

УДК 621.313:517.91

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В SIMPOWERSYSTEMS ІЗ КЛЮЧОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

О. П. Чорний

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: apch@kdu.edu.ua

В. К. Титюк

Криворізький національний технічний університет
вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна.

Розглядається питання дослідження режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами шляхом їх моделювання за допомогою бібліотек SimPowerSystems середовища Simulink математичного пакету Matlab. Зроблено акцент на особливостях математичних моделей з урахуванням перетворювачів енергії, що містять ключові елементи, методів чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь моделей при їх дослідженні. Показано кількісні й якісні відмінності в рішеннях, які виникають при необгрунтованому виборі чисельного методу та його параметрів, а також при врахуванні в моделях нелінійностей і реальних параметрів енергії на виході перетворювачів. Проаналізовано похибки, що можуть виникнути в рішеннях при застосуванні універсальних математичних пакетів для моделювання. Наведено результати моделювання.

Ключові слова: електроприводи з асинхронними двигунами, математичні моделі, ключові елементи.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В SIMPOWERSYSTEMS С КЛЮЧЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А. П. Черный

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: apch@kdu.edu.ua

В. К. Тытюк

Криворожский национальный технический университет
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина.

Рассматривается вопрос исследования режимов работы электроприводов с асинхронными двигателями путем их моделирования с использованием библиотек SimPowerSystems приложения Simulink математического пакета Matlab. Сделан акцент на особенностях математических моделей с учетом преобразователей энергии, содержащих ключевые элементы, и методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений моделей при их исследовании. Показаны количественные и качественные различия в решениях, возникающих при необоснованном выборе численного метода и его параметров, а также при учете в моделях нелинейностей и реальных параметров энергии на выходе преобразователей. Проанализированы погрешности, которые могут возникнуть в решениях. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: электроприводы с асинхронными двигателями, математические модели, ключевые элементы.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Математичне моделювання електроприводів з перетворювальними пристроями на базі ключових елементів пов'язано зі значними складнощами вже на етапі формування математичної моделі, що зумовлено неоднозначністю станів ключових елементів та їх суттєво нелінійними властивостями. Тому в сучасних універсальних програмах, призначених для моделювання електромеханічних систем, використовується SPICE-моделювання систем.

Метод моделювання електронних схем SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) розроблено в Каліфорнійському Університеті [1]. У даний час SPICE де-факто стала еталонною програмою моделювання аналогових електронних кіл.

Перша версія SPICE була розроблена в середині 70-х років XX-го століття. Вона дозволяла аналізувати лінійні й нелінійні ланцюги в тимчасовій обла-

сті, розраховувати частотні характеристики лінійних ланцюгів; для аналізу лінійних резистивних ланцюгів використовувався метод вузлових напруг. Бібліотека моделей включала моделі діода й біполярного транзистора (модель Еберса-Молла).

З плином часу програма вдосконалювалася, з'явилися нові версії, розширювався перелік моделей компонентів. У кінці 70-х років SPICE стала широко використовуватися в промисловості для моделювання електронних схем.

1983 року з'явилася версія SPICE2G.6, розроблена в Каліфорнійському університеті (Берклі). Це була остання версія, написана мовою FORTRAN. Математичний модуль піддався суттєвій переробці. Для аналізу лінійних кіл у версії 2G.6 використовувався модифікований метод вузлових напруг. При розрахунку динамічних ланцюгів використовувалися алгоритми з автоматичним вибором кроку інтег-

рування. Були перероблені моделі біполярних і МОП-транзисторів. Модель біполярного транзистора у версії SPICE2G.6 заснована на рівняннях Гуммеля–Пуна [2].

Пік досліджень з розробки алгоритмів комп'ютерного аналізу електронних схем припав на 70–80 роки. Підсумком цих досліджень є сучасні програми моделювання електронних кіл: PSpice, Micro-CAP, Multisim, CircuitMaker та ін. Більшість з них є модифікацією програми схемотехнічного моделювання SPICE, розробленої в середині 70-х років. Ця програма, створена в епоху IBM 360, де-факто стала еталонною програмою аналізу аналогових пристроїв. Моделі електронних компонентів, розроблені для SPICE, використовуються в більшості інших програм.

Саме на таких технологіях засновано роботу бібліотеки SimPower Systems програми Simulink, за допомогою якої можна складати, а потім і моделювати електромеханічні системи довільної складності, замінивши етап розробки математичної моделі електропривода на візуальне конструювання його силових частини та розробку системи керування ключовими елементами [3].

За допомогою спеціалізованої бібліотеки електромеханічних компонентів SimPowerSystems відносно нескладно перейти до дослідження імітаційної моделі регульованих асинхронних електроприводів. Тут під терміном «імітаційна модель» будемо розуміти таку модель у середовищі Simulink, у якій всі елементи силових кіл, у тому числі напівпровідникові та електромеханічні перетворювачі, створено з елементів бібліотеки SimPowerSystems.

Ця бібліотека містить моделі окремих напівпровідникових силових ключів: тиристорів, діодів, IGBT та МОП-транзисторів, готових багатофазних перетворювачів на базі цих елементів, що дозволяє створювати схеми перетворювальних пристроїв довільної складності.

Такий підхід значно підвищує наочність математичної моделі, підвищує її педагогічну цінність,

але й накладає певні обмеження на процеси розрахунків математичної моделі. Цей підхід є досить універсальним з точки зору підходу до розробки моделі електропривода, але він вимагає від дослідника дуже обережного підходу до вибору чисельних методів, що використовуються для розрахунків, та критичного підходу до перевірки адекватності отримуваних результатів. Тому автори ставлять за мету вирішення актуальної задачі обґрунтованого вибору чисельного метода інтегрування систем диференціальних рівнянь синтезованих моделей, розуміння природи виникнення похибок, які можуть виникнути в рішеннях при застосуванні універсальних математичних пакетів для моделювання, що дозволить уникнути помилкових рішень у курсовому й дипломному проектуванні, дослідженнях магістрантів і аспірантів та навіть у науково-дослідній роботі.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Розглянемо низку розроблених авторами віртуальних математичних моделей основних систем асинхронних електроприводів та результати їх обчислень у середовищі Simulink програми Matlab.

Модель асинхронного частотно-керованого електропривода

На рис. 1 наведено розроблену модель частотно-керованого асинхронного електропривода з автономним інвертором напруги.

У зв'язку з великою складністю моделі, що містить значну кількість ключових елементів, на можливі методи вирішення рівнянь такої моделі накладаються певні обмеження, які ми й обговоримо нижче.

При створенні моделі з використанням бібліотеки SimPowerSystems необхідно використовувати блок *Powergui*. Блок *Powergui* необхідний для моделювання будь-якої моделі Simulink, що містить SimPowerSystems блоки. Він використовується для зберігання еквівалентної схеми Simulink, яка надає рівняння моделі в просторі станів.

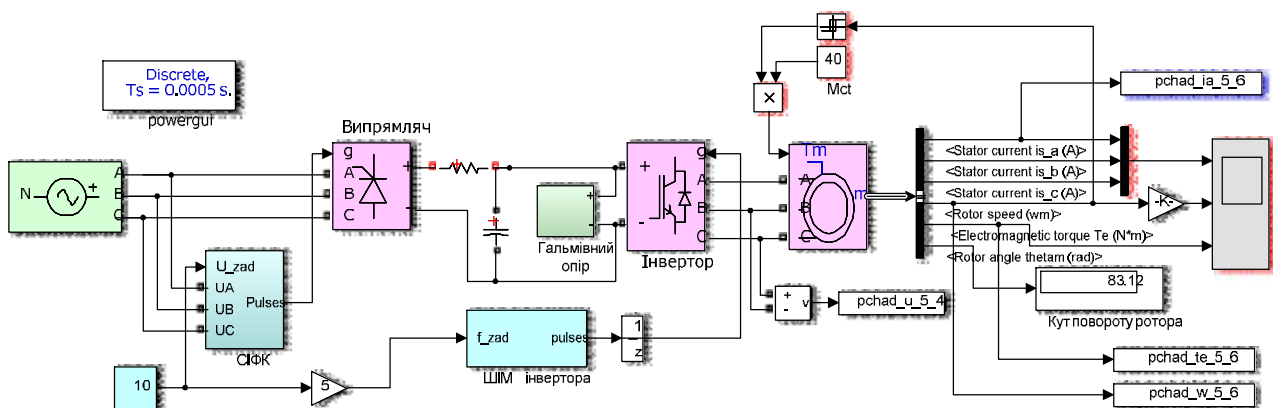


Рисунок 1 – Модель електропривода ПЧ–АД

Блок *Powergui* дозволяє вибрати один з наступних режимів для вирішення рівнянь моделі:

- безперервний, який використовує стандартний вирішувач зі змінним кроком інтегрування від Simulink;
- безперервний, з ідеальними ключовими елементами;
- дискретний режим розрахунку електричної

системи для вирішення з фіксованим за часом кроком.

Були протестовані режими моделювання та методи інтегрування, отримані результати відображено у табл. 1.

На рис. 2–9 наведено графіки перехідних режимів електропривода ПЧ–АД, отримані при використанні різних інтервалів дискретизації T_s .

