

ДІАГНОСТИКА СТАРТЕРА НА ОСНОВІ ПОРІВНЯННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ НА СТЕНДІ

Орищенко С., канд. техн. наук,

<https://orcid.org/0000-0002-5359-5285>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

У статті запропоновано підхід до діагностики автомобільного стартера на основі зіставлення результатів математичного моделювання з експериментальними даними, отриманими на діагностичному стенді ASG-019. Розроблено спрощену математичну модель пускового режиму, що описує часові залежності напруги живлення, струму якоря, електромагнітного моменту та прискорення обертання вала. Модель реалізовано у вигляді програмного засобу з графічним інтерфейсом для візуалізації перехідних процесів.

Мета дослідження – побудова інформативної математичної моделі пускового режиму стартера та аналіз електромеханічних процесів у перехідному режимі з можливістю порівняння теоретичних і експериментальних характеристик.

Методи. Застосовано методи математичного й комп'ютерного моделювання з використанням чисельної обробки сигналів. Реалізацію виконано мовою Python із застосуванням бібліотек NumPy, Matplotlib та інтерфейсу Tkinter. Адекватність моделі оцінювалася шляхом якісного порівняння з експериментальними даними стенда ASG-019.

Результати. Отримано часові залежності напруги живлення, струму якоря, електромагнітного моменту та прискорення обертання вала, які відображають основні етапи пускового процесу: початковий струмовий пік, перехідне падіння напруги та подальший динамічний розгін електродвигуна. Побудовані теоретичні характеристики забезпечують можливість оцінювання впливу параметрів електричного кола й механічного навантаження на форму пускових кривих. Порівняльний аналіз з експериментальними даними стенда ASG-019 показав якісну узгодженість форми та часової структури сигналів, а також відтворення характерних тенденцій зміни струму й напруги в перехідному режимі.

Висновки. Запропонована математична та комп'ютерна модель адекватно відображає загальний характер електромеханічних процесів пуску автомобільного стартера. Виявлені кількісні розбіжності між теоретичними й експериментальними характеристиками пояснюються прийнятими спрощеннями, зокрема неврахуванням індуктивних параметрів, механічних втрат, дії тягового реле та реальних характеристик акумуляторної батареї. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого підходу для діагностики технічного стану стартера та створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення моделі з метою підвищення точності оцінювання пускових характеристик.

Ключові слова: діагностика стартера, пусковий режим, моделювання електромеханічних процесів, струм якоря, прискорення обертання, стенд ASG-019.



Вступ. Автомобільний стартер є критичним елементом системи пуску, надійність якого безпосередньо визначає експлуатаційну готовність транспортного засобу. У сучасних умовах вимоги до електромеханічних характеристик стартерів зазнали кардинальних змін. Масове впровадження екологічних технологій, зокрема систем «Start-Stop», призвело до багаторазового збільшення кількості циклів пуску – з традиційних 30-50 тисяч до 250-300 тисяч за життєвий цикл автомобіля. Такі умови експлуатації спричиняють прискорене накопичення втомних пошкоджень і знос компонентів, що вимагає переходу до нових, більш досконалих методів технічної діагностики [Ковальчук & Мельник, 2021].

Пусковий режим стартера характеризується значними електромеханічними навантаженнями, що призводить до інтенсивного зношування його елементів та ускладнює діагностику несправностей за статичними параметрами [Пархоменко & Савченко, 2020; Міщенко & Семенюк, 2020; Gao & Chen, 2022; Abdel et al., 2024].

Сучасні діагностичні стенди, зокрема ASG-019 дають змогу реєструвати часові залежності напруги, струму та інших параметрів під час вмикання стартера [ASG, 2022; Кравченко, 2023; Мельник, 2023; Ковальчук & Мельник, 2021], однак інтерпретація отриманих даних потребує теоретичного обґрунтування. У зв'язку з цим актуальним є застосування математичного та комп'ютерного моделювання для аналізу перехідних процесів і пояснення форми пускових характеристик [Шевченко & Костюк, 2020; Krasheninnikov et al., 2020; Singh & Verma, 2023; Abdel et al., 2024].

