

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**ЛОВЕЙКІН В.С.  
ПОЧКА К.І.**

**ДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ  
КУЛАЧКОВОГО ПРИВОДУ МАШИН  
РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ**

МОНОГРАФІЯ

Київ – 2016

УДК 693.546  
Л68

Публікується за рішенням Вчених рад Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 10 від 30.03.2016р.) та Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол № 41 від 26.02.2016р.)

Рецензенти: **Назаренко І.І.**, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури

**Кузьмінець М.П.**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерної і комп'ютерної графіки та дизайну Національного транспортного університету

**Зайченко С.В.**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

**Ловейкін В.С., Почка К.І.**

Л68 Динамічна оптимізація кулачкового приводу машин роликового формування. Монографія. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 177 с.

Монографія написана на основі досліджень авторів режимів руху роликової формувальної установки з кулачковим приводним механізмом для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка. У ній наведено аналіз режимів руху кулачкових механізмів, запропоновано методику синтезу оптимальних режимів руху, яка дозволяє отримати будь-які режими, що відображають ті або інші властивості кулачкового механізму. Розраховано оптимальні режими руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого, проведено оптимізацію режиму реверсування та здійснено оптимізацію крайових умов.

Призначена для наукових та інженерно-технічних працівників, а також може бути корисна аспірантам, магістрам та студентам машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів.

## ВСТУП

Підвищення надійності робочих органів конструкцій машин для ущільнення виробів з бетонних сумішей та інших елементів, зниження металомісткості, покращення експлуатаційних показників, розширення функціонально-технічних можливостей є пріоритетним напрямком роботи з удосконалення існуючих та розробки нових бетоноформувальних машин.

В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність. Разом з тим, недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням, їхньому характеру зміни в часі та впливу на елементи приводу формувальних візків та на якість готової продукції.

В період роботи елементи роликових формувальних установок, а також елементи приводу перебувають під дією динамічних навантажень. Найбільші динамічні навантаження виникають при досягненні формувальними візками крайніх положень. Такі навантаження є явищем небажаним і відносяться до суттєвих факторів, що приводять до передчасного виходу установки з ладу.

В даній монографії з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки запропоновано конструкцію її приводу у вигляді кулачкового механізму для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка. Також запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з кулачковим приводним механізмом з обох боків формувального візка для унеможливлення його осьового перекошування, що в свою чергу приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшення динамічних навантажень в елементах приводу, зменшення зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до підвищення довговічності установки в цілому.

Для даної установки розраховано оптимальний динамічний режим руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього поло-

ження до іншого, оптимальний ривковий режим, оптимальний режим за прискоренням третього порядку та комплексний оптимальний режим руху.

Проведено розрахунки комбінованих режимів руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого з оптимальним динамічним, оптимальним ривковим та оптимальним за прискоренням третього порядку розгоном та гальмуванням.

Здійснено оптимізацію реверсування формувального візка роликів формувальної установки за оптимальним динамічним режимом руху, оптимальним ривковим режимом та оптимальним режимом за прискоренням третього порядку. Для оптимального ривкового режиму реверсування проведено оптимізацію крайових умов – встановлено оптимальне значення прискорення формувального візка при досягненні ним крайніх положень. При оптимальному режимі реверсування за прискоренням третього порядку визначено оптимальні значення прискорення та ривка формувального візка при досягненні ним крайніх положень.

На основі результатів досліджень для кожного з перерахованих режимів руху формувального візка роликів формувальної установки наведено вирази для визначення змінного радіуса кулачка та побудовано його профіль, які захищені патентами України на корисні моделі.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ

### 1.1. Огляд машин для виробництва плоских залізобетонних виробів

Бетонні роботи по своєму об'єму і вартості є основними в будівництві. Бетон як будівельний матеріал слугує основою для створення несучих конструкцій будівель і споруд. Це обґрунтовується його високими механічними характеристиками і технологічністю обробки. З бетону можливо виконати практично будь-які конструктивні елементи споруд, будь-якої конфігурації і призначення.

За останні десятиріччя в будівництві поряд з розвитком споруд з монолітного бетону все більше значення набуває збірний залізобетон [13, 20, 24, 25, 46, 106, 108...112, 114, 148], що виготовляється на підприємствах будіндустрії. Структура його виробництва така, що на формування виробів, а також на утримання і ремонт устаткування припадає близько 50% трудомісткості. У промисловості збірного і монолітного залізобетону відбувається процес старіння устаткування, що пояснюється відсутністю системи реалізації теоретичних розробок, втілених в інженерні вирішення.

Поширені два способи ущільнення будівельних сумішей – вібраційний і безвібраційний.

Вібраційна дія на бетонну суміш має велике практичне значення і лежить в основі всієї сучасної технології ущільнення сумішей [13, 15, 20, 24, 25, 46, 82, 90, 102, 105, 108...112, 114...117, 153, 161]. Сутність вібраційної дії полягає в тому, що при коливаннях бетонна суміш отримує властивості текучості внаслідок порушення зв'язків між частинками. Частинки, що отримують підвищену рухливість, переміщуються і під дією сил ваги прагнуть зайняти більш стійке положення. При цьому повітря, що знаходиться між частинками, витискується вгору і суміш, врешті, значно ущільнюється.

Процес віброуцільнення бетонної суміші має складний характер і проходить у кілька стадій: переукладання компонентів з інтенсивним витискуванням повітря, зближенням частинок і завершальним витискуванням повітря, а також можливим доуцільненням за рахунок деякого додаткового, наприклад статичного, тиску [46, 111, 112, 161]. Означена стадія має назву компресійного стиску і може здійснюватись як під час вібрування суміші, так і по завершенні процесу вібраційної дії. У першому випадку позитивний ефект підвищення густини і міцності бетону досягається невеликим статичним тиском впродовж кількох хвилин. У другому випадку той самий ефект можна отримати лише завдяки значному питомому тиску у кілька мегапаскалей. В обох випадках ефект досягається внаслідок часткового стиску і більш рівномірного розподілу води, яка знаходиться в порах, а також ущільнення контактів між зернами заповнювачів.

Оскільки процес вібраційної дії є знакозмінним, деформація, що приводить до ущільнення шарів суміші, може бути і зворотною, яка сприяє розшаруванню і порушенню ущільненої структури [20, 24, 111, 112]. Тому на процес ущільнення впливає також характер навантаження з боку робочого органу машини.

Вібраційні машини через свої функціональні особливості є джерелами коливань. Означені коливання можуть передаватися на фундамент, опорну конструкцію і на людину, яка працює з вібромашиною. Остання створює не комфортні умови на робочих місцях, підвищує рівень шуму і затуляє у коливання несучі металоконструкції машин, споруд тощо.

Санітарно-гігієнічні норми передбачають і нормують випадки передачі вібрації на руки працівника і на його робоче місце. При створенні віброізолюючих пристроїв, які захищають людину на робочому місці, користуються нормативами державних стандартів [51].

Безвібраційний спосіб ущільнення сумішей заснований на застосуванні тиску на суміш, що перебуває у формі або у спеціальній формувальній порожнині [4, 8...10,13, 16, 20, 24, 27, 112, 147, 154, 157...160]. Принципова відмін-

ність безвібраційного способу ущільнення сумішей від вібраційного способу полягає в тому, що переміщення частинок матеріалу відбувається головним чином в напрямі прикладеного тиску. За такої дії фактично не проявляється поперечне макропереміщення частинок у формі.

Означений спосіб застосовується для виробництва деяких будівельних виробів і матеріалів (плит, панелей, залізобетонних труб, бетонних порожнистих блоків, шлакоблоків, цеглин тощо).

Безвібраційні способи ущільнення суміші поділяють на статичні і динамічні. До статичних належать пресування, прокат, екструзія, вакуумування, до динамічних – пневматичний і механічний набризки. Такий поділ певною мірою є умовним, оскільки все залежить від швидкості прикладання сил і фізико-механічних властивостей матеріалу, що підлягає ущільненню.

Для виробництва невеликих плит, каменів, цегли застосовують метод статичного пресування, часом він поєднується з вібраційним способом; для виробництва труб застосовують центрифуги, де внаслідок обертання форми суміш стискується вібровідцентровими силами. Можливе і радіальне пресування за допомогою роликів, які обертаються і притискають суміш до форми, а при їх підйманні здійснюється загладжування коротким циліндром.

Роликове пресування характерне тим, що відбувається багаторазове вдавлення в свіжоукладений шар нових порцій суміші-підсипки під роликом, який здійснює зворотно-поступальні рухи поперек форми.

Особливість роликового процесу пресування полягає в наявності підсипки під роликом, що має назву язика, тобто зростає щільність виробу завдяки стиску матеріалу під роликом і обмеженому просторі [21, 22, 26...30, 40...45, 47, 59, 75, 89, 147, 149...152]. Процес роликового пресування досить складний. Спочатку до рівня бортів частина форми під роликом заповнюється крихкою сумішшю. Ущільнення відбувається з того моменту, коли поверхня ролика починає взаємодіяти із сумішшю. За кожний прохід ролик втискує шар підсипки в уже нижче розташовані шари. При цьому щільність виробу, розміщеного під робочим органом, зростає по його товщині.

Аналіз сучасного стану обладнання свідчить, що фактори, які дозволяють істотно підвищити його ефективність, значною мірою вичерпані, а галузь потребує подальшої інтенсифікації виробництва. З огляду на це становище, варті уваги методи виробництва залізобетонних виробів безперервним формуванням бетоноформувальними агрегатами, в основу роботи яких покладені принципи поверхневої дії.

Досвід формування на довгих стендах набув поширення за кордоном. Роботи по створенню вітчизняних агрегатів для безперервного формування збірного залізобетону вібраційним і безвібраційним (роликотим) методами ведуться у Київському національному університеті будівництва та архітектури [1...3, 20...24, 26...30, 40, 52, 86, 88, 90, 100...102, 113, 118, 119, 150, 151].

Перевірка досвідом підтвердила доцільність застосування роликотих машин для виготовлення виробів з керамзитобетону. Незважаючи на позитивні результати експлуатації поверхневих вібраційних і безвібраційних (роликотих) машин та економічні розрахунки, що підтверджують їх ефективність, вітчизняна промисловість не налагодила їх серійного випуску, що пояснюється організаційними та науково-технічними недосконаlostями.

Аналіз існуючої технічної та економічної інформації, досвід промислових та лабораторних досліджень дозволяє стверджувати, що розрахунок, проектування та створення нових бетоноформувальних агрегатів є актуальними та перспективними на сучасному етапі їх використання.

Розвиток теорії і практики процесів ущільнення ґрунту та будівельних сумішей і, в тому числі, бетону базується на дослідженнях Десова А.Е., Ахвердова І.Н., Гусєва Б.В., Шмигальського В.Н., Чубука Ю.Ф., Назаренка І.І., Холодова А.М., Калужського Я.А., Баладінського В.Л., Сівка В.Й., Маслова О.Г., Яковенка В.Б., Русанової Н.Г., Файвусовича О.А., Савинова О.А., Гарнеця В.М., Рюшина В.Т., Човнюка Ю.В., Омельченка В.А., Свідерського А.Т., Баранова Ю.О., Кузьмінця М.П. та ін.

Результати досліджень безвібраційних методів, в тому числі роликотого ущільнення, отримані в роботах Руденка І.Ф., Хархути М.Я., Заїки П.М.,



Захаренка А.В., Бабкова В.Ф., Ємельянової І.А., Гарнеця В.М., Ловейкіна В.С., Рюшина В.Т., Зайченка С.В., Кузіна В.М., Шинкаренка В.І., Лавріньова П.Г. та інших дозволили зробити висновок про їхню достатньо високу ефективність і досить обґрунтовано підійти до задачі удосконалення приводного механізму машин роликового формування.

## **1.2. Аналіз конструкцій і параметрів машин роликового формування плоских залізобетонних виробів**

Підприємства будівельної індустрії мають суттєвий недолік, що стримує підвищення ефективності їх роботи. Він полягає в прийнятій на більшості підприємств вібраційної технології виробництва збірного залізобетону, за якою виготовляється більше 80% виробів. Незважаючи на постійне удосконалення вібраційного обладнання, при цій технології досі неможливо позбавитися підвищеного рівня шуму та вібрації на робочих місцях, що створює шкідливі умови праці. Безвібраційні методи формування не тільки усувають недоліки вібраційної технології, але й відкривають нові можливості підвищення продуктивності праці, зниження металомісткості обладнання. До таких способів відноситься метод роликового формування [20, 24, 26...30, 59, 114, 149...151] деяких видів виробів із жорстких та наджорстких дрібнозернистих (піскуватих) та середньозернистих бетонів, фібробетону та керамзитобетону, який був успішно випробуваний у виробництві.

Впровадження безвібраційних роликових машин у виробництво залізобетонних виробів зумовлене потребою у підвищенні ефективності формувального обладнання [20, 24, 112, 150].

Суть методу роликового формування [20, 22, 24, 27, 112, 150] полягає в тому, що жорстко фіксований в напрямних руху укочувальний ролик здійснює зворотно-поступальне перекочування з поступальною швидкістю руху його центра мас упоперек форми, у якій здійснюється ущільнення бетонної

суміші. Ролик фіксується по висоті у відповідному положенні в залежності від товщини виробу, що формується. Разом з роликом переміщується і бункер, що охоплює ролик своїми рукавами, через які безперервно підсипається бетонна суміш в зону контакту ролика з виробом.

Процес ущільнення відбувається наступним чином [20, 26...30, 40, 59, 86, 149...151]. Спочатку пухка суміш заповнює до рівня бортів частину порожнини форми, що розташована під роликом. Ущільнення починається з того моменту, коли верхня поверхня суміші починає взаємодіяти з поверхнею ролика, тобто коли висота шару бетонної суміші починає перевищувати відстань від дна форми до нижньої твірної ролика. За кожний прохід робочий орган (ролик) вдавлює нові порції суміші-підсипки у свіжоукладений шар. При цьому щільність виробу, розташованого під робочим органом, зростає по його товщині. По мірі зростання щільності відбувається видавлювання ущільнюваної суміші в сторону незаповненої порожнини форми. Об'єм видавлюваної суміші у вільну порожнину форми збільшується до тих пір, поки не настане рівновага сил видавлювання суміші з-під ролика та сил опору переміщенню бетонної суміші в сторону незаповненої порожнини форми. видавлювання суміші з-під ролика в бік уже ущільненої суміші не відбувається, тому що цьому перешкоджає загладжувальна плита.

Таким чином, особливість роликового формування бетонних сумішей базується в зростанні щільності виробу за рахунок примусового вдавлювання додаткового матеріалу в обмежений простір форми. Якісне ущільнення бетонних сумішей при такому формуванні залежить від того, наскільки вірно вибрана конструкція роликової машини та режим руху її робочого органа.

Установка для безвібраційного роликового формування залізобетонних виробів представлена на рис. 1.1 [20, 24]. Тут портал 1 розміщений стаціонарно на посту формування із напрямними руху 2 у середині. По них пересувається робочий орган, виконаний у вигляді роздавального бункера 8 і розміщених між його рукавами 5 ущільнювальних роликів 4. Зворотно-поступальний рух органу забезпечує гідроциліндр 7, який працює від силової гідростанції 6.

Бетонна суміш до роздавального бункера надходить із основного бункера. Форма-піддон 9 встановлюється так, щоб передній край роликів знаходився на одній лінії із внутрішньою поверхнею переднього торцевого борта. Після цього розпочинається переміщення робочого органу і відкривається заслінка роздавального бункера. Суміш заповнює порожнину форми до нижньої твірної роликів і вони починають вдавлювати нові надходження суміші до свіжоукладеного шару – починається процес ущільнення. При досягненні певної щільності (тиску) суміш починає відтискатися до вільної порожнини форми, утворюється так званий “язик”. Коли зростання його стабілізується (процес ущільнення на початковому етапі закінчився), починається переміщення форми, відбувається послідовне ущільнення всього виробу. Швидкості переміщення форми і робочого органу узгоджуються для забезпечення якісного ущільнення виробів заданої товщини.

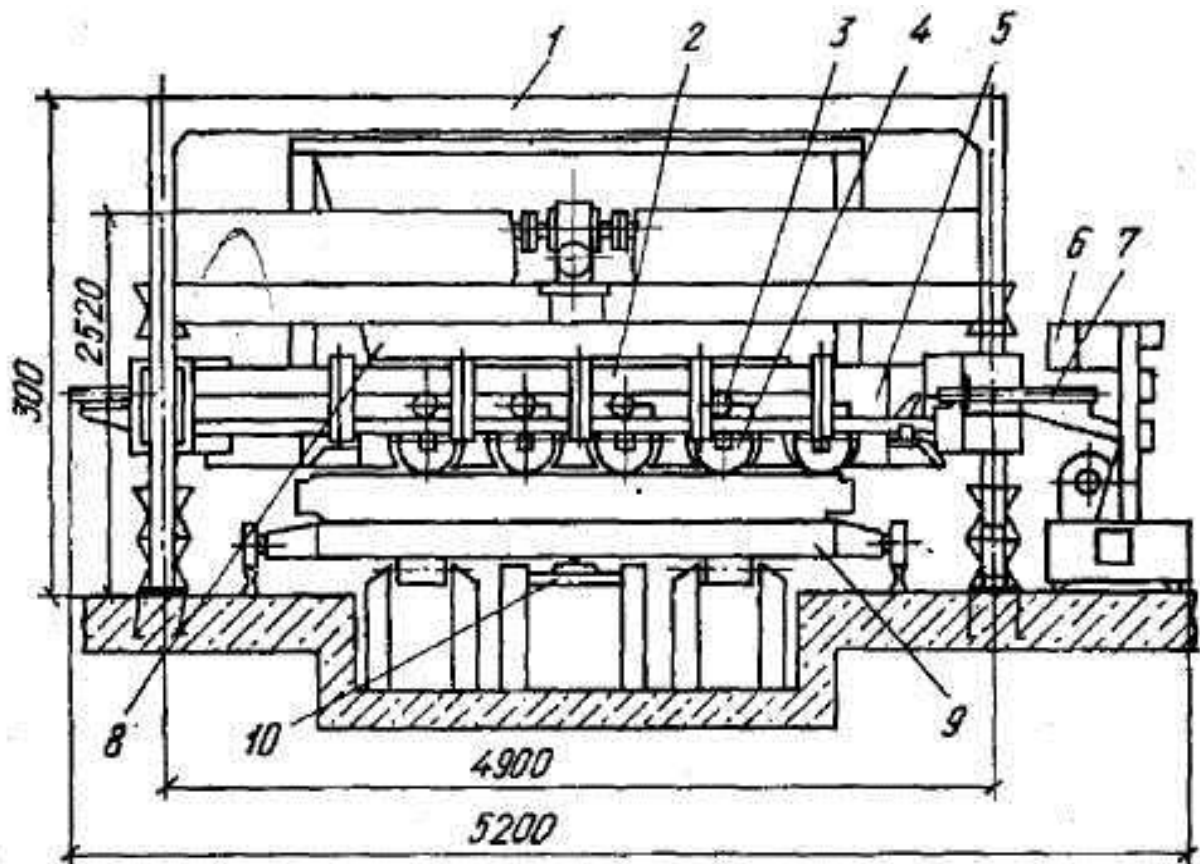


Рис. 1.1. Конструкція безвібраційної роликів формувальної установки

Технічна характеристика роlikової формувальної установки для  
виготовлення плоских залізобетонних виробів  
із гідравлічним приводом робочого візка

Продуктивність за виробами максимального розміру, шт./год .....	14
Швидкість переміщення робочого візка, м/с .....	0,45
Швидкість переміщення форми, м/хв .....	1...1,15
Маса установки, кг .....	5100

У порівнянні з іншими формувальними машинами роlikова формувальна установка значно поліпшує санітарно-гігієнічні умови праці на посту формування, ліквідує вібрацію, знижує до мінімального рівня шум, при цьому формує жорсткі та наджорсткі суміші, котрі неможливо формувати іншими машинами. Відсутність вібраційних навантажень значно підвищує надійність складальних одиниць машини.

Для визначення потужності приводу та динамічних характеристик роlikової установки для формування залізобетонних виробів необхідно знайти шляхом інженерного розрахунку параметри установки та залежності сили опору переміщенню формувального візка, а також необхідного крутного моменту на приводному валу кривошипа.

В основу інженерної методики розрахунку параметрів роlikових БФА для виробництва залізобетонних виробів покладено результати експериментальних та теоретичних досліджень, проведених для машин роlikового формування пустотних панелей [21, 40], а також використані матеріали з роlikового формування суцільних виробів [20, 24, 26...30, 59, 150, 151].

Розроблена методика дозволяє проектувати нові роlikові бетоноформувальні агрегати з широким діапазоном використання для виробництва як пустотних панелей, так і суцільних залізобетонних виробів. Запропонована методика сприяє визначенню практично всіх необхідних даних для проектування, а також дає можливість підвищити точність визначення параметрів робочих органів і бетоноформувальних агрегатів в цілому.

Для визначення опору переміщенню формувального візка використовуються наступні вихідні дані [150]:

- розміри виробу, що формується: висота плити —  $h_0$ , ширина виробу —  $B$ ;
- тип суміші, що ущільнюється;
- вологість бетонної суміші —  $W$ ;
- потрібна щільність виробу —  $k_{yц}$ ;
- величина максимального контактного тиску  $q$ , що забезпечує потрібну щільність виробу  $k_{yц}$  при вологості суміші  $W$ .

Виходячи з товщини виробу, що формується, визначається мінімально допустимий радіус робочого органу [150]:

$$R = (0,4...0,55) \cdot h_0, \quad (1.1)$$

де  $h_0$  — висота виробу.

Необхідна кількість ущільнювальних роликів визначається в залежності від радіуса ролика та від конструктивних параметрів установки:

$$n_p = \frac{B}{2 \cdot R + B_r + b_n}, \quad (1.2)$$

де  $B$  — ширина виробу;  $b_n$  — величина перекриття ущільненої суміші сусіднім роликом (з метою виключення недоущільнення на стику між зонами ущільнення двох сусідніх роликів);  $B_r$  — ширина вихідного рукава живильного бункера.

Довжина ходу формувального візка визначається залежністю:

$$l_s = \frac{B}{n_p} + b_n. \quad (1.3)$$

Визначається також коефіцієнт  $\theta$ , що характеризує розподілення епюри контактної тиску вздовж дуги контакту:

$$\theta = \frac{1}{\pi} \cdot \arctg \frac{2 - 2 \cdot \nu}{\mu \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}, \quad (1.4)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\mu$  – коефіцієнт тертя робочого органу об бетонну суміш.

Кут захвату бетонної суміші робочим органом:

$$\varphi_3 = \arcsin \frac{7,53 \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot (1 - \theta)^{\theta+1} \cdot \theta^{1-\theta}}{E}, \quad (1.5)$$

де  $E$  – модуль пружності бетонної суміші.

Зусилля взаємодії ролика з бетонною сумішшю [150]:

$$F = \frac{k_2 \cdot L \cdot E \cdot R \cdot \sin^2 \varphi_6}{20,32 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \theta \cdot (1 - \theta)^3}, \quad (1.6)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу тиску по дузі контакту;  $L$  – довжина робочого органу (ролика).

Розрахункова довжина контакту ролика з ущільнюваним середовищем по дузі кола ролика:

$$l_p = \frac{R \cdot \sin \varphi_6}{1 - \theta}. \quad (1.7)$$

Зусилля, необхідне для на переміщення ролика при русі його по бетонній суміші, що ущільнюється:

$$F_p = \frac{1 - 2 \cdot \theta}{3 \cdot R} \cdot (2 \cdot l_p + 3 \cdot \mu \cdot R) \cdot F. \quad (1.8)$$

Зусилля, необхідне на переміщення формувального візка [150]:

$$F_B = \left[ |G_B - n_p \cdot F| \cdot \left( \frac{d \cdot \mu_3}{D} + \frac{2 \cdot \mu_4}{d} \right) \right] \cdot \mu_5 + n_p \cdot F_p, \quad (1.9)$$

де  $G_B$  – сила тяжіння формувального візка,  $D$  – діаметр напрямного ролика,  $d$  – діаметр цапфи,  $\mu_3$  – коефіцієнт тертя ковзання втулки об цапфу,  $\mu_4$  – коефіцієнт тертя кочення напрямних роликів по напрямним руху,  $\mu_5$  – коефіцієнт, що враховує додатковий опір тертя ребер напрямних роликів візка по напрямним руху.

Миттєва потужність на ущільнення бетонної суміші:

$$P_{\text{щ}} = F_B \cdot V_B, \quad (1.10)$$

де  $V_B$  — швидкість переміщення формувального візка.

### 1.3. Огляд приводів машин роликового формування

В існуючих установках поверхневого ущільнення залізобетонних виробів використовується кривошипно-повзунний, пневматичний або гідравлічний привод зворотно-поступального руху формувального візка з укочувальними роликами. В установках з пневматичним та гідравлічним приводами формувальний візок приводиться в рух за допомогою пневмоциліндра або гідроциліндра, а в установках з механічним приводом – за допомогою кривошипно-повзунного механізму.

Відомий пристрій для формування виробів з бетонних сумішей (авторське свідоцтво СРСР 1604625, кл. В28В13/02, 1990) [2], який складається з порталу 1 (рис. 1.2), змонтованого на ньому формувального візка 2, що здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних 3 і складається з подавального бункера 4, секцій укочувальних роликів 5, встановлених в горизонтально-рухомій рамі з розподільним бункером та форми 8. Формувальний візок приводиться в рух за допомогою гідроциліндра 6, а для зм'якшення ударів при досягненні візка крайніх положень і для підвищення плавності ходу візка між порталом і горизонтально-рухомою рамою встановлені попередньо стиснені пружні елементи 7.

Недоліком даного приводного механізму є його недосконалість, що призводить до підвищення витрат енергії на розтягування і стискання пружних елементів при здійсненні процесу формування, а також досить мала частота проходжень формувального візка по бетонній суміші, що приводить до зниження продуктивності. При зворотно-поступальному русі формувального візка з укочувальними роликами під час постійних пускогальмівних режимів руху втрачається значна частина енергії, яка йде на втомлене руйнування конструкції.

Для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка також використовується кривошипно-повзунний привод. На рис. 1.3 зображено роликову формувальну установку з кривошипно-повзунним приводом,

що складається з формувального візка 1, шарнірно приєднаного до нього шатуна 2, який іншим кінцем з'єднується з кривошипом 3, що жорстко закріплений на валу 4. Формувальний візок 1 з подавальним бункером 8 та укочувальними роликами 7 вмонтований в порталі 6 на напрямних 5.

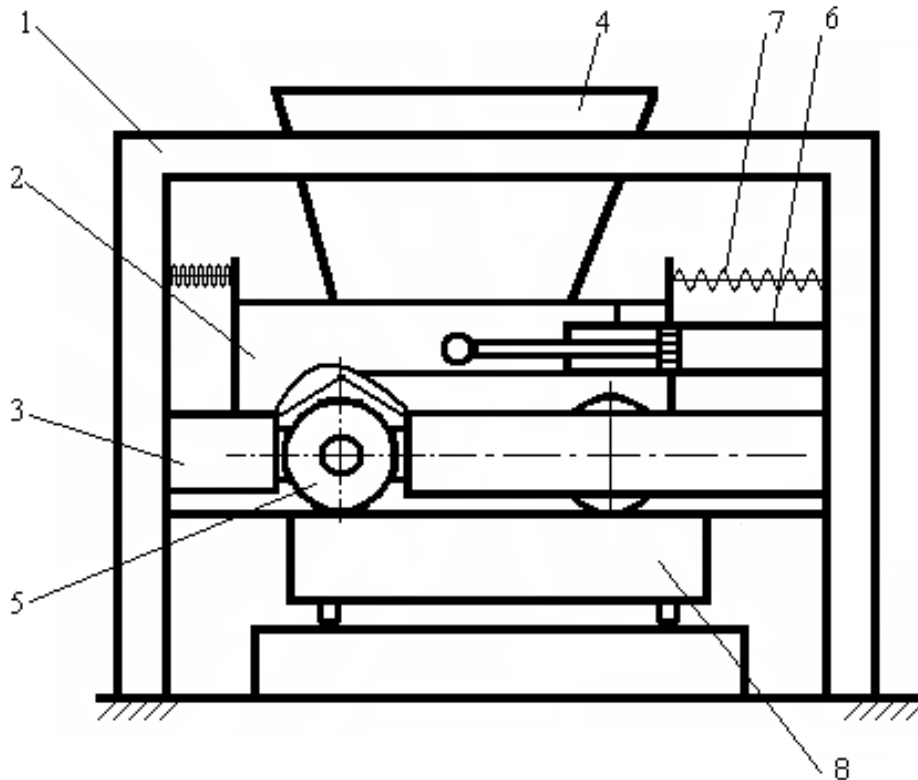


Рис. 1.2. Роликова формувальна установка з гідравлічним приводом зворотно-поступального руху формувального візка

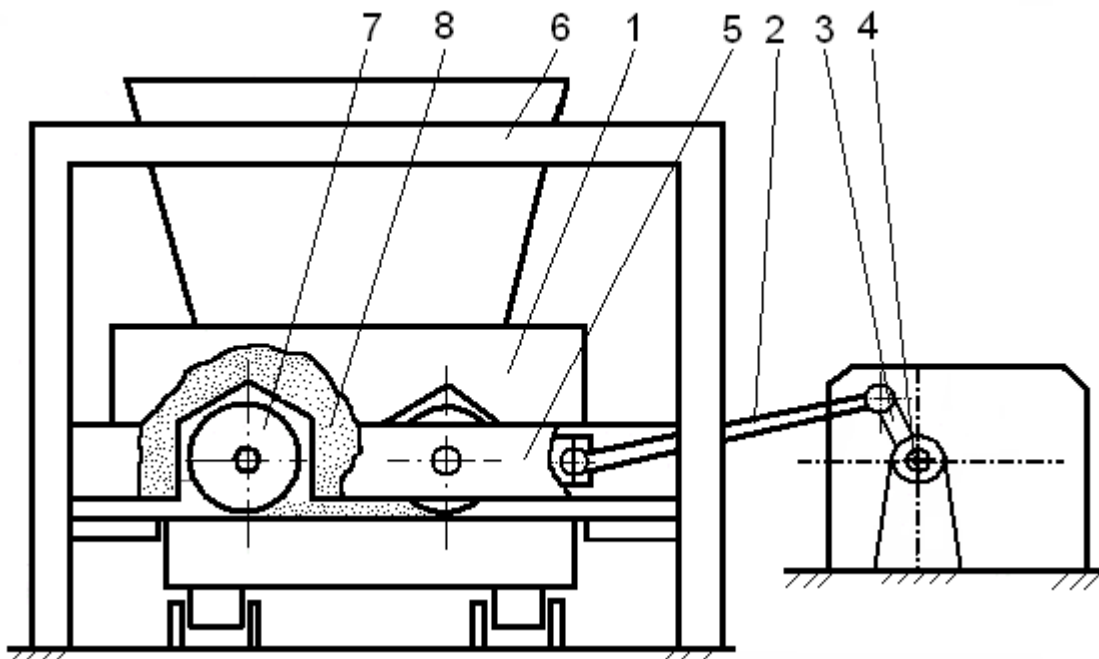


Рис. 1.3. Роликова формувальна установка з кривошипно-повзунним приводом зворотно-поступального руху формувального візка



Недоліком кривошипно-повзунного приводу зворотно-поступального руху формувального візка є значна нерівномірність його руху, що приводить до підвищення динамічних навантажень в елементах приводного механізму та установки в цілому і, як наслідок, до зниження якості готової продукції та передчасного виходу установки з ладу.

На рис. 1.4 представлено роликову формувальну установку з рекупераційним приводом, яка складається з двох спарених візків [120], що приводяться в зворотно-поступальний рух від єдиного приводу, до складу якого входять два кривошипно-повзунні механізми, кривошипи яких жорстко закріплені на одному приводному валу і зміщені між собою на кут  $\pi/2$ . Установка вміщує в собі два пристрої, що розташовані по різні боки відносно приводного вала. Кожний із пристроїв вміщує в собі змонтовані на порталах 9 та 10 формувальні візки 1 та 2, які здійснюють зворотно-поступальний рух в напрямних. Візок 1 складається з подавального бункера 11 та із співвісних секцій уочувальних роликів 12, встановлених в горизонтально-рухомій рамі 8 з розподільчим бункером. Таку ж конструкцію має і другий формувальний візок. Візки 1 та 2 з розподільчими бункерами приводяться в зворотно-поступальний рух за допомогою єдиного приводу, виконаного у вигляді кривошипно-повзунного механізму. Кривошипи 3 та 4 жорстко закріплені на приводному валу 5, зміщені між собою на кут  $\pi/2$  та з'єднані з шатунами 6 і 7, а шатуни в свою чергу з'єднані з візками 1 і 2 відповідно.

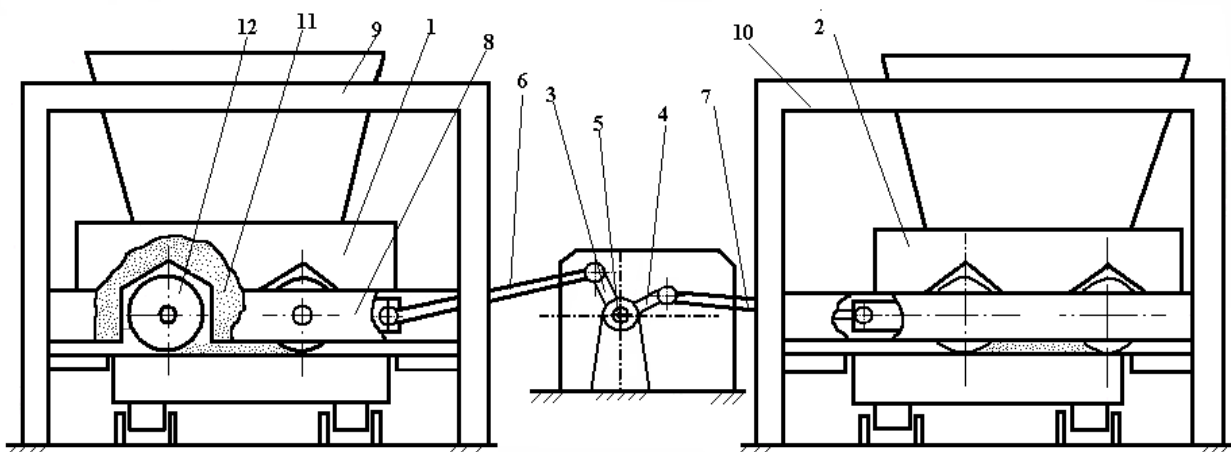


Рис. 1.4. Роликова формувальна установка з рекупераційним приводом

Така конструкція формувальної установки дозволяє здійснювати передачу енергії від одного візка, який здійснює процес гальмування, до другого, який в цей момент здійснює процес розгону. Для забезпечення ущільнення залізобетонних виробів на одній технологічній лінії запропоновано конструкцію установки [122] з розташуванням формувальних візків паралельно між собою з однієї сторони приводного валу з використанням вказаного вище приводного механізму (рис. 1.5, а). На рис. 1.5, б зображено кінематичну схему роликів формувальної установки з рекуперативним приводом для формування залізобетонних виробів на одній технологічній лінії.

