

Виявлення закономірностей сумісних електромагнітних та елетромеханічних перехідних процесів при живленні стартера від іоністора

А. М. Панченко, О. П. Смирнов, А. О. Нечаус, І. С. Трунова, А. О. Борисенко, П. А. Сохін, Р. В. Богач

Іоністори широко використовуються для гарантованого запуску дизель-генераторів. Поза увагою залишаються процеси зумовлені пусковим струмом на момент часу поки вал стартера не обертається. Тривалість цього моменту короткочасна, але вплив на акумулятор, із врахуванням терміну його експлуатації, істотний. Форма цього імпульсу, його тривалість суттєво залежить від співвідношення параметрів системи: іоністор (акумулятор) – стартер – дизель-генератор.

Пропонується система диференційних рівнянь, яка описує сумісні електромагнітні й елетромеханічні процеси, що мають місце при живленні стартера дизель-генератора від іоністора. Як змінна величина використовується заряд. Ураховуються перехідні процеси, що відбуваються при нерухомому роторі стартера, та наступні процеси, зумовлені зростанням електромагнітного моменту стартера.

Стаття присвячена отриманню закономірностей, пов'язаних із початком руху стартера, виходом його на режим при падаючій напрузі іоністора, обміном електричної і магнітної енергії накопиченої в індуктивних елементах стартера.

Використання заряду, як змінної величини, дозволило поєднати кінцеві значення попереднього процесу (нерухомий ротор) із початковими наступного (вихід на пускові оберти). Таким чином, отримали математичний опис, який ураховує більшість параметрів розрядного кола іоністора. З'ясована можливість використання завищеної напруги іоністора, для збільшення накопиченої енергії.

Отримане теоретичне обґрунтування процесів, що дозволяє використати малий внутрішній опір кола стартера, наявність індуктивних складових, аномально велику ємність іоністора для формування бажаної форми електромагнітного моменту. Це дозволить врахувати специфічні вимоги різноманітних систем гарантованого електропостачання.

Ключові слова: електромагнітні перехідні процеси, елетромеханічні перехідні процеси, електромагнітний момент, момент опору.

1. Вступ

Іоністори завдяки своїм унікальним властивостям – аномально великій ємності, малому внутрішньому опору, працездатності при низьких температурах, – набувають широкого розповсюдження в різноманітних галузях. Однією із слабких ланок у системах резервного електропостачання є запуск дизель-генераторів при низьких температурах. Аналогічною є ситуація і в автомобільній техніці [1]. Термін служби акумуляторів істотним чином залежить від того,

наскільки часті були запуски при низьких температурах і наскільки були глибокими розрядні імпульси. Для забезпечення гарантованого електропостачання, поліпшення умов функціонування акумуляторів останнім часом використовують іоністори, які надійно функціонують в складних умовах.

Проведені в цьому напрямку дослідження не завжди враховують ряд факторів. Зокрема, при використанні навантажувальної вилки в якості діагностуючого засобу, не враховується зміна її внутрішнього опору від температури. При застосуванні сумісної роботи іоністора і акумулятора не враховується перерозподіл струмів між ними. Технологія запуску лише від іоністора [2] не є досконалою, із-за відсутності математичного апарату, який описує подібні перехідні процеси.

У цілому отримані результати не мають високої достовірності. Під час проведення натурних досліджень із стартером, зазвичай, враховуються електромеханічні перехідні процеси, а електромагнітні, залишаються поза увагою. Але піковий струм, зумовлений саме електромагнітним перехідним процесом, коли вал стартера ще не обертається. Тобто, проти ЕРС стартера ще не з'явилась і "працює" лише його індуктивність в нерухомому стані.

Прагнення виробників систем гарантованого електропостачання поліпшити надійність запуску дизель генератора за рахунок збільшення ємності акумуляторів не вирішує проблеми. Оскільки критичним для запуску не є кількість накопиченої енергії, а здатність джерела забезпечити відповідну потужність на певному проміжку часу. В цьому відношенні іоністори мають суттєву перевагу над акумуляторами. Традиційно, при дослідженні роботи стартера, не використовується енергія накопичена в його індуктивних елементах. Введення режиму коливального розряду іоністора на стартер, дає змогу її застосувати, що дозволить зменшити ваго габаритні показники системи запуску.