Зокрема у роботах, присвячених стартер-генераторним системам, розглядаються особливості реалізації та аналізу стартерного режиму вентильно-індукторних машин, що підтверджує доцільність урахування перехідних процесів у моделях пуску [Мазуренко та ін., 2020а; Мазуренко та ін., 2020б]. Окрім того, дослідження якості електроенергії та перехідних режимів автономних електромеханічних

систем демонструють вплив динамічних процесів на параметри напруги й струму, що є важливим для коректної діагностики стартерів за часовими залежностями [Шишненко & Мазуренко, 2019].

Постановка завдань. Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі діагностики та моделювання електромеханічних систем автомобільних стартерів підтверджує доцільність використання математичних моделей для дослідження перехідних процесів у пускових режимах [Міщенко & Семенюк, 2020; Пархоменко & Савченко, 2020; Шевченко & Костюк, 2020]. Значну увагу в роботах приділено питанням формування та інтерпретації пускових характеристик на основі експериментальних вимірювань і комп'ютерного моделювання [Krasheninnikov et al., 2020; Gao & Chen, 2022; Singh & Verma, 2023]. Окремі дослідження спрямовані на підвищення точності діагностики стартерів шляхом зіставлення результатів моделювання з даними сучасних випробувальних стендів [Bosch, 2023; Wang & Liu, 2022; Nowak & Kowalski, 2022; Кравченко, 2023].

Метою цієї роботи є розроблення математичної та комп'ютерної моделі процесу пуску автомобільного стартера, яка дає змогу аналізувати динамічні зміни напруги, струму якоря, електромагнітного моменту та прискорення обертання вала, а також порівнювати результати моделювання з експериментальними даними, отриманими на діагностичному стенді ASG-019.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати електромеханічні процеси, що відбуваються під час пуску автомобільного стартера, та визначити основні пускові характеристики; розробити математичну модель пускового режиму стартера, що описує часові залежності напруги живлення, струму якоря, електромагнітного моменту та прискорення обертання вала; реалізувати розроблену модель у вигляді програмного засобу для візуалізації результатів моделювання; отримати теоретичні пускові характеристики

ки та здійснити їхнє якісне порівняння з експериментальними даними, отриманими на діагностичному стенді ASG-019; проаналізувати розбіжності між результатами моделювання та експерименту й визначити напрями подальшого вдосконалення моделі з метою підвищення точності діагностики стартера.

Методи і матеріали. У дослідженні використано методи математичного та комп'ютерного моделювання електромеханічних перехідних процесів пуску автомобільного стартера. Реалізацію моделі виконано мовою програмування Python із застосуванням бібліотек NumPy та Matplotlib, а також графічного інтерфейсу Tkinter для візуалізації результатів. Експериментальні дані для порівняння отримано на діагностичному стенді ASG-019, який забезпечує реєстрацію напруги, струму та прискорення під час пуску стартера.

Результати. Процес пуску автомобільного стартера належить до складних електромеханічних перехідних процесів, у яких одночасно відбуваються швидкі зміни електричних і механічних параметрів. Саме ці процеси визначають як надійність запуску двигуна внутрішнього згорання, так і технічний стан елементів пускової системи. У момент увімкнення стартера спостерігається різка зміна напруги живлення, струму якоря, електромагнітного моменту та швидкості обертання вала, що супроводжується значними навантаженнями на електричні й механічні вузли.

Аналіз часових залежностей зазначених величин є ефективним інструментом діагностики, оскільки форма пускових характеристик безпосередньо пов'язана зі станом обмоток якоря, контактів, щіткового вузла, механізму приводу та акумуляторної батареї. У зв'язку з цим застосування математичного та комп'ютерного моделювання дає змогу не лише пояснити характер експериментальних осцилограм, але й виділити діагностично значущі ознаки пускового процесу.