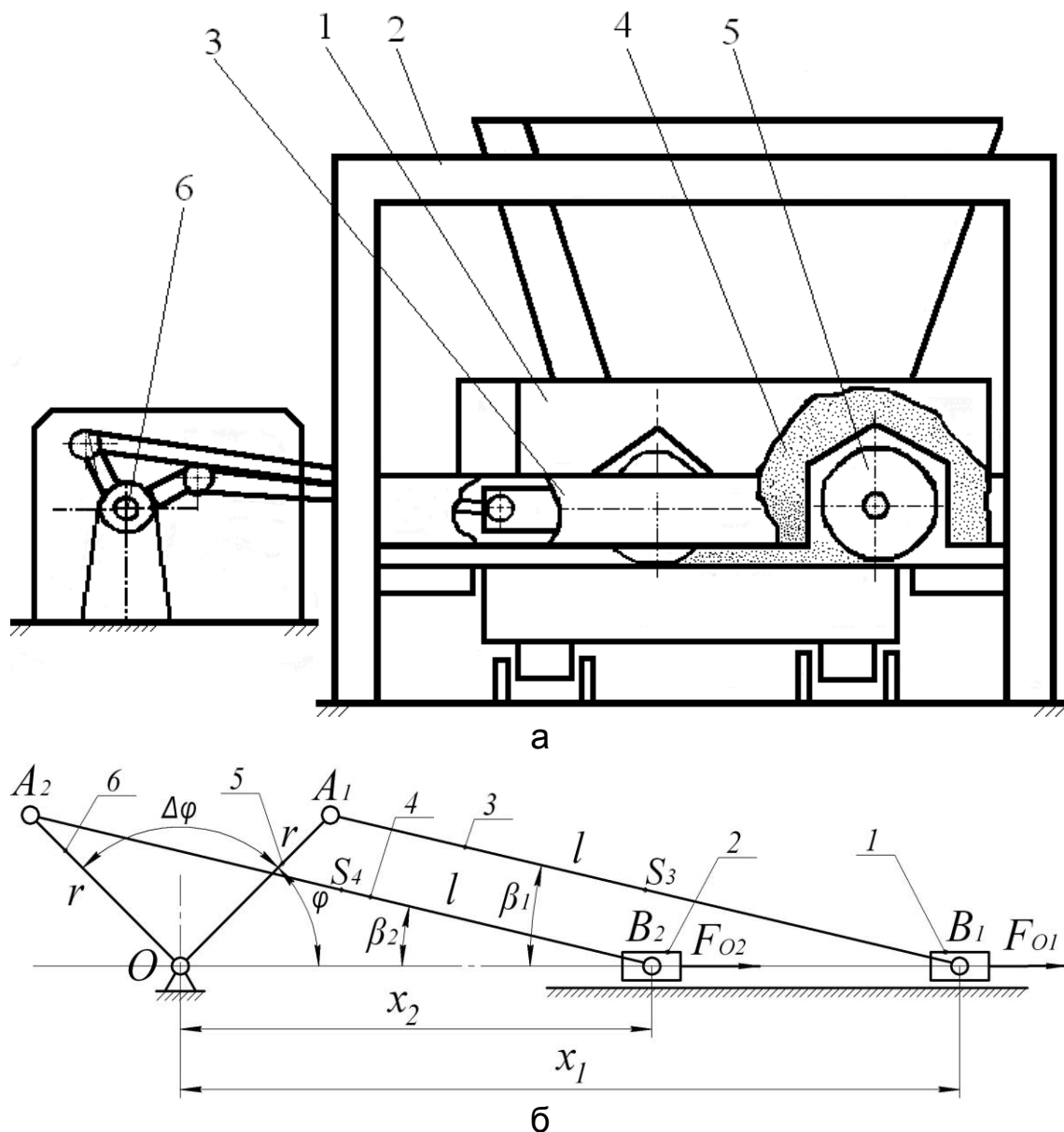


Рис. 1.5. Роликів формувальна установка з рекуперативним приводом для формування залізобетонних виробів на одній технологічній лінії (а) та її кінематична схема (б)

На рис. 1.6, а представлено роликову формувальну установку з енергетично врівноваженим приводом, яка складається з нерухомого порталу та трьох формувальних візків, що виконані з можливістю приведення в зворотно-поступальний рух від спільного привода з трьома кривошипно-повзунними механізмами, кривошипи яких жорстко закріплені на одному приводному валу і зміщені один відносно іншого на кут  $\Delta\varphi = 120^\circ$  [136]. Всі формувальні пристрої розташовані паралельно між собою з одного боку приводного вала для забезпечення ущільнення бетонної суміші на одній технологічній лінії. На рис. 1.6, б представлено кінематичну схему роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом.

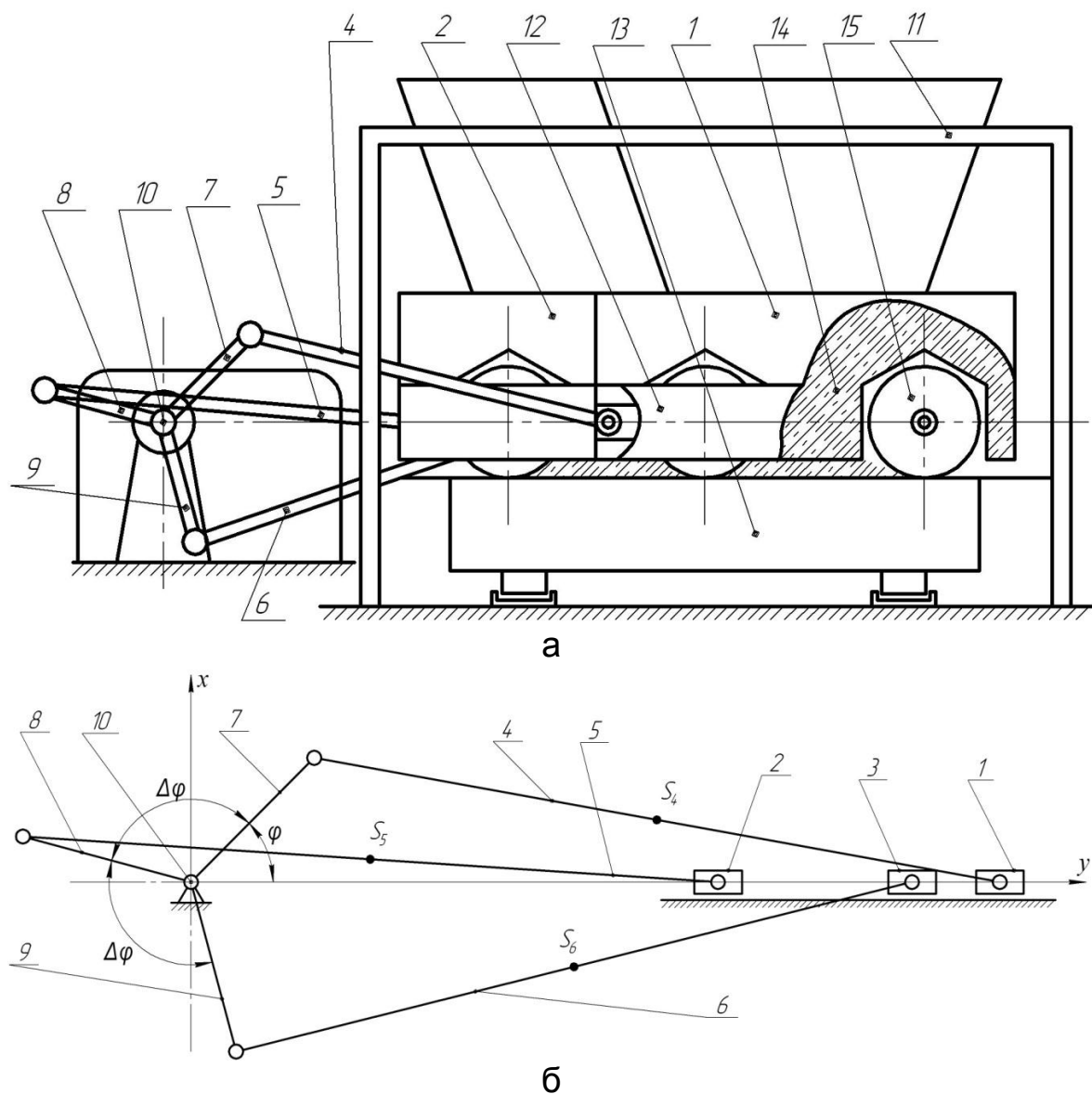


Рис. 1.6. Роликова формувальна установка з енергетично врівноваженим приводом (а) та її кінематична схема (б)

На рис. 1.7, а представлено роликову формувальну установку з врівноваженим приводом, яка складається з нерухомого порталу та чотирьох формувальних візків, що виконані з можливістю приведення в зворотно-поступальний рух від спільного привода з чотирма кривошипно-повзунними механізмами, кривошипи яких жорстко закріплені на одному приводному валу і зміщені один відносно іншого на кут  $\Delta\varphi = 90^\circ$  [124, 135]. Всі формувальні пристрої розташовані паралельно між собою з одного боку приводного вала для забезпечення ущільнення бетонної суміші на одній технологічній лінії. На рис. 1.7, б представлено кінематичну схему роликової формувальної установки з врівноваженим приводом.

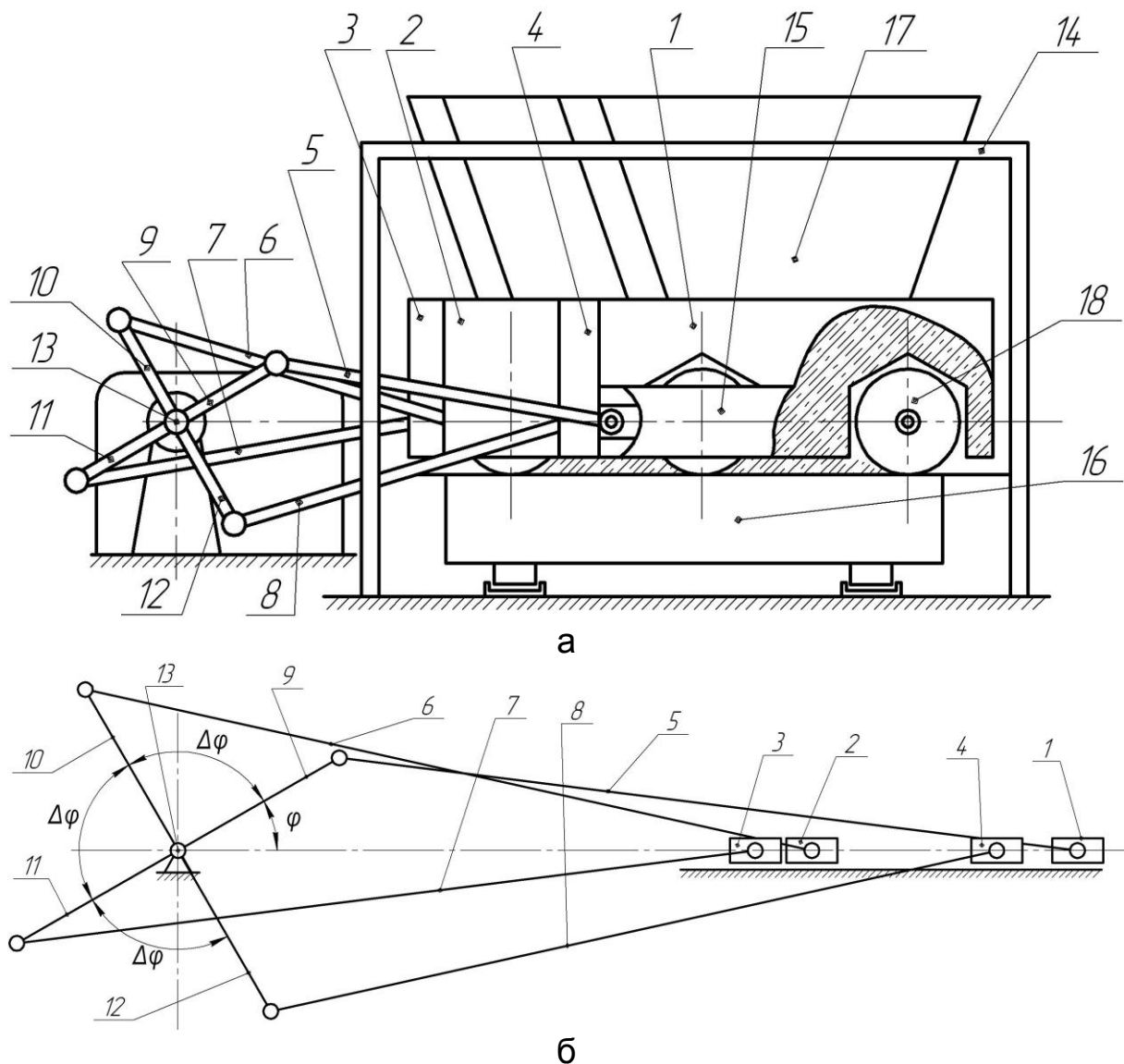


Рис. 1.7. Роликова формувальна установка з врівноваженим приводом (а) та її кінематична схема (б)

Недоліком установок з наведеними приводами (рис. 1.4-1.7) є наявність в них нерівномірності руху формувальних візків під час виконання процесу ущільнення бетонної суміші [62...65, 67...70, 74, 83, 85, 87, 93...95], що приводить до зниження якості виробу та виникненню значних динамічних навантажень на елементи приводу та конструкції установки.

Для зменшення нерівномірності руху формувального візка була розроблена конструкція гідравлічного приводу роликів формувальної установки [61, 126], яка дає можливість реалізувати будь-який режим руху формувального візка (рис. 1.8). Різні режими руху формувального візка забезпечуються гідроприводом з дросельним шляховим керуванням подачі робочої рідини у виконавчий гідроциліндр.

Гідропривод переміщення формувального візка 2 складається з приводного гідроциліндра 7, шток 8 якого шарнірно з'єднаний з рамою формувального візка 6. Формувальний візок в нижній своїй частині має уковувальні ролики 5, що переміщуються в напрямній 3 змонтованій на рамі 1. Під роликами знаходиться форма 19, яка переміщується перпендикулярно до напрямку руху формувального візка і поступово заповнюється бетонною сумішшю, що потрапляє з бункеру 4.

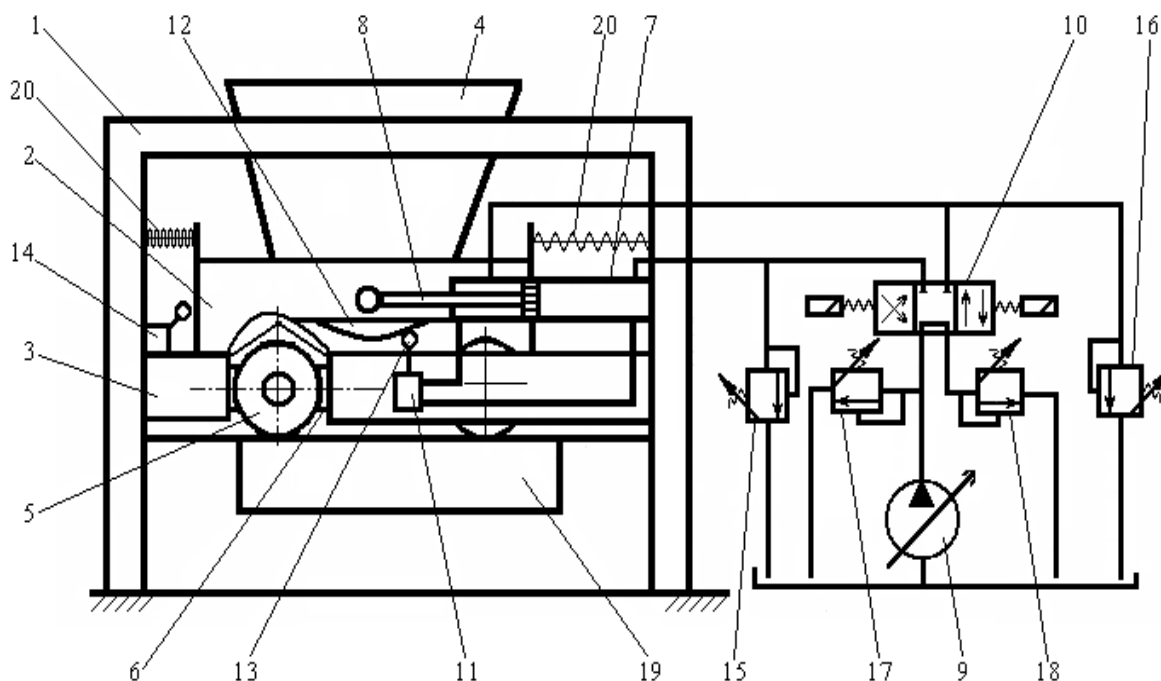


Рис. 1.8. Роликів формувальна установка з керованим гідроприводом

При роботі установки робоча рідина від насоса 9 через реверсивний золотник 10 з електромагнітним керуванням надходить в безштокову порожнину гідроциліндра 7, після чого починається рух поршня зі штоком 8. Паралельно циліндру на напрямній ролика 13 встановлений дросельний керуючий пристрій 11, що слідує за подачею робочої рідини з попередньо підібраним живим перерізом. Шток 8 приводить в рух формувальний візок 6, на якому встановлено кулачок 12 спеціального профілю, який контактує з дросельним керуючим пристроєм 11 через ролик 13. При здійсненні руху формувального візка, шток 8 переміщується і змінює живий переріз дросельного керуючого пристрою (дроселя) аж до його повного перекриття. Керуючий пристрій виконує подачу рідини до гідроциліндра за певним законом, що дає змогу забезпечити відповідну зміну швидкості та прискорення у часі.

Зміна напрямку руху візка досягається кінцевим вимикачем 14. Клапани 15, 16 і запобіжний з напірним клапани 17,18 виконують функцію забезпечення рівномірності роботи гідроприводу і запобігання перевантажень системи. Роль накопичувача енергії виконують пружні елементи 20, які при стиску чи розтягу поглинають або віддають накопичену енергію, що перетворюється в енергію руху формувального візка.

Застосування запропонованого гідроприводу порівняно з кривошипно-повзунним приводом дає змогу забезпечити необхідний закон руху візка та знизити витрати енергії на формування.

Однак в такій конструкції установки також є недолік, який полягає в тому, що відбувається перекошування формувального візка в напрямних руху, що значно впливає на якість формування залізобетонних виробів. Тому для усунення цього недоліку здійснено модернізацію конструкції приводу, згідно з якою в роликовій формувальній установці з керованим гідроприводом (рис. 1.8) для приводу формувального візка у зворотно-поступальний рух встановлено два паралельно підключених гідроциліндри двосторонньої дії з дросельним регулюванням швидкості переміщення робочої рідини з безштокової до штокової порожнини гідроциліндрів із зміною перепускної щілини

за допомогою роликового штовхача, контактуючого з профільованим кулачком, нерухомо закріпленим на формувальному візку [131].

На рис. 1.9 зображено гідроциліндри з дросельним керуючим пристроєм. При такій конструкції приводу робоча рідина при подачі до гідроциліндрів 2, змушує їх змінювати положення формувального візка 1. Гідроциліндри встановлені таким чином, що штокова порожнина одного гідроциліндра паралельно підключена до безштокової порожнини іншого, а безштокова відповідно до штокової. Це дає змогу забезпечити однакову швидкість при прямому та зворотному русі формувального візка. Паралельно до гідроциліндрів підключений регулюючий дросель 4, який виконує подачу рідини до гідроциліндрів за відповідним законом, що дає змогу забезпечити відповідний режим зміни швидкості та прискорення у часі. Застосування запропонованого гідроприводу порівняно з існуючими рішеннями дає змогу запобігти перекошуванню формувального візка в напрямних руху.

На рис. 1.10 зображену установку для формування виробів з бетонних сумішей [129], яка складається з формувального візка 1, що встановлений в напрямних руху 3 на нерухомому порталі 2 і приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою гідравлічного приводу, та форми 9. Привод вміщує в собі гідроциліндр 4, гідропроводи, ротаційний гідророзподільник примусової дії 12, гідронасос 11 та гідробак 10. Також установка вміщує м'які пружні елементи 8, встановлені між порталом і формувальним візком, які слугують для перетворення кінетичної енергії візка в потенціальну енергію пружних елементів при гальмуванні візка та для перетворення потенці-

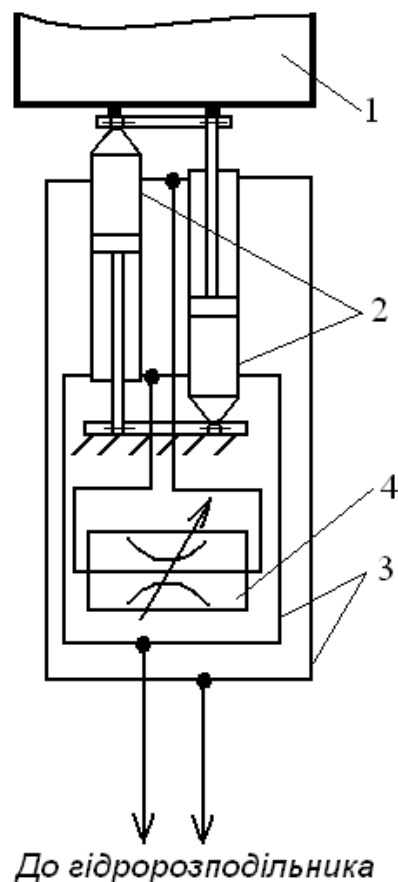


Рис. 1.9. Розташування гідроциліндрів у роликовій формувальній установці з керованим гідроприводом

льної енергії пружних елементів в кінетичну енергію формувального візка при розгоні, що приводить до покращення динаміки руху установки. При застосуванні такого гідравлічного приводу в установці відбувається регулювання рівномірності руху формувального візка при постійних пускогальмівних процесах, що приводить до покращення динаміки руху установки в цілому і зменшення енергетичних витрат.

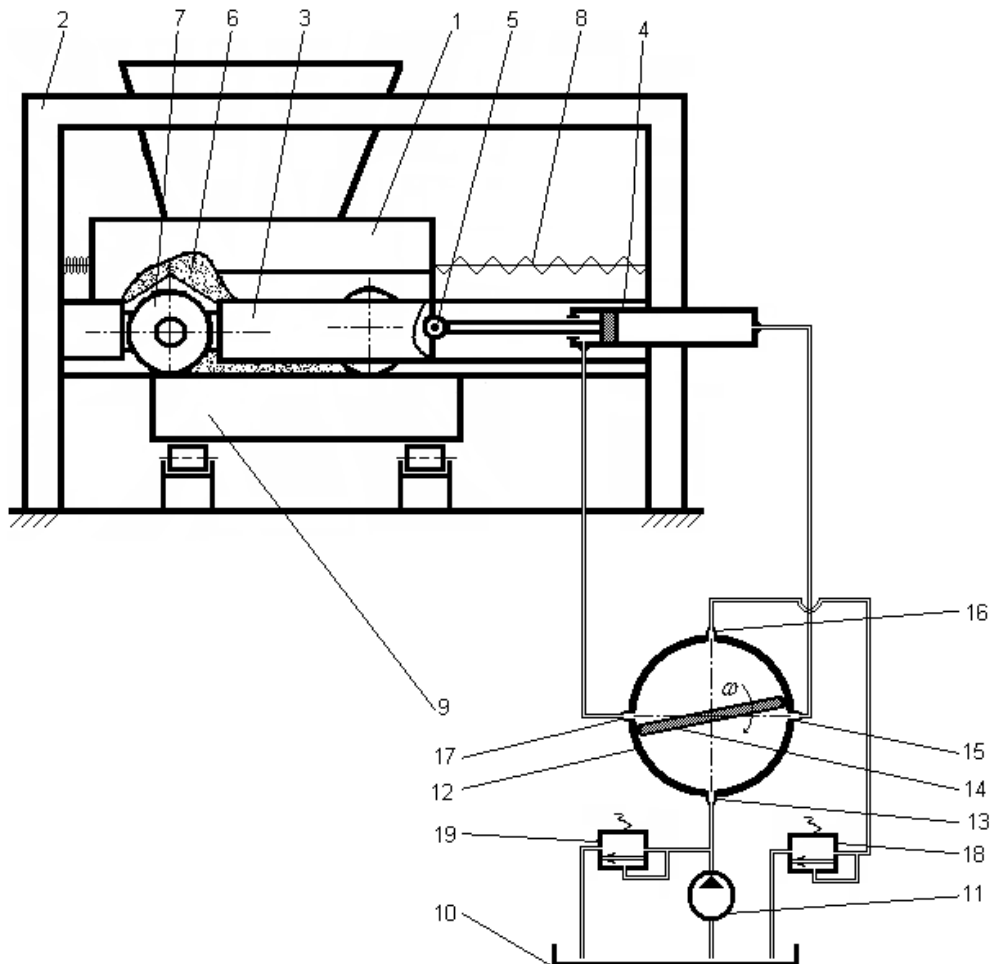


Рис. 1.10. Роликова формувальна установка з гідроприводом із ротаційним гідророзподільником

При такій конструкції пристрою відбувається наступне: робоча рідина з бака 10 гідравлічного стенду за допомогою насоса 11 потрапляє у вхідний отвір 13 розподільника 12. При повороті золотника 14 у відповідному напрямку, вхідний отвір 13 розподільника відкривається і рідина через вихід 15 потрапляє в безштокову порожнину гідроциліндра 4. В той же час вихідний отвір 16 розподільника відкривається і робоча рідина зі штокової порожнини гідроциліндра через вхідний 17 і вихідний 16 отвори та переливний клапан



18 потрапляє в бак 10. При цьому шток гідроциліндра разом з формувальним візком рухається вліво з певною швидкістю. При повному відкритті вхідного отвору 13 швидкість руху формувального візка стає максимальною і є постійною до поступового перекриття впускного отвору 15 при подальшому обертанні золотника. При повному перекритті отворів 15 і 17 формувальний візок зупиняється. На цьому закінчується процес руху формувального візка вліво. Подальше обертання золотника 14 призводить до поступового відкриття отворів 17 і 15, і робоча рідина від насоса через отвори 13 та 17 потрапляє в штокову порожнину гідроциліндра 4. В цей же час рідина з безштокової порожнини через отвори 15 і 16 потрапляє на злив в бак 10. При цьому формувальний візок починає рухатись вправо. Обертаючись далі, золотник поступово перекриває отвори 13 та 16, гідравлічна сила зменшується до нуля і шток гідроциліндра 4 разом з формувальним візком 1 зупиняються в крайньому правому положенні. Далі цикл продовжується безперервно і відбувається плавний зворотно-поступальний рух формувального візка 1. Застосування в установці сферичного шарніру 5 дозволяє спростити конструкцію установки при її складанні та у процесі ущільнення суміші.

На рис. 1.11, а наведено установку для формування виробів з бетонних сумішей [128], яка складається з нерухомого порталу 1, змонтованого на ньому формувального візка 2, що вміщує подавальний бункер 3 та укочувальні ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних 5 над порожниною форми 6. Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою привода, прикріпленого до порталу 1 у вигляді зубчастого колеса 7, зубці якого розташовані по одній половині початкового кола (рис. 1.11, б) в межах кута  $\varphi$  ( $0 < \varphi < \pi$ ). Зубчасте колесо 7 обертається з постійною кутовою швидкістю ( $\omega = const$ ) і входить в зачеплення з двосторонньою зубчастою рейкою 8, що жорстко з'єднана з формувальним візком 2.

При застосуванні в роликівій формувальній установці наведеного приводного механізму спостерігається постійне значення швидкості руху формувального візка. При обертанні зубчастого колеса 7 з постійною кутовою

швидкістю ( $\omega = const$ ) його зубці поперемінно входять в зачеплення із зубцями зубчастої рейки 8, приводячи її в зворотно-поступальний рух з постійною швидкістю, яка визначається залежністю  $V = \omega \cdot R$ , де  $R$  – радіус ділильного кола зубчастого колеса 7. При цьому підвищується рівномірність ущільнення бетонної суміші, зменшуються динамічні навантаження в елементах приводного механізму, зникають зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується надійність та довговічність установки.

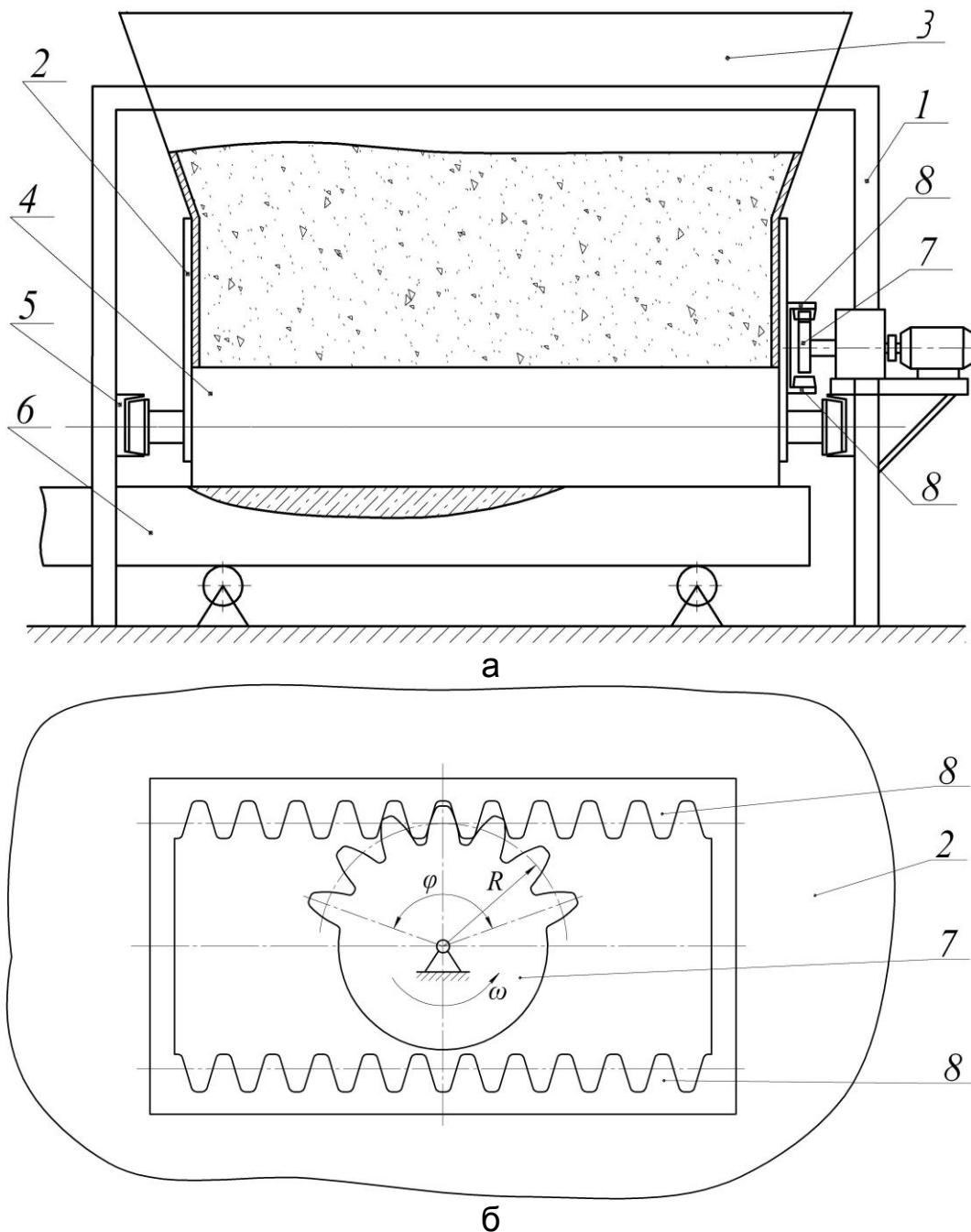


Рис. 1.11. Роликова формувальна установка з приводом від зубчастого сектора (а) та схема приводного механізму (б)

Також для приведення формувального візка в зворотно-поступальний рух в роликівій формувальній установці можна було б використати кулісний механізм, однак недоліком даного механізму є різниця в часі руху вихідної ланки в обох напрямках і, як наслідок, різниця у значеннях швидкостей її руху в обох напрямках, що негативно позначилося б на якості готової продукції та привело б до виникнення зайвих динамічних навантажень.

#### **1.4. Загальні положення про кулачкові механізми**

Кулачковим називається механізм з вищими і нижчими кінематичними парами, в яких рівномірний рух ведучої ланки (кулачка) перетворюється в нерівномірний рух веденої ланки (штовхача) [5...7, 14, 17, 32, 48...50, 55, 103, 107, 155]. Кулачкові механізми набули широкого поширення в автоматичних пристроях регулювання робочими процесами машин.

За характером руху кулачкові механізми поділяються на плоскі та просторові. Якщо ланки кулачкового механізму рухаються у одній площині, то це плоский механізм, а якщо хоча б одна ланка рухається у просторі – просторовий.

За типом штовхача кулачкові механізми поділяються на: механізми із голчастим (загостреним) штовхачем, із роликівім штовхачем, із тарілчастим (плоским) штовхачем, а також коромислові кулачкові механізми.

За розташуванням штовхача кулачкові механізми також поділяються на центрові та позацентрові. Центровий – це такий кулачковий механізм, у якого вісь переміщення штовхача співпадає з віссю обертання кулачка. У позацентрового кулачкового механізму між віссю переміщення штовхача та віссю обертання кулачка є зміщення, яке називається ексцентриситетом.

При дослідженні кулачкових механізмів розв'язуються дві основні задачі: задача аналізу та задача синтезу.

У задачі аналізу кулачкового механізму заданими є кулачковий механізм з усіма його геометричними параметрами, а також заданим є закон руху

ведучої ланки (кулачка). В цій задачі необхідно знайти закон руху веденої ланки (штовхача або коромисла).

Задача синтезу кулачкового механізму – це зворотна задача аналізу. При її розв'язуванні заданими є закон руху ведучої ланки (кулачка) та закон руху веденої ланки (штовхача або коромисла). Необхідно визначити всі геометричні параметри кулачкового механізму, величину ексцентриситету (для механізму із штовхачем) або міжосьову відстань (для коромислового кулачкового механізму), а також побудувати профіль кулачка.

### **1.5. Задачі оптимізації кулачкових механізмів**

Основними тенденціями в розвитку сучасного машинобудування є підвищення продуктивності, надійності машин та механізмів, а також підвищення якості виконання технологічних процесів. Значне поширення в машинах-автоматах легкої, харчової та інших галузях виробництва отримали кулачкові механізми. При розрахунку та проектуванні таких механізмів виникають задачі, без розв'язку яких неможливо задовольнити вимоги сучасного виробництва. При підвищенні робочих швидкостей кулачкові механізми працюють в більш жорсткому динамічному режимі, що обмежує подальше зростання їхньої продуктивності. В цих умовах для отримання сприятливих експлуатаційних характеристик при проектуванні кулачкових механізмів необхідно розв'язувати задачі динамічного аналізу та синтезу. На роботу кулачкових механізмів при перетворенні неперервного обертального руху ведучої ланки в усталений нерівномірний рух веденої ланки (робочого органу) значний вплив має закон їхнього руху. Вибір закону руху кулачкового механізму дозволяє зменшити інерційні навантаження, підвищити динамічний коефіцієнт корисної дії та рівномірність руху, зменшити габарити та вагу. Тому вибір динамічно оптимальних законів руху кулачкових механізмів є важливою науковою задачею.

При кінематичному та динамічному синтезі кулачкових механізмів необхідно знати закони (режими) руху ведучої та веденої ланок [146]. В практиці розрахунку та проектування кулачкових механізмів значне поширення отримали типові закони руху: постійної швидкості; постійного прискорення; змінного прискорення за лінійним, трапецеїдальним, косинусоїдальним, синусоїдальним і поліноміальним законами [155]. Кожний з цих режимів забезпечує ті чи інші властивості кулачкового механізму. Для комплексного забезпечення певних властивостей кулачкового механізму необхідно враховувати комплекс властивостей режимів руху ведучої та веденої ланок. Вибір таких режимів руху кулачкових механізмів може бути здійснений тільки при наявності інтегральних динамічних критеріїв [31...37].

## РОЗДІЛ 2

### ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РУХУ КУЛАЧКОВОГО ПРИВОДУ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ

#### 2.1. Оптимізація режимів руху кулачкових механізмів за одичними критеріями

Оскільки режими руху кулачкових механізмів являють собою функціональні залежності переміщення, швидкості, прискорення тощо веденої ланки від часового чи просторового аргументів, що характеризують ведучу ланку протягом усього циклу руху, то критерій повинен мати вигляд інтегрального функціоналу. Крім того, процедура порівняння допустимих режимів руху можлива тільки в тому випадку, коли критерій має вигляд скалярної величини і для кожного режиму приймає конкретне число.

Усім перерахованим вимогам до критеріїв оцінки режимів руху кулачкових механізмів відповідає структура критерію у вигляді дії [73]:

$$I_n = \int_{t_0}^{t_1} F_n \left( t, x, \dot{x}, \dots, x^{(n)} \right) dt, \quad (2.1)$$

де  $t$  – час;  $t_0, t_1$  – початковий та кінцевий моменти часу закінченого циклу руху;  $F_n$  – “енергія” прискорень  $n-1$ -го порядку кулачкового механізму;  $x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}$  – координати вихідної ланки кулачкового механізму та їхні похідні включно до  $n$ -го порядку. Назва “енергія” прискорень взята за аналогією з кінетичною енергією, але є цілком умовною і не відповідає відомому поняттю енергії.

Для випадку, коли  $n=1$  функція  $F_n = F_1$  є функцією кінетичної енергії кулачкового механізму і критерій (2.1) оцінює енергетичні витрати для створення руху. При  $n=2$  функція  $F_n = F_2$  відповідає “енергії” прискорень першого порядку, яка має назву функції Гіббса [48]. В цьому випадку критерій (2.1) відображає інерційну складову потужності руху кулачкового механізму. При

$n = 3$  функція  $F_n = F_3$  є “енергією” прискорень другого порядку або “енергією” ривків (пульса) і критерій (2.1) оцінює ефективну величину динамічних навантажень кулачкового механізму зважених по пульсу вихідної ланки. Для оцінки режимів руху можуть бути використані критерії у формі (2.1) з підінтегральними функціями у вигляді “енергії” прискорень більш високих порядків (третього, четвертого і тому подібне). Вони враховуються при виборі режимів руху кулачкових механізмів з пружними ланками.

Синтез оптимальних режимів руху кулачкових механізмів здійснюється шляхом мінімізації критерію (2.1). Мінімум критерію (2.1) досягається на функціях  $\tilde{S}(t)$ , які є розв’язком рівняння Пуассона [57]:

$$\frac{\partial F_n}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F_n}{\partial \dot{x}} + \dots + (-1)^n \cdot \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial F_n}{\partial x} = 0. \quad (2.2)$$

Як приклад синтезу оптимальних режимів руху кулачкових механізмів розглянемо плоский кулачковий механізм із загостреним штовхачем, який здійснює зворотно-поступальний рух з вистоями в крайніх положеннях (рис. 1). Тут  $x$  – переміщення штовхача, яке залежить від кутової координати кулачка  $\varphi$  і профілю кулачка, що складається з чотирьох ділянок: 0-1 – віддалення; 1-2 – дальнього стояння; 2-3 – повернення; 3-0 – ближнього стояння. На цих ділянках кути повороту кулачка відповідно дорівнюють  $\varphi_0$ ,  $\varphi_{0.c.}$ ,  $\varphi_n$ ,  $\varphi_{0.c.}$ . Будемо вважати, що кулачок обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega = const$ .