Отримання математичного опису процесів, що відбуваються при роботі стартера від іоністора, дозволить з'ясувати вплив наступних чинників. Активний та індуктивний опір стартера, ємність та внутрішній опір іоністора, момент опору на валу з боку дизеля, рівень зарядної напруги іоністора. Наступний крок – це вирішення оптимізаційної задачі в залежності від умов замовника. Варіюючи вказаними параметрами, при незмінній енергії іоністора, можна формувати різну форму крутного моменту в часі. Підходи можуть бути різними в залежності від режиму експлуатації дизель генератора. Холодний резерв, гарячий резерв, тривалість часу для запуску та інші.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [1] досліджувалися можливості запуску двигуна від іоністорів. Наведені результати досліджень з використанням напівпровідникового перетворювача. Показано, що для конкретної ситуації такий варіант застосування іоністора цілком придатний. Але залишилися не вирішені деталі, щодо особливостей динамічного моменту опору вала двигуна, механічної характеристики стартера, в різні фази перехідного процесу. Причиною цього можуть бути аспекти пов'язані з розмежуванням різних перехідних процесів в натурних дослідженнях, при струмах 200–1000 А. В цілому такий напрямок може виявитися не доцільним.

Варіантом подолання ускладнень надійного запуску від іоністора може бути використання синхронного двонаправленого перетворювача [2], що забезпечує роботу допоміжної силової установки. Не зважаючи на практичну значущість такого підходу, поза увагою залишилися питання як це вплине на ваго-габаритні показники. Залишається не вирішеною проблема роботи перетворювача на пікових струмах. Одним із напрямків вирішення подібних труднощів є поєднання акумулятора і іоністора. Саме такий підхід використаний в роботі [3], де іоністор використовується як демпфер для пікового струму і тим самим, поліпшуються умови експлуатації акумулятора. Однак недостатньою мірою опрацьовані схемні рішення, щодо контролю розподілу навантаження в процесі пуску. Імовірно це пов'язано зі складністю підбору параметрів наявних іоністорів, стартерів та акумуляторів. Представлені результати досліджень системи гарантованого електропостачання з різними накопичувачами електроенергії [4]. Зокрема, досліджувався варіант запуску дизель-генератора лише від іоністора. Отримані результати свідчать про перспективність сумісного використання акумуляторів і іоністорів. Але не вирішеними залишаються питання пов'язані стосовно співвідношень параметрів схем пуску, та їх вплив на тривалості перехідних процесів. Причиною цього, може бути неочевидність існування, на першому етапі, лише електромагнітного перехідного процесу і складності його розмежування при натурних дослідженнях. В роботі [5] наведені результати досліджень іоністорів в якості компенсаторів пікового струму, аналізується їх здатність до форсованого заряду і розряду. Однак не приведені дані стосовно кількості циклів на проміжок часу, не дані характеристики джерел, які здатні забезпечують подібну роботу та способи реалізації форсованих режимів. В роботі [6] досліджується здатність накопичення енергії іоністором з подальшим живленням від нього двигуна транспортного засобу. Для аналізу результатів користуються методами чисельного моделювання в середовищі MATLAB Simulink (University of New Mexico (UNM), США). Подібний підхід має очевидність, але вказане математичне забезпечення не орієнтоване на нестандартні схемні рішення, яким є живлення від іоністора двигуна в перехідних режимах. Математична модель роботи міського електротранспорту з використанням іоністорів запропонована в роботі [7]. Показані узагальнені процеси режимів зарядки і розрядки іоністорів, але відсутня деталізація процесів які б враховували сумісні перехідні процеси. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані описом властивості двигунів постійного струму в перехідних процесах при падаючій напрузі живлення. Спроба дати достовірний математичний опис процесів роботи іоністора разом з акумулятором представлена в роботі [8]. Але дослідження стосувалися головним чином теплових процесів та їхнього впливу на тривалість гарантійного ресурсу. Варіантом подолання вказаних труднощів може бути створення системи керування джерелами живлення (паливного елемента, акумулятора й іоністора). Саме такий підхід використаний в роботі [9], розроблені контролери для управління джерелами живлення в середовищі MATLAB/Simulink. Унаслідок досягнення контролю за перетоками енергії між джерелами та привідним двигуном, були отримані дані, що дозволили провести аналіз продуктивності процесів. Водночас поза увагою залишилися особ-