Таблиця 1 – Зведені дані про розрахунки віртуальної моделі ПЧ–АД з використанням бібліотеки SimPowerSystems

Режим розрахунку: Continuous (Безперервний)	
Метод інтегрування	Результат моделювання
Ode45 (Dormand-Prince)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні 10^{-11} с. Час роботи моделі недопустимо великий.
Ode23tb (stiff/TR-BDF2), solver reset method – robust	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні $2 \cdot 10^{-9}$ с. Час роботи моделі все одно недопустимо великий.
Ode113 (Adams)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні $2 \cdot 10^{-7}$ с. Час роботи моделі все одно недопустимо великий.
Ode5 (Dormand-Prince) а також усі інші методи з постійним кроком інтегрування	Вирішення рівнянь моделі аварійно переривається з наступним діагностичним повідомленням: Derivative input – 8 of 'PCH_AD_Demo/Інвертор/Model/ continuous IGBT/Tail/Integrator' at time 0,0002715 is Inf or NaN. Stopping simulation. There may be a singularity in the solution. If not, try reducing the step size (either by reducing the fixed step size or by tightening the error tolerances)
Режим розрахунку: Discrete (Дискретний)	
$T_s = 5 \cdot 10^{-4}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання абсолютно незадовільні
$T_s = 5 \cdot 10^{-5}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні
$T_s = 5 \cdot 10^{-6}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні

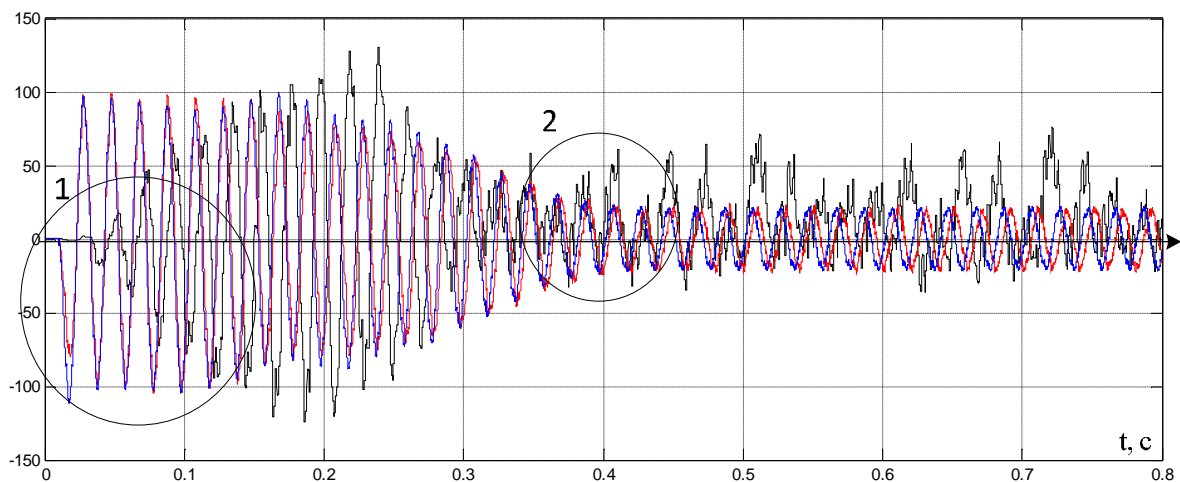


Рисунок 2 – Порівняльні графіки фазного струму статора ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s

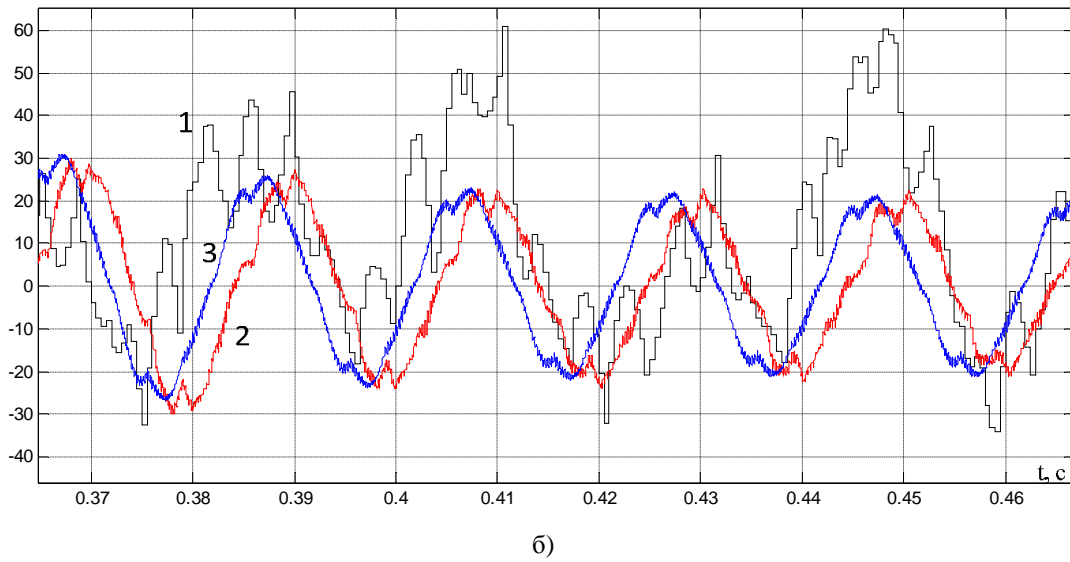
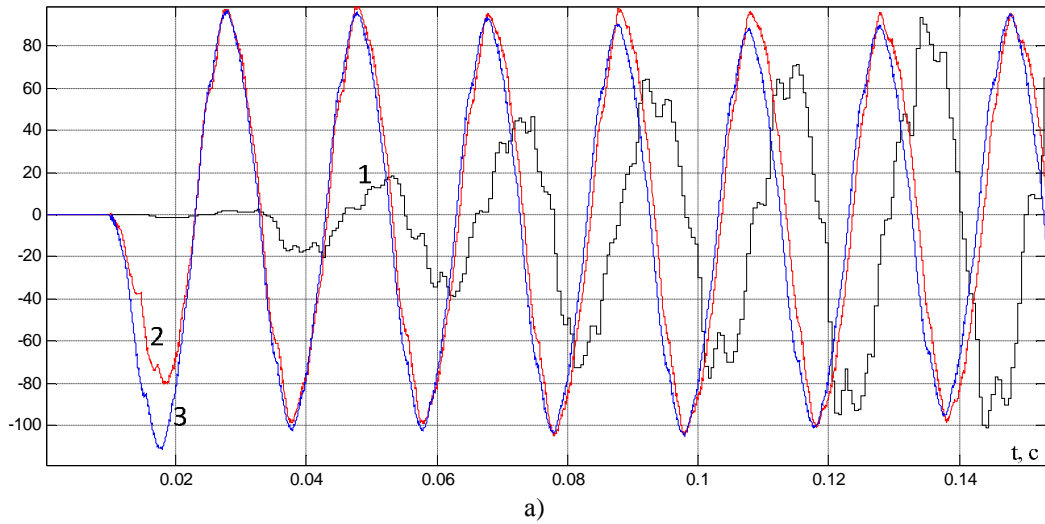


Рисунок 3 – Перехідний процес фазного струму статора ПЧ-АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s : 1 – $T_s = 5 \cdot 10^{-4}$; 2 – $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$: а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

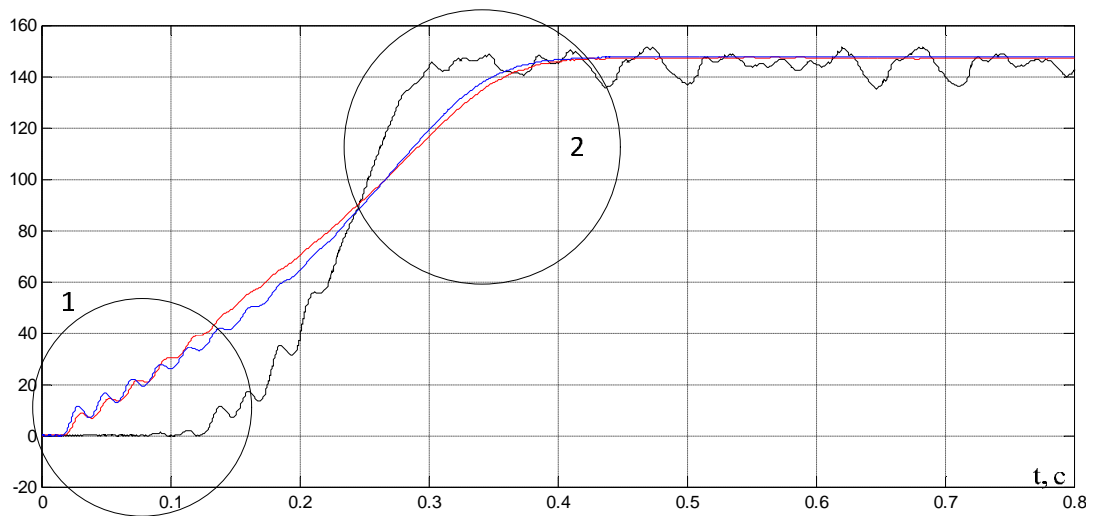
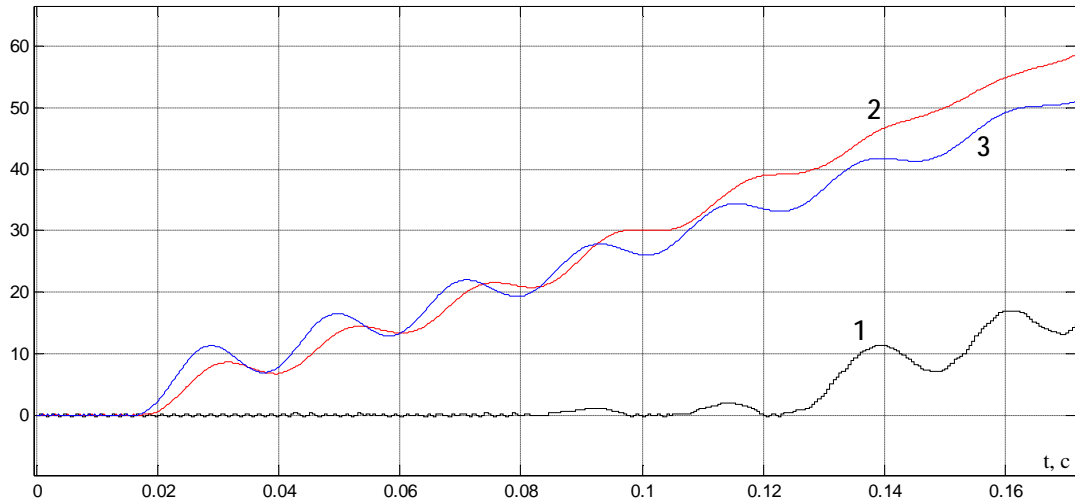
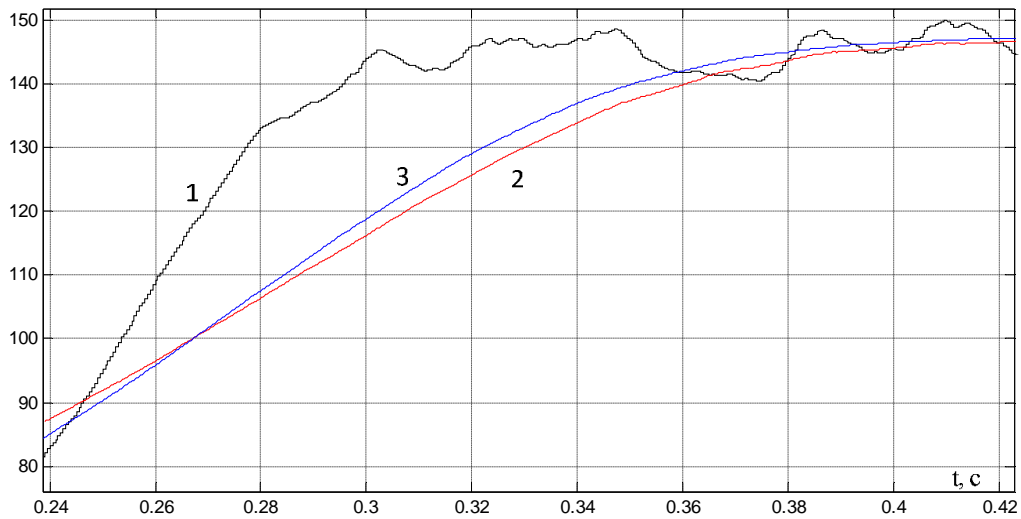