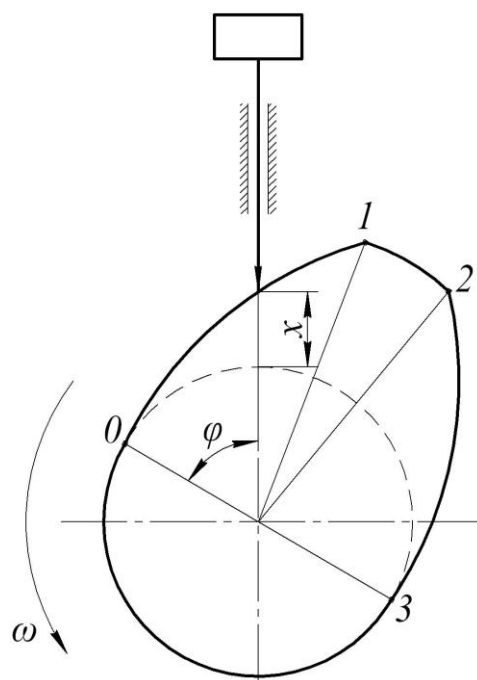


Рис. 2.1. Схема кулачкового механізму із загостреним штовхачем

Для такого кулачкового механізму визначимо закон зміни переміщення штовхача  $x$  від кута повороту кулачка  $\varphi$ , що рівнозначно побудові профілю кулачка за критерієм (2.1) при різних виразах підінтегральної функції  $F_n$ .

Для синтезу оптимального енергетичного режиму руху кулачкового механізму використаємо критерій (2.1) з підінтегральною функцією, яка є кінетичною енергією штовхача, оскільки кінетична енергія кулачка є незмінною величиною протягом усього циклу руху і оптимізації не підлягає. Кінетична енергія штовхача має вигляд:

$$F_1 = T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2, \quad (2.3)$$

де  $m$  та  $\dot{x}$  – маса штовхача та його швидкість. Після підстановки залежності (2.3) в рівняння (2.2), отримаємо  $\ddot{x} = 0$ . Після двократного інтегрування лівої та правої частин цього рівняння, будемо мати:

$$\dot{x} = C_1; \quad x = C_1 \cdot t + C_2, \quad (2.4)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – постійні інтегрування, які визначаються з початкових і кінцевих умов руху, коли  $t = 0$ ,  $x = 0$  та  $t = t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}$ ,  $x = h$ . Тут  $t_1$  – тривалість руху механізму на ділянці віддалення, а  $h$  – максимальне переміщення штовхача. В результаті підстановки цих умов в залежності (2.4) отримаємо закон (режим) руху штовхача, який забезпечує мінімальні енергетичні витрати:

$$\dot{x} = V = \frac{h}{t_1} = \omega \cdot \frac{h}{t_1} = const; \quad x = h \cdot \frac{t}{t_1} = \frac{h \cdot \varphi}{\varphi_1}. \quad (2.5)$$

На ділянці дальнього стояння початковими і кінцевими умовами є:  $t = t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}$ ,  $x = h$  та  $t = t_2 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{\omega}$ ,  $x = h$ , які дають:

$$\dot{x} = V = 0; \quad x = h = const. \quad (2.6)$$

На ділянці повернення початковими і кінцевими умовами руху будуть:  $t = t_2 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{\omega}$ ,  $x = h$  та  $t = t_3 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)}{\omega}$ ,  $x = 0$ . Після підстановки цих крайових умов у залежності (2.4) будемо мати закон руху штовхача, який забезпечує мінімальні енергетичні витрати на ділянці повернення:

$$\dot{x} = V = -\frac{h}{(t_3 - t_2)} = -\omega \cdot \frac{h}{\varphi_3} = const; \quad x = h \cdot \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2} = h \cdot \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi}{\varphi_3}. \quad (2.7)$$

На ділянці ближнього стояння крайовими умовами руху штовхача є:  $t = t_3 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)}{\omega}$ ,  $x = 0$  та  $t = t_4 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)}{\omega}$ ,  $x = 0$ . Для цих умов отримуємо:



$$\dot{x} = V = 0; \quad x = 0. \quad (2.8)$$

В отриманих режимах руху на ділянках віддалення та повернення штовхач повинен рухатись з постійними швидкостями, а на ділянках ближнього та дальнього стояння він знаходиться в нерухомому стані. Це приводить до того, що при переході з ділянок ближнього стояння до віддалення, від віддалення до дальнього стояння, від дальнього стояння до повернення та від повернення до ближнього стояння спостерігається розрив швидкості руху штовхача, що приводить до жорстких ударів [146, 155]. З наведеного можна зробити висновок, що на ділянках віддалення та повернення не доцільно використовувати оптимальний енергетичний режим руху кулачкового механізму.

На ділянках віддалення та повернення штовхача визначимо оптимальний режим руху, що забезпечує мінімальне значення інерційної складової потужності приводу. Для синтезу такого оптимального режиму руху кулачкового механізму використаємо критерій (2.1) з підінтегральною функцією, що відображає “енергію” прискорень штовхача, оскільки “енергія” прискорень кулачка є незмінною величиною протягом усього циклу руху і оптимізації не підлягає. “Енергія” прискорень штовхача визначається залежністю:

$$F_2 = V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \ddot{x}^2, \quad (2.9)$$

де  $\ddot{x}$  – прискорення центра мас штовхача.

Підставивши вираз (2.9) в рівняння (2.2), отримаємо  $\frac{IV}{x} = 0$ . Після чотирикратного інтегрування лівої та правої частин цього рівняння, отримаємо:

$$\ddot{x} = B_1; \quad \ddot{x} = B_1 \cdot t + B_2; \quad \dot{x} = \frac{1}{2} \cdot B_1 \cdot t^2 + B_2 \cdot t + B_3; \quad x = \frac{1}{6} \cdot B_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot B_2 \cdot t^2 + B_3 \cdot t + B_4, \quad (2.10)$$

де  $B_1, B_2, B_3$  та  $B_4$  – постійні інтегрування, що визначаються з крайових умов руху, які для ділянки віддалення мають вигляд:  $t = 0, x = 0, \dot{x} = 0$  та  $t = t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}, x = h, \dot{x} = 0$ . Після підстановки цих крайових умов в залежності (2.10), отримаємо оптимальний режим руху штовхача, що забезпечує мінімальне значення складової потужності інерційних навантажень:

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{-12 \cdot h}{t_1^3} = \frac{-12 \cdot \omega^3 \cdot h}{\varphi_1^3}; & \ddot{x} &= \frac{6 \cdot h \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t}{t_1}\right)}{t_1^2} = \frac{6 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1}\right)}{\varphi_1^2}; \\
\dot{x} &= \frac{6 \cdot h \cdot \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \cdot t}{t_1^2} = \frac{6 \cdot \omega \cdot h \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_1}\right) \cdot \varphi}{\varphi_1^2}; & & \\
x &= \frac{h \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{t}{t_1}\right) \cdot t^2}{t_1^2} = \frac{h \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1}\right) \cdot \varphi^2}{\varphi_1^2}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

На ділянці повернення крайовими умовами руху штовхача будуть:  $t = t_2 = (\varphi_1 + \varphi_2) / \omega$ ,  $x = h$ ,  $\dot{x} = 0$  та  $t = t_3 = (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) / \omega$ ,  $x = 0$ ,  $\dot{x} = 0$ . В результаті піdstановки цих крайових умов в залежності (2.10), будемо мати:

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{12 \cdot h}{(t_3 - t_2)^3} = \frac{12 \cdot \omega^3 \cdot h}{\varphi_3^3} = const; \\
\ddot{x} &= \frac{-6 \cdot h \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t - t_2}{t_3 - t_2}\right)}{(t_3 - t_2)^2} = \frac{-6 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\varphi - \varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_3}\right)}{\varphi_3^2}; \\
\dot{x} &= \frac{-6 \cdot h \cdot \left(1 - \frac{t - t_2}{t_3 - t_2}\right) \cdot (t - t_2)}{(t_3 - t_2)^2} = \frac{-6 \cdot \omega \cdot h \cdot \left(1 - \frac{\varphi - \varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_3}\right) \cdot (\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)}{\varphi_3^2}; \\
x &= \frac{h \cdot \left[1 - \left(3 - 2 \cdot \frac{t - t_2}{t_3 - t_2}\right) \cdot (t - t_2)^2\right]}{(t_3 - t_2)^2} = \frac{h \cdot \left[1 - \left(3 - 2 \cdot \frac{\varphi - \varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_3}\right) \cdot (\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)^2\right]}{\varphi_3^2}.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

За даними залежностей (2.5)-(2.8) та (2.11), (2.12) побудовано графіки зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка на ділянках віддалення, повернення, дальнього та ближнього стояння штовхача (рис. 2.2). З аналізу отриманих графіків можна зробити висновок, що на відміну від оптимального енергетичного режиму, оптимальний за інерційною складовою потужності доцільно використовувати на практиці. Однак при цьому режимі руху в 2,25 рази збільшуються енергетичні витрати на створення власне руху порівняно з оптимальним енергетичним режимом. Крім того, цей режим має максимальні прискорення на початку і в кінці руху на ділянках віддалення та повернення, які зростають і спадають миттєво, що приводить до виникнення м'яких уда-

рів [146, 155]. Такий режим руху не доцільно використовувати в швидкохідних кулачкових механізмах, оскільки він може викликати виникнення коливань в ланках механізму. Оптимальний за інерційною складовою потужності режим руху доцільно використовувати в кулачкових механізмах, де виникає потреба в мінімізації потужності приводного механізму.

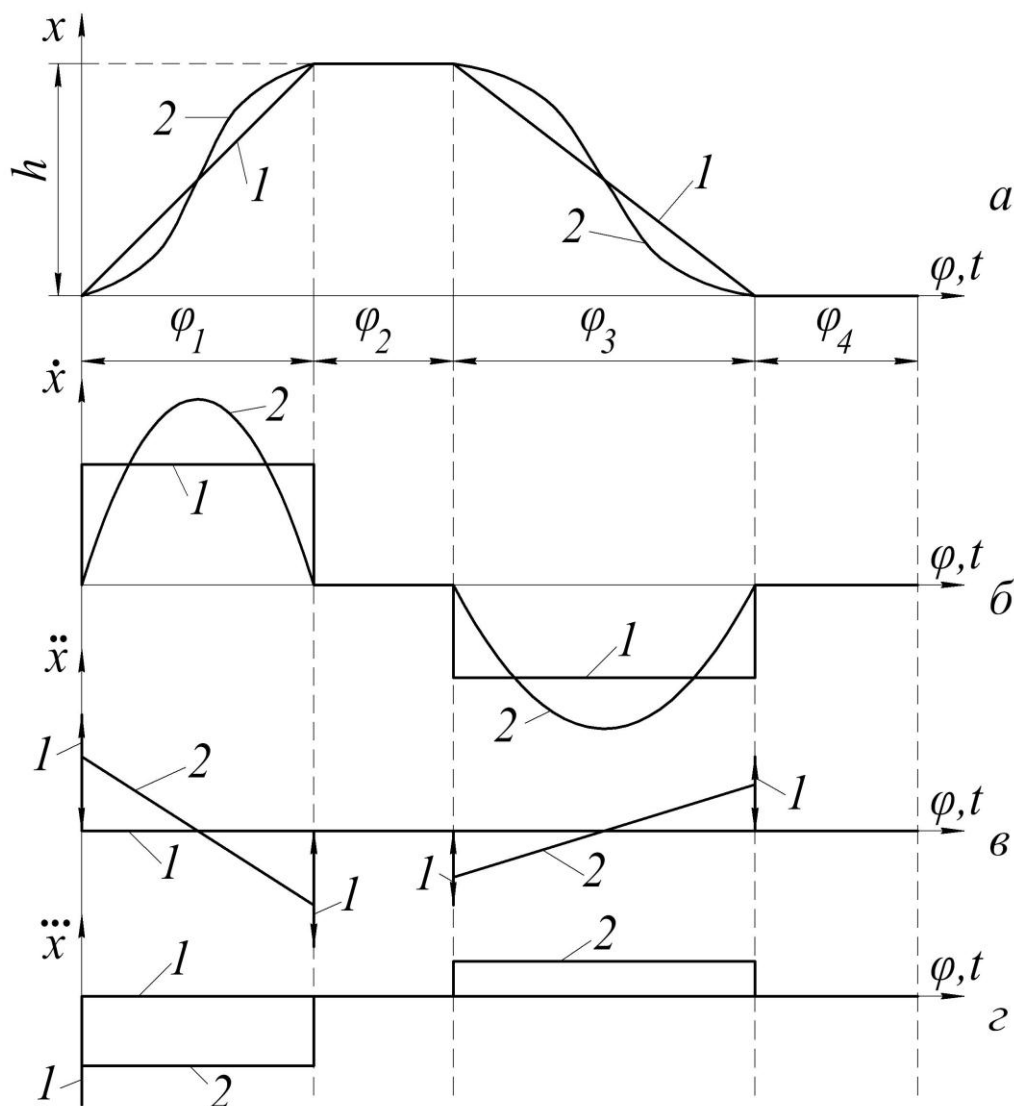


Рис. 2.2. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в) і ривка (г) при оптимальних енергетичному (1) та за потужністю (2) режимах руху штовхача

На ділянках віддалення та повернення визначимо оптимальний ривковий режим руху штовхача кулачкового механізму. Для синтезу такого режиму руху використаємо критерій (2.1) з підінтегральною функцією, що описує “енергію” прискорень другого порядку (ривків) штовхача, яка має вигляд:

$$F_3 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \ddot{x}^2, \quad (2.13)$$

де  $\ddot{x}$  – прискорення другого порядку (ривок або пульс) центра мас штовхача.

Після підстановки виразу (2.13) в рівняння (2.2), будемо мати  $\overset{IV}{x} = 0$ . Інтегруючи ліву і праву частини цього рівняння, отримаємо:

$$\begin{aligned} \overset{V}{x} &= A_1; & \overset{IV}{x} &= A_1 \cdot t + A_2; & \ddot{x} &= \frac{1}{2} \cdot A_1 \cdot t^2 + A_2 \cdot t + A_3; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{6} \cdot A_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t + A_4; \\ \dot{x} &= \frac{1}{24} \cdot A_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot A_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot A_3 \cdot t^2 + A_4 \cdot t + A_5; \\ x &= \frac{1}{120} \cdot A_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot A_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot A_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot A_4 \cdot t^2 + A_5 \cdot t + A_6, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де  $A_1, A_2, \dots, A_6$  – постійні інтегрування, що визначаються з крайових умов руху, які для ділянки віддалення приймають значення:  $t=0, x=0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$  та  $t=t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}, x=h, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$ . В результаті підстановки цих крайових умов в систему (2.14), отримаємо оптимальний ривковий режим руху штовхача на ділянці віддалення:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{60 \cdot h \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 6 \cdot \frac{t}{t_1} + 1 \right)}{t_1^3} = \frac{60 \cdot \omega^3 \cdot h \cdot \left( 6 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 6 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 1 \right)}{\varphi_1^3}; \\ \ddot{x} &= \frac{60 \cdot h \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 3 \cdot \frac{t}{t_1} + 1 \right) \cdot t}{t_1^3} = \frac{60 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left( 2 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 3 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 1 \right) \cdot \varphi}{\varphi_1^3}; \\ \dot{x} &= \frac{30 \cdot h \cdot \left( \frac{t^2}{t_1^2} - 2 \cdot \frac{t}{t_1} + 1 \right) \cdot t^2}{t_1^3} = \frac{30 \cdot \omega \cdot h \cdot \left( \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 2 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 1 \right) \cdot \varphi^2}{\varphi_1^3}; \\ x &= \frac{h \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 15 \cdot \frac{t}{t_1} + 10 \right) \cdot t^3}{t_1^3} = \frac{h \cdot \left( 6 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 15 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 10 \right) \cdot \varphi^3}{\varphi_1^3}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Крайові умови ділянки повернення мають вигляд:  $t=t_2 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{\omega}, x=h, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$  та  $t=t_3 = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)}{\omega}, x=0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$ . Після підстановки цих умов в систему (2.14), отримаємо:

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{-60 \cdot h \cdot \left[ 6 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - 6 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 1 \right]}{(t_3-t_2)^3} = \\
&= \frac{-60 \cdot \omega^3 \cdot h \cdot \left[ 6 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - 6 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 1 \right]}{\varphi_3^3}; \\
\ddot{x} &= \frac{-60 \cdot h \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - 3 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 1 \right] \cdot (t-t_2)}{(t_3-t_2)^3} = \\
&= \frac{-60 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - 3 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 1 \right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)}{\varphi_3^3}; \\
\dot{x} &= \frac{-30 \cdot h \cdot \left[ \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 1 \right] \cdot (t-t_2)^2}{(t_3-t_2)^3} = \\
&= \frac{-30 \cdot \omega \cdot h \cdot \left[ \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 1 \right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)^2}{\varphi_3^3}; \\
x &= \frac{h \cdot \left\{ 1 - \left[ 6 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - 15 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 10 \right] \cdot (t-t_2)^3 \right\}}{(t_3-t_2)^3} = \\
&= \frac{h \cdot \left\{ 1 - \left[ 6 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - 15 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 10 \right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)^3 \right\}}{\varphi_3^3}.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Ривковий режим руху кулачкового механізму забезпечує плавну зміну прискорення протягом всього циклу руху як на ділянці віддалення, так і на ділянці повернення. При цьому режимі руху відсутні як жорсткі, так і м'які удари, що дає можливість використовувати його у швидкохідних кулачкових механізмах. Однак при оптимальному ривковому режимі руху значно зростають енергетичні витрати на створення руху власне механізму, які перевищують аналогічні витрати енергії при оптимальному енергетичному режимі руху в 3,45 рази. Крім того, при оптимальному ривковому режимі руху в крайніх положеннях на ділянках віддалення та повернення штовхач приймає

максимальні значення ривка (пульсу), а сама функція ривка в цих точках є розривною, що також може викликати коливання в ланках кулачкового механізму при наявності пружних зв'язків.

В ряді випадків при визначенні оптимальних режимів руху кулачкових механізмів із врахуванням пружних властивостей ланок необхідно враховувати підінтегральні функції критерію (2.1), які залежать не тільки від прискорень і ривків (прискорень другого порядку), але і більш високих порядків.

Синтез оптимальних режимів руху кулачкового механізму за прискореннями високих порядків покажемо на прикладі режиму руху за прискореннями третього порядку на ділянках віддалення та повернення. Для синтезу такого режиму руху використаємо критерій (2.1) з підінтегральною функцією “енергія” прискорень третього порядку, яка описується залежністю:

$$F_4 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot x^{IV}, \quad (2.17)$$

де  $x^{IV}$  – прискорення третього порядку центра мас штовхача, яке характеризує інтенсивність зміни ривка (пульсу) і в деяких джерелах отримало назву “відчуття” [39], хоча на нашу думку його краще назвати “поштовх”.

Підставивши вираз (2.17) в рівняння (2.2), отримаємо  $x^{VIII} = 0$ . Після інтегрування цього рівняння будемо мати:

$$\begin{aligned} x^{VIII} &= D_1; & x^{VI} &= D_1 \cdot t + D_2; & x^{IV} &= \frac{1}{2} \cdot D_1 \cdot t^2 + D_2 \cdot t + D_3; \\ x^{IV} &= \frac{1}{6} \cdot D_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot D_2 \cdot t^2 + D_3 \cdot t + D_4; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{24} \cdot D_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot D_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot D_3 \cdot t^2 + D_4 \cdot t + D_5; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{120} \cdot D_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot D_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot D_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot D_4 \cdot t^2 + D_5 \cdot t + D_6; \\ \dot{x} &= \frac{1}{720} \cdot D_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot D_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot D_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot D_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot D_5 \cdot t^2 + D_6 \cdot t + D_7; \\ x &= \frac{1}{5040} \cdot D_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot D_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot D_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot D_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot D_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot D_6 \cdot t^2 + D_7 \cdot t + D_8. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Тут  $D_1, D_2, \dots, D_8$  – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху. Для ділянки віддалення ці умови приймають наступні значення:  $t=0, x=0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0, \ddot{\ddot{x}}=0$  та  $t=t_1 = \varphi_1/\omega, x=h, \dot{x}=0, \ddot{x}=0, \ddot{\ddot{x}}=0$ . Після підстановки цих умов в систему (2.18), отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{\ddot{x}} &= \frac{840 \cdot h \cdot \left(1 - 6 \cdot \frac{t}{t_1} + 10 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^3}\right) \cdot t}{t_1^4} = \frac{840 \cdot \omega^3 \cdot h \cdot \left(1 - 6 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 10 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 5 \cdot \frac{\varphi^3}{\varphi_1^3}\right) \cdot \varphi}{\varphi_1^4}; \\ \ddot{x} &= \frac{420 \cdot h \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{t}{t_1} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^3}\right) \cdot t^2}{t_1^4} = \frac{420 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 5 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 2 \cdot \frac{\varphi^3}{\varphi_1^3}\right) \cdot \varphi^2}{\varphi_1^4}; \\ \dot{x} &= \frac{140 \cdot h \cdot \left(1 - 3 \cdot \frac{t}{t_1} + 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - \frac{t^3}{t_1^3}\right) \cdot t^3}{t_1^4} = \frac{140 \cdot \omega \cdot h \cdot \left(1 - 3 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 3 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - \frac{\varphi^3}{\varphi_1^3}\right) \cdot \varphi^3}{\varphi_1^4}; \\ x &= \frac{h \cdot \left(35 - 84 \cdot \frac{t}{t_1} + 70 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3}\right) \cdot t^4}{t_1^4} = \frac{h \cdot \left(35 - 84 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} + 70 \cdot \frac{\varphi^2}{\varphi_1^2} - 20 \cdot \frac{\varphi^3}{\varphi_1^3}\right) \cdot \varphi^4}{\varphi_1^4}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Крайові умови ділянки повернення мають вигляд:  $t=t_2 = (\varphi_1 + \varphi_2)/\omega, x=h, \dot{x}=0, \ddot{x}=0, \ddot{\ddot{x}}=0$  та  $t=t_3 = (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)/\omega, x=0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0, \ddot{\ddot{x}}=0$ . Підставивши ці умови в систему (2.18), будемо мати:

$$\begin{aligned} \ddot{\ddot{x}} &= \frac{-840 \cdot h \cdot \left[1 - 6 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right) + 10 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^2 - 5 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^3\right] \cdot (t-t_2)}{(t_3-t_2)^4} = \\ &= \frac{-840 \cdot \omega^3 \cdot h \cdot \left[1 - 6 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right) + 10 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right)^2 - 5 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right)^3\right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)}{\varphi_3^4}; \\ \ddot{x} &= \frac{-420 \cdot h \cdot \left[1 - 4 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right) + 5 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^3\right] \cdot (t-t_2)^2}{(t_3-t_2)^4} = \\ &= \frac{-420 \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \left[1 - 4 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right) + 5 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3}\right)^3\right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)^2}{\varphi_3^4}; \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= \frac{-140 \cdot h \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 3 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^3 \right] \cdot (t-t_2)^3}{(t_3-t_2)^4} = \\
&= \frac{-140 \cdot \omega \cdot h \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^3 \right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)^3}{\varphi_3^4}; \\
x &= \frac{h \cdot \left\{ 1 - \left[ 35 - 84 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) + 70 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^2 - 20 \cdot \left( \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right)^3 \right] \cdot (t-t_2)^4 \right\}}{(t_3-t_2)^4} = \\
&= \frac{h \cdot \left\{ 1 - \left[ 35 - 84 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right) + 70 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^2 - 20 \cdot \left( \frac{\varphi-\varphi_1-\varphi_2}{\varphi_3} \right)^3 \right] \cdot (\varphi-\varphi_1-\varphi_2)^4 \right\}}{\varphi_3^4}.
\end{aligned} \tag{2.20}$$

На основі залежностей (2.15), (2.16) та (2.19), (2.20) побудовано графіки зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка на ділянках віддалення, повернення, дальнього та ближнього стояння штовхача при оптимальних за прискореннями другого та третього порядків (рис. 2.3). З аналізу цих графіків видно, що всі наведені кінематичні характеристики штовхача змінюються плавно протягом усього циклу руху. Переміщення, швидкості та прискорення оптимальних режимів руху штовхача за прискореннями другого та третього порядків є неперервними функціями, характер зміни яких є досить близьким, разом з тим характер зміни ривка штовхача для цих режимів є принципово різним. На відміну від оптимального ривкового режиму, оптимальний за прискореннями третього порядку режим руху забезпечує плавну зміну ривка до нульового значення в крайніх положеннях штовхача на ділянках віддалення та повернення. А це значить, що при такій зміні ривка в пружних елементах кулачкового механізму будуть відсутні коливальні процеси. З наведеного можна зробити висновок, що залежність зміни ривка штовхача є однією з основних характеристик режиму руху кулачкових механізмів.

Приведений аналіз режимів руху кулачкових механізмів показує, що отримані режими руху є відомими функціями і знайшли значне поширення при синтезі кулачкових механізмів. Однак запропонована методика синтезу



оптимальних режимів руху дозволяє отримати будь-які режими, що залежать від виду підінтегральної функції в критерії (2.1) і відображають ті або інші властивості кулачкового механізму. Кожний з таких режимів руху кулачкових механізмів покращує одні їхні властивості і одночасно погіршує інші. Тому більш перспективним слід вважати комплексні оптимальні режими руху, що враховують одночасно декілька властивостей кулачкових механізмів, наприклад, енергетичні витрати, динамічну складову потужності та інтенсивність зміни динамічних навантажень. Такі оптимальні режими руху можуть бути отримані на базі комплексних критеріїв з урахуванням вище зазначених оптимальних режимів руху кулачкових механізмів за одиничними інтегральними критеріями.

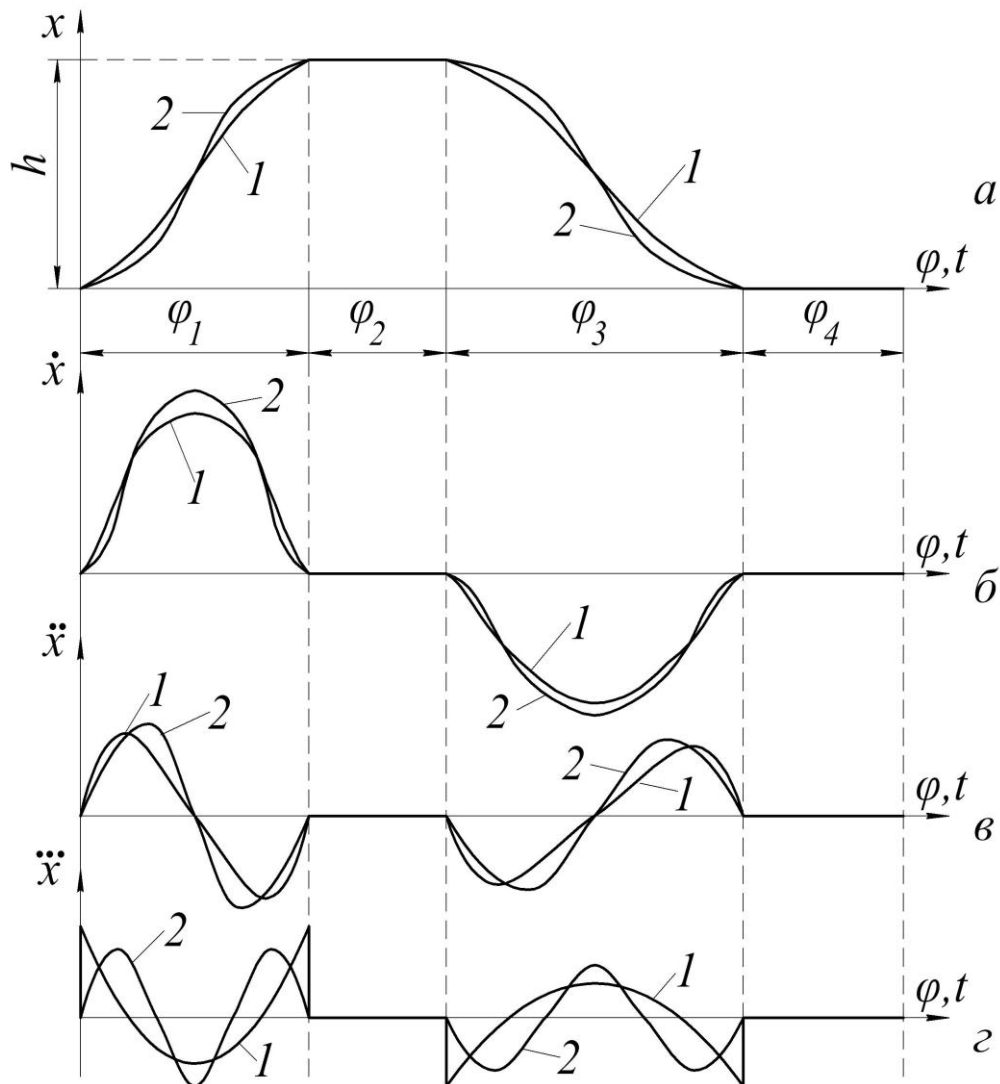


Рис. 2.3. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в) і ривка (г) при оптимальних режимах руху штовхача за прискореннями другого (1) та третього (2) порядків

## 2.2. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним динамічним режимом руху

При оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху формувального візка його координата при переміщенні з одного крайнього положення в інше описується залежністю [88, 97]:

$$x = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot \left( 3 - \frac{2 \cdot t}{t_1} \right) \cdot \frac{t^2}{t_1^2}, \quad (2.21)$$

де  $x$  – координата центра мас формувального візка;  $x_0$ ,  $x_1$  – координати крайніх положень центра мас візка;  $t_1$  – тривалість руху формувального візка від одного крайнього положення до іншого;  $t$  – час.

Перетворивши вираз (2.21) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення візка, отримаємо [88]:

$$x = \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 3 - \frac{2 \cdot t}{t_1} \right) \cdot \left( \frac{t}{t_1} \right)^2 - 1 \right], \quad (2.22)$$

де  $\Delta x$  – хід формувального візка від одного крайнього положення до іншого.

На рис. 2.4 зображено графік зміни прискорення формувального візка при оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху, що описується рівнянням (2.21).

Закон руху візка, описаний рівнянням (2.22), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка. Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим змінний радіус кулачка визначається залежністю

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 3 - \frac{2 \cdot t}{t_1} \right) \cdot \left( \frac{t}{t_1} \right)^2 - 1 \right], \quad (2.23)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

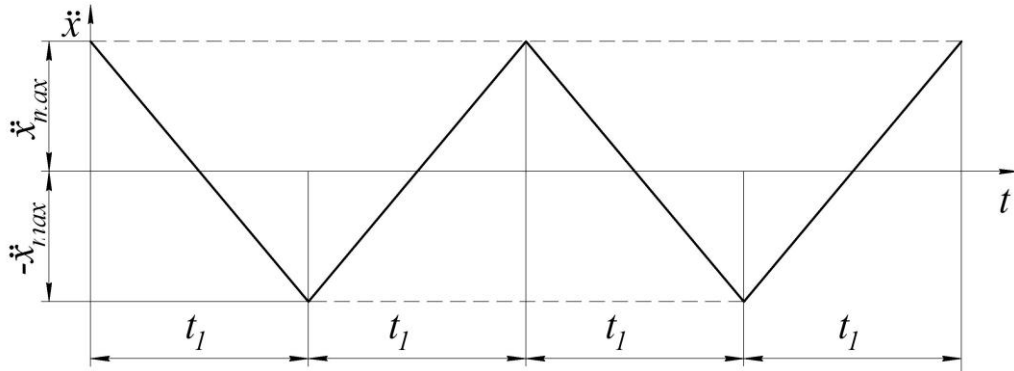


Рис. 2.4. Графік зміни прискорення формувального візка при оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху

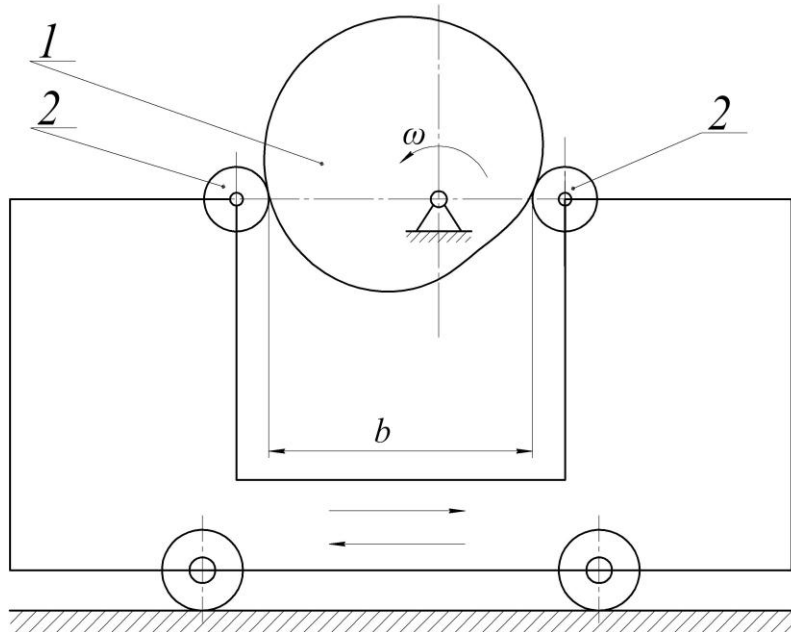


Рис. 2.5. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка

Час  $t$  можна виключити із залежності (2.23), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_1 = \frac{\pi}{\omega}$ .

Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість кулачка. Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступним виразом:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 3 - \frac{2 \cdot \varphi}{\pi} \right) \cdot \left( \frac{\varphi}{\pi} \right)^2 - 1 \right], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.24)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється за залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 3 - \frac{2 \cdot (\varphi - \pi)}{\pi} \right) \cdot \left( \frac{\varphi - \pi}{\pi} \right)^2 - 1 \right], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (2.25)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.24) та (2.25) профіль кулачка (рис. 2.6) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

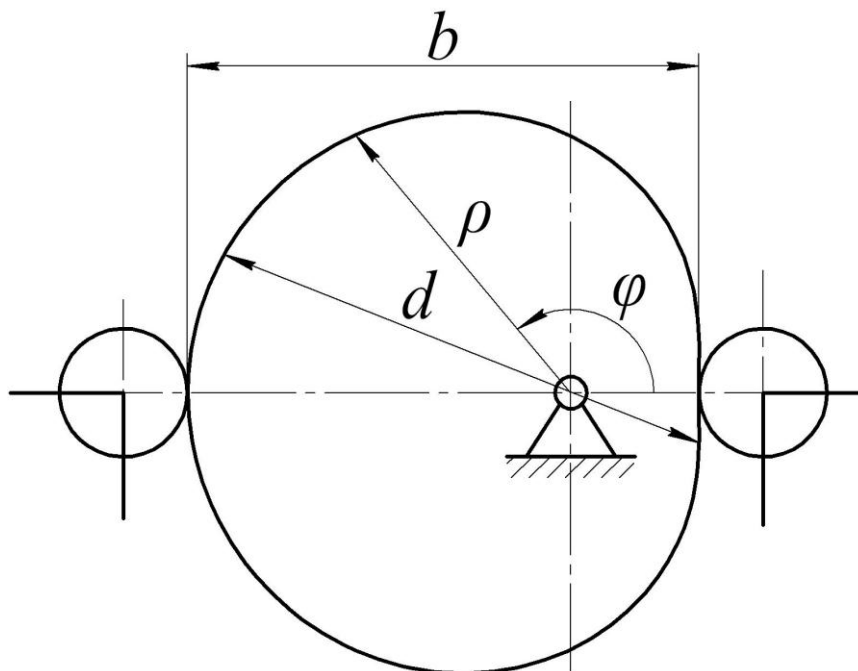


Рис. 2.6. Профіль кулачка, що реалізує оптимальний динамічний режим руху

З метою зменшення динамічних навантажень в елементах установки та для підвищення її надійності запропоновано конструкцію установки з приводним механізмом для забезпечення оптимального динамічного режиму зворотно-поступального руху формувального візка (рис. 2.7). Приводний механізм виконаний у вигляді шарнірно встановленого на порталі кулачкового механізму, що контактує з штовхачем, жорстко прикріпленим до формувального візка [3].

Установка вміщує змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, який здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних руху 3 і складається з розподільчого бункера 4 та укочувальних роликів 5. Візок приводиться в рух за допомогою приводу 6, що змонтований на порталі установки у вигляді кулачкового механізму, кулачок якого обертається з постійною кутовою швидкістю ( $\omega = \text{const}$ ) і контактує з двома штовхачами 7, жорстко з'єднаними з рамою візка 2.