ливості, що зумовлені сумісною дією перехідних електромашинних і електромагнітних процесів. В роботі [10] наведені результати дослідження гарантованої системи електропостачання до складу якої входить іоністор, акумулятор і дизель-генератор. Впроваджена стратегія керування декількома джерелами живлення, що надає очевидні переваги щодо гарантованого запуску автономних об'єктів. Однак поза увагою залишилися питання, стосовно характеру зміни напруги, струму, моменту та швидкості під час пуску.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є продовження дослідження, присвяченого з'ясуванню характеру перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів, їх вплив на швидкість та момент, що розвивається стартером при його живленні від іоністора.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є отримання закономірностей роботи стартера при його живленні від іоністора. Враховуючи той факт, що іоністор має на порядок кращі показники по питомій потужності, в порівнянні з акумулятором, є підстави сподіватися на отримання наперед заданого закону зміни електромагнітного моменту. Це, в свою чергу, забезпечить пристосованість режиму запуску в залежності від пускових характеристик дизеля та умов експлуатації.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- описати диференціальними рівняннями електромагнітні процеси, що мають місце в нерухомому стартері, із використанням в якості змінної величини заряду, що надходить від іоністора;

- описати диференціальними рівняннями сумісні електромагнітні й електромеханічні процеси, що мають місце в системі – іоністор, двигун послідовного збудження з навантаженням.

4. Матеріали та методи дослідження сумісних електромагнітних та електромеханічних процесів стартера

Проведене дослідження спрямоване на отримання закономірностей, що мають місце при роботі стартера від джерела з падаючим характером напруги (іоністора). Враховується послідовний перехід електромагнітного перехідного процесу з подальшим сумісним електромагнітним і електромеханічними перехідними процесами. Користуючись отриманими результатами та ввівши параметри конкретної системи стартер-іоністор, отримуємо характеристику процесу. Варіюючи параметрами, можна з'ясувати, наскільки система віддалена від оптимальної і по якому параметру. А уже наступним кроком підбирати відповідне обладнання. При запуску від акумулятора подібні питання не стояли гостро. В силу того, що його внутрішній опір на кілька порядків більший за внутрішній опір іоністора, напруга має відносно сталі значення, електромагнітні коливальні процеси не спостерігаються. А отже, не актуальним було врахування магнітної енергії, що накопичувалася в стартері на першій стадії запуску. Згодом енергія втрачалася, перетворюючись в тепло. Використання іоністора, з врахуванням параметрів розрядного кола, дає можливість сформулювати “ударний електромагнітний момент” не на початковій стадії, а перемістити його в часі.

Тобто, об'єднати струми, обумовлені активними опорами кола, та використати енергію, накоплену в індуктивних елементах стартера. Важливо для прокрутки холодного дизеля зрушити колінчатий вал з місця, в подальшому механічний момент опору починає падати. Відповідно можна зменшити кількість надходження енергії від іоністора, що й виконується завдяки його властивостям.

Процес пуску дизель-генератора від стартера, з живленням від іоністора був розмежований на два взаємопов'язаних етапи. Перший, становить від сотих до декількох секунд, коли подається напруга на стартер, але його вал ще не почав обертатися. Отже, відсутня швидкісна проти-ЕРС (протиелектрорушійна сила), яка залежить від швидкості обертання ротора в магнітному полі, створеному струмом, що проходить по ротору й обмотці збудження. Струм обумовлений лише параметрами LRC контуру. Другий етап настає, коли вал стартера приходить у рух і з'являється швидкісна проти-ЕРС.

Оскільки вал стартера не обертається, маємо послідовне з'єднання іоністора, активного опору (сума активних опорів обмоток стартера, проводів, іоністора) та індуктивності стартера рис. 1.

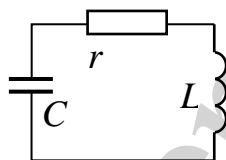


Рис. 1. Розрядне коло іоністора

Диференціальне рівняння перехідного процесу такого кола загально відоме. В якості змінної величини є струм. Але для випадку, коли напруга живлення від іоністора є величина змінна, доцільно перейти до диференціального рівняння, де змінною величиною є заряд іоністора, кулон:

$$Lq'' + rq' + \frac{q}{C} = 0, \quad (1)$$

де q – заряд, що змінюється в часі по мірі розряду іоністора; C – ємність іоністора; L – індуктивність стартера; r – активний опір кола (іоністора, з'єднувальних проводів обмоток стартера).

Оскільки маємо диференціальне рівняння другого порядку, необхідно знайти початкове значення заряду іоністора та початкові значення першої похідної заряду по часу, тобто початковий струм:

$$\begin{cases} q(0) = C \cdot U_0, \\ q'(0) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де U_0 – величина напруги на іоністорі.