Пусковий процес стартера у роботі розглядається у часовій області на інтервалі:

$$t \in [0, t_{end}], \quad t_{end} = 0,35c.$$

Вибір тривалості інтервалу зумовлений експериментальними даними стенда ASG-019 і відповідає реальній тривалості пуску стартера. Для чисельної реалізації модель дискретизується з використанням рівномірної часової сітки з кількістю відліків

$$N = 1000, \quad (2)$$

а моменти часу визначаються співвідношенням:

$$t_i = \frac{i}{N-1} t_{end}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

З метою зручності аналізу та порівняння з експериментальними осцилограмами часову шкалу при побудові графіків подають у мілісекундах:

$$t_{ms} = 1000t. \quad (4)$$

Номинальний струм стартера визначається через задані значення напруги живлення U та потужності P :

$$I_{nom} = \frac{P}{U} \quad (5)$$

Пусковий струм приймається пропорційним номінальному:

$$I_{peak} = K_{start} I_{nom} \quad (6)$$

де K_{start} - коефіцієнт пускового струму. Усталене значення струму після завершення перехідного процесу визначається як:

$$I_{final} = 1,5 I_{nom} \quad (7)$$

Часова форма струму якоря моделюється експоненціальною функцією з максимумом у момент t_{peak}

Запропонована залежність дає змогу якісно відтворити характерний пусковий пік і подальше зменшення струму в процесі розгону.

Значна величина струму в пусковому режимі призводить до падіння напруги на внутрішньому опорі електричного кола. Внутрішній опір визначається з умови заданого мінімального значення напруги:

$$R_{int} = \frac{U - U_{min}}{I_{peak}} \quad (8)$$

Миттєве значення напруги на затискачах стартера обчислюється за законом Ома:

$$U(t) = U - R_{int}I_a(t) \quad (9)$$

Форма напругової кривої є важливим діагностичним параметром, що характеризує стан джерела живлення та силових ланцюгів.

Електромагнітний момент стартера визначає здатність пускової системи забезпечити обертання двигуна. У моделі момент описується згладженою функцією з пусковим максимумом:

$$M(t) = 0,7I_{peak} \frac{t}{\tau_m} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_m}\right) + 0,3I_{final} \quad (10)$$

Такий підхід дає змогу відтворити характерну форму моментної характеристики у пусковому режимі.

Зміна швидкості обертання вала стартера моделюється логістичною функцією:

$$n(t) = \frac{n_{max}}{1 + \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \quad (11)$$

Прискорення визначається як похідна швидкості за часом:

$$a(t) = \frac{dn(t)}{dt} \quad (12)$$

Аналіз кривої прискорення дає змогу

```
# ----- МОДЕЛЬ СТАРТЕРА -----
def simulate_starter(U, P):
    """
    U - напруга живлення, В
    P - потужність стартера, Вт (приблизно механічна на валу)
    Повертає часові ряди для побудови графіка.
    """

    # Основні параметри моделі (можна підганяти під реальний стартер)
    K_START = 6.0 # у скільки разів пусковий струм більше від "номінального"
    t_end = 0.35 # тривалість процесу, с (*350 мс)
    n_points = 1000 # кількість точок

    # Теоретичні "номінальні" значення струму
    I_nom = P / U # умовний номінальний струм
    I_peak = K_START * I_nom # пусковий пік
    I_final = 1.5 * I_nom # усталений струм наприкінці

    # Підберемо внутрішній опір так, щоб при піку було ~9 В
    U_min_target = 9.0
    R_int = max((U - U_min_target) / max(I_peak, 1e-3), 1e-4)

    # Часова шкала
    t = np.linspace(0, t_end, n_points)
    t_ms = t * 1000 # в мілісекундах

    # Струм якоря: різкий пік і вихід на усталене значення
    t_peak = 0.06 # час піку струму, с
    shape = (t / t_peak) * np.exp(1 - t / t_peak) # 0 - пік - спад
    shape[t == 0] = 0
    I_arm = I_final + (I_peak - I_final) * shape # А

    # "Струм мотора / момент" (зелена крива)
    shape_m = (t / 0.045) * np.exp(1 - t / 0.045)
    shape_m[t == 0] = 0
    I_motor = 0.7 * I_peak * shape_m + 0.3 * I_final # умовний момент/струм, А

    # Напруга: падіння при піку струму і відновлення
    U_inst = U - R_int * I_arm
    U_inst = np.clip(U_inst, 0, U)

    # Швидкість і прискорення мотора (сіма крива)
    n_max = 4000.0
    t0 = 0.08
    tau = 0.04
    n = n_max / (1 + np.exp(-(t - t0) / tau)) # логістична крива
    acc = np.gradient(n, t) # "умовне" прискорення

    return t_ms, U_inst, I_arm, I_motor, acc
```

Рисунок 1 – Програмний код моделі стартеру

виявити механічні несправності, пов'язані з підвищеним тертям або заїданням механізмів.