Рисунок 4 – Порівняльні графіки кутової швидкості ротора ПЧ-АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s



а)



б)

Рисунок 5 – Перехідний процес кутової швидкості ротора ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s : 1 – $T_s=5 \cdot 10^{-4}$; 2 – $T_s=5 \cdot 10^{-5}$; 3 – $T_s=5 \cdot 10^{-6}$: а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

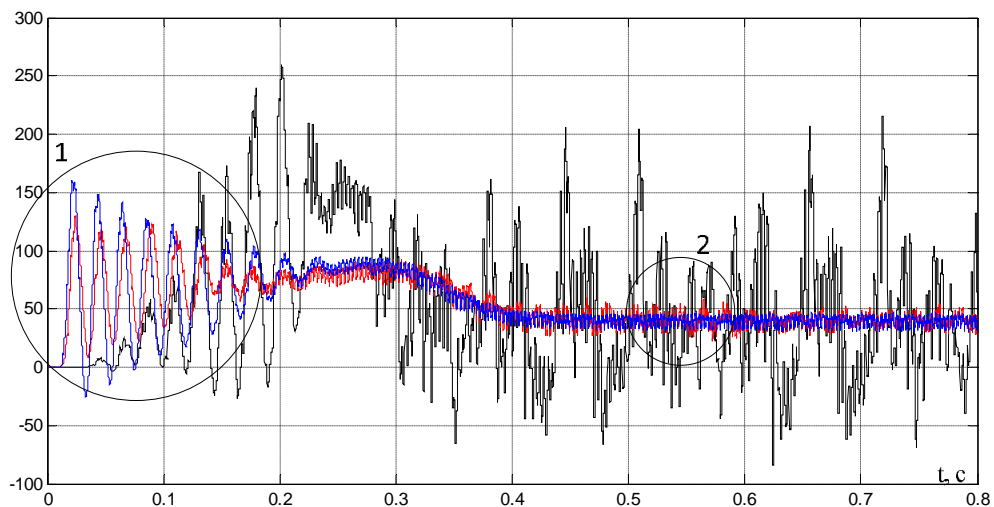
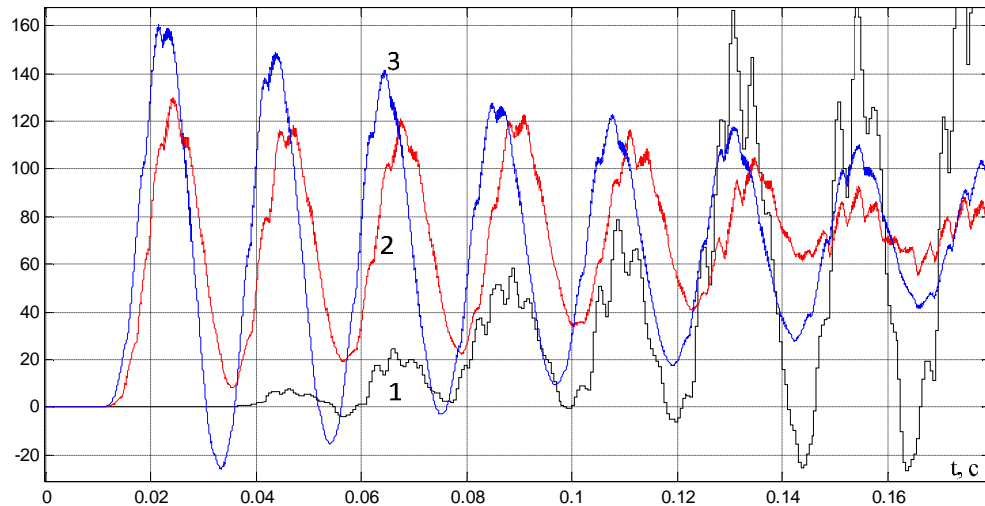
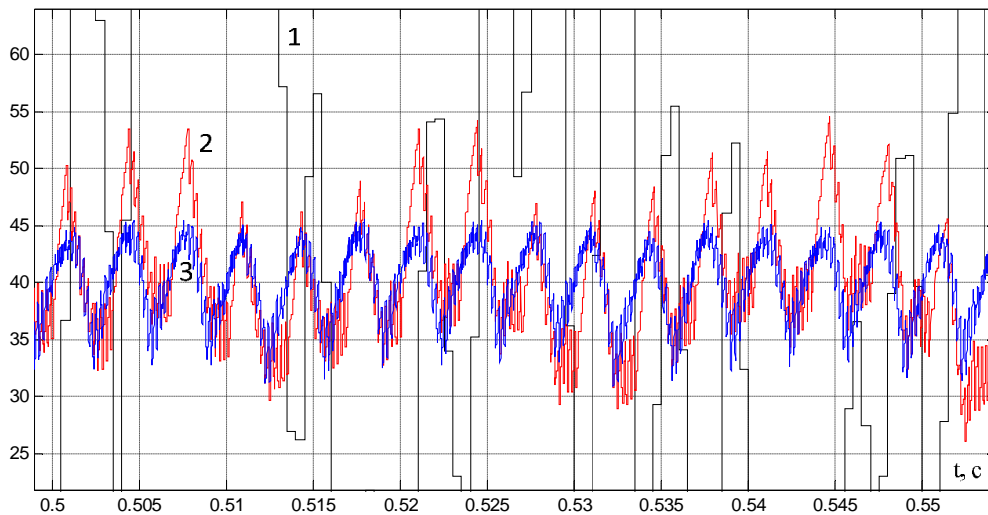


Рисунок 6 – Порівняльні графіки електромагнітного моменту електропривода ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s



а)



б)

Рисунок 7 – Перехідний процес електромагнітного моменту електропривода ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s :
1 – $T_s = 5 \cdot 10^{-4}$; 2 – $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$: а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

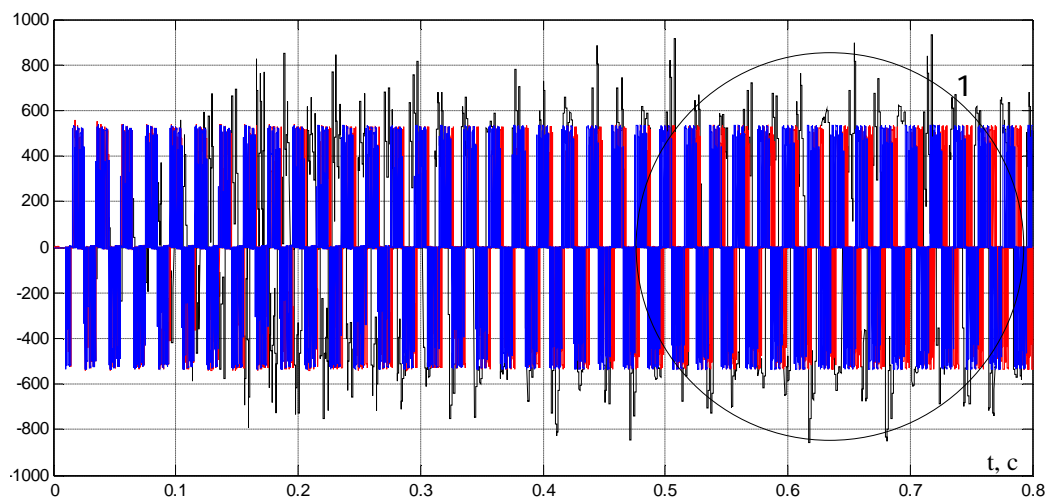


Рисунок 8 – Порівняльні графіки лінійної напруги на статорі електропривода ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s