Наступним кроком слід визначити момент часу, коли вал стартера приходить у рух. Імовірно цей час буде відповідати тому значенню струму, коли електромагнітний момент, що розвиває стартер, зрівняється з моментом опору вала стартера. Складемо систему диференціальних рівнянь, яка об'єднує електромагнітні й електромеханічні перехідні процеси:

$$\begin{cases} Lq'' + rq' + \frac{q}{C} - c_v\omega = 0, \\ c_m(q')^2 - M_0 = j\omega', \end{cases} \quad (3)$$

де c_v – конструктивний параметр, що характеризує електромагнітні властивості стартера; ω – миттєва швидкість вала двигуна; j – момент інерції системи вал стартера та колінчатий вал двигуна; c_m – конструктивний параметр, що характеризує електромеханічні властивості стартера; M_0 – момент опору на валу стартера.

Перше рівняння системи (3) відповідає сумі напруг на індуктивності, активному опору, напрузі на ємності та член $c_v\omega$ (проти-ЕРС), яка пропорційна швидкості обертання ротора. Друге рівняння характеризує взаємозв'язок між електромагнітним моментом, що розвиває двигун $c_m(q')^2$, моментом опору на валу M_0 та динамічним моментом $j\omega'$. Оскільки за технологічними міркуваннями, стартери виготовляють як двигуни послідовного збудження, це означає, що струм кола якоря проходить і по колу збудження. Електромагнітний момент, у свою чергу, залежить від добутку магнітного потоку і струму, отже отримуємо квадратичну залежність.

На рис. 2 представлена схема вмикання стартера. До неї входять механічна частина: колінчатий вал дизеля DG та ротор стартера St. Електрична частина: C – іоністор, L – загальна індуктивність ротора і котушки збудження стартера, r – активний опір, що об'єднує внутрішній опір іоністора, стартера та з'єднувальних проводів.

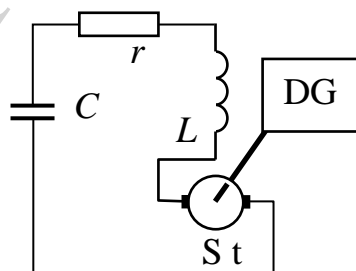


Рис. 2. Схема вмикання стартера

Початок руху ротора стартера буде відповідати миті, коли зрівняються електромагнітний момент і момент опору на валу:

$$c_m (q')^2 = M_0, \quad (4)$$

звідки:

$$q' = i_1 = \sqrt{\frac{M_0}{c_m}}. \quad (5)$$

Порівнюючи струм i_1 із струмом знайденим унаслідок розв'язання диференційного рівняння (1), знаходимо час t_1 , коли вал починає рухатися, та кількість заряду, що залишилася на іоністорі $q_{01}(t_1)$.

Для чисельного розв'язання диференційної системи рівнянь (3) її слід подати в явній формі Коши відносно старшої похідної. Після низки стандартних математичних перетворень отримаємо:

$$q''' = \frac{1}{L} r q'' - \frac{q'}{C} + \frac{c_v c_m}{j} (q')^2 - \frac{c_v M_0}{j}, \quad (6)$$

диференційне рівняння третього порядку. Для його розв'язання необхідно знайти значення другої похідної по заряду. Для цього скористаємося першим рівнянням системи (3). Оскільки вал не обертається $\omega=0$, можемо записати:

$$L q''(t_1) + r i_1 + \frac{q_{01}}{C} = 0,$$

звідки:

$$q''(t_1) = -\frac{1}{L} \left(r i_1 + \frac{q_{01}}{C} \right).$$

Таким чином, маємо початкові умови для чисельного розв'язання рівняння (6)

$$\begin{cases} t_1; \\ q_{01}(t_1); \\ q'_{01}(t_1); \\ q''(t_1) = -\frac{1}{L} \left(r i_1 + \frac{q_{01}}{C} \right). \end{cases} \quad (7)$$

У цілому отримуємо таку структуру: іоністор має заряд, що відповідає напрузі U_0 , у момент $t_0=0$ подається напруга на стартер, який залишається нерухомим, зменшується заряд, зростає струм. Ці процеси описуються рівнянням (1)

початковими умовами є (2). У момент часу t_1 значення струму стали такими, що електромагнітний момент стартера зрівнявся з моментом опору M_0 , починається обертальний рух ротора, з'являється проти-ЕРС. Процеси описуються рівнянням (3) початковими умовами є (7). Кінцеві умови попереднього процесу є початковими наступного.

5. Результати досліджень іоністорного пуску стартера

5.1. Електромагнітні перехідні процеси при нерухомому роторі

Отриманий чисельний розв'язок диференційного рівняння (1) показав, як змінюються в часі на етапі, коли ротор ще нерухомий, заряд іоністора та струм в колі стартера. Результати подані на рис. 3.