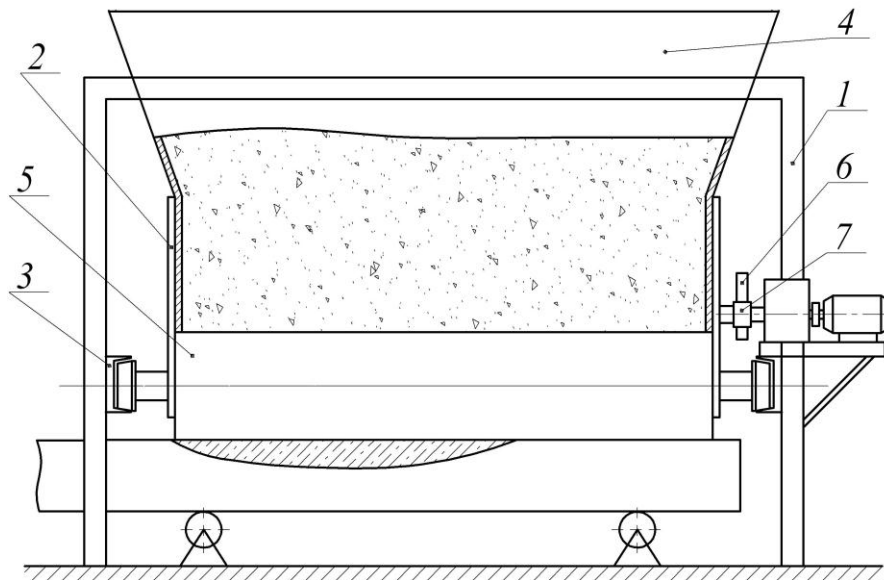


Рис. 2.7. Роликова формувальна установка з кулачковим приводним механізмом

Недоліком даної установки є використання в ній кулачкового приводного механізму з одного боку формувального пристрою, що створює значне навантаження на привод через перекошування формувального візка у напрямних руху, оскільки опір переміщенню формувального візка не рівномірний по ширині робочого органа – ролика. Це приводить до значного підвищення сил тертя формувального візка у напрямних руху, до виникнення зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до передчасного виходу установки з ладу. Тому в дослідженні покладено задачу удосконалення конструкції приводного механізму з метою унеможливлення осьового перекошування формувального візка та підвищення надійності установки.

Поставлена задача вирішується тим, що установка для формування виробів з бетонних сумішей, яка складається з нерухомого порталу, кулачкового приводного механізму та формувального пристрою симетрично відносно своєї поздовжньої осі додатково містить кулачковий приводний механізм для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка від обох кулачкових приводів з унеможливленням його осьового перекошування у напрямних руху (рис. 2.8) [139].

Установка складається з нерухомого порталу 1, змонтованого на ньому формувального візка 2, що вміщує подавальний бункер 3 та укочувальні

ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних 5 над порожньою формою 6. Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою двох приводів 7, прикріплених до порталу 1 у вигляді двох кулачкових механізмів, що обертаються з постійною кутовою швидкістю ( $\omega = \text{const}$ ), але різною за напрямками, і контактують з двома штовхачами 8, жорстко з'єднаними з візком 2. Наявність двох штовхачів 8 з кожного боку формувального візка 2 дозволяє створювати жорсткий силовий ланцюг при його прямому і зворотному ході.

При застосуванні в установці кулачкового приводного механізму з кожного боку формувального візка унеможливується його осьове перекошування, підвищується якість поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшуються динамічні навантаження в елементах приводу, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки в цілому [139].

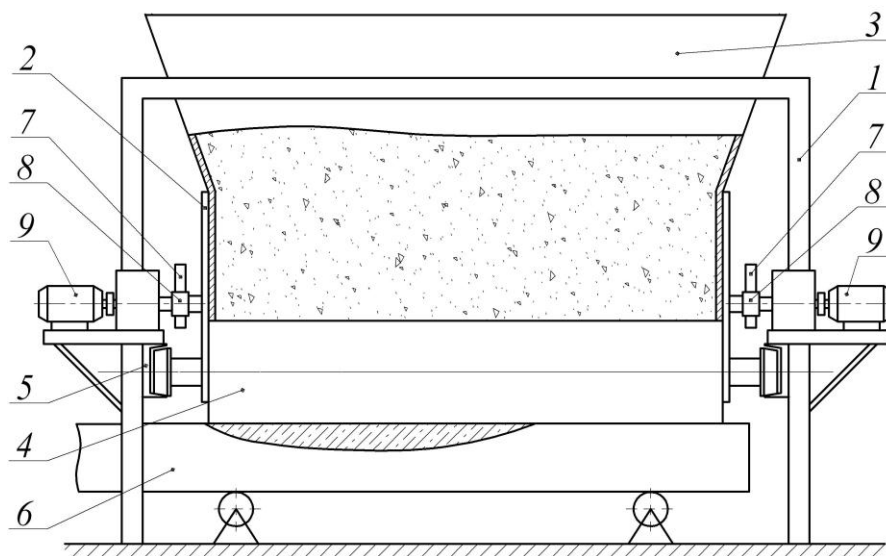


Рис. 2.8. Роликова формувальна установка з двома кулачковими приводними механізмами

### 2.3. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним ривковим режимом руху

При оптимальному ривковому режимі зворотно-поступального руху формувального візка його координата при переміщенні з одного крайнього положення в інше описується залежністю [88, 98]:

$$x = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot \left( \frac{6 \cdot t^2}{t_1^2} - \frac{15 \cdot t}{t_1} + 10 \right) \cdot \frac{t^3}{t_1^3}, \quad (2.26)$$

де  $x$  – координата центра мас формувального візка;  $x_0, x_1$  – координати крайніх положень центра мас візка;  $t_1$  – тривалість руху формувального візка від одного крайнього положення до іншого;  $t$  – час.

Перетворивши вираз (2.26) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення візка, отримаємо [88]:

$$x = \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{6 \cdot t^2}{t_1^2} - \frac{15 \cdot t}{t_1} + 10 \right) \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right], \quad (2.27)$$

де  $\Delta x$  – хід формувального візка від одного крайнього положення до іншого.

На рис. 2.9 зображено графік зміни прискорення формувального візка при оптимальному ривковому режимі зворотно-поступального руху, що описується рівнянням (2.26).

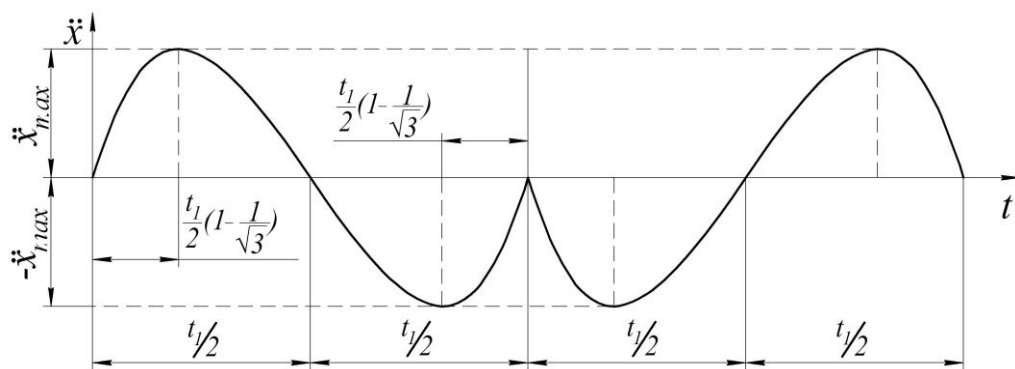


Рис. 2.9. Графік зміни прискорення формувального візка при оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху

Закон руху візка, описаний рівнянням (2.27), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{6 \cdot t^2}{t_1^2} - \frac{15 \cdot t}{t_1} + 10 \right) \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right], \quad (2.28)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежності (2.28), оскільки  $t = \varphi/\omega$ , а  $t_1 = \pi/\omega$ .

Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість кулачка. Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступним виразом:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{6 \cdot \varphi^2}{\pi^2} - \frac{15 \cdot \varphi}{\pi} + 10 \right) \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} - 1 \right], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.29)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється за залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{6 \cdot (\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - \frac{15 \cdot (\varphi - \pi)}{\pi} + 10 \right) \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} - 1 \right], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (2.30)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.29) та (2.30) профіль кулачка (рис. 2.10) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [137].

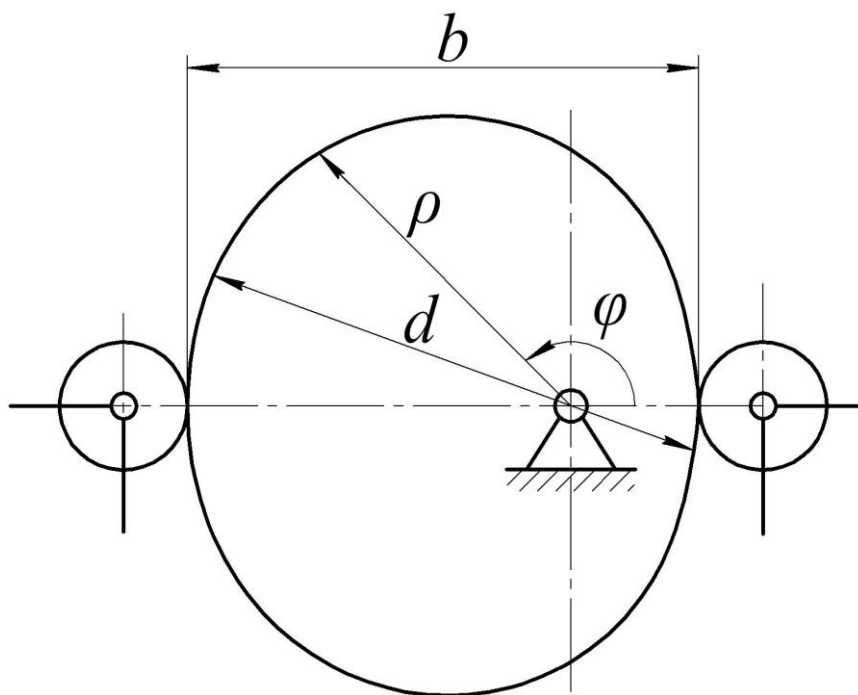


Рис. 2.10. Профіль кулачка, що реалізує оптимальний ривковий режим руху



## 2.4. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку

При оптимальному режимі зворотно-поступального руху формувального візка за прискоренням третього порядку його кінематичні характеристики при переміщенні з одного крайнього положення в інше із врахуванням виразів (2.19) описуються залежностями [39, 88]:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (x_1 - x_0) \cdot \left( 35 - 84 \cdot \frac{t}{t_1} + 70 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_1^4}; \\ \dot{x} &= 140 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \left( 1 - 3 \cdot \frac{t}{t_1} + 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_1^4}; \\ \ddot{x} &= 420 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \left( 1 - 4 \cdot \frac{t}{t_1} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_1^4}; \\ \ddot{\ddot{x}} &= 840 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \left( 1 - 6 \cdot \frac{t}{t_1} + 10 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t}{t_1^4} \end{aligned} \quad (2.31)$$

де  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  та  $\ddot{\ddot{x}}$  – координата, швидкість, прискорення та ривок центра мас формувального візка;  $x_0$ ,  $x_1$  – координати крайніх положень центра мас візка;  $t_1$  – тривалість руху формувального візка від одного крайнього положення до іншого;  $t$  – час.

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , було розраховано кінематичні характеристики оптимального режиму руху формувального візка за прискоренням третього порядку. За результатами розрахунків побудовано графіки зміни переміщення (рис. 2.11, а), швидкості (рис. 2.11, б), прискорення (рис. 2.11, в) та ривка (рис. 2.11, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше при оптимальному режимі руху за прискоренням третього порядку.

Перетворивши перший вираз (2.31) для випадку, коли початок координат відрховується від середнього положення переміщення візка, отримаємо [88]:

$$x = \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 35 - 84 \cdot \frac{t}{t_1} + 70 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_1^4} - 1 \right], \quad (2.32)$$

де  $\Delta x$  – хід формувального візка від одного крайнього положення до іншого.

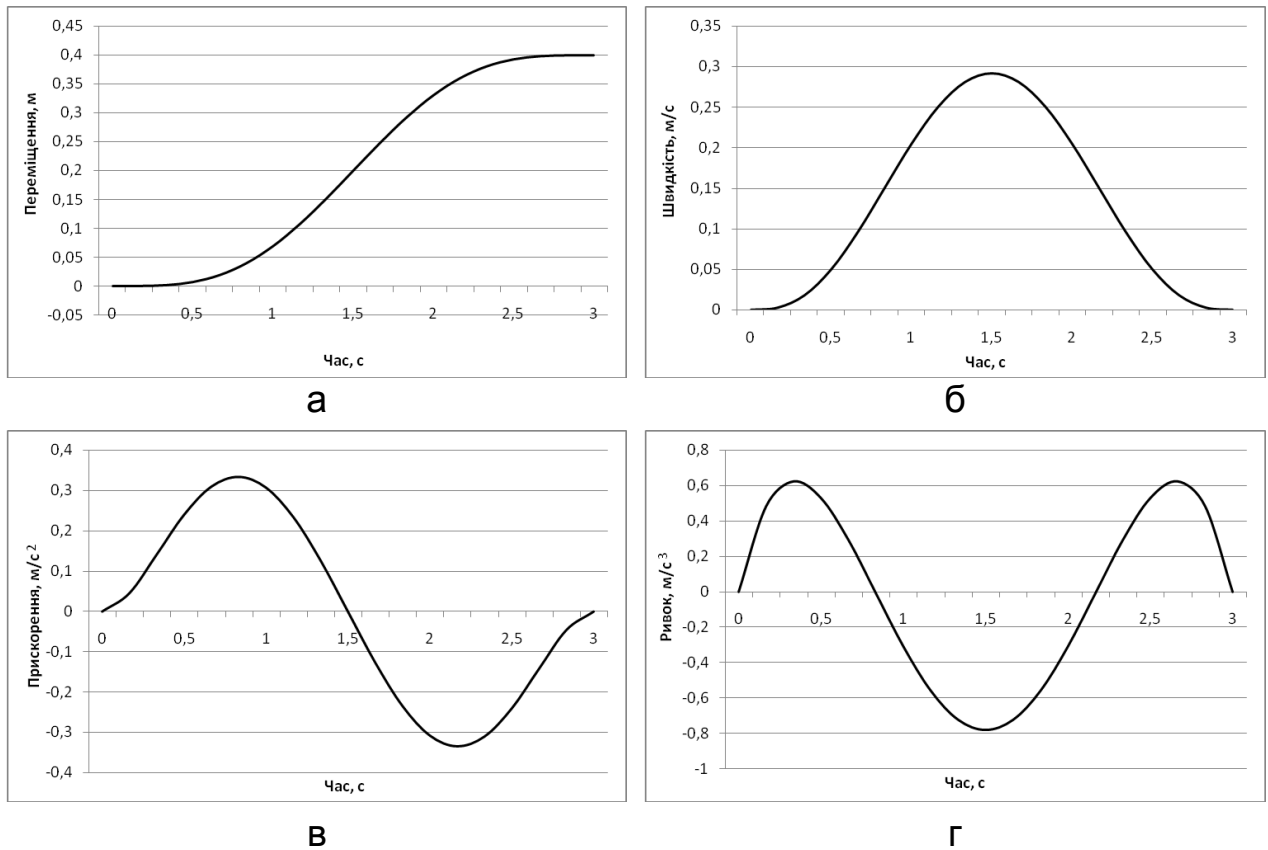


Рис. 2.11. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при оптимальному режимі руху візка за прискоренням третього порядку

Закон руху візка, описаний рівнянням (2.32), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 35 - 84 \cdot \frac{t}{t_1} + 70 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_1^4} - 1 \right], \quad (2.33)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежності (2.33), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_1 = \frac{\pi}{\omega}$ .

Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість кулачка. Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступним виразом:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 35 - 84 \cdot \frac{\varphi}{\pi} + 70 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 20 \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} \right) \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} - 1 \right], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.34)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється за залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( 35 - 84 \cdot \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} + 70 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 20 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} \right) \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} - 1 \right], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (2.35)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.34) та (2.35) профіль кулачка (рис. 2.12) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

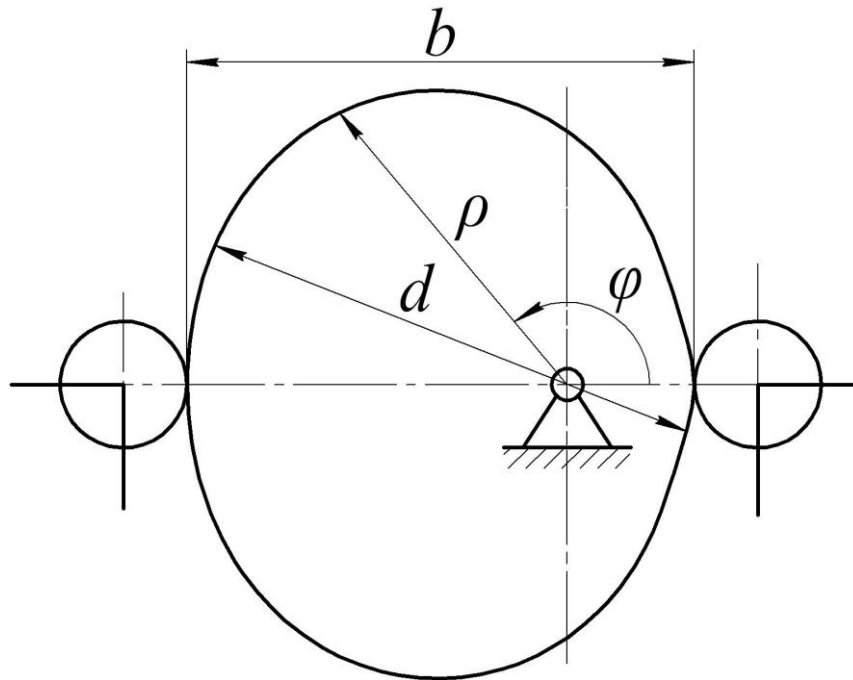


Рис. 2.12. Профіль кулачка, що реалізує оптимальний режим руху за прискоренням третього порядку

## 2.5. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним комплексним режимом руху

Диференціальне рівняння, що визначає умови оптимального режиму руху формувального візка, який враховує одночасний вплив енергетичних затрат, діючих динамічних навантажень та інтенсивності їх зміни в часі, має вид [88, 89, 99]:

$$x^{VI} - n_1 \cdot \frac{x^{IV}}{t_1^2} + n_2 \cdot \frac{\ddot{x}}{t_1^4} = 0, \quad (2.36)$$

де  $x$  – координата центра мас формувального візка;  $t_1$  – тривалість руху формувального візка від одного крайнього положення до іншого;  $n_1 = \frac{60 \cdot \delta_2}{(1 - \delta_1 - \delta_2)}$ ;

$n_2 = \frac{720 \cdot \delta_1}{(1 - \delta_1 - \delta_2)}$ ;  $\delta_1$  та  $\delta_2$  – безрозмірні вагові коефіцієнти, що враховують долю енергетичних затрат та діючих динамічних навантажень відповідно.

При розв'язку рівняння (2.36) розглянемо випадок, коли  $n_1 \geq 2 \cdot \sqrt{n_2}$ . В результаті вирішення рівняння (2.36) отримуємо вирази переміщення, швидкості, прискорення та рівка центра мас формувального візка [88, 89, 99]:

$$x = A_1 + A_2 \cdot t + A_3 \cdot e^{P_1 \frac{t}{t_1}} + A_4 \cdot e^{-P_1 \frac{t}{t_1}} + A_5 \cdot e^{P_2 \frac{t}{t_1}} + A_6 \cdot e^{-P_2 \frac{t}{t_1}}; \quad (2.37)$$

$$\dot{x} = A_2 + \frac{P_1 \cdot \left( A_3 \cdot e^{P_1 \frac{t}{t_1}} - A_4 \cdot e^{-P_1 \frac{t}{t_1}} \right) + P_2 \cdot \left( A_5 \cdot e^{P_2 \frac{t}{t_1}} - A_6 \cdot e^{-P_2 \frac{t}{t_1}} \right)}{t_1}; \quad (2.38)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1^2 \cdot \left( A_3 \cdot e^{P_1 \frac{t}{t_1}} + A_4 \cdot e^{-P_1 \frac{t}{t_1}} \right) + P_2^2 \cdot \left( A_5 \cdot e^{P_2 \frac{t}{t_1}} + A_6 \cdot e^{-P_2 \frac{t}{t_1}} \right)}{t_1^2}; \quad (2.39)$$

$$\ddot{\ddot{x}} = \frac{P_1^3 \cdot \left( A_3 \cdot e^{P_1 \frac{t}{t_1}} - A_4 \cdot e^{-P_1 \frac{t}{t_1}} \right) + P_2^3 \cdot \left( A_5 \cdot e^{P_2 \frac{t}{t_1}} - A_6 \cdot e^{-P_2 \frac{t}{t_1}} \right)}{t_1^3}, \quad (2.40)$$

де  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  та  $A_6$  – постійні інтегрування;  $P_1 = \sqrt{\frac{n_1 + \sqrt{n_1^2 - 4 \cdot n_2}}{2}}$ ;

$P_2 = \sqrt{\frac{n_1 - \sqrt{n_1^2 - 4 \cdot n_2}}{2}}$ ;  $t$  – час.

Виходячи з початкових умов періоду руху  $t=0, x=x_0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$  та його кінцевих умов –  $t=t_1, x=x_1, \dot{x}=0, \ddot{x}=0$  ( $x_0, x_1$  – координати крайніх положень центра мас візка) визначено постійні інтегрування:

$$A_6 = \frac{x_1 - x_0}{\left[ \begin{aligned} & e^{-P_2} + P_2 - 1 - \frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot \left( e^{P_1} - P_1 - 1 - \frac{(e^{-P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1} + 2 \cdot P_1)}{(e^{-P_1} - e^{P_1})} \right) - \\ & - \left[ e^{P_2} - P_2 - 1 - \frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot \left( e^{P_1} - P_1 - 1 - \frac{(e^{P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1} + 2 \cdot P_1)}{(e^{-P_1} - e^{P_1})} \right) \right] \times \\ & \times \frac{P_2 \cdot (e^{-P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{P_1} + e^{-P_1} - 2) + P_1 \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1}) \cdot \left[ \frac{P_2}{P_1} \cdot (1 - e^{P_1}) + (1 - e^{-P_2}) \right]}{P_2 \cdot (e^{P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{P_1} + e^{-P_1} - 2) + P_1 \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1}) \cdot \left[ \frac{P_2}{P_1} \cdot (1 - e^{P_1}) + (e^{P_2} - 1) \right]} \end{aligned} \right]}; \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned}
A_5 &= -A_6 \cdot \frac{P_2 \cdot (e^{-P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{P_1} + e^{-P_1} - 2) + P_1 \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1}) \cdot \left[ \frac{P_2}{P_1} \cdot (1 - e^{P_1}) + (1 - e^{-P_2}) \right]}{P_2 \cdot (e^{P_2} - e^{P_1}) \cdot (e^{P_1} + e^{-P_1} - 2) + P_1 \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1}) \cdot \left[ \frac{P_2}{P_1} \cdot (1 - e^{P_1}) + (e^{P_2} - 1) \right]}, \\
A_4 &= -\frac{P_2^2 \cdot [A_5 \cdot (e^{P_2} - e^{P_1}) + A_6 \cdot (e^{-P_2} - e^{P_1})]}{P_1^2 \cdot (e^{-P_1} - e^{P_1})}; \quad A_3 = -A_4 - \frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot (A_5 + A_6); \\
A_2 &= -\frac{P_1 \cdot (A_3 - A_4) + P_2 \cdot (A_5 - A_6)}{t_1}; \quad A_1 = x_0 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6.
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Значення вагових коефіцієнтів  $\delta_1$  та  $\delta_2$  можуть бути визначені на основі експертних оцінок або співставлення максимальних значень кінематичних характеристик з їх допустимими значеннями. Наприклад, можуть бути співставлені максимальні значення швидкості  $\dot{x}_{\max}$  та ривка  $\ddot{x}_{\max}$  з їх допустимими значеннями  $\dot{x}_{\text{дон}}$  та  $\ddot{x}_{\text{дон}}$ . Швидкість формувального візка, визначена виразом (2.38), приймає максимальне значення в момент часу  $t = \frac{t_1}{2}$ , а ривок – при  $t = 0$ . На основі цих даних отримуємо систему двох трансцендентних рівнянь [88]:

$$\begin{cases}
A_2 + \frac{P_1 \cdot (A_3 \cdot e^{P_1/2} - A_4 \cdot e^{-P_1/2}) + P_2 \cdot (A_5 \cdot e^{P_2/2} - A_6 \cdot e^{-P_2/2})}{t_1} = \dot{x}_{\text{дон}}; \\
\frac{P_1^3 \cdot (A_3 - A_4) + P_2^3 \cdot (A_5 - A_6)}{t_1^3} = \ddot{x}_{\text{дон}},
\end{cases} \tag{2.42}$$

з яких можуть бути розраховані невідомі  $P_1$  та  $P_2$ .

За значеннями  $P_1$  та  $P_2$  визначаємо залежності для  $n_1$  та  $n_2$ :

$$n_1 = P_1^2 + P_2^2; \quad n_2 = P_1^2 \cdot P_2^2, \tag{2.43}$$

а потім уже і вагові коефіцієнти  $\delta_1$  та  $\delta_2$ :

$$\delta_2 = \frac{720 \cdot n_2}{(n_1 + 60) \cdot (n_2 + 720) - n_2^2}; \quad \delta_1 = 1 - \delta_2 \cdot \frac{(n_1 + 60)}{n_1}. \tag{2.44}$$

Із системи рівнянь (2.42) з врахуванням постійних інтегрування (2.41) визначаємо коефіцієнти  $P_1 = 7,75$  та  $P_2 = 5,48$ . На основі цих коефіцієнтів з виразів (2.43) визначаємо коефіцієнти  $n_1 = 90$  та  $n_2 = 1800$ , а за ними з допомогою залежностей (2.44) – шукані вагові коефіцієнти  $\delta_1 = 0,5$  та  $\delta_2 = 0,3$  [88].

Кінематичні характеристики комплексного оптимального режиму руху формувального візка розраховуються залежностями (2.37)-(2.40) з враху-

ванням постійних інтегрування (2.41) при амплітуді переміщення  $\Delta x = x_1 - x_0 = 0,4 \text{ м}$  та тривалості руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_1 = 3 \text{ с}$ . За результатами розрахунків побудовано графіки комплексного оптимального режиму зміни переміщення (рис. 2.13, а), швидкості (рис. 2.13, б), прискорення (рис. 2.13, в) та ривка (рис. 2.13, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

Перетворивши вираз (2.37) переміщення центра мас формувального візка для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення його переміщення, отримаємо [88]:

$$x = A_1 + A_2 \cdot t + A_3 \cdot e^{\frac{P_1 \cdot t}{t_1}} + A_4 \cdot e^{-\frac{P_1 \cdot t}{t_1}} + A_5 \cdot e^{\frac{P_2 \cdot t}{t_1}} + A_6 \cdot e^{-\frac{P_2 \cdot t}{t_1}} - \frac{\Delta x}{2}. \quad (2.45)$$

Закон руху візка, описаний рівнянням (2.45), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} + A_1 + A_2 \cdot t + A_3 \cdot e^{\frac{P_1 \cdot t}{t_1}} + A_4 \cdot e^{-\frac{P_1 \cdot t}{t_1}} + A_5 \cdot e^{\frac{P_2 \cdot t}{t_1}} + A_6 \cdot e^{-\frac{P_2 \cdot t}{t_1}} - \frac{\Delta x}{2}, \quad (2.46)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежності (2.46), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_1 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість кулачка. Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступним виразом:

$$\rho = \frac{b}{2} + A_1 + A_2 \cdot \varphi + A_3 \cdot e^{\frac{P_1 \cdot \varphi}{\pi}} + A_4 \cdot e^{-\frac{P_1 \cdot \varphi}{\pi}} + A_5 \cdot e^{\frac{P_2 \cdot \varphi}{\pi}} + A_6 \cdot e^{-\frac{P_2 \cdot \varphi}{\pi}} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.47)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється за залежністю:

$$\rho = \frac{b}{2} + A_1 + A_2(2\pi - \varphi) + A_3 e^{\frac{P_1(2\pi - \varphi)}{\pi}} + A_4 e^{-\frac{P_1(2\pi - \varphi)}{\pi}} + A_5 e^{\frac{P_2(2\pi - \varphi)}{\pi}} + A_6 e^{-\frac{P_2(2\pi - \varphi)}{\pi}} - \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi < \varphi \leq 2\pi. \quad (2.48)$$

При визначенні змінного радіуса кулачка залежностями (2.47) та (2.48) необхідно в формулах постійних інтегрування (2.41) для  $A_2$  використовувати  $\pi$  замість  $t_1$ .

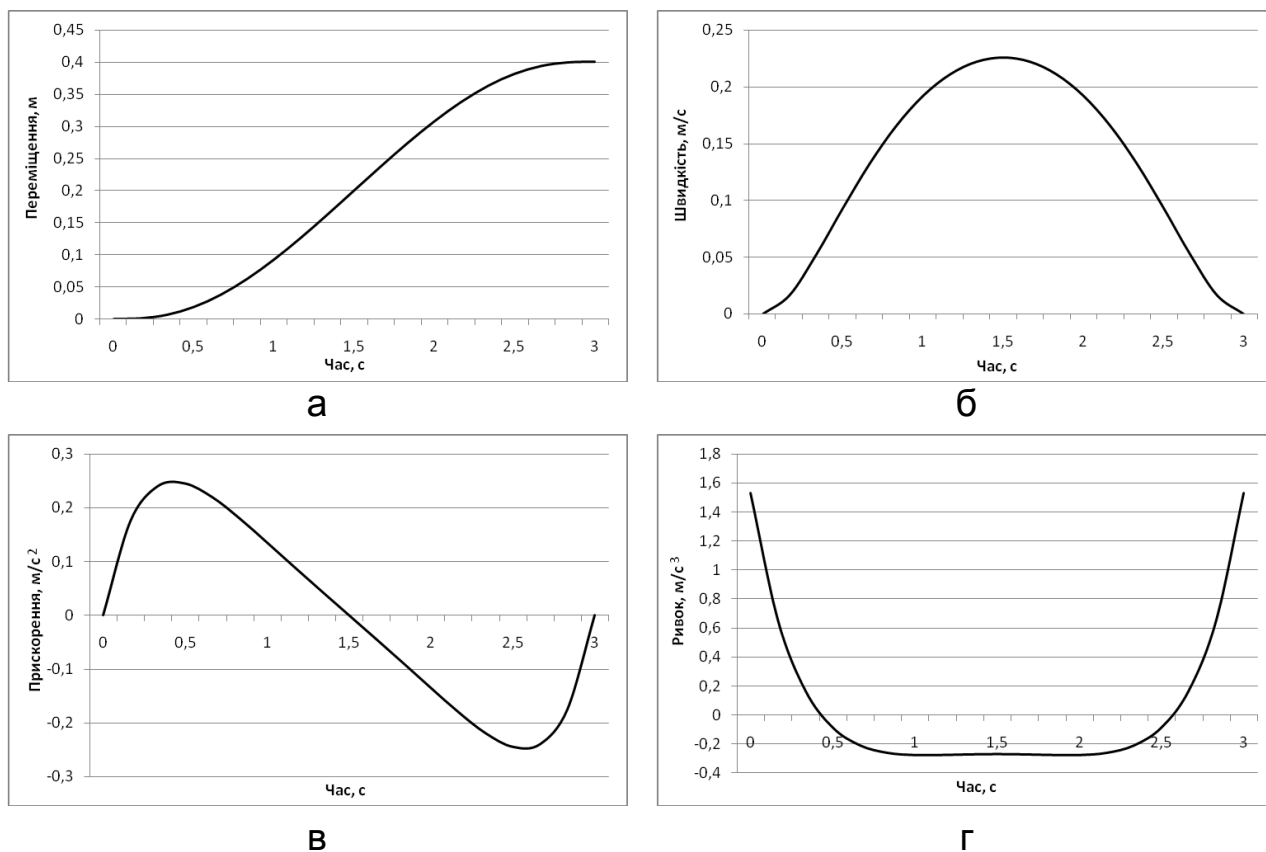


Рис. 2.13. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при комплексному оптимальному режимі руху візка

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.47) та (2.48) профіль кулачка (рис. 2.14) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [140].

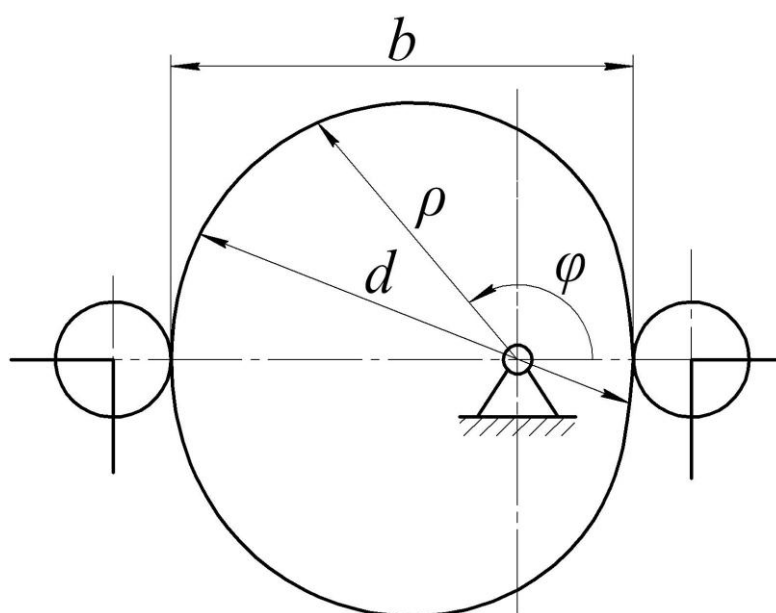


Рис. 2.14. Профіль кулачка, що реалізує комплексний оптимальний режим руху

## 2.6. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим динамічним режимом руху

Для роликової формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що позитивно вплинуло б на якість готового виробу. Однак на практиці такий режим руху здійснити неможливо, оскільки в ньому відсутні ділянки розгону та гальмування, без яких не може бути циклічного руху. Тому пропонується реалізувати такий режим руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого, у якому були б ділянки розгону і гальмування з мінімальними динамічними навантаженнями та ділянка руху з постійною швидкістю.

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_s$ , його можна розділити на три частини: час розгону –  $t_p$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_z$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_s$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_s$  та  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_s$ .

Для процесу розгону та гальмування формувального візка запропоновано здійснювати їх за оптимальним динамічним режимом руху [88]. При цьому швидкість формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, а ривок має постійне значення, що в свою чергу позитивно впливає довговічність установки.

При оптимальному динамічному режимі розгону формувального візка зі стану спокою до виходу на усталений режим руху координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями [88, 96]:



$$\begin{aligned}
x_p &= x_{0p} + \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^2}{t_p} - \frac{t^3}{3 \cdot t_p^2} \right); & \dot{x}_p &= \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t}{t_p} - \frac{t^2}{t_p^2} \right); \\
\ddot{x}_p &= 2 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{t_p} - \frac{t}{t_p^2} \right); & \ddot{x}_p &= -\frac{2 \cdot \dot{x}_y}{t_p^2} = const,
\end{aligned}
\tag{2.49}$$

де  $x_{0p}$  – координата початкового положення центра мас візка при розгоні;  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість розгону формувального візка зі стану спокою до виходу на усталений режим руху;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху формувального візка на усталеному режимі.

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{x}_y = 0, \tag{2.50}$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

При оптимальному динамічному режимі гальмування формувального візка з моменту усталеного руху до повної зупинки координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями [88, 96]:

$$\begin{aligned}
x_2 &= x_{1_2} - \dot{x}_y \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot t_2 - t + \frac{t^3}{3 \cdot t_2^2} \right); & \dot{x}_2 &= \dot{x}_y \cdot \left( 1 - \frac{t^2}{t_2^2} \right); \\
\ddot{x}_2 &= -2 \cdot \dot{x}_y \cdot \frac{t}{t_2^2}; & \ddot{x}_2 &= \frac{-2 \cdot \dot{x}_y}{t_2^2} = const,
\end{aligned}
\tag{2.51}$$

де  $x_{1_2}$  – кінцева координата процесу гальмування;  $t_2$  – тривалість гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки.

У виразах (2.49)-(2.51) координата початкового положення центра мас візка при розгоні  $x_{0p}$  та кінцева координата процесу гальмування  $x_{1_2}$  відповідають його крайнім положенням, однак невідомими є швидкість руху  $\dot{x}_y$  формувального візка на усталеному режимі, координати початкового  $x_{0y}$  та кінцевого  $x_{1y}$  положень центра мас візка при усталеному русі.