Наведені залежності реалізовані у вигляді програмного засобу з графічним інтерфейсом, фрагмент коду якого наведено на рисунку 1.

Результати моделювання представлені у вигляді осцилограм напруги, струму, моменту та прискорення (рис. 2).

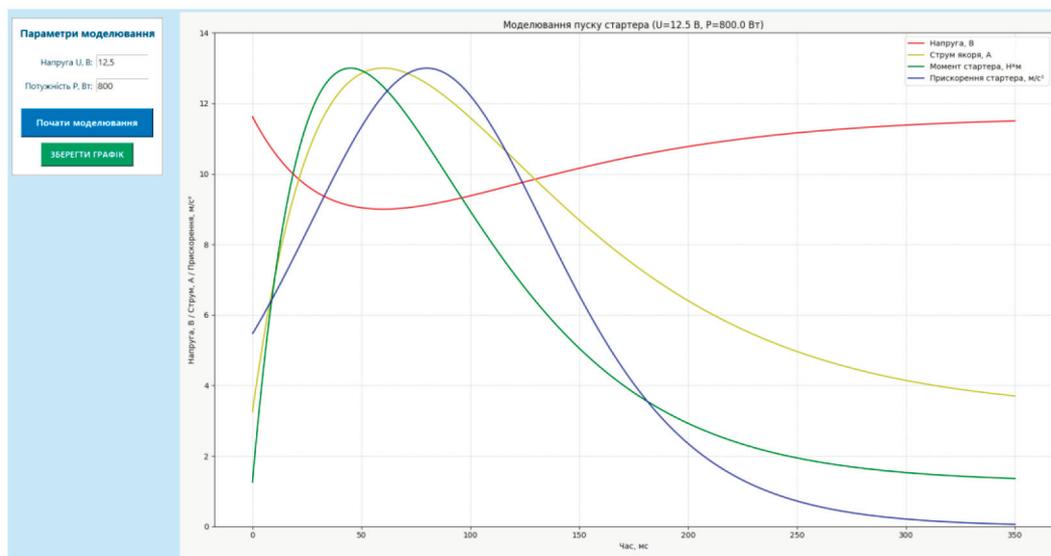


Рисунок 2 – Графічне представлення характеристик стартеру

Для експериментальної перевірки адекватності результатів моделювання використано діагностичний стенд ASG-019, що забезпечує реєстрацію часових залежностей напруги, струму та прискорення під час пуску стартера; загальний вигляд стартера на стенді наведено на фотографії (рис. 3) [ASG, 2022], а експериментальні осцилограми пускового процесу – на рисунку 4.

Аналіз експериментальних даних і результатів моделювання дає змогу виділити декілька характерних фаз пуску стартера.

У першій фазі відбувається подача напруги та спрацювання тягового реле. Якір стартера перебуває у нерухомому стані, протидіюча електрорушійна сила відсутня, що призводить до різкого зростання струму та значного падіння напруги на затискачах стартера. Глибина цього падіння є важливою ознакою стану акумуляторної батареї та контактних з'єднань.

Друга фаза характеризується формуванням максимального пускового струму та електромагнітного моменту, необхідного для подолання статичного моменту опору двигуна. Саме на цьому етапі створюються найбільші електричні й механічні навантаження на стартер.

У третій фазі відбувається розгін стартера та двигуна. Зі зростанням швидкості обертання збільшується протидіюча електрорушійна сила, що призводить до зменшення струму якоря та поступового відновлення напруги.