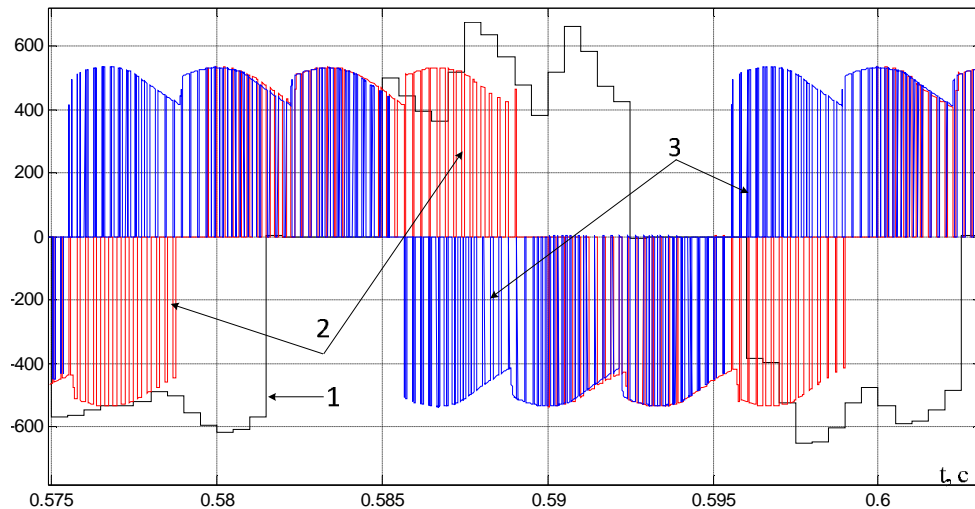


Рисунок 9 – Фрагмент 1 лінійної напруги на статорі електропривода ПЧ–АД при використанні різних інтервалів дискретизації T_s : 1 – $T_s= 5 \cdot 10^{-4}$; 2 – $T_s= 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – $T_s= 5 \cdot 10^{-6}$

Візуально помітно погіршення у результатах моделювання при поступовому збільшенні інтервалу дискретизації T_s .

Зменшення інтервалу дискретизації T_s до $5 \cdot 10^{-4}$ призводить до появи у графіках струму та електромагнітного моменту обчислювальних артефактів, які значно деформують графік кутової швидкості та не дають змоги адекватно оцінити процеси при запуску електропривода ПЧ–АД. Також звертає на себе увагу наявність фазового

зсуву між окремими рішеннями для струму статора (рис. 3,б). Це може призводити до похибок при обчисленні енергетичних характеристик електроприводу.

Модель каскадного асинхронного електропривода за системою АВК

На рис. 10 наведено синтезовану імітаційну модель каскадного асинхронного електроприводу за системою АВК на прикладі відомої моделі [4].

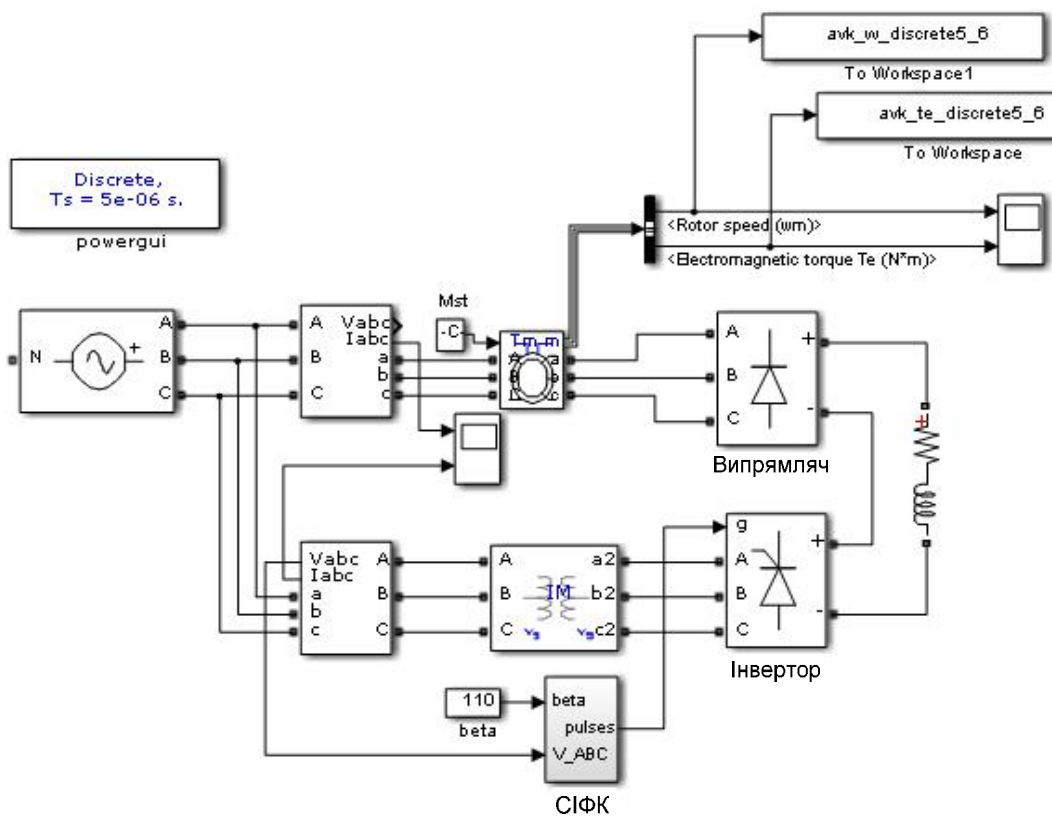


Рисунок 10 – Модель електропривода АВК

Було протестовано різноманітні режими інтегрування, отримані результати зведено до моделювання та різноманітні доступні методи табл. 2.

Таблиця 2 – Зведені дані про розрахунки імітаційної моделі АВК з використанням бібліотеки SimPowerSystems

Режим розрахунку: Continuous (Безперервний)	
Метод інтегрування	Результат моделювання
Ode45 (Dormand-Prince)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні 10^{-9} с. Час роботи моделі недопустимо великий.
Ode23tb (stiff/TR-BDF2), solver reset method – robust	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні.
Ode113 (Adams)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні $2 \cdot 10^{-7}$ с. Час роботи моделі все одно недопустимо великий
Ode5 (Dormand-Prince), а також усі інші методи з постійним кроком інтегрування	Вирішення рівнянь моделі аварійно переривається з наступним діагностичним повідомленням: Derivative input – 25 of 'avk_demo/Asynchronous Machine SI Units/Electrical model/ Continuous/Asynchronous Machine State-space model/Saturation/Time Constant/Integrator' at time 0.02 is Inf or NaN. Stopping simulation. There may be a singularity in the solution. If not, try reducing the step size (either by reducing the fixed step size or by tightening the error tolerances)
Режим розрахунку: Discrete (Дискретний)	
$T_s = 5 \cdot 10^{-4}$	Вирішення рівнянь моделі завершується успішно. У результаті моделювання отримуємо розбіжний результат
$T_s = 5 \cdot 10^{-5}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні
$T_s = 5 \cdot 10^{-6}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні

На рис. 11–15 наведено графіки перехідних режимів електропривода АВК, отримані при використанні різних методів обчислення.

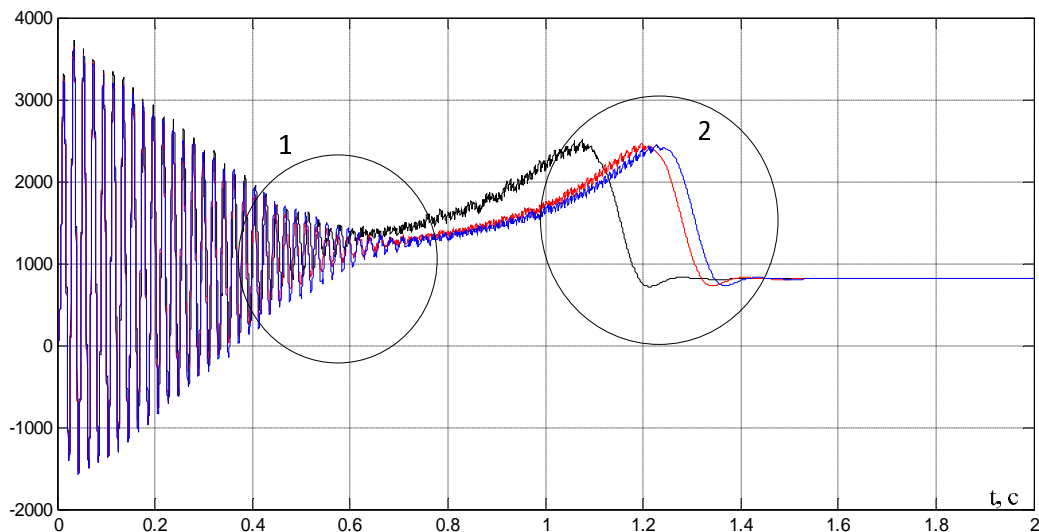


Рисунок 11 – Порівняльні графіки електромагнітного моменту електропривода АВК при використанні різних режимів обчислення