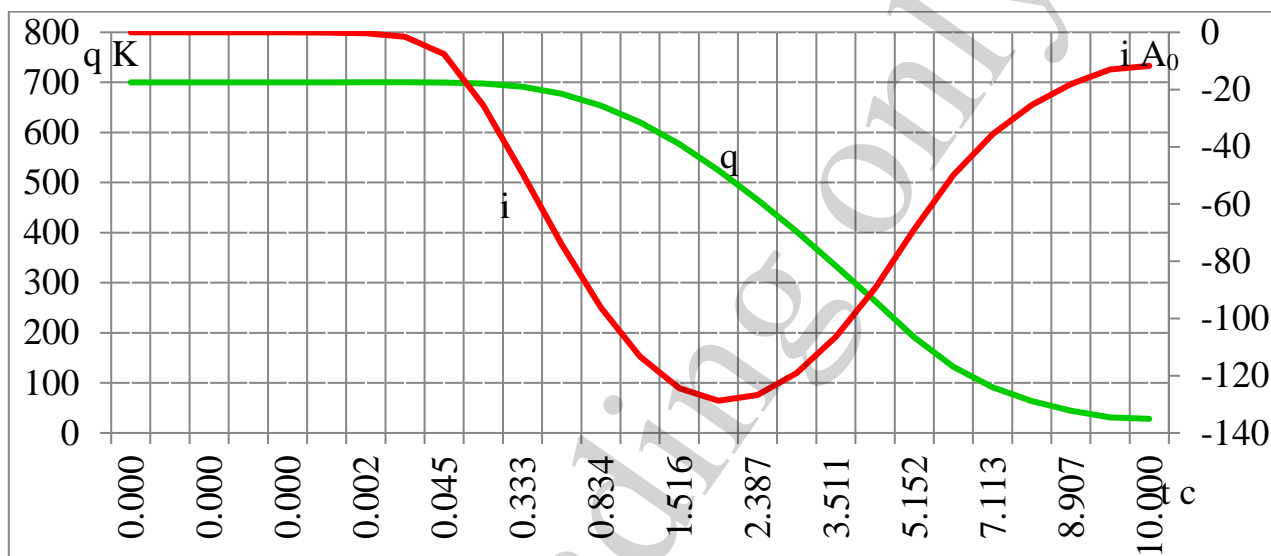


Рис. 3. Розрядні криві іоністора: крива q – залежність кількості заряду на іоністорі від часу (ліва вісь), i – зміна струму в часі (права вісь)

Співвідношення від'ємних значень струму та позитивних значень напруги (заряду) рис. 3 пояснюється зменшенням заряду іоністора, тобто похідна по заряду має від'ємне значення. Характеристики відповідають режиму загальмованого ротора. Тобто протягом 10 с ротор (штучно) залишається не рухомим. Із цього дослідження знаходимо, при якому струмі згідно з (4,5) моменти зрівнюються і отримаємо час початку руху ротора стартера. Для більшої очевидності вісь часу подана нерівномірною шкалою, оскільки починаючи з 1,5 до 10 с процес проходить відносно гладко. Установлено, що характер перехідних електромагнітних процесів залежить від співвідношень L , r , C та кількості зарядів на іоністорі, у даному випадку 700 К, що при ємності іоністора 20 Ф відповідає напрузі 35 В. Спостерігаємо аперіодичний характер розряду іоністора.

5.2. Сумісні електромагнітні і електромеханічні перехідні процеси

На рис. 4 представлені характеристики напруги і струму отримані шляхом чисельного розв'язання рівняння (3). Ділянка з інтервалом $t=0-2,167$ с відповідає графіку рис. 3, коли ротор нерухомий, що дозволило знайти час початку

обертання ротора. Точки 1 і 2 рис. 4 відповідають цьому моменту струм ≈ 200 А, напруга 24–20 В.