Розділимо переміщення  $S$  формувального візка від одного крайнього положення до іншого на три ділянки: 1 – ділянка розгону, їй відповідає переміщення  $S_p$ ; 2 – ділянка усталеного руху, їй відповідає переміщення  $S_y$ ; 3 – ділянка гальмування, їй відповідає переміщення  $S_z$ . Із врахуванням залежностей (2.49)-(2.51) вирази переміщення на кожній ділянці можна подати у вигляді:

$$S_p = \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_p} \left( 2 \cdot \frac{t}{t_p} - \frac{t^2}{t_p^2} \right) dt = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^2}{t_p} - \frac{t^3}{3 \cdot t_p^2} \right) \Big|_0^{t_p} = \frac{2}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p; \quad (2.52)$$

$$S_y = \int_0^{t_y} \dot{x}_y dt = \dot{x}_y \cdot t \Big|_0^{t_y} = \dot{x}_y \cdot t_y; \quad (2.53)$$

$$S_z = \int_0^{t_z} \dot{x}_z dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_z} \left( 1 - \frac{t^2}{t_z^2} \right) dt = \dot{x}_y \cdot \left( t - \frac{t^3}{3 \cdot t_z^2} \right) \Big|_0^{t_z} = \frac{2}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z. \quad (2.54)$$

Тоді вираз загального переміщення формувального візка можна подати у вигляді:

$$S = S_p + S_y + S_z = \frac{2}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p + \dot{x}_y \cdot t_y + \frac{2}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot t_p + t_y + \frac{2}{3} \cdot t_z \right). \quad (2.55)$$

Підставивши у попередній вираз  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$  та амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x = S$ , отримуємо:

$$\Delta x = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 + \frac{2}{3} \cdot t_3 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 \right) = \frac{8}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{9 \cdot \Delta x}{8 \cdot t_3}. \quad (2.56)$$

Координату положення формувального візка, що визначає закінчення ділянки розгону та початок ділянки усталеного руху  $x_{0y}$ , можна визначити з виразів (2.52) та (2.56):

$$x_{0y} = \frac{2}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p = \frac{2}{3} \cdot \frac{9 \cdot \Delta x}{8 \cdot t_3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 = \frac{1}{8} \cdot \Delta x, \quad (2.57)$$

а координату, що визначає закінчення ділянки усталеного руху  $x_{1y}$  та початок ділянки гальмування, можна визначити з виразів (2.53), (2.56) та (2.57):

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y \cdot t_y = \frac{1}{8} \cdot \Delta x + \frac{9 \cdot \Delta x}{8 \cdot t_3} \cdot \frac{2}{3} \cdot t_3 = \frac{7}{8} \cdot \Delta x. \quad (2.58)$$

Підставивши вирази (2.56)-(2.58) у рівності (2.49)-(2.52) та задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , було розраховано кінематичні характеристики комбінованого динамічного режиму руху формувального візка. За результатами розрахунків побудовано графіки комбінованого динамічного режиму зміни переміщення (рис. 2.15, а), швидкості (рис. 2.15, б), прискорення (рис. 2.15, в) та ривка (рис. 2.15, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

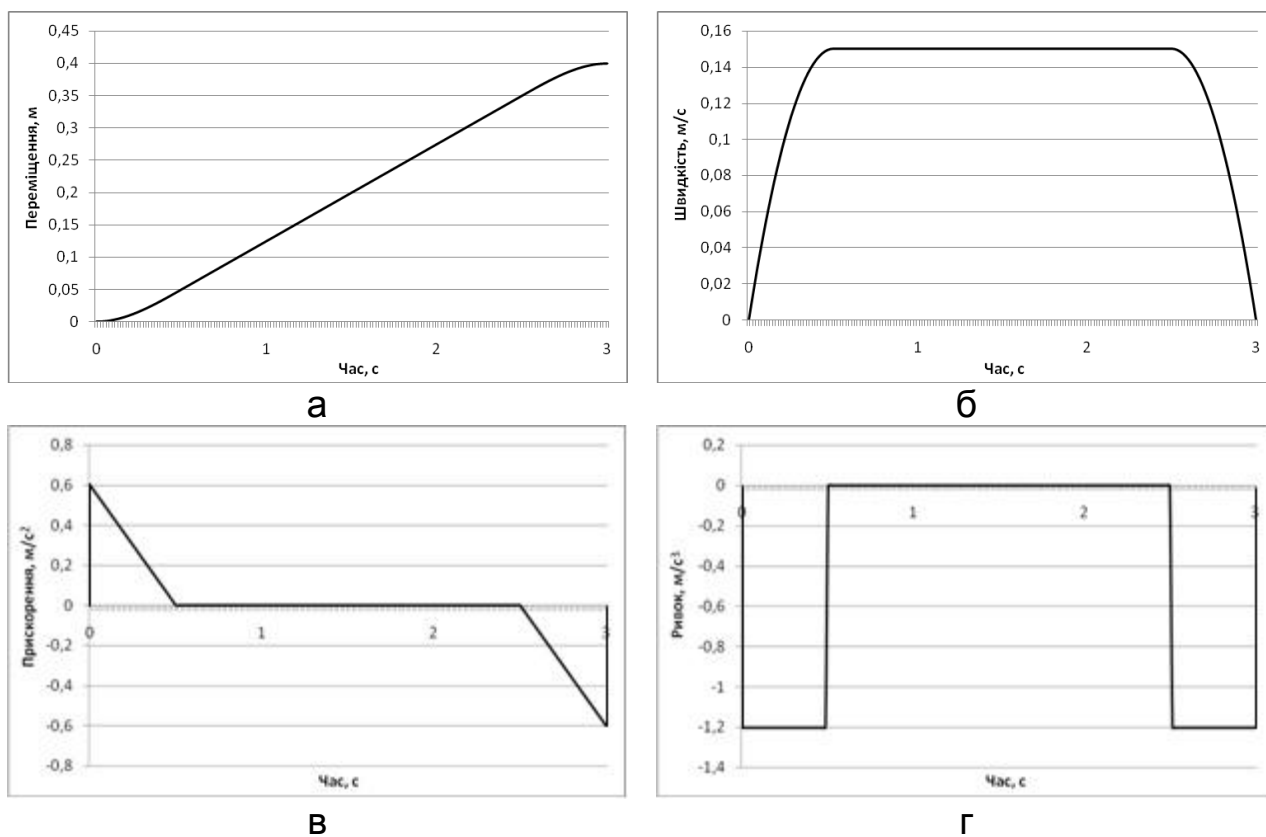


Рис. 2.15. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при комбінованому динамічному режимі руху формувального візка

Перетворивши перші залежності виразів (2.49)-(2.52) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка з урахуванням виразів (2.56)-(2.58), отримаємо:

– на ділянці розгону:

$$x_p = \frac{27}{4} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{t}{t_3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.59)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x_y = \frac{1}{8} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + 9 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.60)$$

– на ділянці гальмування:

$$x_2 = \frac{\Delta x}{2} - \frac{9}{8} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{1}{9} - \frac{t}{t_3} + 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} \right). \quad (2.61)$$

Закон руху візка, описаний залежностями (2.59)-(2.61), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці розгону:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27}{4} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{t}{t_3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.62)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{8} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + 9 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.63)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{9}{8} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{1}{9} - \frac{t}{t_3} + 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} \right), \quad (2.64)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (2.62)-(2.64), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час розгону формувального візка визначається залежністю  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес розгону здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27}{4} \cdot \Delta x \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\varphi}{\pi}\right) \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (2.65)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{8} \cdot \Delta x \cdot \left[1 + 9 \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi}\right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (2.66)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{9}{8} \cdot \Delta x \cdot \left[\frac{1}{9} - \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi} + 12 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3}\right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (2.67)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{27}{4} \cdot \Delta x \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{(\varphi - \pi)}{\pi}\right] \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (2.68)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{1}{8} \cdot \Delta x \cdot \left[1 + 9 \cdot \left(\varphi - \frac{7\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi}\right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (2.69)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{9}{8} \cdot \Delta x \cdot \left[\frac{1}{9} - \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi} + 12 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3}\right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (2.70)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.65)-(2.70) профіль кулачка (рис. 2.16) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [138].

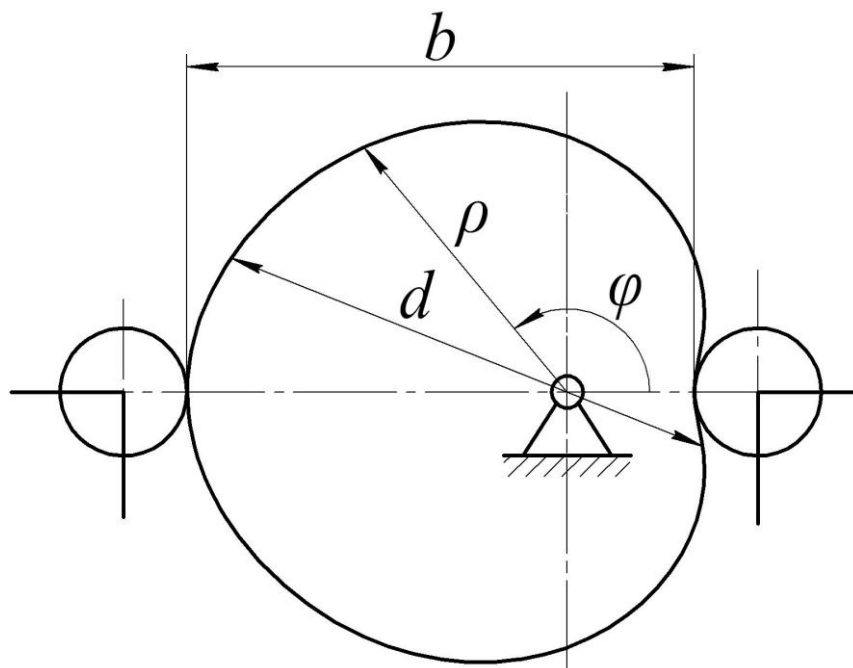


Рис. 2.16. Профіль кулачка, що реалізує комбінований динамічний режим руху формувального візка

## 2.7. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим ривковим режимом руху

Для плавного процесу розгону та гальмування формувального візка запропоновано здійснювати їх за оптимальним ривковим режимом руху [88]. При цьому швидкість та прискорення формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що, в свою чергу, позитивно впливає на її довговічність.

При оптимальному ривковому режимі розгону формувального візка зі стану спокою до виходу на усталений режим руху координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями [88]:

$$\begin{aligned} x_p &= x_{0p} + 2 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_p^2} - \frac{t^4}{t_p^3} + 0,3 \cdot \frac{t^5}{t_p^4} \right); & \dot{x}_p &= \dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 8 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} \right); \\ \ddot{x}_p &= 12 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t}{t_p^2} - 2 \cdot \frac{t^2}{t_p^3} + \frac{t^3}{t_p^4} \right); & \ddot{\ddot{x}}_p &= 12 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{t_p^2} - 4 \cdot \frac{t}{t_p^3} + 3 \cdot \frac{t^2}{t_p^4} \right), \end{aligned} \quad (2.71)$$

де  $x_{0p}$  – координата початкового положення центра мас візка при розгоні;  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість розгону формувального візка зі стану спокою до виходу на усталений режим руху;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху формувального візка на усталеному режимі.

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0, \quad (2.72)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

При оптимальному ривковому режимі гальмування формувального візка з моменту усталеного руху до повної зупинки координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями [88]:

$$\begin{aligned}
x_2 &= x_{1_2} - \dot{x}_y \cdot \left( 0,6 \cdot t_2 - t + \frac{t^4}{t_2^3} - 0,6 \cdot \frac{t^5}{t_2^4} \right); & \dot{x}_2 &= \dot{x}_y \cdot \left( 1 - 4 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} \right); \\
\ddot{x}_2 &= 12 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_2^4} - \frac{t^2}{t_2^3} \right); & \ddot{x}_2 &= 12 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^2}{t_2^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_2^3} \right),
\end{aligned} \tag{2.73}$$

де  $x_{1_2}$  – кінцева координата процесу гальмування;  $t_2$  – тривалість гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки.

У виразах (2.71)-(2.73) координата початкового положення центра мас візка при розгоні  $x_{0_p}$  та кінцева координата процесу гальмування  $x_{1_2}$  відповідають його крайнім положенням, однак невідомими є швидкість руху  $\dot{x}_y$  формувального візка на усталеному режимі, координати початкового  $x_{0_y}$  та кінцевого  $x_{1_y}$  положень центра мас візка при усталеному русі.

Розділимо переміщення  $S$  формувального візка від одного крайнього положення до іншого на три ділянки: 1 – ділянка розгону, їй відповідає переміщення  $S_p$ ; 2 – ділянка усталеного руху, їй відповідає переміщення  $S_y$ ; 3 – ділянка гальмування, їй відповідає переміщення  $S_z$ . Із врахуванням залежностей (2.71)-(2.73) вирази переміщення на кожній ділянці можна подати у вигляді:

$$S_p = \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_p} \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 8 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} \right) dt = \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_p^2} - 2 \cdot \frac{t^4}{t_p^3} + \frac{3}{5} \cdot \frac{t^5}{t_p^4} \right) \Big|_0^{t_p} = \frac{3}{5} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p; \tag{2.74}$$

$$S_y = \int_0^{t_y} \dot{x}_y dt = \dot{x}_y \cdot t_y = \dot{x}_y \cdot t_y; \tag{2.75}$$

$$S_z = \int_0^{t_z} \dot{x}_z dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_z} \left( 1 - 4 \cdot \frac{t^3}{t_z^3} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_z^4} \right) dt = \dot{x}_y \cdot \left( t - \frac{t^4}{t_z^3} + \frac{3}{5} \cdot \frac{t^5}{t_z^4} \right) \Big|_0^{t_z} = \frac{3}{5} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z. \tag{2.76}$$

Тоді вираз загального переміщення формувального візка можна подати у вигляді:

$$S = S_p + S_y + S_z = \frac{3}{5} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p + \dot{x}_y \cdot t_y + \frac{3}{5} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{3}{5} \cdot t_p + t_y + \frac{3}{5} \cdot t_z \right). \tag{2.77}$$

Підставивши у попередній вираз  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$  та амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x = S$ , отримуємо:

$$\Delta x = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 + \frac{2}{3} \cdot t_3 + \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 \right) = \frac{13}{15} \cdot \dot{x}_y \cdot t_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{15 \cdot \Delta x}{13 \cdot t_3}. \quad (2.78)$$

Координату положення формувального візка, що визначає закінчення ділянки розгону та початок ділянки усталеного руху  $x_{0y}$ , можна визначити з виразів (2.74) та (2.78):

$$x_{0y} = \frac{3}{5} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p = \frac{3}{5} \cdot \frac{15 \cdot \Delta x}{13 \cdot t_3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 = \frac{3}{26} \cdot \Delta x, \quad (2.79)$$

а координату, що визначає закінчення ділянки усталеного руху  $x_{1y}$  та початок ділянки гальмування, можна визначити з виразів (2.75), (2.78) та (2.79):

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y \cdot t_y = \frac{3}{26} \cdot \Delta x + \frac{15 \cdot \Delta x}{13 \cdot t_3} \cdot \frac{2}{3} \cdot t_3 = \frac{23}{26} \cdot \Delta x. \quad (2.80)$$

Підставивши вирази (2.78)-(2.80) у рівності (2.71)-(2.73) та задавши амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , розраховано кінематичні характеристики комбінованого режиму руху формувального візка. За результатами розрахунків побудовано графіки комбінованого режиму зміни переміщення (рис. 2.17, а), швидкості (рис. 2.17, б), прискорення (рис. 2.17, в) та ривка (рис. 2.17, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

Перетворивши перші рівняння виразів (2.71)-(2.73) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка з урахуванням виразів (2.78)-(2.80), отримаємо:

– на ділянці розгону:

$$x_p = \frac{1080}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 - 6 \cdot \frac{t}{t_3} + 10,8 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - \frac{1}{2} \cdot \Delta x; \quad (2.81)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x_y = \frac{3}{26} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + 10 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{1}{2} \cdot \Delta x; \quad (2.82)$$

– на ділянці гальмування:

$$x_2 = \frac{1}{2} \cdot \Delta x - \frac{15}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 0,1 - \frac{t}{t_3} + 216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 777,6 \frac{t^5}{t_3^5} \right). \quad (2.83)$$



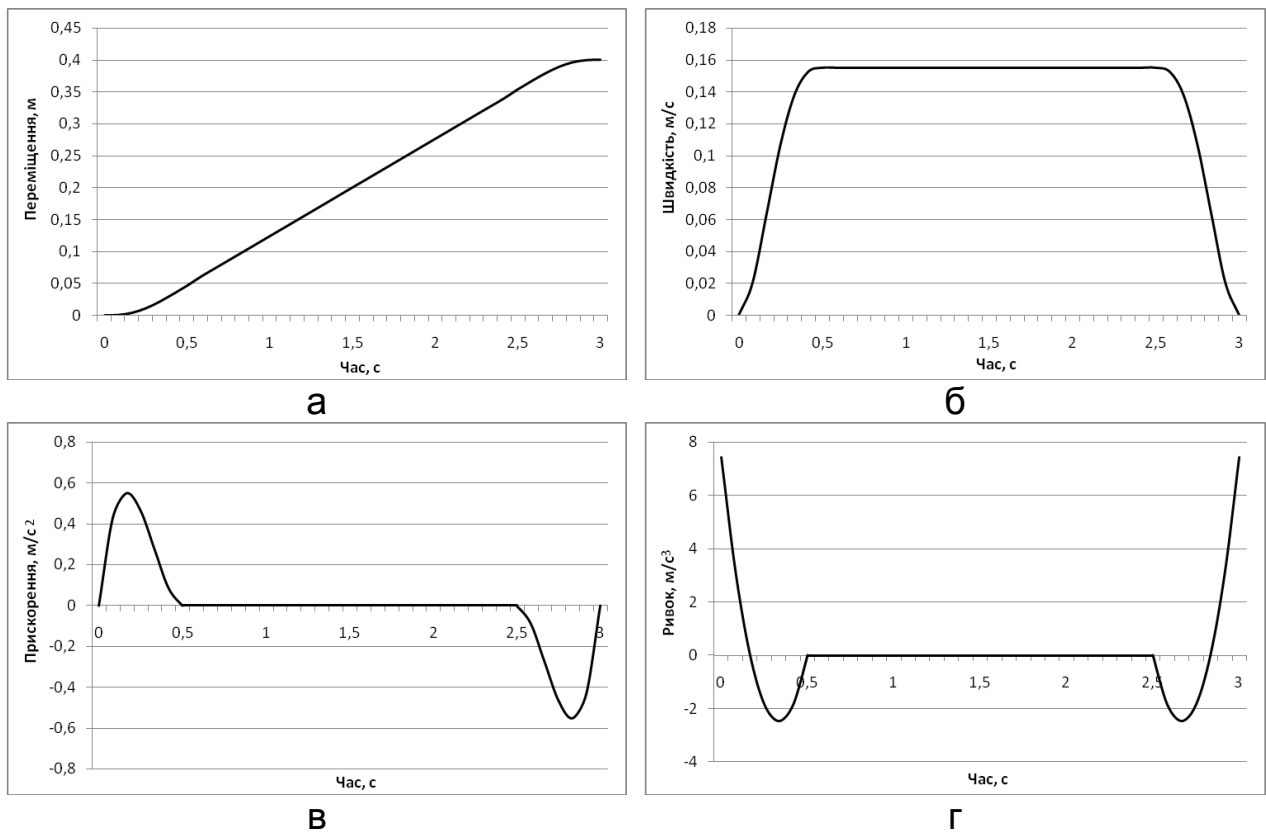


Рис. 2.17. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при комбінованому режимі руху формувального візка

Закон руху візка, описаний рівняннями (2.81)-(2.83), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці розгону:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1080}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 - 6 \cdot \frac{t}{t_3} + 10,8 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - \frac{1}{2} \cdot \Delta x; \quad (2.84)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3}{26} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + 10 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{1}{2} \cdot \Delta x; \quad (2.85)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{2} \cdot \Delta x - \frac{15}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 0,1 - \frac{t}{t_3} + 216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 777,6 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} \right), \quad (2.86)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (2.84)-(2.86), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час розгону формувального візка визначається залежністю  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес розгону здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = 5 \cdot \frac{\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 5 \cdot \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1080}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 - 6 \cdot \frac{\varphi}{\pi} + 10,8 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} \right) \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} - \frac{1}{2} \cdot \Delta x, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (2.87)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3}{26} \cdot \Delta x \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] - \frac{1}{2} \cdot \Delta x, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (2.88)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{15}{13} \cdot \Delta x \cdot \left[ 0,1 - \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + 216 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 777,6 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} \right], \quad (2.89)$$

$$\frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi.$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{1080}{13} \cdot \Delta x \cdot \left[ 1 - 6 \cdot \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} + 10,8 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} \right] \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (2.90)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{3}{26} \cdot \Delta x \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (2.91)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{15}{13} \cdot \Delta x \cdot \left[ 0,1 - \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + 216 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 777,6 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} \right], \quad (2.92)$$

$$\frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi.$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.87)-(2.92) профіль кулачка (рис. 2.18) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [141].

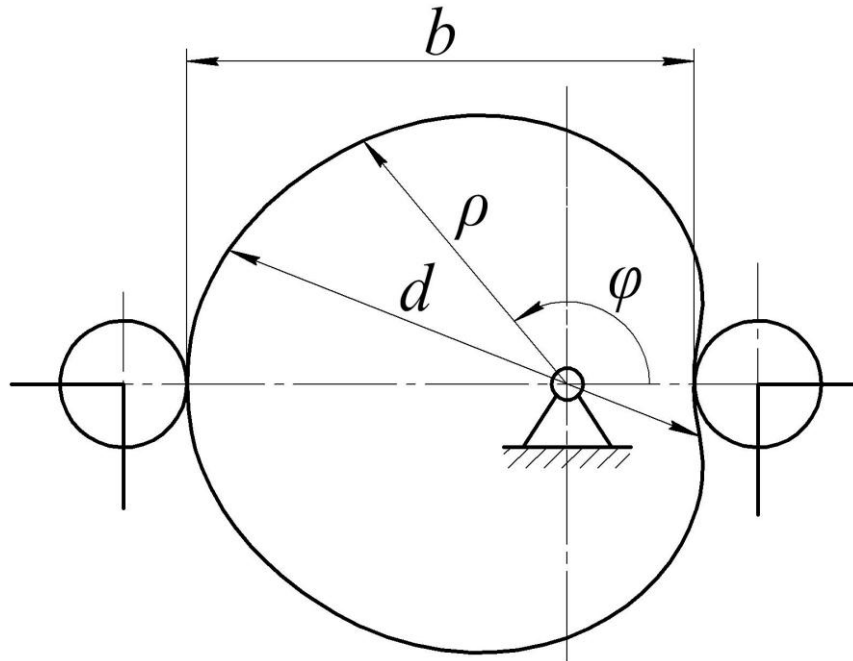


Рис. 2.18. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка

## 2.8. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим режимом руху за прискоренням третього порядку

Для плавного процесу розгону та гальмування формувального візка запропоновано здійснювати їх за оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку. При цьому швидкість, прискорення та ривок формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що в свою чергу позитивно впливає на її довговічність.

При оптимальному режимі розгону формувального візка за прискоренням третього порядку зі стану спокою до виходу на усталений режим руху координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями, що визначаються з виразів (2.18). Для ділянки

розгону крайові умови приймають наступні значення:  $t=0$ :  $x=0$ ,  $\dot{x}=0$ ,  $\ddot{x}=0$ ,  $\ddot{\ddot{x}}=0$  та  $t=t_p$ :  $\dot{x}=\dot{x}_y$ ,  $\ddot{x}=0$ ,  $\ddot{\ddot{x}}=0$ ,  $x=0$ . Тут  $t_p$  – тривалість розгону формувального візка зі стану спокою до виходу на усталений режим руху;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху формувального візка на усталеному режимі.

Підставивши вищевказані крайові умови у (2.18), отримаємо [84, 88]:

$$t=0: D_8=0; D_7=0; D_6=0; D_5=0; \quad (2.93)$$

$$t=t_p: \begin{cases} \frac{1}{720} \cdot D_1 \cdot t_p^6 + \frac{1}{120} \cdot D_2 \cdot t_p^5 + \frac{1}{24} \cdot D_3 \cdot t_p^4 + \frac{1}{6} \cdot D_4 \cdot t_p^3 = \dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot D_1 \cdot t_p^5 + \frac{1}{24} \cdot D_2 \cdot t_p^4 + \frac{1}{6} \cdot D_3 \cdot t_p^3 + \frac{1}{2} \cdot D_4 \cdot t_p^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot D_1 \cdot t_p^4 + \frac{1}{6} \cdot D_2 \cdot t_p^3 + \frac{1}{2} \cdot D_3 \cdot t_p^2 + D_4 \cdot t_p = 0; \\ \frac{1}{6} \cdot D_1 \cdot t_p^3 + \frac{1}{2} \cdot D_2 \cdot t_p^2 + D_3 \cdot t_p + D_4 = 0. \end{cases} \quad (2.94)$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.94), отримуємо постійні інтегрування  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  та  $D_4$ :

$$D_1 = -7200 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^6}; \quad D_2 = 4320 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^5}; \quad D_3 = -1080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^4}; \quad D_4 = 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^3}. \quad (2.95)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (2.93) та (2.95) у систему (2.18) отримаємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі розгону зі стану спокою до виходу на усталений режим руху [84, 88]:

$$\begin{aligned} x_p &= x_{0p} + \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6 \cdot \frac{t^6}{t_p^5} - 9 \cdot \frac{t^5}{t_p^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_p^3} \right); \\ \dot{x}_p &= \dot{x}_y \cdot \left( -10 \cdot \frac{t^6}{t_p^6} + 36 \cdot \frac{t^5}{t_p^5} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} + 20 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} \right); \\ \ddot{x}_p &= 60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{t^5}{t_p^6} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_p^5} - 3 \cdot \frac{t^3}{t_p^4} + \frac{t^2}{t_p^3} \right); \\ \ddot{\ddot{x}}_p &= 60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( -5 \cdot \frac{t^4}{t_p^6} + 12 \cdot \frac{t^3}{t_p^5} - 9 \cdot \frac{t^2}{t_p^4} + 2 \cdot \frac{t}{t_p^3} \right), \end{aligned} \quad (2.96)$$

де  $x_{0p}$  – координата початкового положення центра мас візка при розгоні;  $t$  – час.

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{x}_y = 0, \quad (2.97)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

При оптимальному режимі гальмування формувального візка за прискоренням третього порядку зі стану спокою до виходу на усталений режим руху координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок його центра мас описуються залежностями, що визначаються з виразів (2.18). Для ділянки гальмування крайові умови приймають наступні значення:  $t = 0$ :  $\dot{x} = \dot{x}_y$ ,  $\ddot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$ ,  $\overset{IV}{x} = 0$  та  $t = t_2$ :  $x = x_{12}$ ,  $\dot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$ . Тут  $t_2$  – тривалість гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки;  $x_{12}$  – кінцева координата процесу гальмування;

Підставивши вищевказані крайові умови у (2.18), отримаємо:

$$t = 0: \quad D_7 = \dot{x}_y; \quad D_6 = 0; \quad D_5 = 0; \quad D_4 = 0; \quad (2.98)$$

$$t = t_2: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot D_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot D_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot D_3 \cdot t_2^5 + \dot{x}_y \cdot t_2 + D_8 = x_{12}; \\ \frac{1}{720} \cdot D_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot D_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot D_3 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot D_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot D_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot D_3 \cdot t_2^3 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot D_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot D_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot D_3 \cdot t_2^2 = 0. \end{cases} \quad (2.99)$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.99), отримуємо постійні інтегрування  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  та  $D_8$ :

$$D_1 = -7200 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6}; \quad D_2 = 2880 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5}; \quad D_3 = -360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4}; \quad D_8 = x_{12} - \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_2. \quad (2.100)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (2.98) та (2.100) у систему (2.18) отримаємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки:

$$\begin{aligned}
x_2 &= x_{1z} - \dot{x}_y \cdot \left( \frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_2^6} - 4 \cdot \frac{t^6}{t_2^5} + 3 \cdot \frac{t^5}{t_2^4} - t + \frac{4}{7} \cdot t_2 \right); \\
\dot{x}_2 &= \dot{x}_y \cdot \left( -10 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} + 24 \cdot \frac{t^5}{t_2^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 1 \right); \\
\ddot{x}_2 &= 60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{t^5}{t_2^6} + 2 \cdot \frac{t^4}{t_2^5} - \frac{t^3}{t_2^4} \right); \\
\ddot{\ddot{x}}_2 &= 60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( -5 \cdot \frac{t^4}{t_2^6} + 8 \cdot \frac{t^3}{t_2^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_2^4} \right).
\end{aligned} \tag{2.101}$$

У виразах (2.96), (2.97) та (2.101) координата початкового положення центра мас візка при розгоні  $x_{0p}$  та кінцева координата процесу гальмування  $x_{1z}$  відповідають його крайнім положенням, однак невідомими є швидкість руху  $\dot{x}_y$  формувального візка на усталеному режимі, координати початкового  $x_{0y}$  та кінцевого  $x_{1y}$  положень центра мас візка при усталеному русі.

Розділимо переміщення  $S$  формувального візка від одного крайнього положення до іншого на три ділянки: 1 – ділянка розгону, їй відповідає переміщення  $S_p$ ; 2 – ділянка усталеного руху, їй відповідає переміщення  $S_y$ ; 3 – ділянка гальмування, їй відповідає переміщення  $S_z$ . Із врахуванням залежностей (2.96), (2.97) та (2.101) вирази переміщення на кожній ділянці можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned}
S_p &= \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_p} \left( -10 \cdot \frac{t^6}{t_p^6} + 36 \cdot \frac{t^5}{t_p^5} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} + 20 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} \right) dt = \\
&= \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6 \cdot \frac{t^6}{t_p^5} - 9 \cdot \frac{t^5}{t_p^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_p^3} \right) \Bigg|_0^{t_p} = \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p;
\end{aligned} \tag{2.102}$$

$$S_y = \int_0^{t_y} \dot{x}_y dt = \dot{x}_y \cdot t \Big|_0^{t_y} = \dot{x}_y \cdot t_y; \tag{2.103}$$

$$\begin{aligned}
S_z &= \int_0^{t_2} \dot{x}_z dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_2} \left( -10 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} + 24 \cdot \frac{t^5}{t_2^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 1 \right) dt = \\
&= \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_2^6} + 4 \cdot \frac{t^6}{t_2^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_2^4} + t \right) \Bigg|_0^{t_2} = \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_2.
\end{aligned} \tag{2.104}$$

Тоді вираз загального переміщення формувального візка можна подати у вигляді:

$$S = S_p + S_y + S_z = \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p + \dot{x}_y \cdot t_y + \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{4}{7} \cdot t_p + t_y + \frac{4}{7} \cdot t_z \right). \quad (2.105)$$

Підставивши у попередній вираз  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$  та амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x = S$ , отримуємо:

$$\Delta x = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 + \frac{2}{3} \cdot t_3 + \frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 \right) = \frac{6}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{7 \cdot \Delta x}{6 \cdot t_3}. \quad (2.106)$$

Координату положення формувального візка, що визначає закінчення ділянки розгону та початок ділянки усталеного руху  $x_{0y}$ , можна визначити з виразів (2.102) та (2.106):

$$x_{0y} = \frac{4}{7} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p = \frac{4}{7} \cdot \frac{7 \cdot \Delta x}{6 \cdot t_3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 = \frac{1}{9} \cdot \Delta x, \quad (2.107)$$

а координату, що визначає закінчення ділянки усталеного руху  $x_{1y}$  та початок ділянки гальмування, можна визначити з виразів (2.103), (2.106) та (2.107):

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y \cdot t_y = \frac{1}{9} \cdot \Delta x + \frac{7 \cdot \Delta x}{6 \cdot t_3} \cdot \frac{2}{3} \cdot t_3 = \frac{8}{9} \cdot \Delta x. \quad (2.108)$$

Підставивши вирази (2.106)-(2.108) у залежності (2.96), (2.97) та (2.101) і прийнявши  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , кінематичні характеристики формувального візка на ділянках розгону, усталеного руху та гальмування можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} x_p &= 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 216 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 54 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); \\ \dot{x}_p &= 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -2160 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} + 1296 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 270 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 20 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \\ \ddot{x}_p &= 15120 \cdot \Delta x \cdot \left( -216 \cdot \frac{t^5}{t_3^7} + 108 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); \\ \ddot{\ddot{x}}_p &= 30240 \cdot \Delta x \cdot \left( -540 \cdot \frac{t^4}{t_3^7} + 216 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 27 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (2.109)$$

$$x_y = \frac{1}{9} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x}_y = \frac{7 \cdot \Delta x}{6 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \quad (2.110)$$

$$\begin{aligned}
x_2 &= \Delta x - \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 31104 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - \frac{t}{t_3} + \frac{2}{21} \right); \\
\dot{x}_2 &= \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left( -466560 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} + 186624 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right); \\
\ddot{x}_2 &= 90720 \cdot \Delta x \cdot \left( -36 \cdot \frac{t^5}{t_3^7} + 12 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - \frac{t^3}{t_3^5} \right); \\
\dddot{x}_2 &= 272160 \cdot \Delta x \cdot \left( -60 \cdot \frac{t^4}{t_3^7} + 16 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - \frac{t^2}{t_3^5} \right).
\end{aligned}
\tag{2.111}$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (2.109)-(2.111) розраховано кінематичні характеристики комбінованого режиму руху формувального візка за прискоренням третього порядку. За результатами розрахунків побудовано графіки комбінованого режиму зміни переміщення (рис. 2.19, а), швидкості (рис. 2.19, б), прискорення (рис. 2.19, в) та ривка (рис. 2.19, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

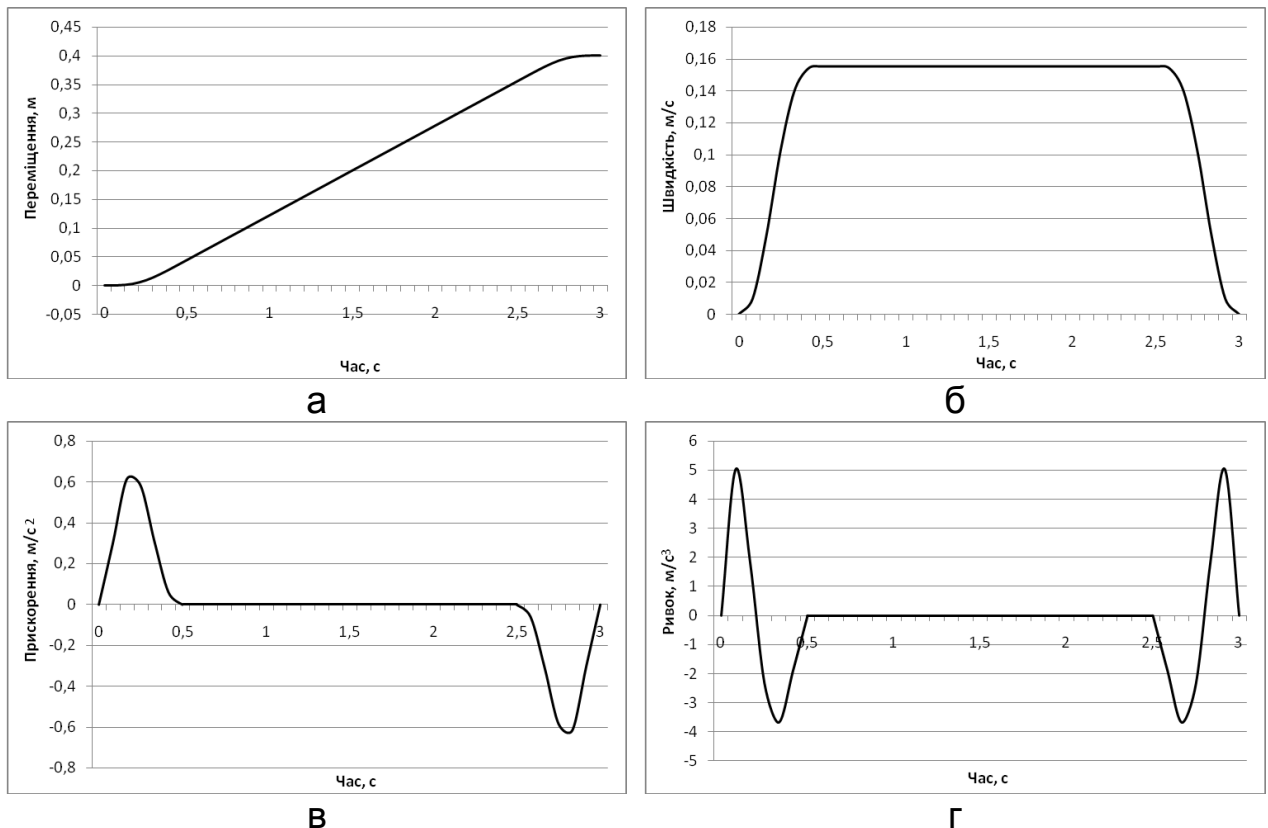


Рис. 2.19. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при комбінованому режимі руху формувального візка за прискоренням третього порядку



Перетворивши перші рівняння виразів (2.109)-(2.111) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці розгону:

$$x_p = 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 216 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 54 \cdot \frac{t}{t_3} + 5 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.112)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x_y = \frac{1}{9} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.113)$$

– на ділянці гальмування:

$$x_z = \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 31104 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - \frac{t}{t_3} + \frac{2}{21} \right). \quad (2.114)$$

Закон руху візка, описаний залежностями (2.112)-(2.114), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому змінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці розгону:

$$\rho = \frac{b}{2} + 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 216 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 54 \cdot \frac{t}{t_3} + 5 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.115)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9} \cdot \Delta x \cdot \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (2.116)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 31104 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - \frac{t}{t_3} + \frac{2}{21} \right), \quad (2.117)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (2.115)-(2.117), оскільки  $t = \varphi / \omega$ , а  $t_3 = \pi / \omega$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час розгону формувального візка ви-

значається залежністю  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес розгону здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = 5 \cdot \frac{\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 5 \cdot \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} + 216 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 54 \cdot \frac{\varphi}{\pi} + 5 \right) \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (2.118)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9} \cdot \Delta x \cdot \left[ 1 + \frac{21}{2} \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (2.119)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left[ \frac{466560}{7} \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} - 31104 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + \right. \\ \left. + 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (2.120)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється за залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - 252 \cdot \Delta x \cdot \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} + 216 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 54 \cdot \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} + 5 \right) \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + \frac{\Delta x}{2}, \quad (2.121) \\ \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{1}{9} \cdot \Delta x \cdot \left[ 1 + \frac{21}{2} \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (2.122)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{7}{6} \cdot \Delta x \cdot \left[ \frac{466560}{7} \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} - 31104 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + \right. \\ \left. + 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad (2.123) \\ \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi.$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (2.118)-(2.123) профіль кулачка (рис. 2.20) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

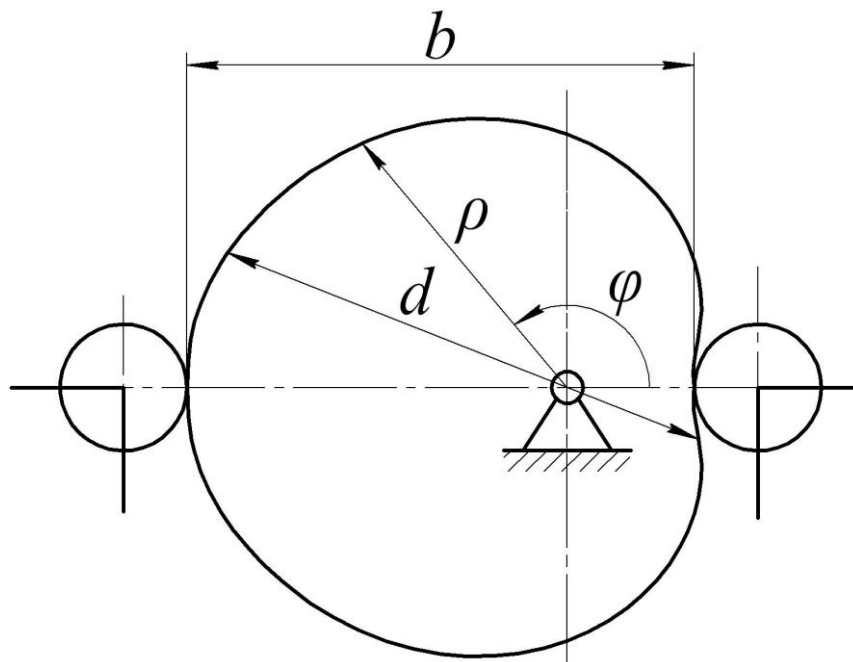


Рис. 2.20. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка за прискоренням третього порядку

### РОЗДІЛ 3

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РЕВЕРСУВАННЯ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ

### 3.1. Оптимізація динамічного режиму реверсування

Для роликової формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що позитивно вплинуло б на якість готового виробу. Однак на практиці такий режим руху здійснити неможливо, оскільки в ньому відсутні ділянки розгону та гальмування, без яких не може бути циклічного руху. Тому пропонується реалізувати такий режим руху формувального візка при його переміщенні, у якому були б ділянки реверсування з мінімальними динамічними навантаженнями та ділянки руху з постійною швидкістю.