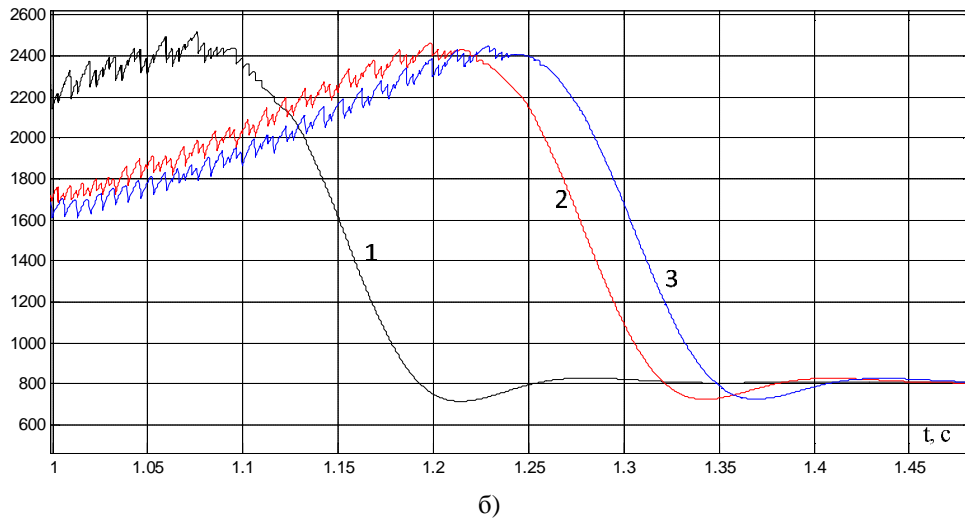
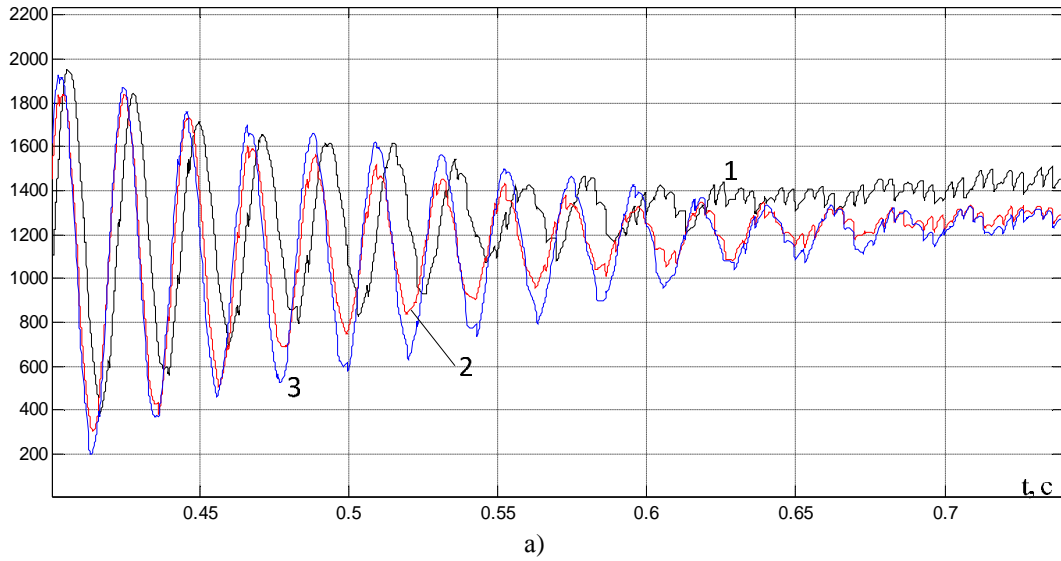


Рисунок 12 – Перехідний процес електромагнітного моменту електропривода АВК при використанні різних режимів обчислення:
 1 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$;
 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2): а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

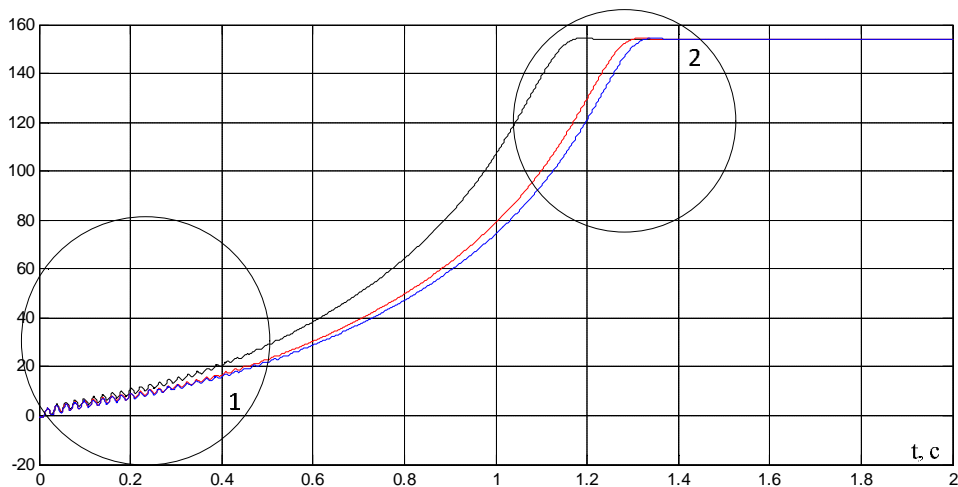


Рисунок 13 – Порівняльні графіки кутової швидкості ротора електропривода АВК при використанні різних режимів обчислення

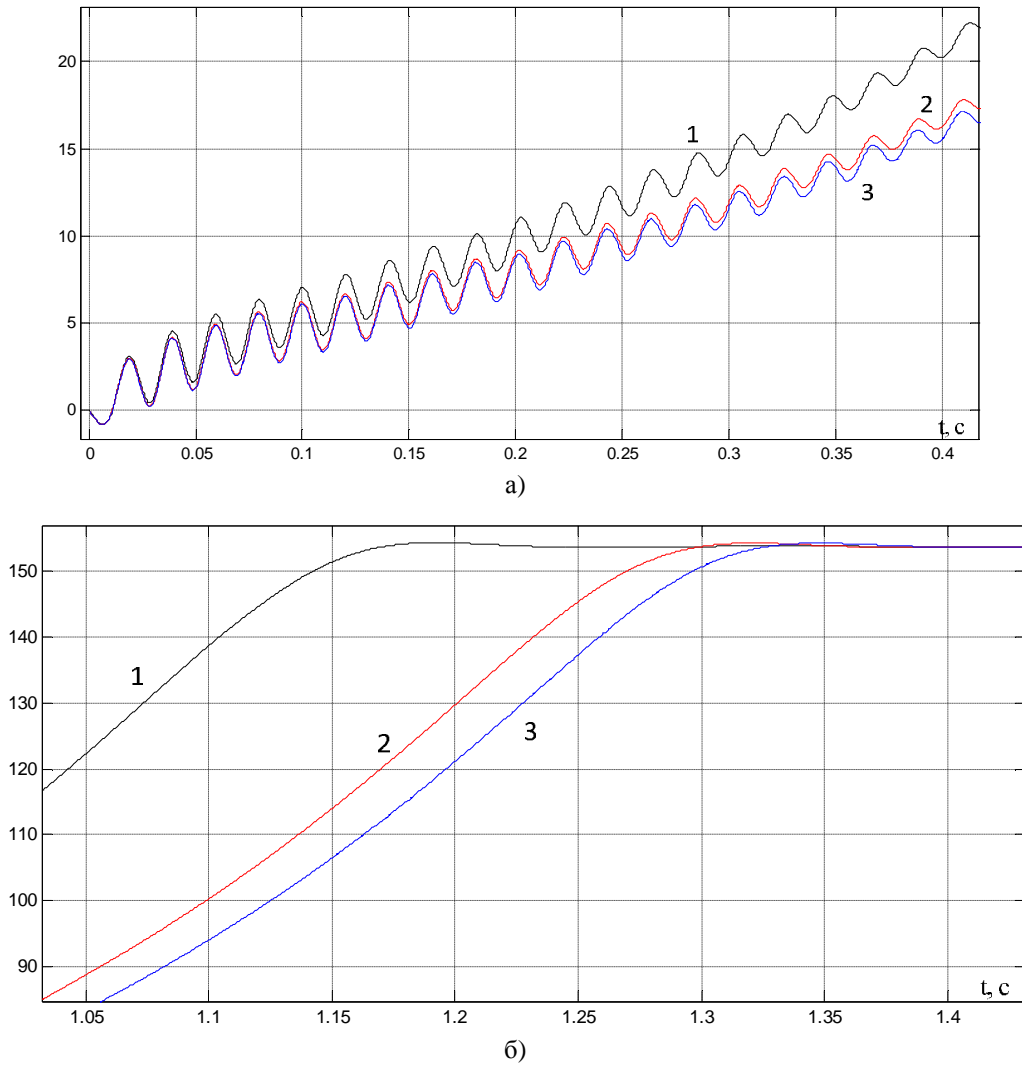


Рисунок 14 – Перехідний процес кутової швидкості ротора електропривода АВК при використанні різних режимів обчислення:
 1 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$; 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2): а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

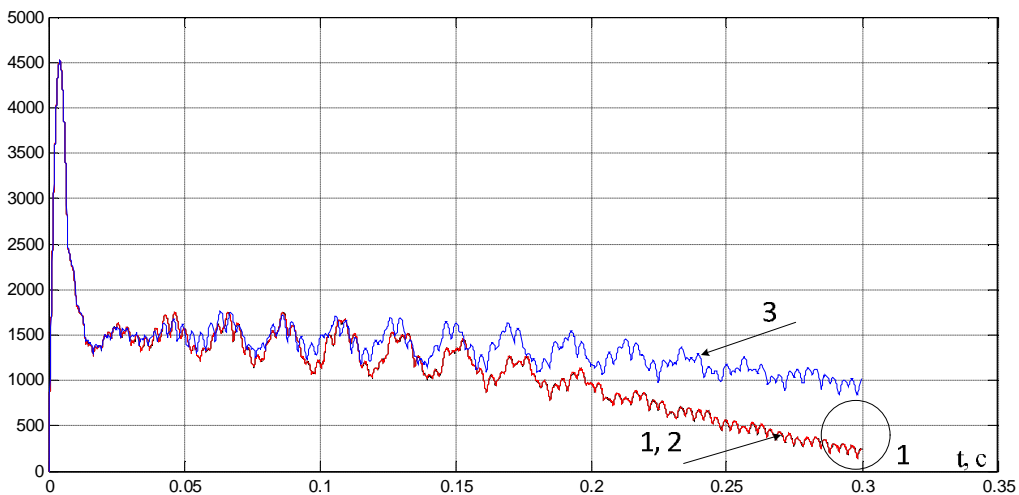


Рисунок 15 – Порівняльні графіки випрямленого струму ротора електропривода АВК при використанні різних режимів обчислення: 1 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$; 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2)

Модель електроприводу з тиристорним регулятором напруги на статорі АД

На рис. 16–18 зображено синтезовану модель асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги (ТРН–АД) та її складові.

