напруги ΔU_{Σ} при тій же довжині кабелю $L = 500 \text{ м}$ і $S = 50 \text{ мм}^2$ зростає до 23 %. Падіння пускового моменту перевищує 40 %. Крім того, вищі гармоніки створюють знакозмінні пульсуючі моменти на валу, амплітуда яких досягає 15 % від номінального моменту.

Критерієм працездатності електроприводу є умова успішного пуску важко навантаженого механізму (наприклад, скребкового конвеєра), при якому пусковий момент двигуна перевищує статичний опір: $M_p > M_c$. Нормативні вимоги щодо електробезпеки та стійкості роботи встановлюють мінімально допустиму напругу на клеммах двигуна при пуску на рівні (0,8–0,85) U_n .

З умови обмеження падіння напруги на рівні 20 % ($\Delta U_{max} = 0.2 \Delta U_n$), аналітичний вираз для гранично допустимої довжини кабельної лінії L_{max} має вигляд:

$$L \frac{0.2 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_s \cdot (R_{0,eq} \cdot \cos \phi_n + X_{0,eq} \cdot \sin \phi_n)}_{max} \quad (9)$$

де $R_{0,eq}$, $X_{0,eq}$ – еквівалентні погонні опори з урахуванням основної та вищих гармонік напруги.

На основі результатів інтегрування масивів даних Simulink для мережі 1140 В побудовані залежності

максимально допустимої довжини кабельної лінії від її перерізу (рис. 2). Отримано такі граничні умови для потужності АД 100–132 кВт, які полягають у наступному. При перерізі кабелю $S = 35 \text{ мм}^2$ L_{max} не повинна перевищувати 350 м (за наявності гармонік знижується до 280 м). При перерізі кабелю $S = 50 \text{ мм}^2$, L_{max} становить 550 м (з урахуванням гармонік – 450 м). При перерізі кабелю $S = 95 \text{ мм}^2$, L_{max} досягає 900 м (з урахуванням гармонік – 780 м).

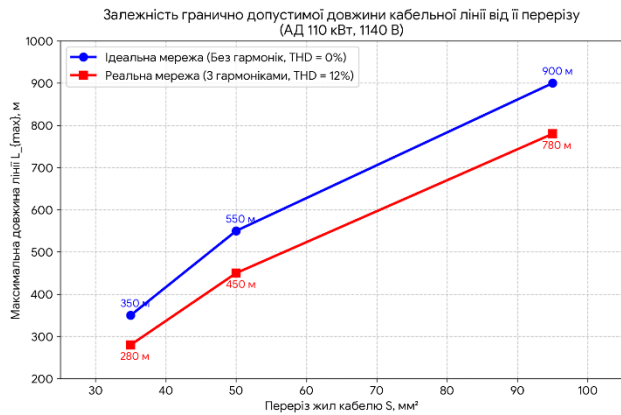


Рисунок 2 – Залежність максимально допустимої довжини кабельної лінії від її перерізу для мережі 1140 В при живленні АД 100–132 кВт

При перевищенні зазначених довжин прямий пуск стає неможливим: ротор залишається в загальмованому стані (перекидання двигуна), вся електроенергія, що споживається, перетворюється на теплові втрати потужності в обмотках, що веде до пробою ізоляції.

Висновок. 1. Ускладнення структури електропостачання підземних копалень і шахт обумовлює необхідність застосування системного підходу до аналізу електромагнітних процесів, що відбуваються в них. Використання схемного моделювання серед MATLAB/Simulink є оптимальним інструментом, що забезпечує баланс між точністю і швидкістю обчислень. Даний підхід дозволяє досліджувати взаємний вплив розгалужених кабельних мереж від підземних підстанцій, силових перетворювачів та АД, що необхідно для розробки ефективних заходів щодо підвищення якості електроенергії та надійності підземних електромеханічних комплексів.