Четверта фаза відповідає переходу до квазіусталеного режиму або завершенню пуску. У цій фазі параметри змінюються повільно, а подальший перебіг процесу залежить від результату запуску двигуна.

Порівняння результатів моделювання з



Рисунок 3 – Загальний вигляд стартера на стенді

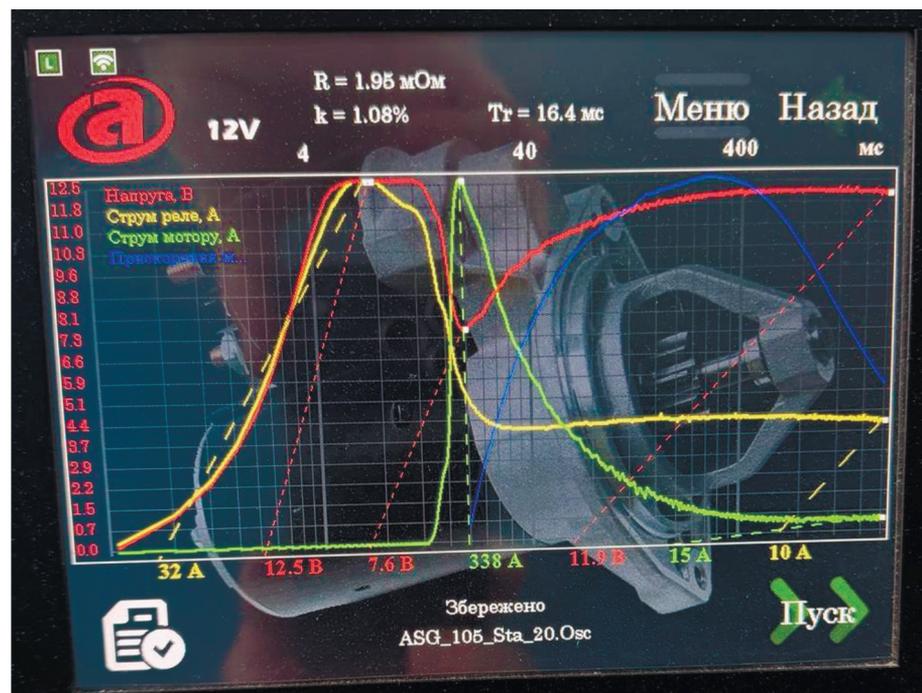


Рисунок 4 – Результати експериментальних досліджень

експериментальними даними показало подібність загального характеру фаз пускового процесу. Незважаючи на кількісні розбіжності, зумовлені спрощеннями моделі та неврахуванням індуктивностей і детальної динаміки тягового реле, модель дозволяє відтворити основні закономірності пу-

скового режиму та може бути використана для якісної діагностики стартера.

Обговорення. Отримані в ході дослідження результати підтверджують перспективність застосування математичного моделювання як еталонного інструменту для діагностики стартерів, водночас виявляючи критичні розбіжності, які потребують детального фізичного аналізу.

Порівняльний аналіз показав високу кореляцію форми модельованих кривих з експериментальними даними, отриманими на стенді ASG-019. Збіг часової послідовності ключових подій (пік струму \rightarrow падіння напруги \rightarrow стабілізація обертів) свідчить про те, що розроблена математична модель коректно описує фундаментальні закони електромеханічного перетворення енергії в двигуні постійного струму. Це підтверджує можливість використання спрощених моделей для розпізнавання патернів роботи стартера (Pattern Recognition) в умовах автосервісу, що є основою сучасної методології Model-Based Diagnosis.

Особливого значення набуває аналіз кривої кутового прискорення ($a(t)$). Експериментальні дані підтверджують, що динаміка зміни швидкості є більш чутливим індикатором механічного стану вузла, ніж усталена швидкість обертання. Це узгоджується з дослідженнями в галузі діагностики обертових машин, де саме флуктуації прискорення використовуються для раннього виявлення дефектів підшипників і зубчастих передач.