Для плавного процесу реверсування формувального візка запропоновано здійснювати його за оптимальним динамічним режимом руху [88]. При цьому швидкість формувального візка змінюється плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що в свою чергу позитивно впливає на її довговічність.

Критеріями режиму руху механізмів і машин можуть бути коефіцієнти нерівномірності руху та динамічності [88]. В якості критерію режиму руху використаємо критеріальну дію, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для динамічного режиму реверсування критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_v = \int_0^{t_p} V dt \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість реверсування;  $V$  – “енергія” прискорень:

$$V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \ddot{x}^2, \quad (3.2)$$

де  $m$  – маса формувального візка;  $\ddot{x}$  – прискорення його центра мас.

Умовою мінімуму критерію (3.1) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial V}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{x}} = 0, \quad (3.3)$$

де  $x$ ,  $\dot{x}$  – координата переміщення та швидкість центра мас візка.

З виразу (3.3) можна записати:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial \dot{x}} = 0; \quad \frac{\partial V}{\partial \ddot{x}} = m \cdot \ddot{x}; \quad \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{x}} = m \cdot \overset{IV}{x} = 0. \quad (3.4)$$

З останнього рівняння (3.4) отримуємо диференціальне рівняння та його розв'язки:

$$\overset{IV}{x} = 0; \quad \ddot{x} = C_1; \quad \dot{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad x = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \quad (3.5)$$

$$x = \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4,$$

де  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є:  $t=0$ :  $x=-x_1$ ;  $\dot{x}=\dot{x}_y$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2$ :  $x=0$ ;  $\dot{x}=0$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t=0$ :  $x=0$ ;  $\dot{x}=0$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n$ :  $x=-x_1$ ;  $\dot{x}=-\dot{x}_y$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у залежності (3.5), отримуємо:

$$t=0: \quad C_4 = -x_1; \quad C_3 = \dot{x}_y; \quad (3.6)$$

$$t=t_2: \quad \begin{cases} \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_2^2 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t_2^2 + C_2 \cdot t_2 + \dot{x}_y = 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.7), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$  та  $C_2$ :

$$C_1 = 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^3}; \quad C_2 = 6 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2}. \quad (3.8)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.6) та (3.8) у систему (3.5) отримаємо функцію зміни прискорення формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\ddot{x} = \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot t + 6 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} \quad (3.9)$$

або

$$\ddot{x} = \frac{2}{t_2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right) \right]. \quad (3.10)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.2) та (3.10) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{V_2} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} \ddot{x}^2 dt = \frac{2 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 3 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 9 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 6 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \right] dt = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_2^2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot t_2 + 3 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot t_2 + \left( 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 2 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot t_2 \right] = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ 3 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 3 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \dot{x}_y^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у рівняння (3.5), отримуємо:

$$t=0: \quad C_3=0; \quad C_4=0; \quad (3.12)$$

$$t=t_n: \quad \begin{cases} \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_n^2 = -x_1; \\ \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t_n^2 + C_2 \cdot t_n = -\dot{x}_y. \end{cases} \quad (3.13)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.13), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$  та  $C_2$ :

$$C_1 = 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2}; \quad C_2 = 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 6 \cdot \frac{x_1}{t_n^2}. \quad (3.14)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.12) та (3.14) у систему (3.5) отримаємо функцію зміни прискорення формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\ddot{x} = \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \right) \cdot t + 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 6 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \quad (3.15)$$

або

$$\dot{x} = \frac{2}{t_n} \cdot \left[ 3 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]. \quad (3.16)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.2) та (3.16) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{Vn} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} \dot{x}^2 dt = \frac{2 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 3 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 9 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 6 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \right] dt = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_n^2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot t_n + 3 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot t_n + \left( \dot{x}_y - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot t_n \right] = \\ &= \frac{2 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ 3 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \dot{x}_y^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (3.11) та (3.17) буде визначатися наступним виразом:

$$I_V = I_{Vz} + I_{Vn} = \frac{2 \cdot m}{t_z} \cdot \left[ 3 \cdot \frac{x_1^2}{t_z^2} - 3 \cdot \frac{x_1}{t_z} \cdot \dot{x}_y + \dot{x}_y^2 \right] + \frac{2 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ 3 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 3 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.18)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_z = t_n = t_1$ , вираз (3.18) можна подати у наступному вигляді:

$$I_V = \frac{2 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 6 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 6 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + 2 \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.19)$$

Для забезпечення виконання умови (3.1) необхідно розв'язати рівняння:

$$\frac{\partial I_V}{\partial x_1} = \frac{2 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 12 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{12 \cdot m}{t_1^2} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0. \quad (3.20)$$

Із виразу (3.20) можна отримати:

$$2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (3.21)$$

Підставивши другий вираз (3.21) у рівності (3.6) та (3.8) отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_3 = \dot{x}_y; \quad C_4 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (3.22)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.22) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( -\frac{t^2}{t_1} + 2 \cdot t - t_1 \right); \quad \dot{x} = \dot{x}_y \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right); \quad \ddot{x} = -\frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0. \quad (3.23)$$

Підставивши другий вираз (3.21) у рівності (3.12) та (3.14) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = 0. \quad (3.24)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.24) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$x = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \frac{t^2}{t_1}; \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \frac{t}{t_1}; \quad \ddot{x} = -\frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0. \quad (3.25)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0, \quad (3.26)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (3.26) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши отримані координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (3.26) отримано залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (3.27)$$



Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{\Delta x}{10}. \quad (3.28)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (3.28) у рівності (3.23), (3.25) та (3.26), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{18 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{t^2}{t_3^2}; \quad \dot{x} = \frac{36 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{t}{t_3^2}; \quad \ddot{x} = \frac{36 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3^2}; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (3.29)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3}\right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (3.30)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left(-36 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 12 \cdot \frac{t}{t_3} + 9\right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot t}{t_3}\right); \quad \ddot{x} = -\frac{36 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3^2}; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0. \quad (3.31)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (3.29)-(3.31) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 3.1, а), швидкості (рис. 3.1, б), прискорення (рис. 3.1, в) та ривка (рис. 3.1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше з оптимальним динамічним режимом реверсування.

Перетворивши перші рівняння виразів (3.29)-(3.31) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{18 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.32)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{3 \cdot t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.33)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left( -36 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 12 \cdot \frac{t}{t_3} + 9 \right) - \frac{\Delta x}{2}. \quad (3.34)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (3.32)-(3.34), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим перемінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{18 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.35)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{3 \cdot t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.36)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{10} \cdot \left( -36 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 12 \cdot \frac{t}{t_3} + 9 \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad (3.37)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

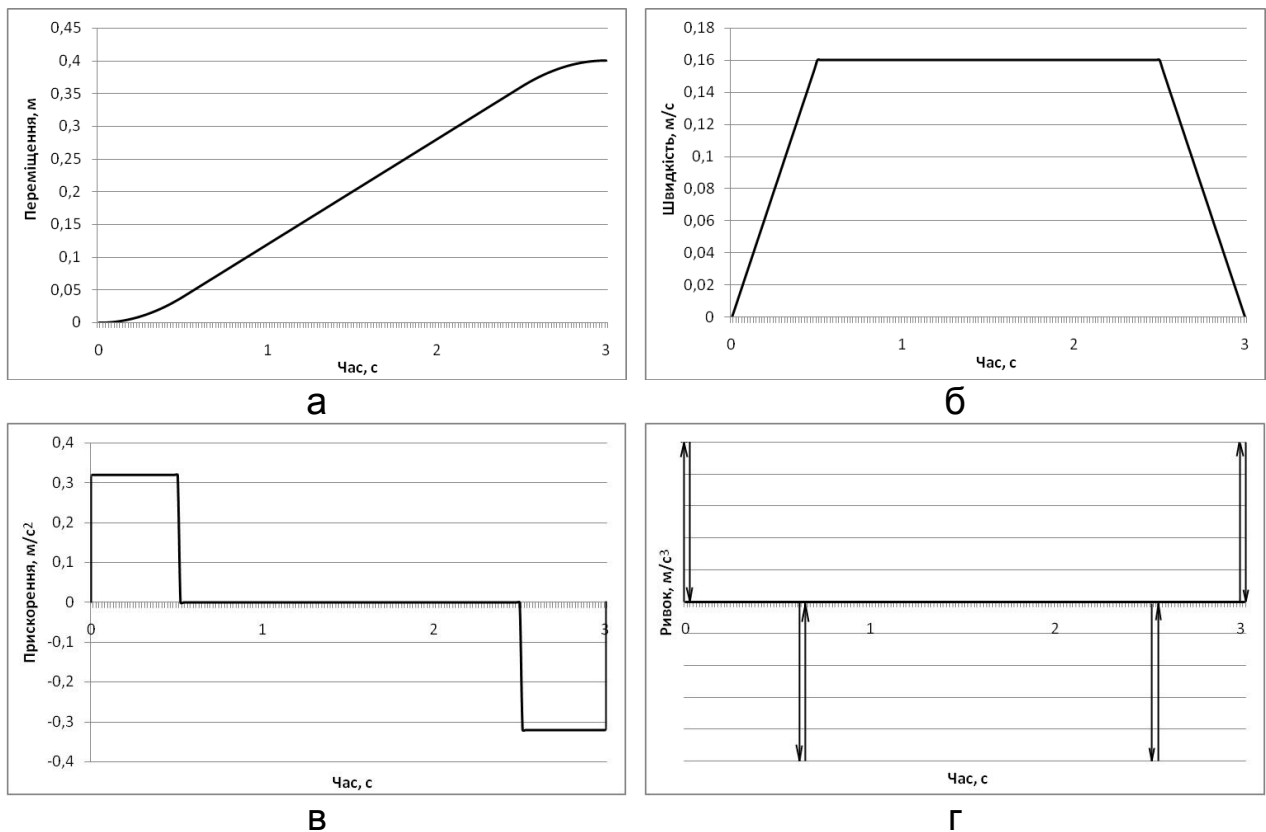


Рис. 3.1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з оптимальним динамічним режимом реверсування

Час  $t$  можна виключити із залежностей (3.35)-(3.37), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{18 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (3.38)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (3.39)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{10} \cdot \left[ -36 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi^2} + 12 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + 9 \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (3.40)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{18 \cdot \Delta x}{5} \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (3.41)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right], \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (3.42)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{10} \cdot \left[ -36 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi^2} + 12 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + 9 \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (3.43)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний залежностями (3.38)-(3.43) профіль кулачка (рис. 3.2) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [142].

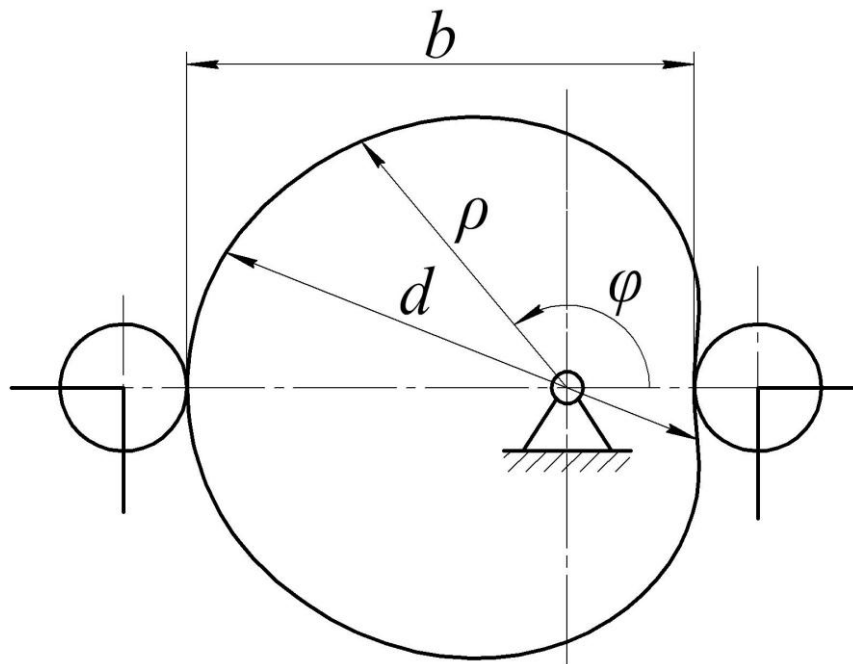


Рис. 3.2. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з оптимальним динамічним реверсуванням

### 3.2. Оптимізація ривкового режиму реверсування

Для плавного процесу реверсування формувального візка запропоновано здійснювати його за оптимальним ривковим режимом руху [81, 88, 91]. При цьому швидкість та прискорення формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що, в свою чергу, позитивно впливає на її довговічність.

Критеріями режиму руху механізмів і машин можуть бути коефіцієнти нерівномірності руху та динамічності [81, 88, 91]. В якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для ривкового режиму реверсування критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_W = \int_0^{t_p} W dt \rightarrow \min, \quad (3.44)$$

де  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість реверсування;  $W$  – “енергія” ривків:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \ddot{x}^2, \quad (3.45)$$

де  $m$  – маса формувального візка;  $\ddot{x}$  – ривок його центра мас.

Умовою мінімуму критерію (3.44) є рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial W}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial W}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial W}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial W}{\partial \ddot{x}} = 0, \quad (3.46)$$

де  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  – координата переміщення, швидкість та прискорення центра мас візка.

З виразу (3.46) можна записати:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial W}{\partial \ddot{x}} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial \ddot{x}} = m \cdot \ddot{x}; \quad \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial W}{\partial \ddot{x}} = m \cdot \overset{VI}{x} = 0. \quad (3.47)$$

З останнього рівняння (3.47) отримуємо диференціальне рівняння та його розв’язки:

$$\begin{aligned} \overset{VI}{x} &= 0; \quad \overset{V}{x} = C_1; \quad \overset{IV}{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \ddot{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \dot{x} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\ x &= \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6, \end{aligned} \quad (3.48)$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є:  $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у залежності (3.48), отримуємо:

$$t=0: C_6 = -x_1; C_5 = \dot{x}_y; C_4 = 0; \quad (3.49)$$

$$t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_2^2 + C_3 \cdot t_2 = 0. \end{cases} \quad (3.50)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.50), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2$  та  $C_3$ :

$$C_1 = \frac{360 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right)}{t_2^4}; \quad C_2 = \frac{24 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)}{t_2^3}; \quad C_3 = \frac{12 \cdot \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right)}{t_2^2}. \quad (3.51)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.49) та (3.51) у систему (3.48) отримаємо функцію зміни ривка формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\ddot{x} = 180 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^4} + 24 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^3} + 12 \cdot \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{1}{t_2^2} \quad (3.52)$$

або

$$\ddot{x} = \frac{12}{t_2^2} \cdot \left[ 15 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 2 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right) \right]. \quad (3.53)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.45) та (3.53) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 I_{W_2} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} \ddot{x}^2 dt = \frac{72 \cdot m}{t_2^4} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 15 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 2 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right) \right]^2 dt = \\
 &= \frac{72 \cdot m}{t_2^4} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 225 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 4 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 60 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 30 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\
 &\quad \left. + 4 \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_2} \right] dt = \\
 &= \frac{72 \cdot m}{t_2^3} \cdot \left[ 45 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right)^2 + \frac{4}{3} \cdot \left( 8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \left( 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 3 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 15 \cdot \left( 31 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y - 30 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 8 \cdot \dot{x}_y^2 \right) + 10 \cdot \left( 10 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 11 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + 3 \cdot \dot{x}_y^2 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + 2 \cdot \left( 85 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y - 24 \cdot \dot{x}_y^2 - 75 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} \right) \right] = \\
 &= \frac{72 \cdot m}{t_2^3} \cdot \left[ 5 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{4}{3} \cdot \dot{x}_y^2 \right].
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у рівняння (3.48), отримуємо:

$$t = 0: \quad C_4 = 0; \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \tag{3.55}$$

$$t = t_n: \quad \begin{cases} \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 = -x_1; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_n^2 + C_3 \cdot t_n = 0. \end{cases} \tag{3.56}$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.56), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$  та  $C_3$ :

$$C_1 = \frac{360 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)}{t_n^4}; \quad C_2 = \frac{24 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right)}{t_n^3}; \quad C_3 = \frac{12 \cdot \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)}{t_n^2}. \tag{3.57}$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.55) та (3.57) у систему (3.48) отримаємо функцію зміни ривка формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\ddot{x} = 180 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^4} + 24 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n^3} + 12 \cdot \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{1}{t_n^2} \quad (3.58)$$

або

$$\ddot{x} = \frac{12}{t_n^2} \cdot \left[ 15 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]. \quad (3.59)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.45) та (3.59) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{Wn} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} \ddot{x}^2 dt = \frac{72 \cdot m}{t_n^4} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 15 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{72 \cdot m}{t_n^4} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 225 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 4 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + 60 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 30 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \\ &\quad \left. + 4 \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t}{t_n} \right] dt = \\ &= \frac{72 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ 45 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \frac{4}{3} \cdot \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \left( 2 \cdot \dot{x}_y - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + 15 \cdot \left( 29 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y - 30 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \dot{x}_y^2 \right) + 10 \cdot \left( 10 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + 2 \cdot \dot{x}_y^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \left( 65 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y - 14 \cdot \dot{x}_y^2 - 75 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} \right) \right] = \\ &= \frac{72 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ 5 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{4}{3} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (3.54) та (3.60) буде визначатися наступним виразом:

$$I_W = I_{Wz} + I_{Wn} = \frac{72 \cdot m}{t_2^3} \cdot \left[ 5 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 5 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{4}{3} \cdot \dot{x}_y^2 \right] + \frac{72 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ 5 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 5 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{4}{3} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.61)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_2 = t_n = t_1$ , вираз (3.61) можна подати у наступному вигляді:



$$I_w = \frac{72 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ 10 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 10 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + \frac{8}{3} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.62)$$

Для забезпечення виконання умови (3.44) необхідно розв'язати рівняння:

$$\frac{\partial I_w}{\partial x_1} = \frac{72 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ 20 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 10 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{72 \cdot m}{t_1^4} \cdot \left[ 20 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 10 \cdot \dot{x}_y \right] = 0. \quad (3.63)$$

Із виразу (3.63) отримуємо:

$$20 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 10 \cdot \dot{x}_y = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (3.64)$$

Підставивши другий вираз (3.64) у рівності (3.49) та (3.51) отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad C_3 = -6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^2}; \quad C_4 = 0; \quad C_5 = \dot{x}_y; \quad C_6 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (3.65)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.65) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^2} + 2 \cdot t - t_1 \right); & \dot{x} &= \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + 1 \right); \\ \ddot{x} &= 6 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{t}{t_1^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 6 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t}{t_1^3} - \frac{1}{t_1^2} \right). \end{aligned} \quad (3.66)$$

Підставивши другий вираз (3.64) у рівності (3.55) та (3.57) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad C_3 = -6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^2}; \quad C_4 = 0; \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0. \quad (3.67)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.67) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^2} \right); & \dot{x} &= \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} \right); \\ \ddot{x} &= 6 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{t}{t_1^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 6 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t}{t_1^3} - \frac{1}{t_1^2} \right). \end{aligned} \quad (3.68)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0, \quad (3.69)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (3.69) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши отримані координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (3.69) знайдемо залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (3.70)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{\Delta x}{10}. \quad (3.71)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (3.71) у залежності (3.66), (3.68) та (3.69), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{216 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{t^3}{t_3^3} - 3 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); & \dot{x} &= \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{t^2}{t_3^3} - 4 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{1296 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_3^4} - \frac{t}{t_3^3} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= \frac{1296 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{1}{t_3^3} - 12 \cdot \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (3.72)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} + \frac{6 \cdot \Delta x \cdot t}{5 \cdot t_3}; \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (3.73)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{3}{2} \right); & \dot{x} &= \frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - 108 \cdot \frac{t^2}{t_3^3} + \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{1296 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_3^4} - \frac{t}{t_3^3} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= \frac{1296 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 12 \cdot \frac{t}{t_3^4} - \frac{1}{t_3^3} \right). \end{aligned} \quad (3.74)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (3.72)-(3.74) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 3.3, а), швидкості (рис. 3.3, б), прискорення (рис. 3.3, в) та ривка (рис. 3.3, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше з оптимальним ривковим режимом реверсування.

Перетворивши перші залежності виразів (3.72)-(3.74) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримуємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{216 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{t^3}{t_3^3} - 3 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.75)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{3 \cdot t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.76)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{3}{2} \right) - \frac{\Delta x}{2}. \quad (3.77)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (3.75)-(3.77), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим змінний радіус кулачка визначається залежностями:

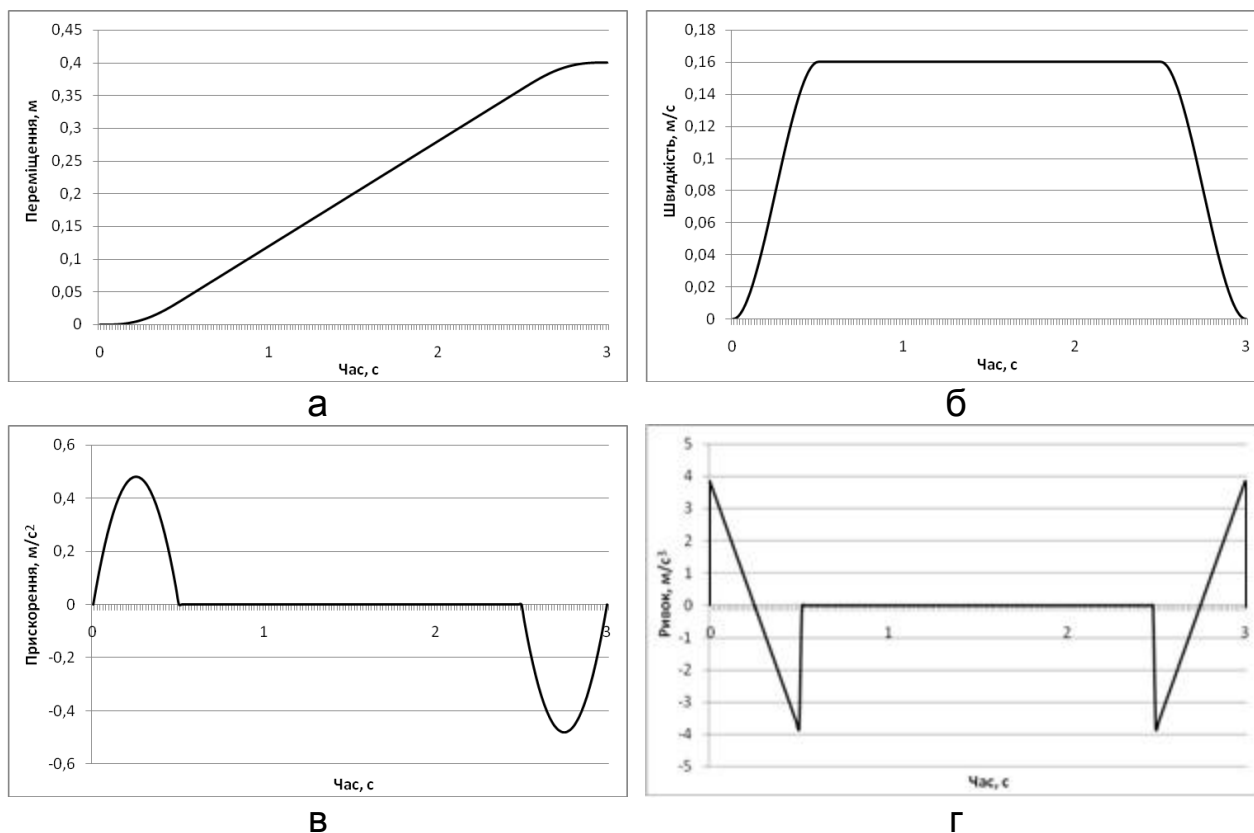


Рис. 3.3. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з оптимальним ривковим режимом реверсування

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{216 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{t^3}{t_3^3} - 3 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.78)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{3 \cdot t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.79)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{3}{2} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad (3.80)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (3.78)-(3.80), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{216 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( \frac{\varphi^3}{\pi^3} - 3 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (3.81)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (3.82)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 216 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 72 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3} + \right. \\ \left. + 2 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{3}{2} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (3.83)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{216 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} - 3 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (3.84)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (3.85)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \begin{aligned} &216 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 72 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3} + \\ &+ 2 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{3}{2} \end{aligned} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (3.86)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний залежностями (3.81)-(3.86) профіль кулачка (рис. 3.4) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [143].

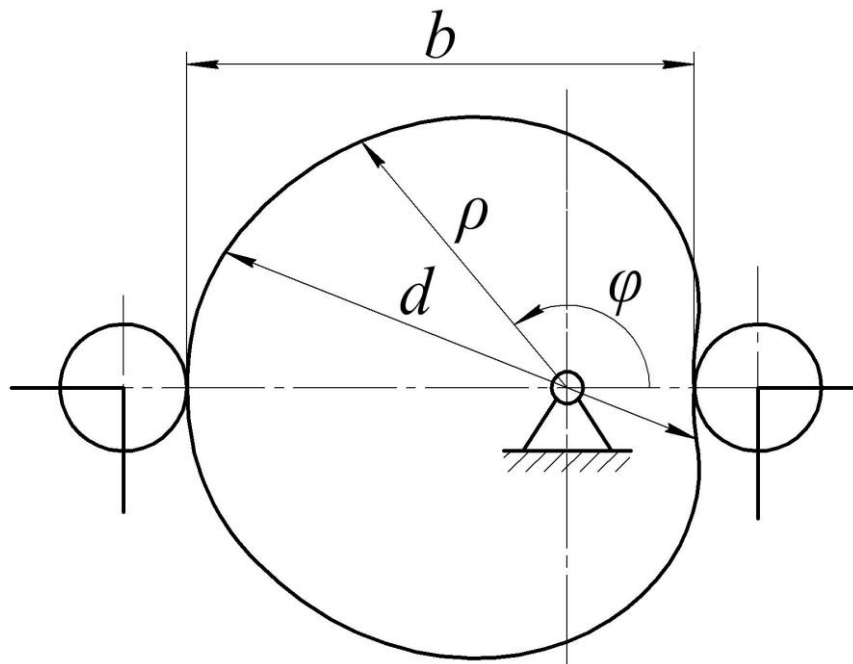


Рис. 3.4. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з оптимальним ривковим реверсуванням

### 3.3. Оптимізація режиму реверсування за прискоренням третього порядку

Для плавного процесу реверсування формувального візка запропоновано здійснювати його у відповідності з оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку [80, 88]. При цьому швидкість, прискорення та ривок формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що в свою чергу позитивно впливає на її довговічність.

В якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для оптимального режиму реверсування за прискоренням третього порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_Z = \int_0^{t_p} Z dt \rightarrow \min, \quad (3.87)$$

де  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість реверсування;  $Z$  – “енергія” прискорень третього порядку:

$$Z = \frac{1}{2} \cdot m \cdot x^{IV}, \quad (3.88)$$

де  $m$  – маса формувального візка;  $x$  – прискорення третього порядку.

Умовою мінімуму критерію (3.87) є рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial x^{IV}} = 0, \quad (3.89)$$

де  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{\ddot{x}}$  – координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок центра мас візка.

З виразу (3.89) можна записати:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{\ddot{x}}} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial x^{IV}} = m \cdot x; \quad \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial x^{IV}} = m \cdot x^{VIII} = 0. \quad (3.90)$$

З останнього рівняння (3.90) отримуємо диференціальне рівняння та його розв’язки:

$$\begin{aligned}
& \overset{VIII}{x} = 0; \quad \overset{VII}{\dot{x}} = C_1; \quad \overset{VI}{\ddot{x}} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \overset{V}{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\
& \overset{IV}{\dot{x}} = \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \overset{III}{\ddot{x}} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\
& \overset{II}{\ddot{x}} = \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \\
& \overset{I}{\dot{x}} = \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7; \\
& x = \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8,
\end{aligned} \tag{3.91}$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$  – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є:  $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \overset{IV}{\ddot{x}}=0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{\ddot{x}}=0$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на установленому режимі до початку гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{\ddot{x}}=0$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \overset{IV}{\ddot{x}}=0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (3.91), отримуємо:

$$\begin{aligned}
& t=0: C_8 = -x_1; C_7 = \dot{x}_y; C_6 = 0; C_5 = 0; \\
& t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = 0. \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.92}$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.93), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
& C_1 = 50400 \cdot \left( \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); \quad C_2 = 1440 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} - 18 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} \right); \\
& C_3 = 360 \cdot \left( 15 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); \quad C_4 = 120 \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} - 4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} \right).
\end{aligned} \tag{3.94}$$



Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.92) та (3.94) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формульованого візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\begin{aligned} x^{IV} = & 8400 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^6} + 720 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^5} + \\ & + 360 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^4} + 120 \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{1}{t_2^3} \end{aligned} \quad (3.95)$$

або

$$x^{IV} = \frac{120}{t_2^3} \cdot \left[ \begin{aligned} & 70 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ & + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right]. \quad (3.96)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.88) та (3.96) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{Zz} = & \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned} & 70 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ & + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\ = & \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned} & 4900 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} + 840 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + \\ & + 36 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 420 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \\ & + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 36 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ & + 9 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 140 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ & + 12 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ & + 6 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_2} \end{aligned} \right] dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[ \begin{aligned}
&700 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \\
&+ \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 140 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) + \\
&+ 84 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + 9 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + \\
&+ 35 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + 4 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + \\
&+ 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)
\end{aligned} \right] = \quad (3.97) \\
&= \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right].
\end{aligned}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у залежності (3.91), отримуємо:

$$t = 0: \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad (3.98)$$

$$t = t_n: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 = -x_1; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + C_4 \cdot t_n = 0. \end{cases} \quad (3.99)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.99), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 50400 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} - \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} \right); & C_2 &= 1440 \cdot \left( 17 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\
C_3 &= 360 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} - 13 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} \right); & C_4 &= 120 \cdot \left( 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right).
\end{aligned} \quad (3.100)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (3.98) та (3.100) у систему (3.91) отримуємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\begin{aligned}
x^{IV} = & 8400 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^6} + 720 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^5} + \\
& + 360 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n^4} + 120 \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{1}{t_n^3}
\end{aligned} \tag{3.101}$$

або

$$x^{IV} = \frac{120}{t_n^3} \cdot \left[ \begin{aligned} & 70 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right]. \tag{3.102}$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.88) та (3.102) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
I_{Zn} = & \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} & 70 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\
= & \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} & 4900 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + 36 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 9 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 840 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + 6 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ & + 420 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 140 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 36 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right)^2 + \\ & + 12 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} \end{aligned} \right] dt = \\
= & \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ \begin{aligned} & 700 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \\ & + 140 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) + \\ & + 84 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + 35 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) + \\ & + 9 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right)^2 + \\ & + 4 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right] =
\end{aligned}$$

$$= \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.103)$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (3.97) та (3.103) буде визначатися наступним виразом:

$$I_Z = I_{Zz} + I_{Zn} = \frac{7200 \cdot m}{t_e^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_e^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_e} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right] + \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.104)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_e = t_n = t_1$ , вираз (3.104) можна подати у наступному вигляді:

$$I_Z = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ 14 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + \frac{18}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (3.105)$$

Для забезпечення виконання умови (3.87) необхідно розв'язати рівняння:

$$\frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ 28 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{7200 \cdot m}{t_1^6} \cdot \left[ 28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y \right] = 0. \quad (3.106)$$

Із виразу (3.106) отримуємо:

$$28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (3.107)$$

Підставивши другий вираз (3.107) у залежності (3.92) та (3.94), отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad (3.108)$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1.$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.108) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$x = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot t + t_1 \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right); \quad (3.109)$$

$$\ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right).$$

Підставивши другий вираз (3.107) у залежності (3.98) та (3.100), отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3};$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0. \quad (3.110)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (3.110) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$x = -\dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + \frac{5}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^3} \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right);$$

$$\ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \quad (3.111)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0, \quad (3.112)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (3.112) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши знайдені координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (3.112), отримаємо залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (3.113)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_s$ , його можна розділити на три частини: час пуску –

$t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{\Delta x}{10}. \quad (3.114)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (3.114) у рівності (3.109), (3.111) та (3.112), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); & \dot{x} &= \frac{2592 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \\ \ddot{x} &= 7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (3.115)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (3.116)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \Delta x - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right); \\ \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= -7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= -15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right). \end{aligned} \quad (3.117)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (3.115)-(3.117) розраховано кінематичні характеристики та побудо-

вано графіки зміни переміщення (рис. 3.5, а), швидкості (рис. 3.5, б), прискорення (рис. 3.5, в) та ривка (рис. 3.5, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку.