2. Довжина та переріз кабельної лінії є лімітуючими факторами при проектуванні підземних мереж з асинхронним приводом. Падіння напруги при прямому пуску квадратично знижує пусковий момент, ставлячи під загрозу успішний запуск технологічного обладнання. Наявність найвищих гармонік напруги конструктивно погіршує пускові властивості. Скін-ефект у жилах кабелю та зростання чинного значення пускового струму збільшують падіння напруги додатково на 4–6 %, що потребує примусового зниження розрахункової довжини траси на 15–20 %.

3. Для подолання даних обмежень за потреби живлення АД на дистанціях понад 1 км від підстанції потрібна відмова від прямого пуску на користь

застосування пристроїв плавного пуску (тиристорних регуляторів напруги) або локальних систем векторного частотного керування.

Список літератури

- Kolar J. W., Friedli T. The essence of three-phase PFC rectifier systems—part I. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 176–198. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2012.2197867>.
- Al-Khalidi H., Kalam A. The impact of underground cables on power transmission and distribution networks. *2006 IEEE International Power and Energy Conference*, Putra Jaya, Malaysia, 28–29 November 2006. 2006. P. 576–580. DOI: <https://doi.org/10.1109/pecon.2006.346717>.
- Leonhard W. *Control of electrical drives*. 3rd ed. Heidelberg: Springer Berlin, 2001. 460 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56649-3>.
- Krishnan R. *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001. 626 p.
- Impact of power quality on the efficiency of the mining process / T. Siostrzonek et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 22. 5675. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17225675>.
- Wang X., Blaabjerg F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, no. 3. P. 2858–2870. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2812712>.
- Harmonics consequences on drive systems with induction motor / H. G. Beleiu et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 4. 1528. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041528>.
- Aminu M. Induction motor efficiency estimation under non-sinusoidal supply condition. *Nigeria Journal of Engineering Science and Technology Research*. 2022. Vol. 8, no. 1. P. 9–21.
- Analysis of electric machinery and drive systems / P. C. Krause et al. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013. 659 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118524336>.
- Pulle D. W. J., Damell P., Veltman A. *Applied control of electrical drives*. Cham: Springer International Publishing, 2015. 417 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20043-9>.
- Mathematical model and characteristics of dynamic modes for managing the asynchronous motors at voltage asymmetry / Y. Pazynich et al. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2024. Vol. 27, no. 4. P. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/191779>.
- Mathematical modelling of induction motors taking into account design-parameter asymmetry / P. Kurliak et al. *Energetika*. 2024. Vol. 70, no. 1. P. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.2024.70.1.3>.
- Saleem H. A. Energy consumption reduction in underground mine ventilation system: an integrated approach using mathematical and machine learning models toward sustainable mining. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 3. 1038. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17031038>.
- On-line losses minimization of induction motor vector control / Z. Rouabah et al. *Archives of Electrical Engineering*. 2011. Vol. 60, no. 3. P. 257–268. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10171-011-0024-5>.
- Bose B. K. *Modern power electronics and AC drives*. Prentice Hall PTR, 2001. 736 p.
- Zhang L., Li Y., Zhao X. Mitigation of overvoltages in long cable PWM drives for deep mining applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, No. 4. P. 3724–3732.

References

- J. W. Kolar and T. Friedli, “The essence of three-phase PFC rectifier systems—part I,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 176–198, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2012.2197867>
- H. Al-Khalidi and A. Kalam, “The impact of underground cables on power transmission and distribution networks,” in *2006 IEEE International Power and Energy Conference*, Putra Jaya, Malaysia, Nov. 28–29, 2006. IEEE, 2006, pp. 576–580, doi: <https://doi.org/10.1109/pecon.2006.346717>
- W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 3rd ed. Heidelberg: Springer Berl., 2001, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56649-3>