Найсуттєвішою відмінністю між моделлю та експериментом є характер наростання струму в початковий момент пуску ($0 < t < 0.05$ с). Теоретична модель демонструє майже миттєве досягнення пікового струму, водночас експериментальна крива має скінченний час наростання. Ця розбіжність пояснюється навмисним спрощенням моделі – нехтуванням індуктивністю якоря (L_a). Окрім того, на точність моделі впливає відсутність блоку, що описує динаміку втягувального реле (соленоїда). Затримка на механічне переміщення сердечника соленоїда та зами-

кання силових контактів створює часовий зсув у реальний процес, який не враховується поточною версією програми.

Порівняно з традиційними статичними методами [Орищенко, 2025], запропонований підхід надає значно більше інформації про стан об'єкта. Статичні тести ігнорують перехідні процеси, в яких проявляються до 80% експлуатаційних навантажень стартера, особливо в системах «Start-Stop», де кількість циклів запуску істотно зростає.

Виявлена в роботі різниця між «ідеальним» (модельним) і реальним струмом може слугувати кількісним критерієм зносу щіткового вузла або погіршення стану контактних з'єднань, що неможливо визначити простим вимірюванням опору.

Слід визнати, що поточна модель базується на припущенні ідеальності джерела живлення (постійна напруга АКБ без внутрішнього опору та хімічних перехідних процесів). У реальній експлуатації стан акумулятора (SOH – State of Health) суттєво впливає на форму пускової кривої, що підтверджує необхідність врахування додаткових енергетичних та електродинамічних факторів у моделі. Подальший розвиток дослідження має бути спрямований на введення в систему диференціальних рівнянь параметра індуктивності L та інтеграцію моделі свинцево-кислотної батареї. Це дасть змогу мінімізувати помилку моделювання та створити повноцінний програмний модуль для автоматизованого дефектування стартерів на стенді ASG-019, що узгоджується із сучасними підходами підвищення ефективності регулювання та керування енергетичними установками й джерелами живлення [Arhun et al., 2024], а також із тенденціями застосування автоматизованих систем контролю стану обладнання та діагностичних алгоритмів.

Висновки. У роботі розроблено й реалізовано математичну і комп'ютерну модель процесу пуску автомобільного стартера, яка дає змогу аналізувати динамічні зміни напруги, струму якоря, електромагнітного моменту та прискорення обертання вала. Порівняння результатів моделюван-

ня з експериментальними даними стенда ASG-019 показало якісну відповідність форми пускових характеристик, а виявлені кількісні розбіжності зумовлені прийнятими спрощеннями моделі. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого підходу для аналізу та діагностики пускових процесів стартера і створюють основу для подальшого вдосконалення моделі.