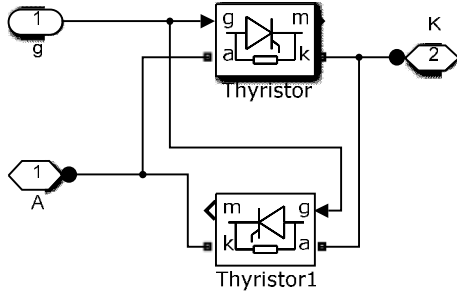


Рисунок 16 – Модель силового ключа ТРН

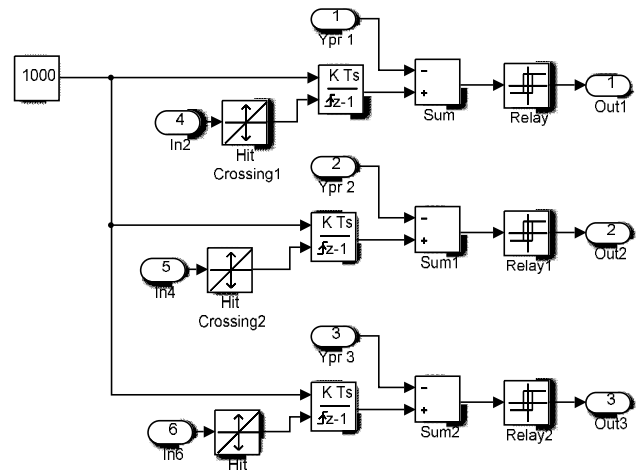


Рисунок 17 – Функціональна схема системи імпульсно-фазового керування трифазним тиристорним регулятором напруги

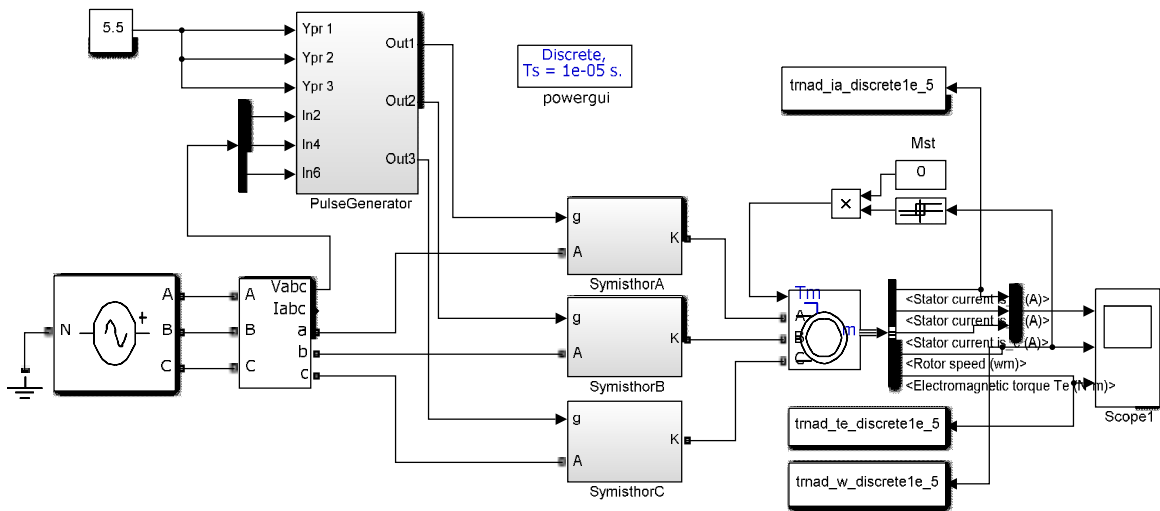


Рисунок 18 – Модель асинхронного електроприводу за системою ТРН–АД

Було протестовано різноманітні режими моделювання та різноманітні доступні методи інтегрування, отримані результати зведено до табл. 3.

На рис. 19–25 наведено графіки перехідних режимів електроприводу ТРН–АД, отримані при використанні різних методів обчислення.

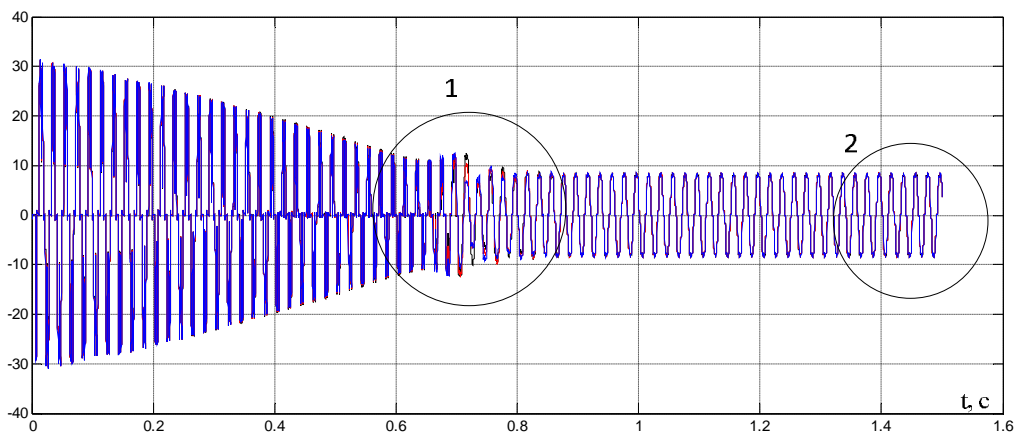


Рисунок 19 – Порівняльні графіки фазного струму статора ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення

Таблиця 3 – Зведені дані про розрахунки віртуальної моделі ТРН–АД з використанням бібліотеки SimPowerSystems

Режим розрахунку: Continuous (Безперервний)	
Метод інтегрування	Результат моделювання
Ode45 (Dormand-Prince)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні 10^{-10} с. Час роботи моделі недопустимо великий
Ode23tb (stiff/TR-BDF2), solver reset method – robust.	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні
Ode113 (Adams)	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно, але крок інтегрування вибрано на рівні $2 \cdot 10^{-8}$ с. Час роботи моделі все одно недопустимо великий
Ode5 (Dormand-Prince), а також усі інші методи з постійним кроком інтегрування	Вирішення рівнянь моделі аварійно переривається з наступним діагностичним повідомленням: Derivative input – 25 of 'avk_demo/ Asynchronous Machine SI Units/Electrical model/ Continuous/ Asynchronous Machine State-space model/Saturation/Time Constant/ Integrator' at time 0.02 is Inf or NaN. Stopping simulation. There may be a singularity in the solution. If not, try reducing the step size (either by reducing the fixed step size or by tightening the error tolerances)
Режим розрахунку: Discrete (Дискретний)	
$T_s = 5 \cdot 10^{-4}$	Вирішення рівнянь моделі завершується успішно. У результаті моделювання отримуємо розбіжний результат
$T_s = 5 \cdot 10^{-5}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні
$T_s = 5 \cdot 10^{-6}$	Вирішення рівнянь моделі відбувається успішно. Машинний час, витрачений на розрахунок моделі, задовільний. Отримані результати моделювання задовільні

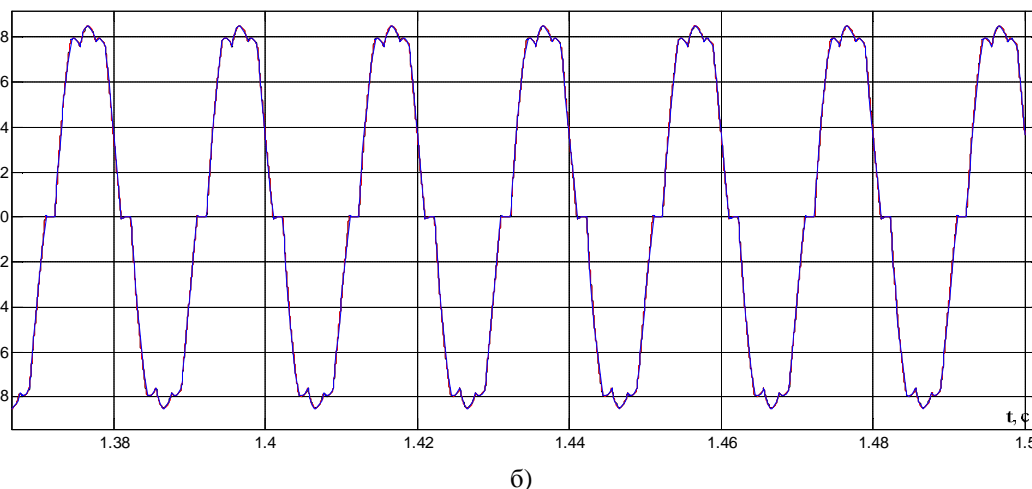
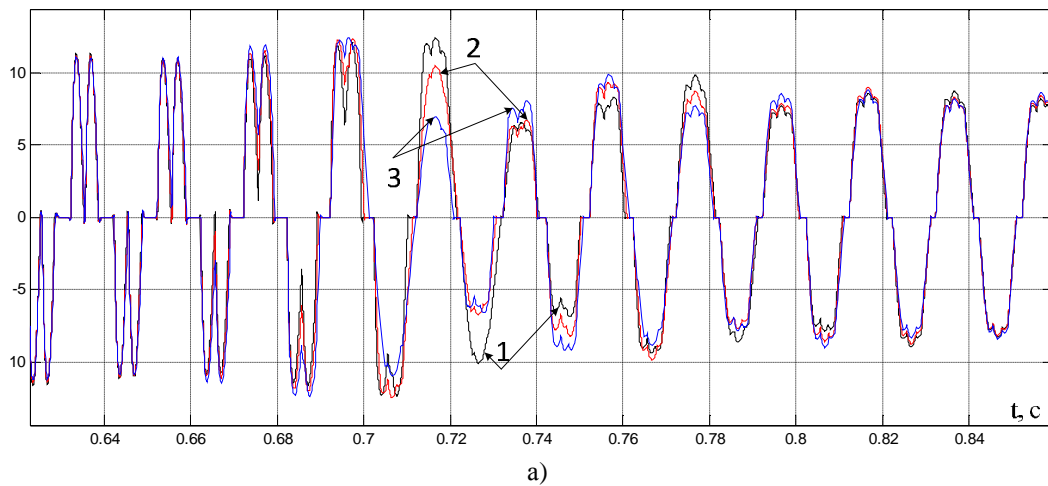