Перетворивши перші рівняння виразів (3.115)-(3.117) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.118)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.119)$$

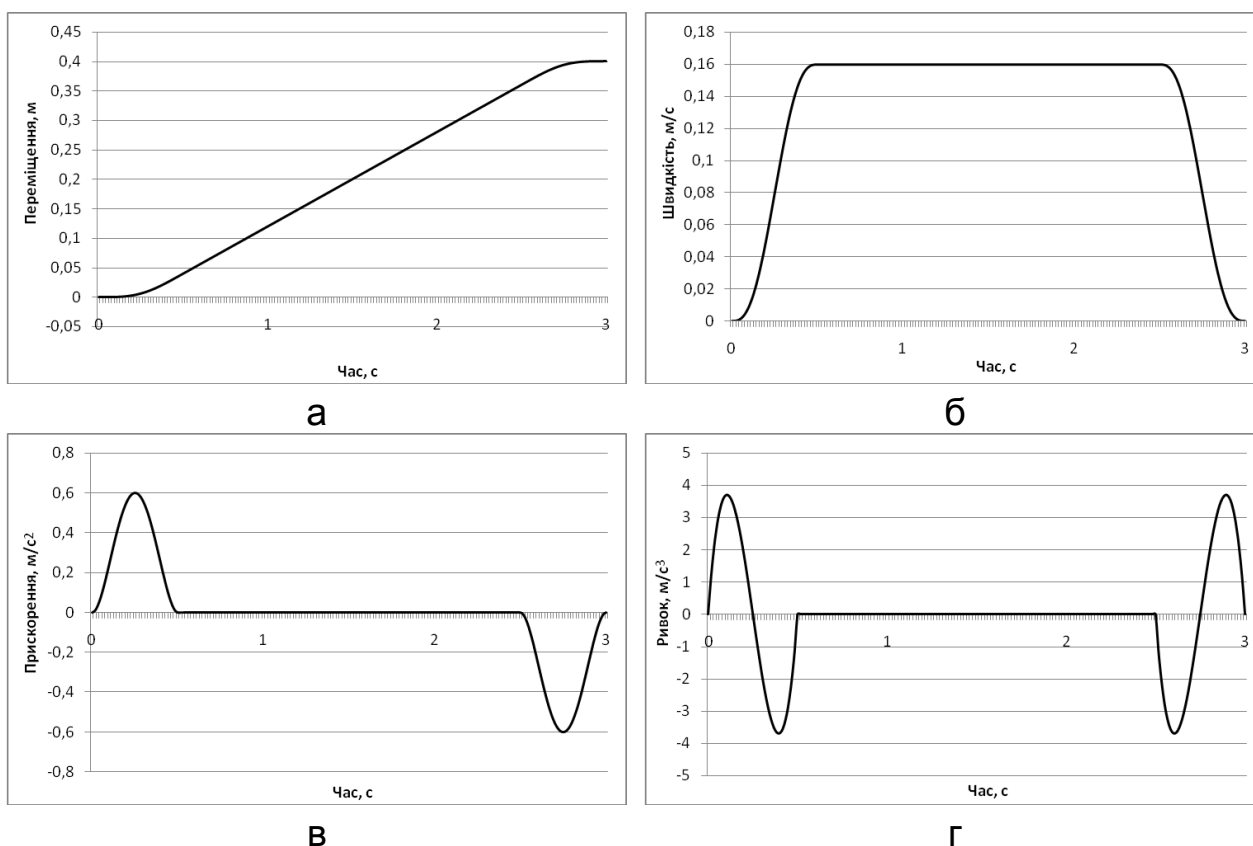


Рис. 3.5. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right). \quad (3.120)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (3.118)-(3.120), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим змінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (3.121)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (3.122)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right), \quad (3.123)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (3.121)-(3.123), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійс-



нюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 5\pi/6$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{\varphi^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (3.124)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (3.125)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \begin{array}{l} 15552 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ + 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{array} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (3.126)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 72 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (3.127)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (3.128)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \begin{array}{l} 15552 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ + 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{array} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (3.129)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (3.124)-(3.129) профіль кулачка (рис. 3.6) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ) [144].

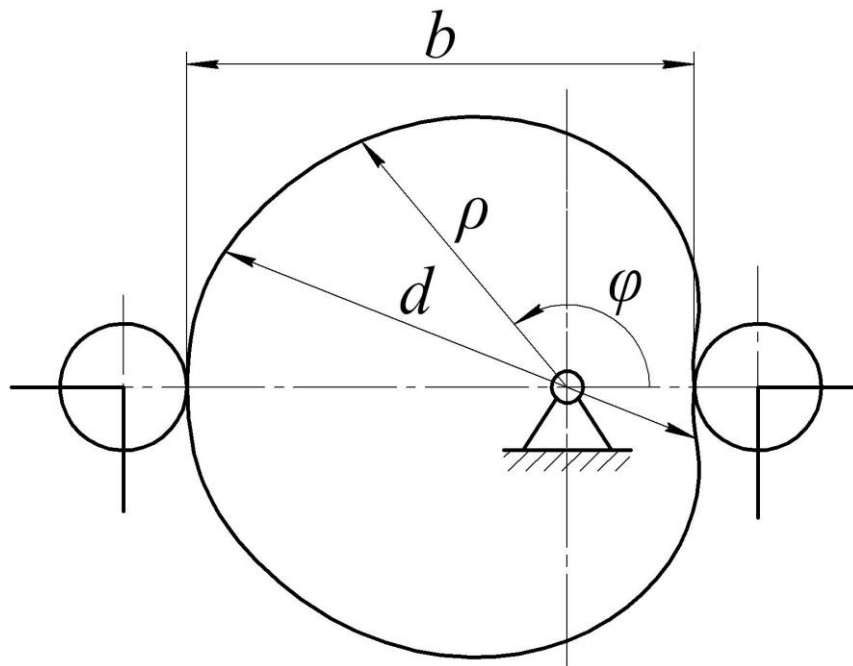


Рис. 3.6. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з оптимальним реверсуванням за прискоренням третього порядку

## РОЗДІЛ 4

### ОПТИМІЗАЦІЯ КРАЙОВИХ УМОВ РЕЖИМІВ РЕВЕРСУВАННЯ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ

#### 4.1. Оптимізація крайових умов ривкового режиму реверсування

При оптимальному ривковому режимі реверсування роликів формувальної установки в якості критерію оптимальності руху використано інтеграл за часом з підінтегральною функцією (3.44), що виражає “енергію” ривків. Для даного режиму реверсування також записано рівняння Пуассона (3.46), з якого отримано диференціальне рівняння (3.48) та його розв’язки.

Розділивши процес реверсування на два етапи, гальмування та пуск, приймемо, що прискорення в кінці етапу гальмування не буде рівним нулю, а матиме якесь певне значення  $\ddot{x} = a$ , на відміну від розрахунку у розділі 3.

Тоді при гальмуванні початковими умовами є:  $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=a$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування;  $a$  – прискорення візка в кінці етапу гальмування.

Приймаємо, що переміщення візка  $x_1$  на обох етапах однакові, а прискорення візка в кінці етапу гальмування дорівнює його прискоренню на початку пуску. Тоді початковими умовами при пуску є:  $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=a$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (3.48), отримуємо:

$$t=0: C_6 = -x_1; C_5 = \dot{x}_y; C_4 = 0; \quad (4.1)$$

$$t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_2^2 + C_3 \cdot t_2 = a. \end{cases} \quad (4.2)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.2), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$  та  $C_3$ :

$$C_1 = \frac{60 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)}{t_2^3}; \quad C_2 = \frac{24 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right)}{t_2^2}; \quad (4.3)$$

$$C_3 = \frac{3 \cdot \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)}{t_2}.$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.1) та (4.3) у систему (3.48) отримуємо функцію зміни ривка формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\ddot{x} = 30 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^3} + 24 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^2} + 3 \cdot \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{1}{t_2} \quad (4.4)$$

або

$$\ddot{x} = \frac{3}{t_2} \cdot \left[ 10 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 8 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \right]. \quad (4.5)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.45) та (4.5) матиме вигляд:

$$I_{W_2} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} \ddot{x}^2 dt = \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 10 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 8 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \right]^2 dt =$$

$$= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 100 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 64 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right.$$

$$\left. + \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)^2 + 160 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \right.$$

$$\left. + 20 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right.$$

$$\left. + 16 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right) \cdot \frac{t}{t_2} \right] dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_2} \cdot \left[ \begin{aligned}
&20 \cdot \left( 12 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)^2 + \frac{64}{3} \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - a - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + \left( 20 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} - 12 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + a \right)^2 + \\
&+ 40 \cdot \left( 186 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} - 27 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_2^2} + 14 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_2} - 180 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} - 48 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} - a^2 \right) + \\
&+ \frac{20}{3} \cdot \left( 240 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} - 264 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} + 32 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_2^2} + 72 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} - 18 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_2} + a^2 \right) + \\
&+ 40 \cdot \left( 340 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} - 35 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_2^2} + 20 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_2} - 300 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} - 96 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} - a^2 \right)
\end{aligned} \right] = \\
&= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_2} \cdot \left[ 80 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} + \frac{64}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} + a^2 - 80 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_2^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_2} \right].
\end{aligned} \quad (4.6)$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у залежності (3.48), отримуємо:

$$t=0: \quad C_4 = a; \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad (4.7)$$

$$t = t_n: \quad \begin{cases} \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_n^2 = -x_1; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + a \cdot t_n = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_n^2 + C_3 \cdot t_n + a = 0. \end{cases} \quad (4.8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.8), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$  та  $C_3$ :

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{60 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right)}{t_n^3}; & C_2 &= \frac{12 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right)}{t_n^2}; \\
C_3 &= \frac{3 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right)}{t_n}.
\end{aligned} \quad (4.9)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.7) та (4.9) у систему (3.48) отримуємо функцію зміни ривка формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\ddot{x} = 30 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^3} + 12 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t}{t_n^2} + 3 \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \cdot \frac{1}{t_n} \quad (4.10)$$

або

$$\ddot{x} = \frac{3}{t_n} \cdot \left[ 10 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 4 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \right]. \quad (4.11)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.45) та (4.11) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{Wn} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} \ddot{x}^2 dt = \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 10 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 4 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \right. \\ &\quad \left. + \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 100 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 16 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \\ &\quad \left. + \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right)^2 + 80 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \right. \\ &\quad \left. + 20 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \\ &\quad \left. + 8 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \cdot \frac{t}{t_n} \right]^2 dt = \\ &= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n} \cdot \left[ 20 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right)^2 + \frac{16}{3} \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right)^2 + \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + 20 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{20}{3} \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right) \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) + \right. \\ &\quad \left. + 4 \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right) \cdot \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right) \right] = \\ &= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n} \cdot \left[ 20 \cdot \left( 6 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 12 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - a \right)^2 + \frac{16}{3} \cdot \left( 30 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 3 \cdot a \right)^2 + \left( 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 20 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} - 3 \cdot a \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + 20 \cdot \left( 348 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} - 360 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} - 66 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_n^2} - 84 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} + 32 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_n} - 3 \cdot a^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{20}{3} \cdot \left( 48 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} - 216 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} - 26 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_n} + 240 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} + 56 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_n^2} + 3 \cdot a^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 4 \cdot \left( 520 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} - 112 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} + 66 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_n} - 600 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} - 150 \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_n^2} - 9 \cdot a^2 \right) \right] = \\ &= \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n} \cdot \left[ 80 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} + \frac{64}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} + a^2 - 80 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_n^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_n} \right]. \quad (4.12) \end{aligned}$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (4.6) та (4.12) буде визначатися наступною залежністю:

$$I_W = I_{W_2} + I_{W_n} = \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_2} \cdot \left[ 80 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} + \frac{64}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} + a^2 - 80 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_2^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_2} \right] + \frac{9 \cdot m}{2 \cdot t_n} \cdot \left[ 80 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} + \frac{64}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} + a^2 - 80 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_n^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_n} \right]. \quad (4.13)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_2 = t_n = t_1$ , вираз (4.13) можна подати у наступному вигляді:

$$I_W = \frac{9 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 80 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^4} + \frac{64}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^2} + a^2 - 80 \cdot \frac{x_1 \cdot \dot{x}_y}{t_1^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1 \cdot a}{t_1^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot a}{t_1} \right]. \quad (4.14)$$

Для забезпечення виконання нерівності (3.44) необхідно виконати умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_W}{\partial x_1} = \frac{9 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 160 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} - 80 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + \frac{40}{3} \cdot \frac{a}{t_1^2} \right] = \frac{360 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ 4 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{1}{3} \cdot a \right] = 0; \\ \frac{\partial I_W}{\partial a} = \frac{9 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 2 \cdot a + \frac{40}{3} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{18 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ a + \frac{20}{3} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

Із виразів (4.15) можна отримати:

$$\begin{cases} \left[ 4 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{1}{3} \cdot a \right] = 0 \\ \left[ a + \frac{20}{3} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{5}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1; \quad a = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}. \quad (4.16)$$

Підставивши два останні вирази (4.16) у рівності (4.1) та (4.3), отримуємо постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad C_3 = -3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^2}; \quad C_4 = 0; \quad C_5 = \dot{x}_y; \quad C_6 = -\frac{5}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (4.17)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.17) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - \frac{t^3}{t_1^2} + 2 \cdot t - \frac{5}{4} \cdot t_1 \right); & \dot{x} &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^3} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + 2 \right); \\ \ddot{x} &= 3 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{t}{t_1^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 3 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t}{t_1^3} - \frac{1}{t_1^2} \right). \end{aligned} \quad (4.18)$$

Підставивши два останні вирази (4.16) у залежності (4.7) та (4.9) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0. \quad (4.19)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.19) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^2}{t_1} - \frac{t^4}{t_1^3} \right); & \dot{x} &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^3} - 3 \cdot \frac{t}{t_1} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{3}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{1}{t_1} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 3 \cdot \dot{x}_y \cdot \frac{t}{t_1^3}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення та швидкості його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0, \quad (4.21)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (4.21) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши знайдені координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (4.21), отримано залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \frac{5}{4} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + \frac{5}{4} \cdot t_1}. \quad (4.22)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_s$ , його можна розділити на три частини: час пуску –



$t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_z$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_z$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_z = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_z$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{8 \cdot \Delta x}{7 \cdot t_z}; \quad x_1 = \frac{5}{42} \cdot \Delta x. \quad (4.23)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (4.23) у рівності (4.18), (4.205) та (4.21), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{36 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( \frac{t^2}{t_z^2} - 6 \cdot \frac{t^4}{t_z^4} \right); & \dot{x} &= \frac{72 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 12 \cdot \frac{t^3}{t_z^4} - \frac{t}{t_z^2} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{72 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^2}{t_z^4} - \frac{1}{t_z^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= \frac{5184 \cdot \Delta x}{7} \cdot \frac{t}{t_z^4}; \end{aligned} \quad (4.24)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{42} \cdot \left( 5 + 48 \cdot \frac{t}{t_z} \right); \quad \dot{x} = \frac{8 \cdot \Delta x}{7 \cdot t_z} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (4.25)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 27 \cdot \frac{t^4}{t_z^4} - 18 \cdot \frac{t^3}{t_z^3} + \frac{t}{t_z} + \frac{37}{48} \right); & \dot{x} &= \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^3}{t_z^4} - 54 \cdot \frac{t^2}{t_z^3} + \frac{1}{t_z} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{864 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^2}{t_z^4} - \frac{t}{t_z^3} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= \frac{864 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 6 \cdot \frac{t}{t_z^4} - \frac{1}{t_z^3} \right). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_z = 3 \text{ с}$ , за виразами (4.24)-(4.26) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 4.1, а), швидкості (рис. 4.1, б), прискоро-

рення (рис. 4.1, в) та ривка (рис. 4.1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з ривковим режимом реверсування при оптимальних крайових умовах.

Перетворивши перші рівняння виразів (4.24)-(4.26) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

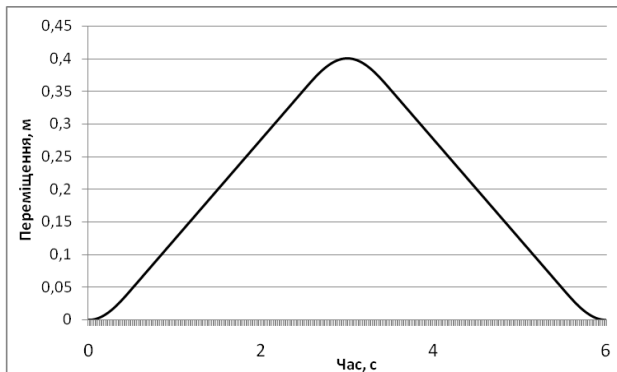
$$x = \frac{36 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( \frac{t^2}{t_3^2} - 6 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.27)$$

– на ділянці усталеного руху:

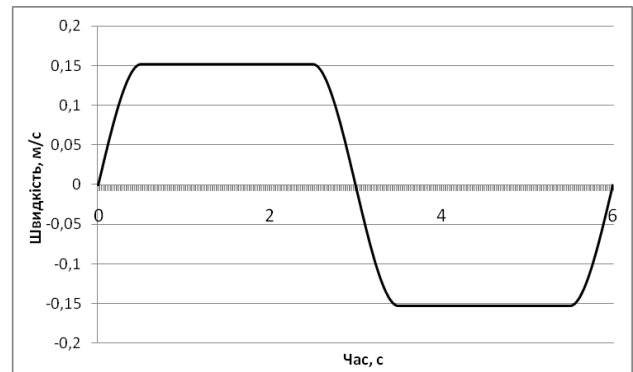
$$x = \frac{8 \cdot \Delta x}{21} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.28)$$

– на ділянці гальмування:

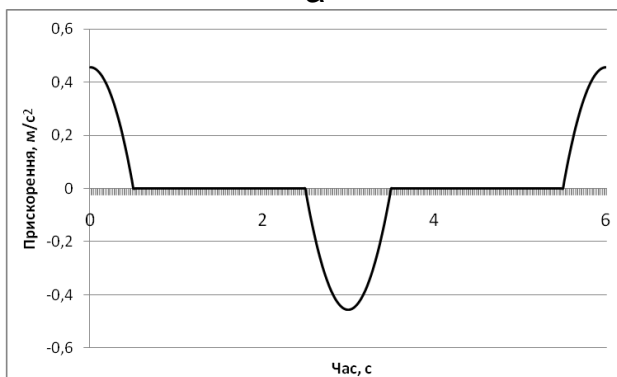
$$x = \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 27 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 18 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + \frac{t}{t_3} + \frac{37}{48} \right) - \frac{\Delta x}{2}. \quad (4.29)$$



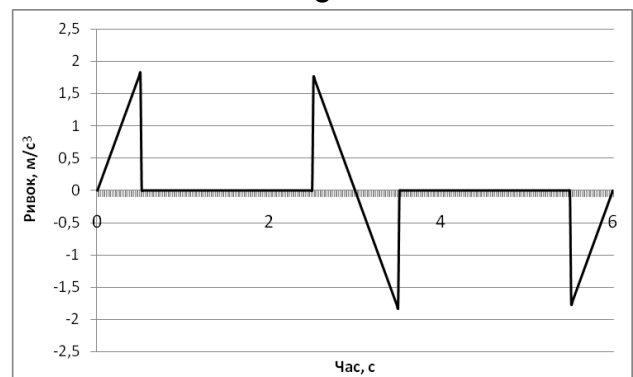
а



б



в



г

Рис. 4.1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з ривковим режимом реверсування при оптимальних крайових умовах

Закон руху візка, описаний залежностями (4.27)-(4.29), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим змінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{36 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( \frac{t^2}{t_3^2} - 6 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.30)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{8 \cdot \Delta x}{21} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.31)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( 27 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 18 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + \frac{t}{t_3} + \frac{37}{48} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad (4.32)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (4.30)-(4.32), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{36 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left( \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 6 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (4.33)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{8 \cdot \Delta x}{21} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (4.34)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left[ 27 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 18 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3} + \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{37}{48} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (4.35)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{36 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left[ \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 6 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (4.36)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{8 \cdot \Delta x}{21} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (4.37)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{8 \cdot \Delta x}{7} \cdot \left[ 27 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 18 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{\pi^3} + \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{37}{48} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (4.38)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (4.33)-(4.38) профіль кулачка (рис. 4.2) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

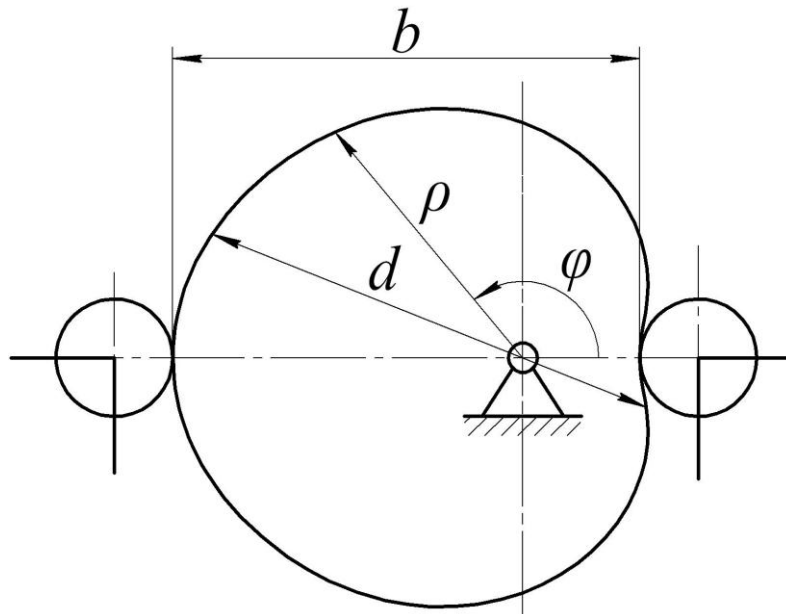


Рис. 4.2. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з ривковим реверсуванням при оптимальних крайових умовах

## 4.2. Обґрунтування крайових прискорень режиму реверсування за прискоренням третього порядку

При оптимальному режимі реверсування роликової формувальної установки за прискоренням третього порядку в якості критерію оптимальності руху використано інтеграл за часом з підінтегральною функцією (3.87), що виражає “енергію” прискорень третього порядку. Для даного режиму реверсування також записано рівняння Пуассона (3.89), з якого отримано диференціальне рівняння (3.91) та його розв’язки.

Розділивши процес реверсування на два етапи, гальмування та пуск, приймемо, що прискорення в кінці етапу гальмування не буде рівним нулю, а матиме якесь певне значення  $\ddot{x} = a$ , на відміну від розрахунку у розділі 3.

Тоді при гальмуванні початковими умовами є:  $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=a; \ddot{\ddot{x}}=0$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування,  $a$  – прискорення візка в кінці етапу гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=a; \ddot{\ddot{x}}=0$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (3.91), отримуємо:

$$t=0: C_8 = -x_1; C_7 = \dot{x}_y; C_6 = 0; C_5 = 0; \quad (4.39)$$

$$t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = a; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = 0. \end{cases} \quad (4.40)$$

Розв’язавши систему рівнянь (4.40), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 10080 \cdot \left( -\frac{a}{t_2^5} + 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 10 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); & C_2 &= 360 \cdot \left( 13 \cdot \frac{a}{t_2^4} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\
C_3 &= 120 \cdot \left( -7 \cdot \frac{a}{t_2^3} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); & C_4 &= 60 \cdot \left( \frac{a}{t_2^2} - 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 14 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right).
\end{aligned} \tag{4.41}$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.39) та (4.41) у систему (3.91) отримуємо функцію зміни прискорення третього порядку формульовального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\begin{aligned}
{}^{IV}x &= 1680 \cdot \left( -a + 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^5} + 180 \cdot \left( 13 \cdot a - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^4} + \\
&+ 120 \cdot \left( -7 \cdot a + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^3} + 60 \cdot \left( a - 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{1}{t_2^2}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

або

$${}^{IV}x = \frac{60}{t_2^2} \cdot \left[ 28 \cdot \left( -a + 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 3 \cdot \left( 13 \cdot a - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\
\left. + 2 \cdot \left( -7 \cdot a + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( a - 8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \right) \right]. \tag{4.43}$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.88) та (4.43) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
I_{Zz} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} {}^{IV}x^2 dt = \frac{1800 \cdot m}{t_2^4} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 28 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + 3 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\
&\left. + 2 \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t}{t_2} + \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \right]^2 dt = \\
&= \frac{1800 \cdot m}{t_2^4} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 784 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 \frac{t^6}{t_2^6} + 168 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^5}{t_2^5} + \right. \\
&+ 9 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 \frac{t^4}{t_2^4} + 112 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + \\
&+ 4 \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 \frac{t^2}{t_2^2} + 56 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&+ \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + 12 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&+ 6 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + \\
&\left. + 4 \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \frac{t}{t_2} \right] dt =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ \begin{aligned}
& 112 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + 28 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) + \\
& + \frac{9}{5} \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + \frac{112}{5} \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) + \\
& + \frac{4}{3} \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + 14 \left( -a + 5 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 10 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) + \\
& + \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right)^2 + 3 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) + \\
& + 2 \left( 13a - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 140 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right) + \\
& + 2 \left( -7a + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_2} - 84 \frac{x_1}{t_2^2} \right) \left( a - 8 \frac{\dot{x}_y}{t_2} + 14 \frac{x_1}{t_2^2} \right)
\end{aligned} \right] = \\
& = \frac{1800 \cdot m}{t_2^3} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot a^2 - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} \cdot a + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \cdot a + \frac{36}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot \dot{x}_y + 28 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} \right]. \quad (4.44)
\end{aligned}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у рівняння (3.91), отримуємо:

$$t = 0: \quad C_5 = 0; \quad C_6 = a; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad (4.45)$$

$$t = t_n: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_n^2 = -x_1; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 + a \cdot t_n = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 + a = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + C_4 \cdot t_n = 0. \end{cases} \quad (4.46)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.46), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 10080 \cdot \left( \frac{a}{t_n^5} - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} + 10 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); & C_2 &= 360 \cdot \left( -15 \cdot \frac{a}{t_n^4} + 68 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 140 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\
C_3 &= 120 \cdot \left( 10 \cdot \frac{a}{t_n^3} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right); & C_4 &= 120 \cdot \left( -\frac{a}{t_n^2} + 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right).
\end{aligned} \quad (4.47)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.45) та (4.47) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\begin{aligned}
{}^IV x = & 1680 \cdot \left( a - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^5} + 180 \cdot \left( -15 \cdot a + 68 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^4} + \\
& + 120 \cdot \left( 10 \cdot a - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t}{t_n^3} + 120 \cdot \left( -a + 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{1}{t_n^2}
\end{aligned} \quad (4.48)$$

або

$${}^IV x = \frac{60}{t_n^2} \cdot \left[ \begin{aligned} & 28 \cdot \left( a - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 3 \cdot \left( -15 \cdot a + 68 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 2 \cdot \left( 10 \cdot a - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + 2 \cdot \left( -a + 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \end{aligned} \right]. \quad (4.49)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.88) та (4.49) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
I_{Zn} = & \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} {}^IV x^2 dt = \frac{1800 \cdot m}{t_n^4} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} & 28 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + 3 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 2 \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t}{t_n} + 2 \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\
= & \frac{1800 \cdot m}{t_n^4} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} & 784 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 \frac{t^6}{t_n^6} + 168 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^5}{t_n^5} + \\ & + 9 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 \frac{t^4}{t_n^4} + 112 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 4 \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 \frac{t^2}{t_n^2} + 112 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + \\ & + 4 \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 + 12 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 12 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 8 \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \frac{t}{t_n} \end{aligned} \right] dt = \\
= & \frac{1800 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ \begin{aligned} & 112 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 + 28 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) + \\ & + \frac{9}{5} \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 + 28 \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) + \\ & + \frac{4}{3} \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 + \frac{112}{5} \left( a - 5 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 10 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) + \\ & + 4 \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right)^2 + 3 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) + \\ & + 4 \left( -15a + 68 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 140 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) + 4 \left( 10a - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 84 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \left( -a + 3 \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 7 \frac{x_1}{t_n^2} \right) \end{aligned} \right] =
\end{aligned}$$



$$= \frac{1800 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot a^2 - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} \cdot a + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \cdot a + \frac{36}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot \dot{x}_y + 28 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} \right]. \quad (4.50)$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (4.44) та (4.50) буде визначатися наступною залежністю:

$$I_Z = I_{Zz} + I_{Zn} = \frac{1800 \cdot m}{t_2^3} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot a^2 - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2} \cdot a + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_2^2} \cdot a + \frac{36}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^2} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot \dot{x}_y + 28 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^4} \right] + \frac{1800 \cdot m}{t_n^3} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot a^2 - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} \cdot a + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \cdot a + \frac{36}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot \dot{x}_y + 28 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} \right]. \quad (4.51)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_2 = t_n = t_1$ , вираз (4.51) можна подати у наступному вигляді:

$$I_Z = \frac{1800 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot a^2 - \frac{26}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \cdot a + \frac{56}{5} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \cdot a + \frac{72}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^2} - 56 \cdot \frac{x_1}{t_1^3} \cdot \dot{x}_y + 56 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^4} \right]. \quad (4.52)$$

Для забезпечення виконання нерівності (3.87) необхідно виконати умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{1800 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ \frac{56}{5} \cdot \frac{a}{t_1^2} - 56 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 112 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = \frac{100800 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ \frac{1}{5} \cdot a - \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 2 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Z}{\partial a} = \frac{1800 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ \frac{4}{3} \cdot a - \frac{26}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{56}{5} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = \frac{3600 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot a - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0. \end{cases} \quad (4.53)$$

Із виразів (4.53) отримуємо:

$$\begin{cases} \left[ \frac{1}{5} \cdot a - \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 2 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \\ \left[ \frac{2}{3} \cdot a - \frac{13}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{28}{5} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{11}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1; \quad a = -\frac{15}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}. \quad (4.54)$$

Підставивши два останні вирази (4.54) у залежності (4.39) та (4.41), отримуємо постійні інтегрування в процесі гальмування формуального візка:

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = -45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -15 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \\ C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{11}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.55) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формуального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned}
x &= -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 8 \cdot t + \frac{11}{2} \cdot t_1 \right); & \dot{x} &= -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 8 \right); \\
\ddot{x} &= -\frac{15}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + 4 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} \right); & \ddot{x} &= -\frac{15}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + 2 \cdot \frac{t}{t_1^3} \right).
\end{aligned} \tag{4.56}$$

Підставивши два останні вирази (4.54) у залежності (4.45) та (4.47), отримуємо постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$\begin{aligned}
C_1 = 0; & \quad C_2 = -45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; & C_3 = 0; & \quad C_4 = \frac{15}{2} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \\
C_5 = 0; & \quad C_6 = -\frac{15}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; & C_7 = 0; & \quad C_8 = 0.
\end{aligned} \tag{4.57}$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.57) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned}
x &= -\frac{1}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^5} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} + 15 \cdot \frac{t^2}{t_1} \right); & \dot{x} &= -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} + 15 \cdot \frac{t}{t_1} \right); \\
\ddot{x} &= -\frac{15}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} + \frac{1}{t_1} \right); & \ddot{x} &= -\frac{15}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^5} - \frac{t}{t_1^3} \right).
\end{aligned} \tag{4.58}$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0, \tag{4.59}$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (4.59) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши отримані координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (4.59), отримуємо залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (4.60)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{11}{80} \cdot \Delta x. \quad (4.61)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (4.61) у рівності (4.56), (4.58) та (4.59), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right); & \dot{x} &= \frac{27 \cdot \Delta x}{10} \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 120 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t}{t_3^2} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{27 \cdot \Delta x}{2} \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 72 \cdot \frac{t^2}{t_3^4} + \frac{1}{t_3^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 1944 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (4.62)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{80} \cdot \left( 11 + 87 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (4.63)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \\ \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 2916 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 2430 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 540 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= -1944 \cdot \Delta x \cdot \left( 9 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 6 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= -3888 \cdot \Delta x \cdot \left( 18 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 9 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right). \end{aligned} \quad (4.64)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4\text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3\text{ с}$ , за виразами (4.62)-(4.64) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 4.3, а), швидкості (рис. 4.3, б), прискорення (рис. 4.3, в) та ривка (рис. 4.3, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

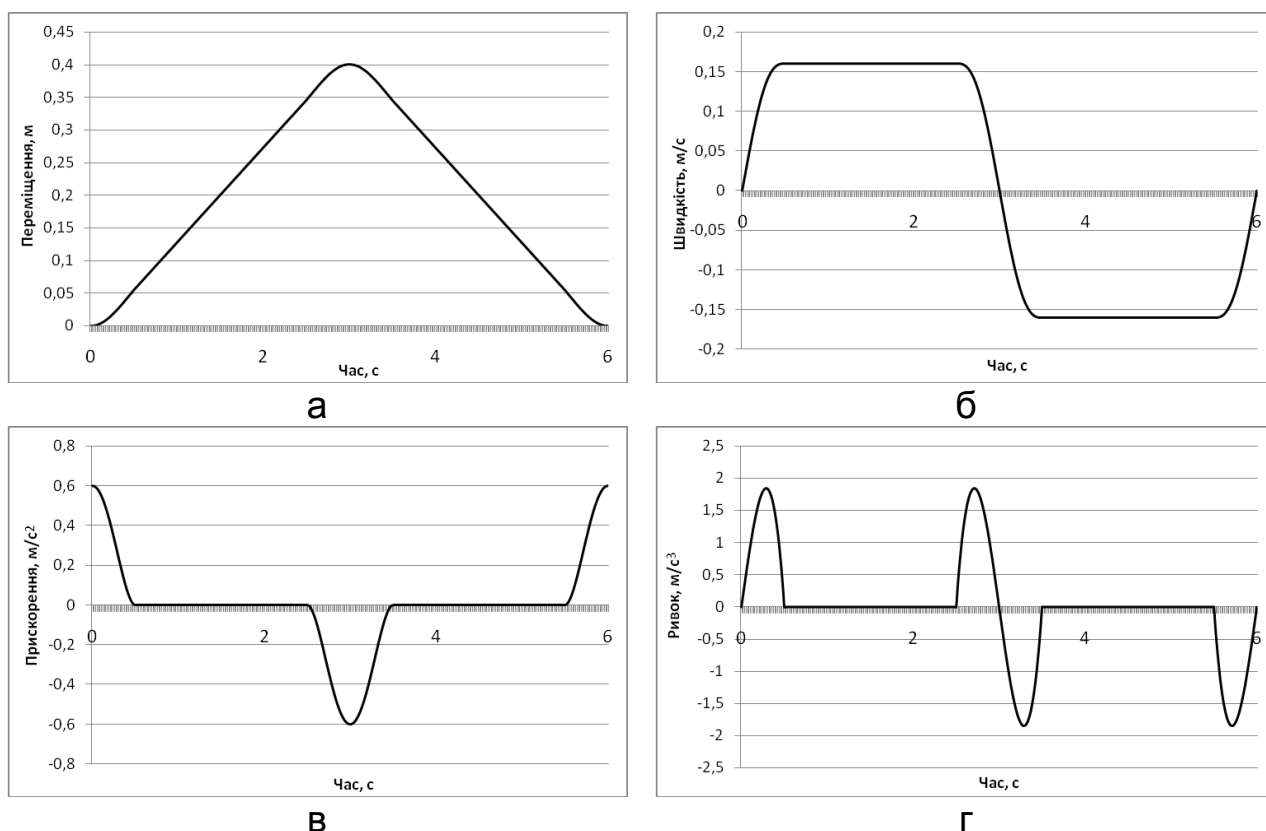


Рис. 4.3. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з режимом реверсування за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових прискореннях

Перетворивши перші залежності виразів (4.62)-(4.64) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.65)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.66)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}. \quad (4.67)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (4.65)-(4.67), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим перемінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.68)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.69)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad (4.70)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (4.68)-(4.70), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в

межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_s$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_s$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 60 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} + 5 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (4.71)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (4.72)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \right. \\ \left. - 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} + 8 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (4.73)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left[ 432 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 60 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + 5 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (4.74)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (4.75)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \right. \\ \left. - 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} + 8 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right) + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (4.76)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (4.71)-(4.76) профіль кулачка (рис. 4.4) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

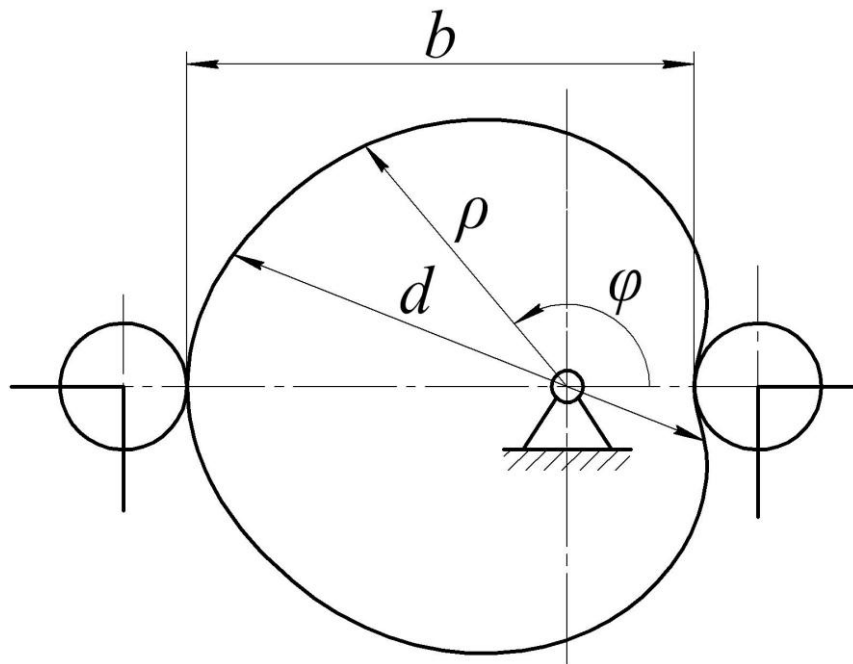


Рис. 4.4. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових прискореннях

### 4.3. Обґрунтування крайових ривків режиму реверсування за прискоренням третього порядку

При оптимальному режимі реверсування роликової формувальної установки за прискоренням третього порядку в якості критерію оптимальності руху використано інтеграл за часом з підінтегральною функцією (3.87), що виражає “енергію” прискорень третього порядку. Для даного режиму реверсування також записано рівняння Пуассона (3.89), з якого отримано диференціальне рівняння (3.91) та його розв’язки.

Розділивши процес реверсування на два етапи, гальмування та пуск, прийmemo, що ривок в кінці етапу гальмування не буде рівним нулю, а матиме якесь певне значення  $\ddot{x} = b$ , на відміну від розрахунку у розділі 3.