Перелік посилань

- Ковальчук, В. І., & Мельник, В. М. (2021). Діагностика електрообладнання автомобілів за часовими характеристиками сигналів. *Вісник НТУ*, 1, 88–94.
- Кравченко, В. П. (2023). Оцінювання технічного стану стартера за струмовими осцилограмами. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2, 29–35.
- Мазуренко, Л. І., Джура, О. В., Шишненко, М. О., & Білик, О. А. (2020). Технічна реалізація та дослідження експериментального зразка вентильно-індукторного стартер-генератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 55, 72–79. <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.072>
- Мазуренко, Л. І., Шишненко, М. О., Джура, О. В., & Білик, О. А. (2020). Дослідження стартерного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії, 3(1357), 97–100. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.16>
- Мельник, В. М. (2023). Стендова діагностика стартерів автомобілів за перехідними процесами. *Наукові праці НТУ*, 2, 55–61.
- Міщенко, О. Г., & Семенюк, О. В. (2020). Електромеханічні процеси пуску двигуна автомобіля. *Вісник НАУ*, 2, 112–118.
- Пархоменко, О. О., & Савченко, І. М. (2020). Аналіз пускових характеристик автомобільних стартерів у перехідному режимі. *Автомобільний транспорт*, 46, 52–58.
- Шевченко, В. М., & Костюк, О. П. (2020). Математичне моделювання перехідних процесів в електромеханічних системах. *Вісник ХНТУСГ*, 205, 134–140.
- Шишненко, М. О., & Мазуренко, Л. І. (2019). Перехідні процеси та якість електроенергії автономного вентильно-індукторного генератора. *Електромеханіка і енергозберігаючі системи*, 1(45), 57–63. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>
- Abdel Menaem, A., Berjozkina, S., & Sarfaraliev, M. (2024). Intelligent current-speed soft-starting controller for an induction motor drive system. *Journal of Energy Systems*, 8(4). <https://doi.org/10.30521/jes.1533403>
- Arhun, S., Bogaevskiy, A., Hnatov, A., & Kunicina, N. (2024). Improving the efficiency of frequency regulation for high-power diesel generators. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100785.
- ASG. (2022). ASG-019. Diagnostic bench for starters and generators: Technical description and measurement principles. Manufacturer documentation. <https://autonica.biz>
- Bosch, R. (2023). Starter motors and starting systems: Diagnostics and testing approaches (SAE Technical Paper No. 1800 108 1081). SAE International. https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/in/parts_11/starter_and_alternator/bosch-starters-alternators-catalogue.pdf
- Gao, L., & Chen, Z. (2022). Modeling of electromechanical transient processes in automotive DC motors. *Energies*, 15(11), Article 4021.
- Krashennikov, V., et al. (2020). Transient analysis of DC motor starting processes for automotive applications. *Energies*, 13(18), Article 4756. <https://doi.org/10.3390/en13184756>
- Nowak, M., & Kowalski, C. (2022). Diagnostic methods for automotive starter systems based on current signal analysis. *Measurement*, 187, Article 110307.
- Oryshchenko, S., & Oryshchenko, V. (2025). Machine Diagnostics in Mechatronic Systems: Analysis Methods and Intelligent Technologies. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(64), 136–142. <https://doi.org/10.26906/>

znp.2025.64.4146

Singh, A., & Verma, R. (2023). Modeling and analysis of electric starter motor for automotive applications. *International Journal of Automotive Technology*, 24(2), 345–353.

Wang, H., & Liu, Y. (2022). Experimental and simulation study of starter motor performance under load. *Journal of Electrical Engineering*, 73(4), 245–252.

References

Abdel Menaem, A., Berjozkina, S., & Sarfaraliev, M. (2024). Intelligent current-speed soft-starting controller for an induction motor drive system. *Journal of Energy Systems*, 8(4). <https://doi.org/10.30521/jes.1533403>

Arhun, S., Bogaevskiy, A., Hnatov, A., & Kunicina, N. (2024). Improving the efficiency of frequency regulation for high-power diesel generators. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100785.

ASG. (2022). ASG-019. Diagnostic bench for starters and generators: Technical description and measurement principles (Manufacturer documentation). <https://autonica.biz>

Bosch, R. (2023). Starter motors and starting systems: Diagnostics and testing approaches (SAE Technical Paper No. 1800 108 1081). SAE International. https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/in/parts_11/starter_and_alternator/bosch-starters-alternators-catalogue.pdf

Gao, L., & Chen, Z. (2022). Modeling of electromechanical transient processes in automotive DC motors. *Energies*, 15(11), 4021.

Kovalchuk, V. I., & Melnyk, V. M. (2021). Diagnostics of automotive electrical equipment based on time-domain signal characteristics. *Bulletin of NTU*, (1), 88–94.

Krashennnikov, V., et al. (2020). Transient analysis of DC motor starting processes for automotive applications. *Energies*, 13(18), 4756. <https://doi.org/10.3390/en13184756>

Kravchenko, V. P. (2023). Assessment of starter technical condition using current oscillograms. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, (2), 29–35.

Mazurenko, L. I., Dzhura, O. V., Shysh-

nenko, M. O., & Bilyk, O. A. (2020). Technical implementation and study of an experimental switched-reluctance starter-generator prototype. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (55), 72–79. <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.072>

Mazurenko, L. I., Shyshnenko, M. O., Dzhura, O. V., & Bilyk, O. A. (2020). Investigation of starter operating mode of a switched-reluctance starter-generator. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 3(1357), 97–100. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.16>

Melnyk, V. M. (2023). Bench diagnostics of automotive starters based on transient processes. *Scientific Works of NTU*, (2), 55–61.