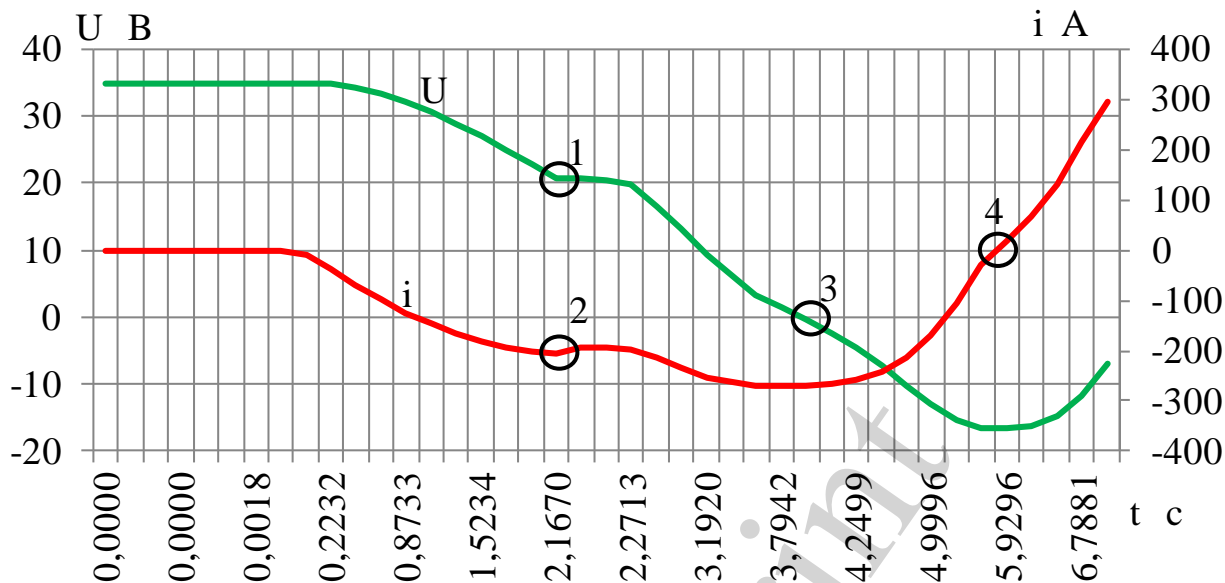


Рис. 4. Зміна напруги і струму стартера при живленні від іоністора: U – напруга стартера (ліва вісь), i – струм стартера (права вісь)

З'являється швидкісна проти-ЕРС, що призводить до сповільнення зростання струму та падіння напруги. Точка 3 рис. 4 – перехід напруги через нуль (елемент коливального розряду) за рахунок енергії накопиченої на індуктивності стартера та максимального струму через стартер. Точка 4 – струм змінює напрямок на протилежний.

На рис. 5 показаний характер зміни обертів і моменту на валу. Час, коли електромагнітний і механічний опір зрівнялися і вал починає обертатися, відповідає 2,167 с рис. 4. Точка 1 рис. 4 показує, що при збільшенні електромагнітного моменту понад 150 Нм починає рухатися ротор. Відповідно зростає момент і швидкість. Для запуску холодного дизеля, зазвичай, достатньо набрати 200–250 об/хв. Потім стартер механічно відключається. Але пуск може й не відбутися, тоді процес продовжується відповідно до графіків рис. 4. Точка 2 – швидкість зменшилися до 0 і змінюється напрям обертання, електромагнітний момент зменшився до 150 Нм і продовжує падати, механічний момент опору провокує зворотній напрямок обертання, чим і пояснюється від'ємна швидкість за точкою 2. Електромагнітний момент свій напрямок не змінює незалежно від напрямку струму, оскільки з напрямком струму змінюється і напрямок магнітного поля.

Отримані результати свідчать, що математичний опис пуску дизельного двигуна від іоністора, на базі рівнянь (1), (3), відповідає реальним процесам, що мають місце, під час роботи електричного двигуна послідовного збудження. Падаючий характер джерела напруги, малий активний опір розрядного кола, індуктивна складова стартера – можуть ініціювати коливальні процеси.