Рисунок 20 – Перехідний процес фазного струму статора ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення: 1 – інтервал дискретизації $T_s = 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2): а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

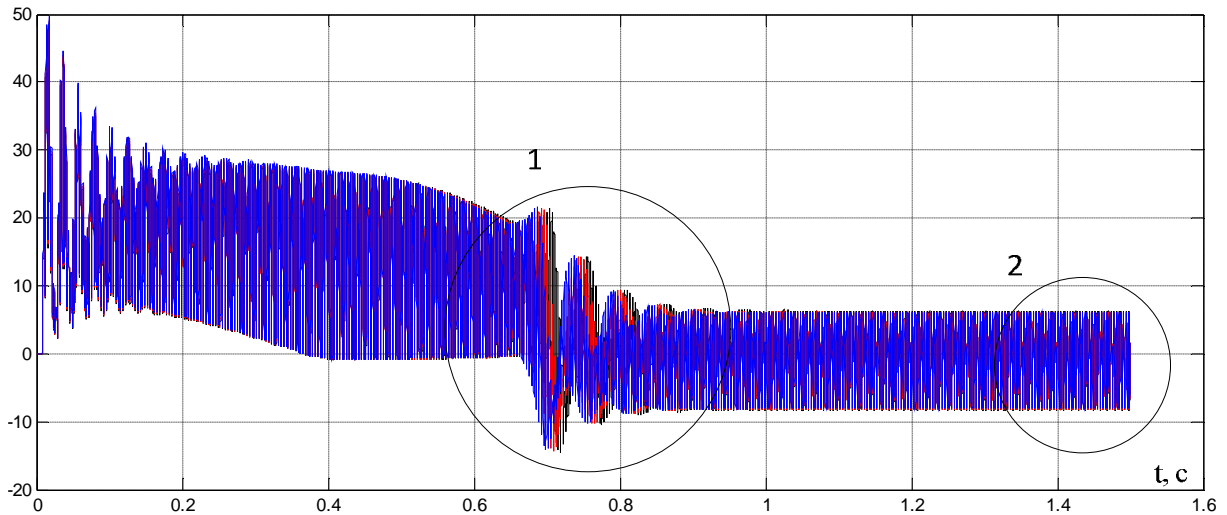
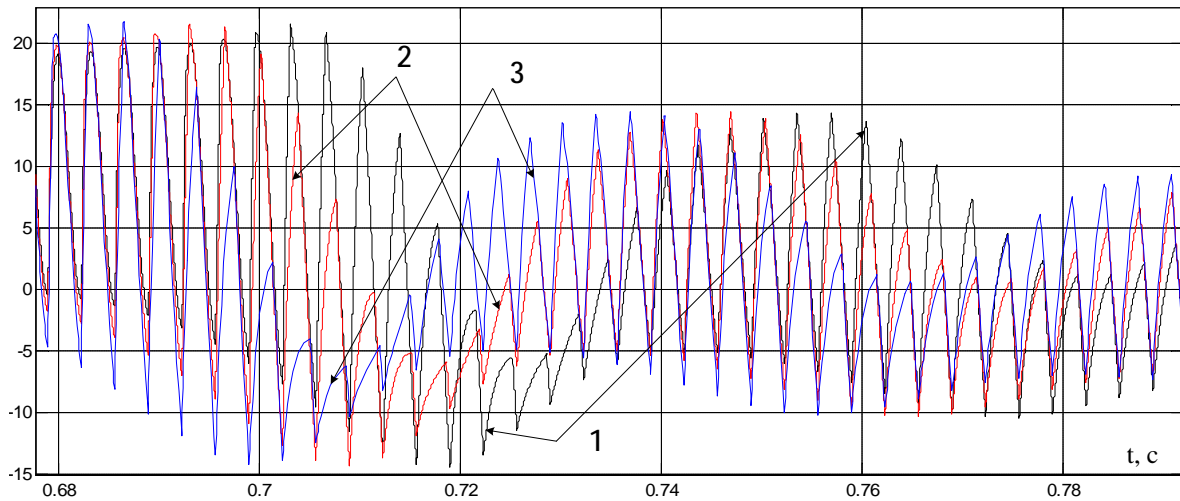
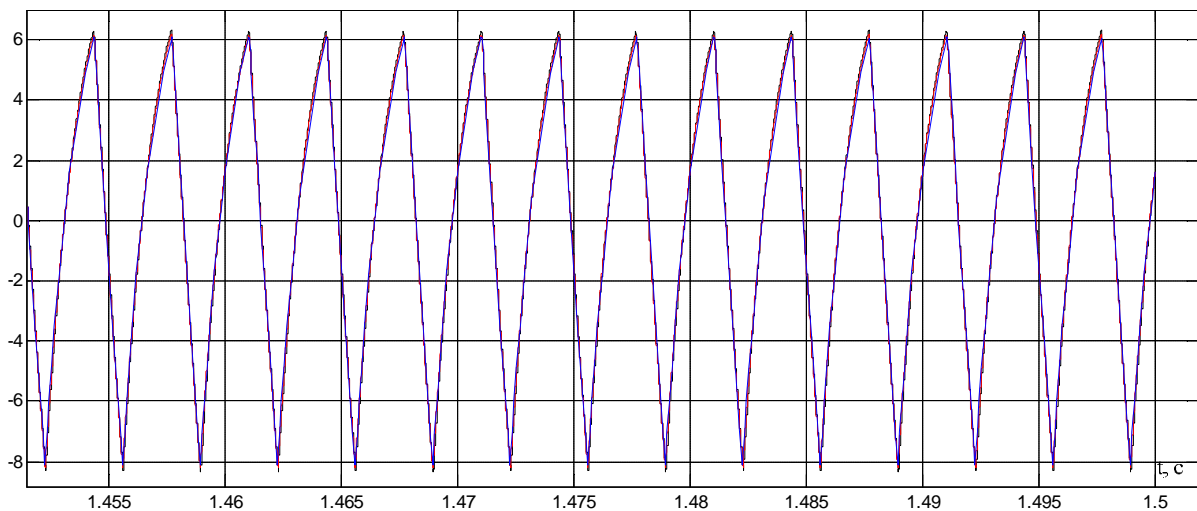


Рисунок 21 – Графіки електромагнітного моменту ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення

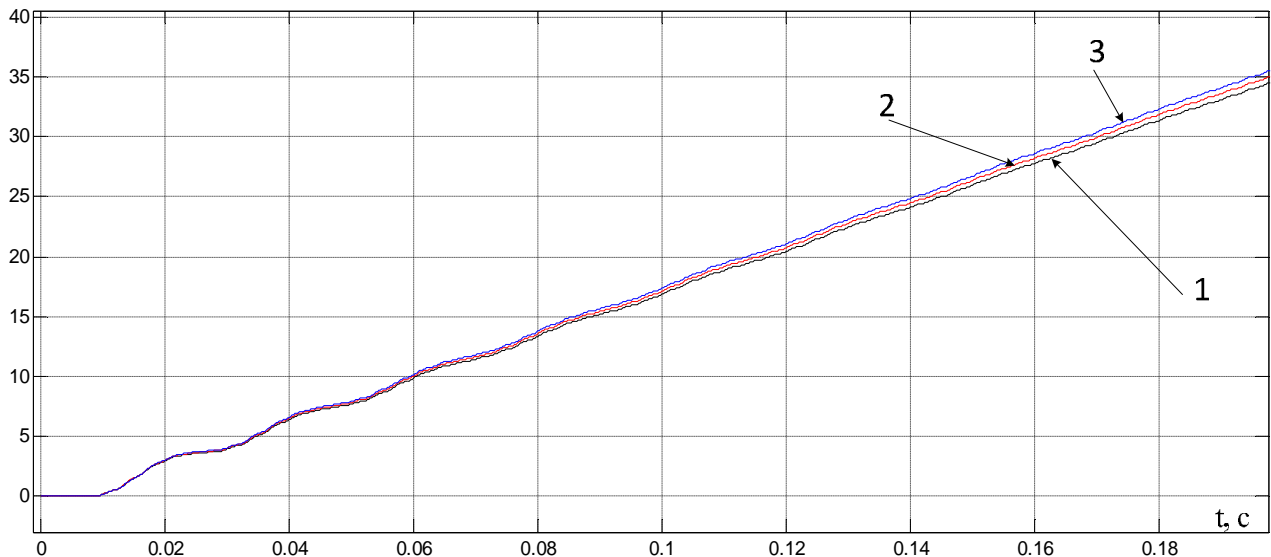


а)

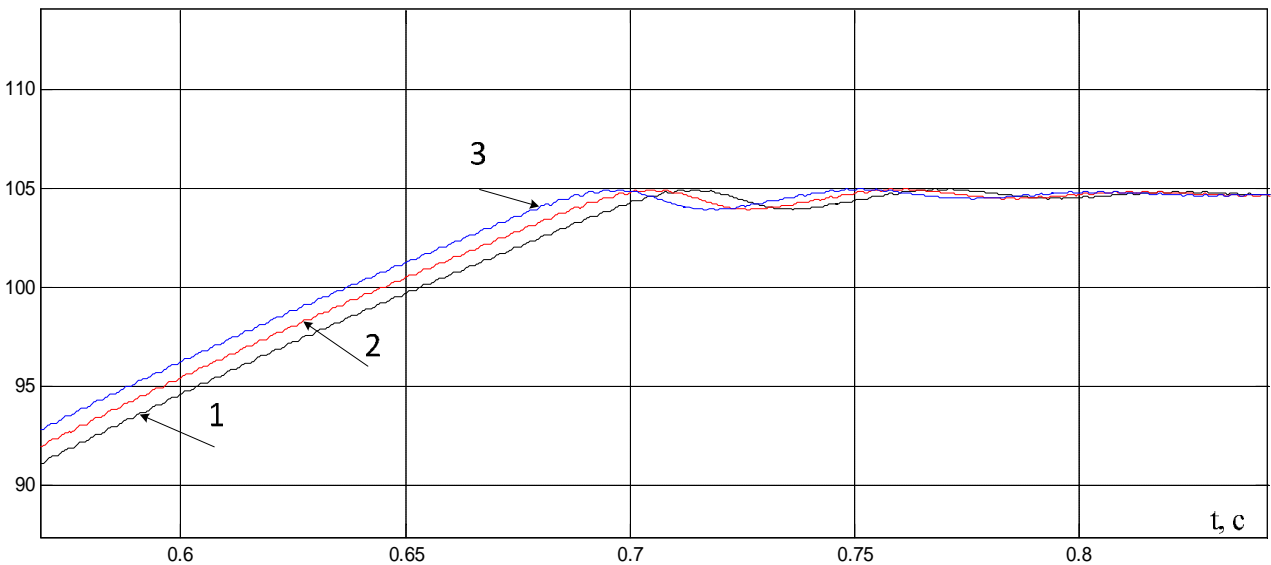


б)