Mishchenko, O. H., & Semeniuk, O. V. (2020). Electromechanical processes of automotive engine start-up. *Bulletin of the National Aviation University*, (2), 112–118.

Nowak, M., & Kowalski, C. (2022). Diagnostic methods for automotive starter systems based on current signal analysis. *Measurement*, 187, 110307.

Oryshchenko, S., & Oryshchenko, V. (2025). Machine diagnostics in mechatronic systems: Analysis methods and intelligent technologies. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(64), 136–142. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4146>

Parkhomenko, O. O., & Savchenko, I. M. (2020). Analysis of starting characteristics of automotive starters in transient mode. *Automobile Transport*, (46), 52–58.

Shevchenko, V. M., & Kostiuk, O. P. (2020). Mathematical modeling of transient processes in electromechanical systems. *Bulletin of KhNTUSG*, (205), 134–140.

Shyshnenko, M. O., & Mazurenko, L. I. (2019). Transients and power quality of an autonomous switched-reluctance generator. *Electromechanics and Energy Saving Systems*, 1(45), 57–63. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>

Singh, A., & Verma, R. (2023). Modeling and analysis of electric starter motor for automotive applications. *International Journal of Automotive Technology*, 24(2), 345–353.

Wang, H., & Liu, Y. (2022). Experimental and simulation study of starter motor performance under load. *Journal of Electrical Engineering*, 73(4), 245–252.

Надійшла до редакції 07.10.2025 р.;
переглянуто 04.11.2025 р.;
прийнято до друку 01.12.2025 р.;
опубліковано 29.12.2025 р.
Received October 07, 2025;
revised November 04, 2025;
accepted December 01, 2025;
published December 29, 2025

UDC 681.5

DIAGNOSTICS OF AN AUTOMOTIVE STARTER BASED ON COMPARISON OF THEORETICAL MODELS WITH EXPERIMENTAL RESULTS OBTAINED ON A TEST BENCH

Oryshenko S., Ph.D of Technical Sc.,
<https://orcid.org/0000-0002-5359-5285>
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Summary

This paper proposes an approach to automotive starter diagnostics based on comparing the results of mathematical modelling with experimental data obtained on the ASG-019 diagnostic test bench. A simplified mathematical model of the starting mode is developed, describing the time dependences of the supply voltage, armature current, electromagnetic torque, and shaft angular acceleration. The model is implemented as a software tool with a graphical interface for visualising transient processes.

The purpose of the study is to develop an informative mathematical model of the starter starting mode and to analyse electromechanical processes under transient conditions with the possibility of comparing theoretical and experimental characteristics.

Methods of mathematical and computer modelling using numerical signal processing are applied. The implementation is carried out in Python using the NumPy and Matplotlib libraries and the Tkinter interface. The model adequacy is evaluated by qualitative comparison with experimental data obtained on the ASG-019 test bench.

Results. Time dependences of the supply voltage, armature current, electromagnetic torque, and shaft angular acceleration are obtained, reflecting the main stages of the starting process, including the initial current peak, transient voltage drop, and subsequent dynamic acceleration of the electric motor. The theoretical characteristics enable assessment of the influence of electrical circuit parameters and mechanical load on the shape of the starting curves. Comparative analysis with experimental data from the ASG-019 bench demonstrates qualitative agreement in the shape and time structure of the signals, as well as reproduction of the main trends of current and voltage variation under transient conditions.

Conclusions. The proposed mathematical and computer model adequately represents the general nature of the electromechanical processes during automotive starter starting. The observed quantitative discrepancies between theoretical and experimental characteristics are explained by the adopted simplifications, in particular neglecting inductive parameters, mechanical losses, the effect of the solenoid relay, and the actual characteristics of the battery. The results confirm the feasibility of the proposed approach for diagnosing the technical condition of the starter and provide a basis for further refinement of the model to improve the accuracy of starting characteristic evaluation.

Keywords: starter diagnostics, starting mode, electromechanical process modelling, armature current, angular acceleration, ASG-019 test bench.