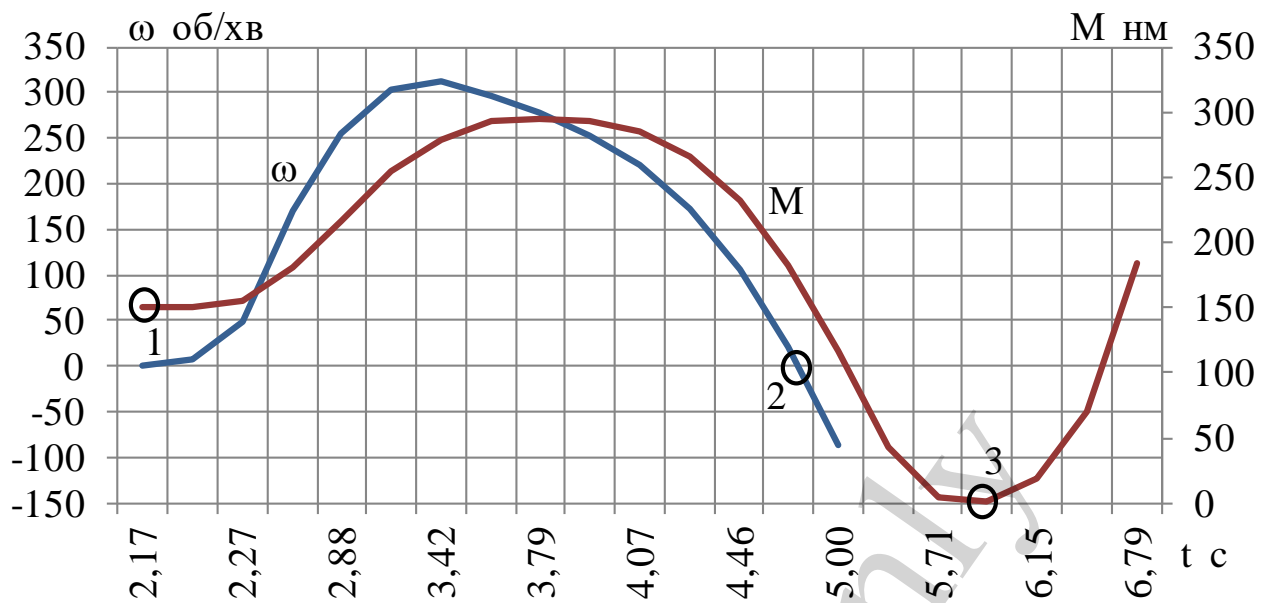


Рис. 5. Зміна швидкості і моменту на валу під час пуску стартера: n – швидкість обертання валу (ліва вісь), M – момент на валу (права вісь)

6. Обговорення результатів дослідження роботи двигуна послідовного збудження від джерела падаючої напруги

Використання іоністорного живлення для стартера дає можливість зменшити активний опір розрядного кола. Внутрішній опір іоністора на декілька порядків менший за внутрішній опір акумулятора, особливо при низьких температурах. В якості струмообмежуючого елемента працює індуктивність стартера, до початку його руху. Енергія, накопичена в електромагнітних елементах стартера в процесі його роботи, сприяє збільшенню обертового електромагнітного моменту. Таким чином, активна енергія іоністора з мінімальними втратами передається стартеру.

При описі процесів, пов'язаних з роботою стартера, використовуються рівняння, де напруга живлення є величина стала (джерело нескінченної потужності). Це дає підстави скористатися відомими рівняннями, де змінною величиною є струм і на далі отримувати необхідні співвідношення. Хоча в дійсності, напруга акумулятора в момент пуску знижується на 10–20 %, врахувати це в диференційному рівнянні складно, через відсутність аналітичної залежності величини напруги від струму. Вказана проблема могла бути вирішена, якщо знати кількість кулонів в акумуляторі на момент пуску, на даний час це питання також не вирішено. В цьому сенсі, властивості іоністора дозволяють отримати однозначну залежність напруги живлення від кількості заряду і зв'язати різні перехідні процеси в єдину систему диференційних рівнянь (3).

Спрощення, що при цьому допускаються, наступні. Магнітопровід стартера працює в ненасиченому режимі. Це дає підстави стверджувати, що коли магнітна система двигуна не рухома її індуктивність є величина постійна. З початком руху ротора, з'являється реакція якоря, яка спотворює магнітний потік, але в силу не насиченості її значення залишається постійним. Конструктивно ротор

виконаний симетрично і якщо знехтувати пульсаціями обумовленими перемиканням колекторних пласти, допустимо вважати, що індуктивність ротора також постійна. Слід зауважити, що послідовна котушка збудження стартера нерухома, отже індуктивність стала, а потокозчеплення змінюється лише за рахунок зміни значень струму. З початком руху з'являється проти ЕРС, яка обумовлена переміщенням ротора. Оскільки магнітна система не насичена, то вона пропорційна швидкості, що враховується в першому рівнянні (3). Виходячи з заявлених спрощень сформоване друге електромеханічне рівняння системи (3).

-В системі диференціальних рівнянь (3) момент опору на валу стартера розглядається як постійна величина. В дійсності момент опору валу дизельного двигуна має обернено пропорційну залежність від обертів. Але рішення такого рівняння потребує іншого математичного апарату і відкладено на майбутнє. З іншого боку, запропонований варіант описує більш обтяжливий момент пуску. Якщо стартер набирає відповідні оберти при постійному моменті опору, то вірогідність запуску при падаючому моменті опору буде вищою.

До обмежень запропонованого методу використання іоністорного пуску слід віднести необхідність підбору параметрів елементів під один елемент. Тобто, якщо задаємося параметрами іоністора, під нього слід підібрати стартер з певним активним опором, з певною індуктивністю та моментом. На практиці це реалізувати складно, а виготовляти стартер з окремими характеристиками під іоністор економічно не вигідно. Або навпаки, задаємося параметрами стартера і під них підганяємо іоністор, також складно. В випадку ж коли будуть поставлені жорсткі вимоги по надійності пуску, та ваго габаритним показникам, подібний підхід становиться виправданим.