Рисунок 22 – Перехідний процес електромагнітного моменту ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення: 1 – інтервал дискретизації $T_s = 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2): а) фрагмент 1; б) фрагмент 2



а)



б)

Рисунок 23 – Перехідний процес кутової швидкості ротора ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення: 1 – інтервал дискретизації $T_s = 10^{-5}$; 2 – інтервал дискретизації $T_s = 5 \cdot 10^{-5}$; 3 – безперервний за методом Ode23tb (stiff/TR-BDF2): а) фрагмент 1; б) фрагмент 2

Необхідно звернути увагу на той факт, що досить значна розбіжність між обчисленими процесами з'являється тільки у перехідних режимах, коли зміна ковзання призводить до зміни кута зсуву між напругою та струмом фази, що позначається на кутовій провідності тиристора. У статичному режимі процеси з високою точністю співпадають для усіх розглянутих режимів обчислення, чого не спостерігалось для інших розглянутих систем електропривода.

ВИСНОВКИ. Сучасний стан розвитку обчислювальної техніки, наприклад, створення кластерних систем, багатоядерних процесорів або застосування методів паралельного виконання розрахунків дозволяє не обмежувати складність моделі. І, таким чином, на перший план виступає не сама модель

системи електропривода, а її особливості й врахування всіх властивостей фізичних систем.

З розширенням використання засобів обчислювальної техніки в дослідженні моделей обсяг аналітичної роботи анітрохи не зменшився. Відбувся його перерозподіл. Якщо раніше вся аналітика була умовно «рівномірно» розподілена на етапах синтезу й аналізу, то тепер все більше концентрується на етапі синтезу моделі. Ситуація ускладнюється тим, що на динаміку АД впливають нарізно й у поєднанні такі фактори, як насичення магнітної системи, витіснення струму, наявність контурів вихрових струмів, форма напруги тощо. До того ж перетворення систем рівнянь до іншої форми, наприклад, запис відносно струмів, рішення при певних параметрах може мати нестійкий характер.

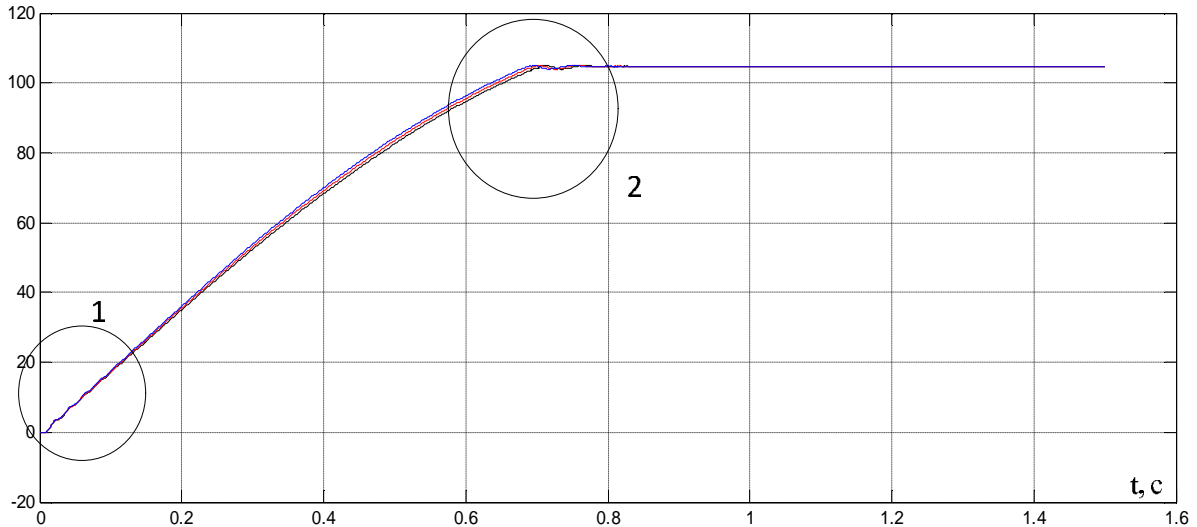


Рисунок 24 – Порівняльні графіки кутової швидкості ротора електропривода ТРН–АД при використанні різних режимів обчислення

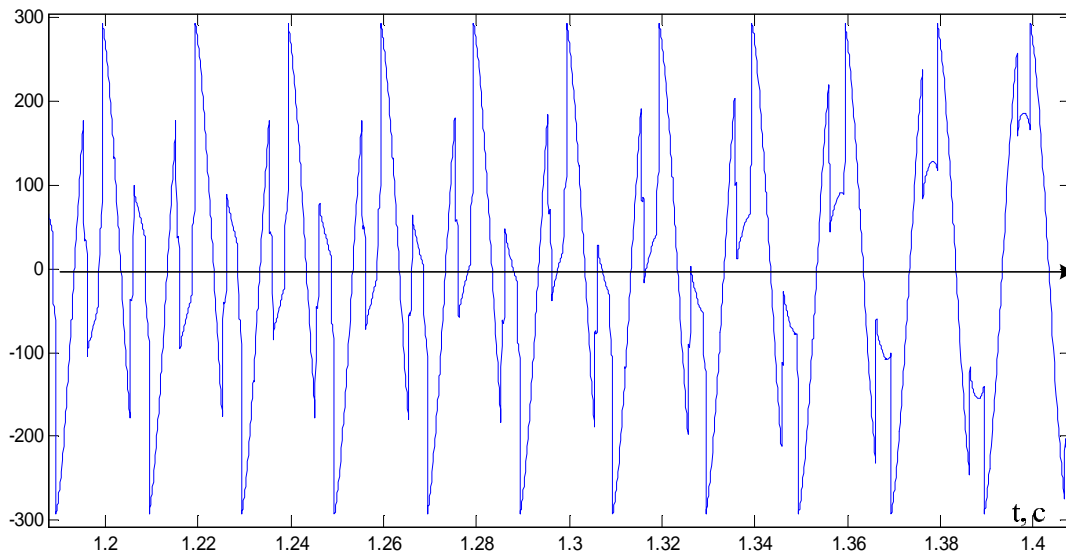


Рисунок 25 – Форма напруги на статорі ТРН–АД

Застосування для вирішення задач універсальних математичних пакетів попри переваги універсальності має й суттєві зауваження. Одне з головних те, що розробники вимушені були піти на компроміс між універсальністю й точністю. Це змушує використовувати практично для всіх моделей з елементами бібліотеки SimPowerSystems комбінований метод ode23tb, що використовує на першому етапі формулу трапецій, а на другому – зворотну диференціальну формулу 2-го порядку й має невисоку точність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nagel, Laurence W. SPICE 2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits,

Memorandum No. ERL-M520, University of California, Berkeley, May 1975.

2. Kundert K.S. The Designer's Guide to SPICE and SPECTRE, Kluwer. – Boston: Academic Publishers, 1998.

3. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

4. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Виртуальное моделирование режимов работы электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада // Промислова електроенергетика та електротехніка. – Промелектро, 2007. – № 1. – С. 61–66.

**RESEARCH FEATURES OF MODELS OF ELECTRIC DRIVES SYSTEM
WITH SWITCHING ELEMENTS IN SIMPOWERSYSTEMS**

O. Chorny

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: apch@kdu.edu.ua

V. Tytyuk

Kyryvi Rih National Technical University
vul. XXII Partyzizdy, 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

The paper is devoted to the issue of research modes of electric drives with induction motors by means of its simulation using Matlab mathematical package, SimPowerSystems libraries of Simulink environment. The accent is made on the features of mathematical models taking into account power converters that contain switching elements and on methods of numerical integration of differential equations systems of models in their study. Quantitative and qualitative differences in the decisions that arise when unjustified selecting of numerical method and its parameters, as well as taking into account nonlinearities in the models and the real parameters of the output power converters have been shown. Errors that may arise in the application of universal solutions packages for mathematical modeling have been analyzed. The results of the simulation have been presented.

Key words: drives with induction motors, mathematical models, switching elements.

REFERENCES

1. Nagel, Laurence W. (1975), "SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits", Memorandum No. ERL-M520, University of California, Berkeley, May 1975.
2. Kundert, K.S. (1998), The Designer's Guide to SPICE and SPECTRE, Academic Publishers, Kluwer, Boston, USA.
3. Dyakonov, V.P. (2005), *MATLAB 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 v matematike i modelirovaniyi* [MATLAB 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 in mathematics and modeling], SOLON-Press, Moscow, Russia. (in Russian)
4. Chermalykh, V.M., Chermalykh, A.V. and Maydanskiy, I.Ya. (2007), "Virtual modeling of the drive scheme asynchronous-valve cascade", *Promislova elektroenergetika ta elektrotehnika: Promelektro*, no. 1, pp. 61–66. (in Russian)

Стаття надійшла 10.09.2013.