4. R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001.
5. T. Siostrzonek, J. Wójcik, M. Dutka, and W. Siostrzonek, "Impact of power quality on the efficiency of the mining process," *Energies*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024, Art. no. 5675, doi: <https://doi.org/10.3390/en17225675>
6. X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic stability in power electronic-based power systems: Concept, modeling, and analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2812712>
7. H. G. Beleiu, V. Maier, S. G. Pavel, I. Birou, C. S. Pică, and P. C. Dărab, "Harmonics consequences on drive systems with induction motor," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, Feb. 2020, Art. no. 1528, doi: <https://doi.org/10.3390/app10041528>
8. M. Aminu, "Induction motor efficiency estimation under non-sinusoidal supply condition," *Nigeria Journal of Engineering Science and Technology Research*, vol. 8, no. 1, pp. 9–21, 2022.
9. P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118524336>
10. D. W. J. Pülle, P. Darnell, and A. Veltman, *Applied Control of Electrical Drives*. Cham: Springer Int. Publishing, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20043-9>
11. Y. Pazynich, A. Kolb, A. Korcyl, V. Buketov, and O. Petinova, "Mathematical model and characteristics of dynamic modes for managing the asynchronous motors at voltage asymmetry," *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 39–58, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.33223/epj/191779>
12. P. Kurliak, V. Tytiuk, O. Chorny, V. Kuznetsov, A. Artemenko, and O. Chorna, "Mathematical modelling of induction motors taking into account design-parameter asymmetry," *Energetika*, vol. 70, no. 1, pp. 29–40, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.2024.70.1.3>
13. H. A. Saleem, "Energy consumption reduction in underground mine ventilation system: An integrated approach using mathematical and machine learning models toward sustainable mining," *Sustainability*, vol. 17, no. 3, Jan. 2025, Art. no. 1038, doi: <https://doi.org/10.3390/su17031038>
14. Z. Rouabah, B. Abdelhadi, F. Anayi, and F. Zidani, "On-line losses minimization of induction motor vector control," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 60, no. 3, pp. 257–268, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.2478/v10171-011-0024-5>
15. B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2001.
16. G. Skibinski, D. Leggate, and R. Kerkman, "Cable characteristics and their influence on motor over-voltages," in *APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Atlanta, GA, USA, Feb. 27, 1997. IEEE, 1997, pp. 114–121, doi: <https://doi.org/10.1109/apec.1997.581441>

Надійшла (Received) 29.04.2026

Прийнята (Accepted) 11.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 622.3

DMYTRO DANYLCHENKO ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua.

SERGIY SHEVCHENKO – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua.

TETIANA DIVCHUK – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electrical Machine, National University "Zaporizhzhia Polytechnic"; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-8527>; e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com.

LIUDMYLA SKRUPSKA – Senior Lecturer of the Department of Electrical and Electronic Apparatus, National University "Zaporizhzhia Polytechnic"; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9494-1009>; e-mail: lskrupskaya@gmail.com.

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE POWER SUPPLY OF INDUCTION MOTORS FROM UNDERGROUND SUBSTATIONS

The article considers the influence of cable line parameters on the power supply of induction motors from underground electrical substations. Ensuring reliable starting of induction motors from underground transformer substations is a critical task. The significant remoteness of consumers necessitates the use of long cable lines, which leads to deep voltage drops during direct start. The presence of nonlinear loads in the network that generate higher current and voltage harmonics further worsens energy performance by increasing total electrical and magnetic power losses in motors and transformers, accelerated thermal aging and insulation degradation in conditions of high humidity and aggressive environments, reduced dynamic stability of electric drives, and risks of process disruption. In this study, a comprehensive simulation of the power supply of induction motors from local and central underground electrical substations without and with the presence of higher voltage harmonics was carried out. An analysis of the voltage drop depending on the length and cross-section of the cable cores for the 1140 V network during direct start of an induction motor for capacities of 100–132 kW was performed, and an assessment of the influence of the harmonic composition of the supply voltage on the maximum (maximum) length of the network at which the conditions for normal direct start at the nominal torque of the induction motor are ensured was also performed. It has been established that in the presence of higher harmonics, the starting current increases, and therefore the voltage drop increases by an additional 4–6 %, which requires a forced reduction in the calculated network length by 15–20 %. It has been proven that to overcome these limitations, when powering an induction motor at distances of more than 1 km from an underground substation, it is necessary to abandon direct starting in favor of using soft starting devices (thyristor voltage regulators) or local vector frequency control systems.

Keywords: underground transformer substation; underground electrical network; electromagnetic process modeling; induction motor; power losses; mining electric drives; energy efficiency.