До обмежень слід також віднести припущення стосовно роботи магнітної системи в ненасиченому стані. Вартість та масо-габаритні показники двигунів, що працюють на лінійній характеристиці петлі гістерезису, вища в порівнянні з тими, де осереддя працює в насиченому стані. Описати роботу стартера при використанні нелінійної ділянки петлі гістерезису поки що не вдається.

Подальше дослідження іоністорного запуску слід зосередити на формуванні оптимального закону зміни електромагнітного моменту стартера. Акумуляторна батарея не дає можливості варіювати цим параметром. Іоністорний пуск може формувати обертовий момент від імпульсного наприклад, при низьких температурах, до плавно зростаючого, при високих температурах, при незмінній накопиченій енергії. Доцільно таким чином підібрати параметри, щоб в випадку першого невдалого пуску, запасу енергії вистачало на декілька послідовних пусків, з зміною форми динамічного електромагнітного моменту, враховуючи попередню історію процесу.

7. Висновки

1. Знаючи закон зміни струму в часі, при нерухомому роторі, та враховуючи час, коли електромагнітним момент зрівняється з моментом опору колінчатого валу дизеля, отримуємо можливість впливати на початок процесу пуску. В залежності від конкретної ситуації, можемо варіювати енергією, що надходить до стартера. Для “жорсткого” пуску треба зробити затримку в часі, накопити

енергію в індуктивних елементах і організувати ударний електромагнітний момент. Або використовуючи ту ж енергію, треба розподілити її “плавно” на інтервалі часу – отримуємо електромагнітний момент, що змінюється відносно “м’яко” на інтервалі пуску. Такі аспекти доцільно враховувати в залежності від властивостей того чи іншого дизеля та температури оточуючого середовища.

2. Поєднання електромагнітних і електромеханічних процесів пуску стартера, дозволяє оцінювати вплив того чи іншого параметра на характер розвитку процесу в цілому. Важливим показником при запуску холодного дизеля є мінімальні оберти, при яких відбувається займання суміші. Мінімум допустимі оберти істотно зростають по мірі зменшення температури оточуючого середовища. Користуючись результатами рішення можна скомпонувати характер зміни максимуму швидкості – більш крутий пік і менший інтервал часу чи навпаки, при однаковій кількості енергії.

Література

1. Morgos, J., Frivaldsky, M., Hanko, B., Drgona, P. (2019). Start-up power supply for automotive applications. *Transportation Research Procedia*, 40, 397–404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.058>
2. Yuhimenko, V., Averbukh, M., Agranovich, G., Kuperman, A. (2014). Dynamics of supercapacitor bank with uncontrolled active balancer for engine starting. *Energy Conversion and Management*, 88, 106–112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.033>
3. Kouchachvili, L., Yaïci, W., Entchev, E. (2018). Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237–248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>
4. Boccaletti, C., Elia, S., Salas M, E. F., Pasquali, M. (2020). High reliability storage systems for genset cranking. *Journal of Energy Storage*, 29, 101336. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101336>
5. Dell, R. M., Moseley, P. T., Rand, D. A. J. (2014). Batteries and Supercapacitors for Use in Road Vehicles. *Towards Sustainable Road Transport*, 217–259. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404616-0.00007-4>
6. Pipitone, E., Vitale, G. (2020). A regenerative braking system for internal combustion engine vehicles using supercapacitors as energy storage elements - Part 1: System analysis and modelling. *Journal of Power Sources*, 448, 227368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227368>
7. Ouyang, M., Zhang, W., Wang, E., Yang, F., Li, J., Li, Z. et. al. (2015). Performance analysis of a novel coaxial power-split hybrid powertrain using a CNG engine and supercapacitors. *Applied Energy*, 157, 595–606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.086>
8. Saw, L. H., Poon, H. M., Chong, W. T., Wang, C.-T., Yew, M. C., Yew, M. K., Ng, T. C. (2019). Numerical modeling of hybrid supercapacitor battery energy storage system for electric vehicles. *Energy Procedia*, 158, 2750–2755. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.033>

9. Rahman, A. U., Ahmad, I., Malik, A. S. (2020). Variable structure-based control of fuel cell-supercapacitor-battery based hybrid electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 29, 101365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101365>
10. Yin, C., Wu, H., Locment, F., Sechilariu, M. (2017). Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor. *Energy Conversion and Management*, 132, 14–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.018>

Not a reprint