Тоді при гальмуванні початковими умовами є:  $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=b$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на

усталеному режимі до початку гальмування,  $b$  – ривок візка в кінці етапу гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=b$ . Кінцеві умови при пуску:  $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (3.91), отримуємо:

$$t=0: C_8 = -x_1; C_7 = \dot{x}_y; C_6 = 0; C_5 = 0; \quad (4.77)$$

$$t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = b. \end{cases} \quad (4.78)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.78), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned} C_1 &= 840 \cdot \left( \frac{b}{t_2^4} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); & C_2 &= 360 \cdot \left( -\frac{b}{t_2^3} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\ C_3 &= 60 \cdot \left( \frac{b}{t_2^2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); & C_4 &= 4 \cdot \left( -\frac{b}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right). \end{aligned} \quad (4.79)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.77) та (4.79) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\begin{aligned} x^{IV} &= 140 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^4} + 180 \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 60 \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2^2} + 4 \cdot \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{1}{t_2} \end{aligned} \quad (4.80)$$

або

$$x^{IV} = \frac{4}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned} &35 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 45 \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 15 \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]. \quad (4.81)$$



Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.88) та (4.81) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
I_{Zz} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} \dot{x}^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 35 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 45 \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\
&\quad \left. + 15 \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 1225 \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^6}{t_2^6} + 3150 \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^5}{t_2^5} + \right. \\
&\quad + 2025 \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^4}{t_2^4} + 1050 \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + \\
&\quad + 225 \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^2}{t_2^2} + 70 \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&\quad + \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 1350 \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&\quad + 90 \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + \\
&\quad \left. + 30 \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2} \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ 175 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 525 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \right. \\
&\quad + 405 \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 210 \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&\quad + 75 \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \frac{35}{2} \cdot \left( b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&\quad + \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \frac{675}{2} \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&\quad + 30 \cdot \left( -b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&\quad \left. + 15 \cdot \left( b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \right] = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ b^2 + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \right]. \quad (4.82)
\end{aligned}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у залежності (3.91), отримуємо:

$$t=0: \quad C_5 = b; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad (4.83)$$

$$t = t_n : \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t_n^3 = -x_1; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_n^2 = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 + b \cdot t_n = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + C_4 \cdot t_n + b = 0. \end{cases} \quad (4.84)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.84), отримуємо постійні інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned} C_1 &= 840 \cdot \left( \frac{b}{t_n^4} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); & C_2 &= 480 \cdot \left( -\frac{b}{t_n^3} + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\ C_3 &= 120 \cdot \left( \frac{b}{t_n^2} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right); & C_4 &= 8 \cdot \left( -2 \cdot \frac{b}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right). \end{aligned} \quad (4.85)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.83) та (4.85) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$$\begin{aligned} x^{IV} &= 140 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^4} + 240 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^3} + \\ &+ 120 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n^2} + 8 \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{1}{t_n} \end{aligned} \quad (4.86)$$

або

$$x^{IV} = \frac{4}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned} &35 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 60 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 30 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + 2 \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right]. \quad (4.87)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.88) та (4.87) матиме вигляд:

$$I_{Zn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_z^{IV}} x^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} &35 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 60 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 30 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + 2 \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned}
&1225 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + 3600 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 900 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 4 \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + \\
&+ 4200 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + \\
&+ 2100 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 140 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\
&+ 3600 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\
&+ 240 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\
&+ 120 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n}
\end{aligned} \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned}
&175 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 700 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 720 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 420 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 300 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 35 \cdot \left( b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 4 \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 900 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 80 \cdot \left( -b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 60 \cdot \left( b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)
\end{aligned} \right] = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ b^2 - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \right]. \quad (4.88)
\end{aligned}$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (4.82) та (4.88) буде визначатися наступною залежністю:

$$\begin{aligned}
I_Z = I_{Zz} + I_{Zn} &= \frac{8 \cdot m}{t_z} \cdot \left[ b^2 + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_z^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_z^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_z^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_z^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_z^6} \right] + \\
&+ \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ b^2 - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \right]. \quad (4.89)
\end{aligned}$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_2 = t_n = t_1$ , вираз (4.89) можна подати у наступному вигляді:

$$I_Z = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 2 \cdot b^2 + 3240 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 12600 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 12600 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \right]. \quad (4.90)$$

Для забезпечення виконання нерівності (3.87) необхідно виконати умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 25200 \cdot \frac{x_1}{t_1^6} - 12600 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5} \right] = \frac{100800 \cdot m}{t_1^6} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Z}{\partial b} = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot [4 \cdot b] = \frac{32 \cdot m}{t_1} \cdot b = 0. \end{cases} \quad (4.91)$$

Із виразів (4.91) можна отримати:

$$\begin{cases} \left[ 2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0 \\ b = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (4.92)$$

Підставивши два останні вирази (4.92) у залежності (4.77) та (4.79), отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad (4.93)$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1.$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.93) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot t + t_1 \right); & \dot{x} &= -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right); \\ \ddot{x} &= -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \end{aligned} \quad (4.94)$$

Підставивши два останні вирази (4.92) у рівності (4.83) та (4.85) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad (4.95)$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0.$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.95) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned} x &= -\dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + \frac{5}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^3} \right); & \dot{x} &= -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right); \\ \ddot{x} &= -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); & \ddot{x} &= -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \end{aligned} \quad (4.96)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0, \quad (4.97)$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (4.97) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши знайдені координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (4.97), отримуємо залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (4.98)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_s$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_e$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,

$t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{\Delta x}{10}. \quad (4.99)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (4.99) у рівності (4.94), (4.96) та (4.97), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); & \dot{x} &= \frac{2592 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \\ \ddot{x} &= 7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (4.100)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (4.101)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \Delta x - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right); \\ \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= -7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= -15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right). \end{aligned} \quad (4.102)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (4.100)-(4.102) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 4.5, а), швидкості (рис. 4.5, б), прискорення (рис. 4.5, в) та ривка (рис. 4.5, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

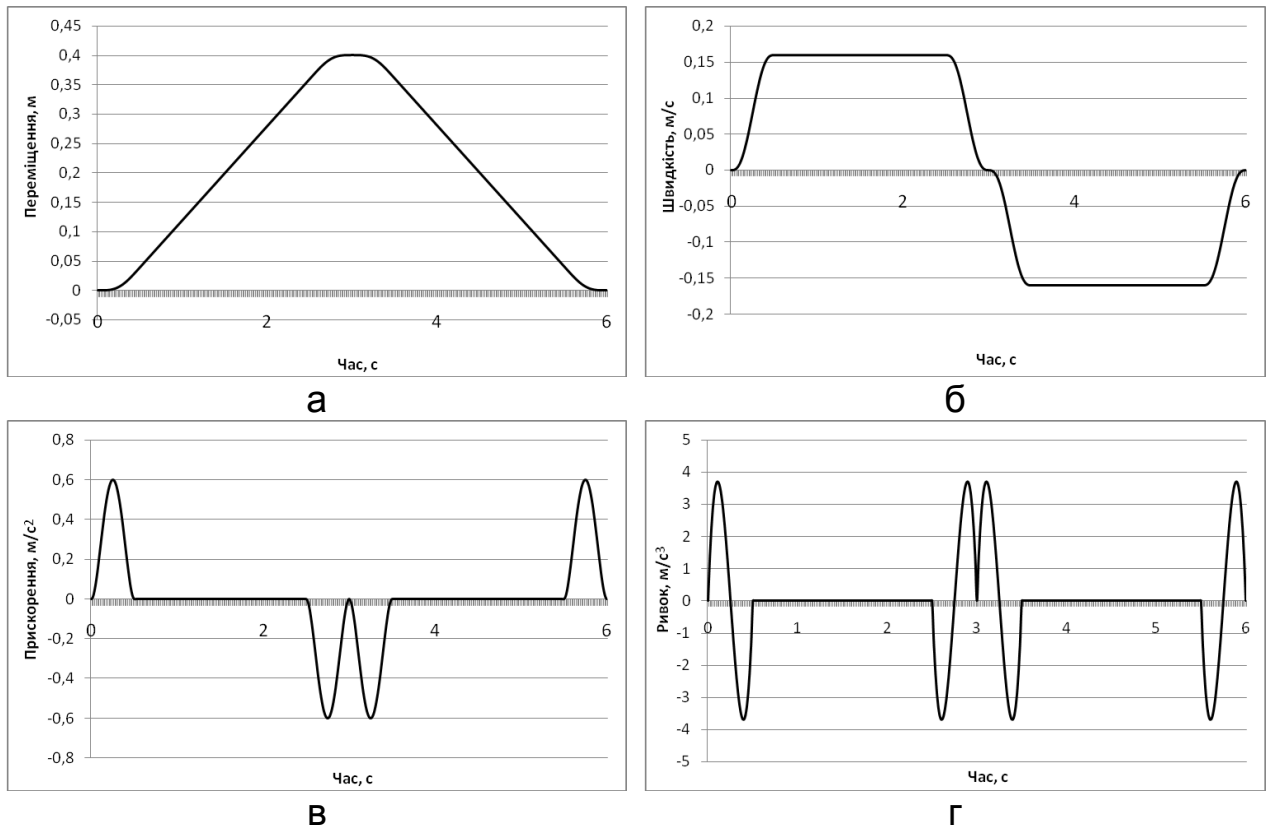


Рис. 4.5. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з режимом реверсування за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових ривках

Перетворивши перші рівняння виразів (4.100)-(4.102) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.103)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.104)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right). \quad (4.105)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (4.103)-(4.105), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється

за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим перемінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.106)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.107)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right), \quad (4.108)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (4.106)-(4.108), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{\varphi^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (4.109)$$



$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (4.110)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \begin{array}{l} 15552 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ + 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{array} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (4.111)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 72 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (4.112)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ 1 - 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (4.113)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[ \begin{array}{l} 15552 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ + 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{array} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (4.114)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (4.109)-(4.114) профіль кулачка (рис. 4.6) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

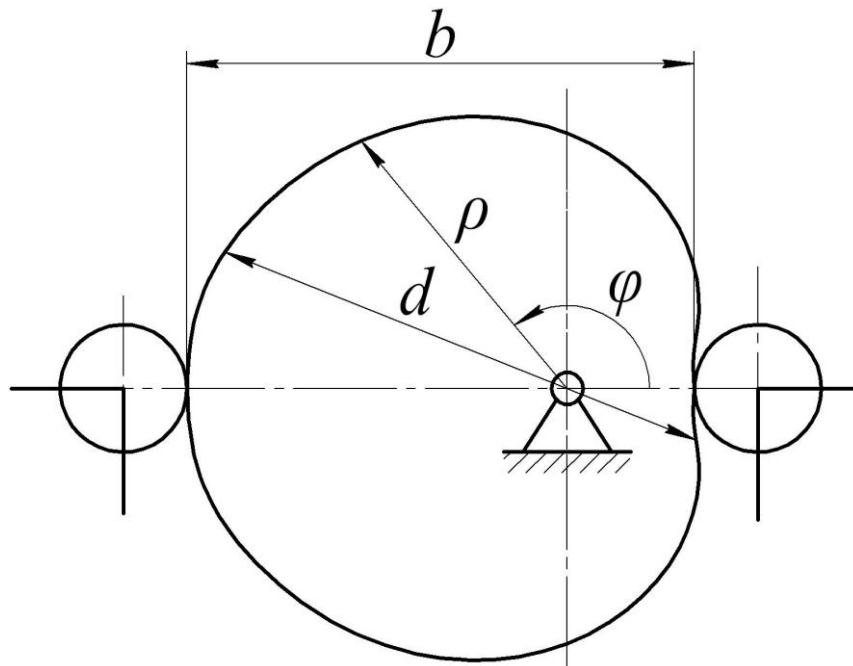


Рис. 4.6. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових ривках

#### 4.4. Обґрунтування крайових умов режиму реверсування за прискоренням третього порядку

При оптимальному режимі реверсування роlikової формувальної установки за прискоренням третього порядку в якості критерію оптимальності руху використано інтеграл за часом з підінтегральною функцією (3.87), що виражає “енергію” прискорень третього порядку. Для даного режиму реверсування також записано рівняння Пуассона (3.89), з якого отримано диференціальне рівняння (3.91) та його розв’язки.

Розділивши процес реверсування на два етапи, гальмування та пуск, приймемо, що прискорення та ривок в кінці етапу гальмування не будуть різними нулю, а матимуть якісь певні значення  $\ddot{x} = a$  та  $\ddot{y} = b$ , на відміну від розрахунків у розділі 3 та попередніх двох пунктах.

Тоді при гальмуванні початковими умовами є:  $t = 0: x = -x_1; \dot{x} = \dot{x}_y; \ddot{x} = 0; \ddot{y} = 0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t = t_2: x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = a; \ddot{y} = b$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування,  $a$  та  $b$  – прискорення та ривок візка в кінці етапу гальмування.

При пуску початковими умовами є:  $t = 0: x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = a; \ddot{y} = b$ . Кінцеві умови при пуску:  $t = t_n: x = -x_1; \dot{x} = -\dot{x}_y; \ddot{x} = 0; \ddot{y} = 0$ .

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (3.91), отримуємо:

$$t = 0: C_8 = -x_1; C_7 = \dot{x}_y; C_6 = 0; C_5 = 0; \quad (4.115)$$

$$t = t_2: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = a; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = b. \end{cases} \quad (4.116)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.116), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$ :

$$\begin{aligned} C_1 &= 840 \cdot \left( \frac{b}{t_2^4} - 12 \cdot \frac{a}{t_2^5} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); & C_2 &= 360 \cdot \left( -\frac{b}{t_2^3} + 13 \cdot \frac{a}{t_2^4} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\ C_3 &= 60 \cdot \left( \frac{b}{t_2^2} - 14 \cdot \frac{a}{t_2^3} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); & C_4 &= 4 \cdot \left( -\frac{b}{t_2} + 15 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right). \end{aligned} \quad (4.117)$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.115) та (4.117) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості  $\dot{x}_y$  до повної зупинки:

$$\begin{aligned} x^{IV} &= 140 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^4} + 180 \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 60 \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2^2} + 4 \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{1}{t_2} \end{aligned} \quad (4.118)$$

або

$$x^{IV} = \frac{4}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned} &35 \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^4} + 45 \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 15 \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2^2} + \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]. \quad (4.119)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (3.88) та (4.119) матиме вигляд:

$$I_{Z_2} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned} &35 \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^4} + 45 \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 15 \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2^2} + \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned}
&1225 \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^6}{t_2^6} + 2025 \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^4}{t_2^4} + \\
&+ 225 \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \\
&+ 3150 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + \\
&+ 1050 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \\
&+ 70 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&+ 1350 \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\
&+ 90 \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\
&+ 30 \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2}
\end{aligned} \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned}
&175 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 405 \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \\
&+ 75 \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \\
&+ 525 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&+ 210 \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&+ \frac{35}{2} \cdot \left( b - 12 \cdot \frac{a}{t_2} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&+ \frac{675}{2} \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&+ 30 \cdot \left( -b + 13 \cdot \frac{a}{t_2} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\
&+ 15 \cdot \left( b - 14 \cdot \frac{a}{t_2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left( -b + 15 \cdot \frac{a}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)
\end{aligned} \right] = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned}
&b^2 - 15 \cdot \frac{a}{t_2} \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + 75 \cdot \frac{a^2}{t_2^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} \cdot a + \\
&+ 1260 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \cdot a + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6}
\end{aligned} \right]. \quad (4.120)
\end{aligned}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у рівняння (3.91), отримуємо:

$$t=0: C_5=b; C_6=a; C_7=0; C_8=0; \quad (4.121)$$

$$t=t_n: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot b \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_n^2 = -x_1; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_n^2 + a \cdot t_n = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 + b \cdot t_n + a = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + C_4 \cdot t_n + b = 0. \end{cases} \quad (4.122)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.122), отримуємо постійні інтегрування  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$ :

$$C_1 = 840 \left( \frac{b}{t_n^4} + 12 \cdot \frac{a}{t_n^5} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); C_2 = 120 \left( -4 \cdot \frac{b}{t_n^3} - 45 \cdot \frac{a}{t_n^4} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \quad (4.123)$$

$$C_3 = 120 \cdot \left( \frac{b}{t_n^2} + 10 \cdot \frac{a}{t_n^3} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right); C_4 = 8 \cdot \left( -2 \cdot \frac{b}{t_n} - 15 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right).$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (4.121) та (4.123) у систему (3.91) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю  $\dot{x}_y$ :

$${}^{IV}x = 140 \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^3}{t_n^4} + 60 \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^2}{t_n^3} + \quad (4.124)$$

$$+ 120 \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t}{t_n^2} + 8 \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{1}{t_n}$$

або

$${}^{IV}x = \frac{4}{t_n} \cdot \left[ 35 \left( b + 12 \frac{a}{t_n} - 60 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + 15 \left( -4b - 45 \frac{a}{t_n} + 204 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \quad (4.125)$$

$$\left. + 30 \left( b + 10 \frac{a}{t_n} - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t}{t_n} + 2 \left( -2b - 15 \frac{a}{t_n} + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \right]$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (3.88) та (4.125) матиме вигляд:

$$I_{Zn} = \frac{m}{2} \int_0^{t_n} {}^{IV}x^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \int_0^{t_n} \left[ 35 \left( b + 12 \frac{a}{t_n} - 60 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + 15 \left( -4b - 45 \frac{a}{t_n} + 204 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \quad (4.125)$$

$$\left. + 30 \left( b + 10 \frac{a}{t_n} - 39 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t}{t_n} + 2 \left( -2b - 15 \frac{a}{t_n} + 45 \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \frac{x_1}{t_n^3} \right) \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned}
&1225 \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \frac{t^6}{t_n^6} + 225 \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 900 \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 4 \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + \\
&+ 1050 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + \\
&+ 2100 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 140 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\
&+ 900 \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\
&+ 60 \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\
&+ 120 \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n}
\end{aligned} \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned}
&175 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 45 \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + \\
&+ 300 \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 4 \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + \\
&+ 175 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 420 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 35 \cdot \left( b + 12 \cdot \frac{a}{t_n} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 225 \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 20 \cdot \left( -4 \cdot b - 45 \cdot \frac{a}{t_n} + 204 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
&+ 60 \cdot \left( b + 10 \cdot \frac{a}{t_n} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left( -2 \cdot b - 15 \cdot \frac{a}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)
\end{aligned} \right] = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned}
&b^2 + 15 \cdot \frac{a}{t_n} \cdot b - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 75 \cdot \frac{a^2}{t_n^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} \cdot a + \\
&+ 1260 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \cdot a + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6}
\end{aligned} \right]. \quad (4.126)
\end{aligned}$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (4.120) та (4.126) буде визначатися наступною залежністю:

$$I_Z = I_{Z_2} + I_{Z_n} = \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned} & b^2 - 15 \cdot \frac{a}{t_2} \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + 75 \cdot \frac{a^2}{t_2^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} \cdot a + \\ & + 1260 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \cdot a + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \end{aligned} \right] + \quad (4.127)$$

$$+ \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned} & b^2 + 15 \cdot \frac{a}{t_n} \cdot b - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 75 \cdot \frac{a^2}{t_n^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} \cdot a + \\ & + 1260 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \cdot a + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \end{aligned} \right].$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску  $t_2 = t_n = t_1$ , вираз (4.127) можна подати у наступному вигляді:

$$I_Z = \frac{16 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ b^2 + 75 \cdot \frac{a^2}{t_1^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} \cdot a + 1260 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \cdot a + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_1^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^6} \right]. \quad (4.128)$$

Для забезпечення виконання нерівності (3.87) необхідно виконати умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{16 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 1260 \cdot \frac{a}{t_1^4} - 6300 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5} + 12600 \cdot \frac{x_1}{t_1^6} \right] = \frac{20160 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ a - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 10 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Z}{\partial a} = \frac{16 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 150 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 585 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 1260 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = \frac{240 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ 10 \cdot a - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Z}{\partial b} = \frac{16 \cdot m}{t_1} \cdot [2 \cdot b] = \frac{32 \cdot m}{t_1} \cdot b = 0. \end{cases} \quad (4.129)$$

Із виразів (4.129) отримуємо:

$$\begin{cases} \left[ a - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 10 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \\ \left[ 10 \cdot a - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \\ b = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{11}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1; \quad a = -\frac{15}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}. \quad (4.130)$$

Підставивши два останні вирази (4.130) у залежності (4.115) та (4.117), отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -15 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad (4.131)$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{11}{16} \dot{x}_y \cdot t_1.$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.131) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned}x &= -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 8 \cdot t + \frac{11}{2} \cdot t_1 \right); \\ \dot{x} &= -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 8 \right); \\ \ddot{x} &= -\frac{15}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + 4 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\dot{x}} = -\frac{15}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + 2 \cdot \frac{t}{t_1^3} \right).\end{aligned}\tag{4.132}$$

Підставивши два останні вирази (4.130) у рівності (4.121) та (4.123) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формувального візка:

$$\begin{aligned}C_1 &= 0; \quad C_2 = -45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = \frac{15}{2} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \\ C_5 &= 0; \quad C_6 = -\frac{15}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0.\end{aligned}\tag{4.133}$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (4.133) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формувального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned}x &= -\frac{1}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^5} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} + 15 \cdot \frac{t^2}{t_1} \right); \quad \dot{x} = -\frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} + 15 \cdot \frac{t}{t_1} \right); \\ \ddot{x} &= -\frac{15}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} + \frac{1}{t_1} \right); \quad \ddot{\dot{x}} = -\frac{15}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^5} - \frac{t}{t_1^3} \right).\end{aligned}\tag{4.134}$$

На усталеному режимі руху формувального візка координати переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються залежностями [88]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\dot{x}} = 0,\tag{4.135}$$

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_y$  – тривалість усталеного руху.

У виразах (4.135) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату



нату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Підставивши отримані координати  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  у другий вираз (4.135) отримано залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (4.136)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_z$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_z = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати переміщення  $x_1$  матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{11}{80} \cdot \Delta x. \quad (4.137)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (4.137) у залежності (4.132), (4.134) та (4.135), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right); & \dot{x} &= \frac{27 \cdot \Delta x}{10} \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 120 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t}{t_3^2} \right); \\ \ddot{x} &= \frac{27 \cdot \Delta x}{2} \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 72 \cdot \frac{t^2}{t_3^4} + \frac{1}{t_3^2} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= 1944 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (4.138)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{80} \cdot \left( 11 + 87 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (4.139)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \\
 \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 2916 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 2430 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 540 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\
 \ddot{x} &= -1944 \cdot \Delta x \cdot \left( 9 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 6 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); \quad \ddot{\dot{x}} = -3888 \cdot \Delta x \cdot \left( 18 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 9 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right).
 \end{aligned}
 \tag{4.140}$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (4.138)-(4.140) розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 4.7, а), швидкості (рис. 4.7, б), прискорення (рис. 4.7, в) та ривка (рис. 4.7, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

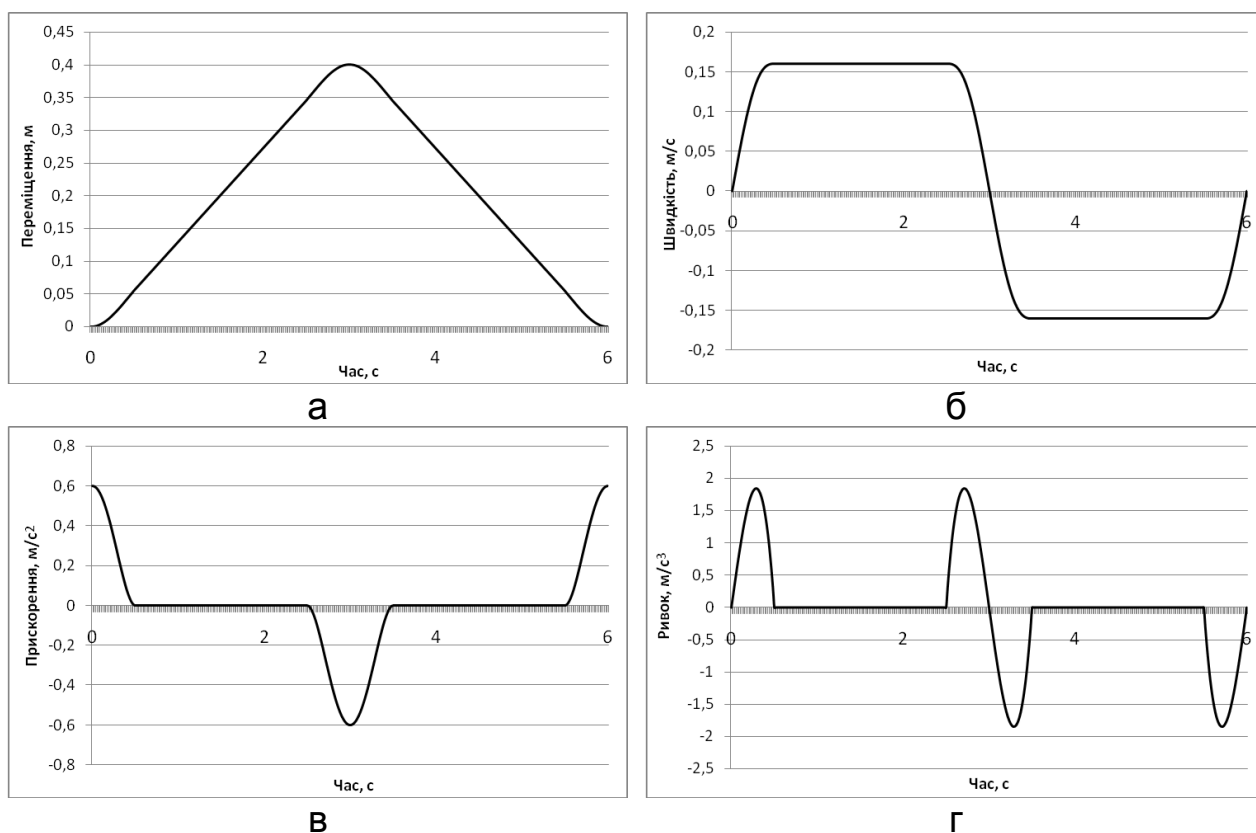


Рис. 4.7. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з режимом реверсування за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових умовах

Перетворивши перші залежності виразів (4.138)-(4.140) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.141)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.142)$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}. \quad (4.143)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (4.141)-(4.143), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2.5) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто  $\varphi = \pi$ ) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим перемінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 60 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 5 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (4.144)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (4.145)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 3888 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad (4.146)$$

де  $b$  – відстань між штовхачами 2 (рис. 2.5).

Час  $t$  можна виключити із залежностей (4.144)-(4.146), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , то процес пуску здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді усталений рух візка забезпечується поворотом кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{\pi}{6}$  до  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ ; час гальмування –  $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , тоді процес гальмування здійснюється при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = \frac{5\pi}{6}$  до  $\varphi = \pi$ . Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( 432 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 60 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} + 5 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (4.147)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (4.148)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + 3888 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \right. \\ \left. - 1080 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} + 8 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (4.149)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{27 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left[ 432 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 60 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + 5 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (4.150)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{29 \cdot \Delta x}{80} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (4.151)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{20} \cdot \left( \frac{69}{12} - 3888 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} + 3888 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} - \right. \\ \left. - 1080 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} + 8 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right) + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (4.152)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (4.147)-(4.152) профіль кулачка (рис. 4.8)

має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр  $d$  – величина постійна і рівна відстані між штовхачами  $b$  ( $d = b$ ).

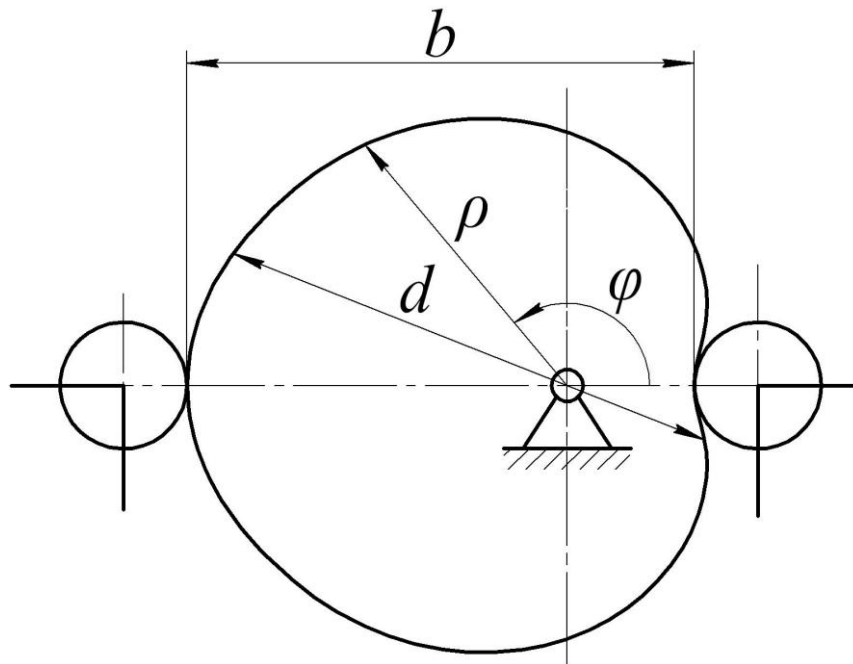


Рис. 4.8. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових умовах

## РОЗДІЛ 5

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ З КУЛАЧКОВИМ ПРИВОДОМ

Для всіх розрахованих режимів руху роликової формувальної установи з кулачковим приводним механізмом прийнято амплітуду переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та тривалість його руху з одного крайнього положення в інше  $t_1 = 3 \text{ с}$ .

При оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху формувального візка його швидкість змінюється плавно; прискорення змінюється лінійно, однак в крайніх положеннях має стрибок від нульового значення до максимального; ривок протягом руху має постійне значення, а в крайніх положеннях також має різку зміну від нуля до постійного свого значення.

В установці з кулачковим приводом, що реалізує оптимальний ривковий режим зворотно-поступального руху формувального візка його прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і протягом руху змінюється плавно; ривок протягом руху змінюється плавно, однак у крайніх положеннях має різку зміну від нуля до максимального значення.

При оптимальному режимі зворотно-поступального руху формувального візка за прискоренням третього порядку його прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і протягом руху змінюється плавно, максимальне значення прискорення становить  $\ddot{x} = 0,334 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ; ривок протягом руху змінюється плавно і в крайніх положеннях рівний нулю, максимальне значення ривка протягом руху формувального візка становить  $\ddot{\dot{x}} = -0,778 \frac{\text{м}}{\text{с}^3}$ . Це в свою чергу приводить до зниження навантажень під час руху формувального візка і, особливо, при досягненні ним крайніх положень.

В установці з кулачковим приводом, що реалізує оптимальний комплексний режим зворотно-поступального руху формувального візка одночасно

враховується вплив енергетичних затрат, діючих динамічних навантажень та інтенсивності їх зміни в часі. При такому режимі з ваговими коефіцієнтами  $\delta_1 = 0,5$  та  $\delta_2 = 0,3$ , що враховують долю енергетичних затрат та діючих динамічних навантажень відповідно, прискорення формувального візка в крайніх положеннях має нульове значення і протягом руху змінюється плавно, максимальне значення прискорення становить  $\ddot{x} = 0,245 \frac{M}{c^2}$ ; ривок протягом руху змінюється плавно, однак у крайніх положеннях має різку зміну від нуля до максимального значення, яке становить  $\ddot{\dot{x}} = 1,532 \frac{M}{c^3}$ .

При комбінованому динамічному режимі зворотно-поступального руху формувального візка його рух на ділянках розгону та гальмування здійснюється за оптимальним динамічним режимом руху, а на ділянці усталеного руху швидкість має постійне значення. При цьому під час розгону та гальмування прискорення змінюється лінійно, однак в крайніх положеннях має стрибок від нульового значення до максимального, яке становить  $\ddot{x} = 0,6 \frac{M}{c^2}$ ; ривок протягом розгону та гальмування має постійне значення, але на початку і в кінці етапів розгону та гальмування має різку зміну від нуля до постійного свого значення, яке дорівнює  $\ddot{\dot{x}} = -1,2 \frac{M}{c^3}$ .

В установці з кулачковим приводом, що реалізує комбінований ривковий режим зворотно-поступального руху формувального візка його рух на ділянках розгону та гальмування здійснюється за оптимальним ривковим режимом руху, а на ділянці усталеного руху швидкість має постійне значення. При такому режимі руху під час розгону та гальмування прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{x} = 0,551 \frac{M}{c^2}$ ; ривок протягом розгону та гальмування змінюється плавно, однак при досягненні візком крайніх положень має досить велике значення, яке становить  $\ddot{\dot{x}} = 7,44 \frac{M}{c^3}$ .

При комбінованому режимі зворотно-поступального руху формувального візка за прискоренням третього порядку його рух на ділянках розгону та

гальмування здійснюється за оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку, а на ділянці усталеного руху швидкість має постійне значення. При цьому під час розгону та гальмування прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{x} = 0,614 \frac{M}{c^2}$ ; ривок протягом розгону та гальмування в крайніх положеннях також має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{x} = 5,04 \frac{M}{c^3}$ .

В установці з кулачковим приводом, що реалізує зворотно-поступальний рух формувального візка з реверсуванням за оптимальним динамічним режимом його рух на ділянках розгону та гальмування здійснюється з швидкістю, що змінюється за лінійним законом, а на ділянках усталеного руху швидкість має постійне значення. При цьому під час розгону та гальмування прискорення має постійне значення, яке становить  $\ddot{x} = 0,32 \frac{M}{c^2}$ , однак на початку і в кінці етапів розгону та гальмування має стрибок від нульового значення до постійного; ривок протягом розгону та гальмування має нульове значення, але на початку і в кінці етапів розгону та гальмування має різку зміну від нуля до нескінченності.

При зворотно-поступальному русі формувального візка з реверсуванням за оптимальним ривковим режимом його рух на ділянках розгону та гальмування здійснюється з швидкістю, що змінюється плавно, а на ділянках усталеного руху швидкість має постійне значення. При цьому під час розгону та гальмування прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{x} = 0,48 \frac{M}{c^2}$ ; ривок протягом розгону та гальмування змінюється лінійно, однак на початку і в кінці етапів розгону та гальмування має різку зміну від нуля до максимального значення, яке становить  $\ddot{x} = 3,84 \frac{M}{c^3}$ .

В установці з кулачковим приводом, що реалізує зворотно-поступальний рух формувального візка з реверсуванням у відповідності з оптимальним ре-



жимом руху за прискоренням третього порядку його рух на ділянках розгону та гальмування здійснюється з швидкістю, що змінюється плавно, а на ділянках усталеного руху швидкість має постійне значення. При цьому під час розгону та гальмування прискорення в крайніх положеннях має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{x} = 0,6 \frac{m}{c^2}$ ; ривок протягом розгону та гальмування в крайніх положеннях також має нульове значення і змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{\dot{x}} = 3,686 \frac{m}{c^3}$ .

Для зворотно-поступального руху формувального візка з реверсуваням за оптимальним ривковим режимом здійснено оптимізацію крайових умов. При цьому було прийнято, що прискорення формувального візка в кінці етапу гальмування не буде рівним нулю, а має якесь певне значення, яке розраховане і становить  $\ddot{x} = 0,48 \frac{m}{c^2}$ . Ривок протягом реверсування змінюється лінійно, однак на початку і в кінці реверсування має різку зміну від нуля до максимального значення, яке становить  $\ddot{\dot{x}} = 1,846 \frac{m}{c^3}$ .

При зворотно-поступальному русі формувального візка з реверсуваням у відповідності з оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку проведено оптимізацію крайових умов в трьох варіантах. В першому варіанті було прийнято, що ривок формувального візка в кінці етапу гальмування має нульове значення, а прискорення не буде рівним нулю, маючи якесь певне значення, яке розраховане і становить  $\ddot{x} = 0,6 \frac{m}{c^2}$ . Ривок протягом розгону та гальмування змінюється плавно, а максимальне його значення становить  $\ddot{\dot{x}} = 1,846 \frac{m}{c^3}$ .

В другому варіанті було прийнято, що прискорення формувального візка в кінці етапу гальмування має нульове значення, а ривок не буде рівним нулю, маючи якесь певне значення. Однак проведені розрахунки дали результат оптимального значення ривка в кінці етапу гальмування, що рівне нулю. При цьому і прискорення і ривок формувального візка змінюються

плавно, а їх максимальні значення становлять  $\dot{x} = 0,6 \frac{M}{c^2}$  та  $\ddot{x} = 3,686 \frac{M}{c^3}$  відповідно.

В третьому варіанті було прийнято, що і прискорення, і ривок формувального візка в кінці етапу гальмування не будуть рівними нулю, маючи якісь певні значення. Проведені розрахунки дали результат оптимального значення прискорення в кінці етапу гальмування, що становить  $\dot{x} = 0,6 \frac{M}{c^2}$ , а значення ривка в кінці етапу гальмування рівне нулю. При цьому ривок змінюється плавно, а його максимальне значення протягом процесу реверсування становить  $\ddot{x} = 1,846 \frac{M}{c^3}$ .

## ВИСНОВКИ

У монографії проведено огляд машин для виробництва плоских залізобетонних виробів, здійснено аналіз конструкцій і параметрів машин роликвого формування виробів з бетонних сумішей та проведено огляд приводів машин роликвого формування.

З метою підвищення надійності та довговічності роликвої формувальної установки розроблено конструкцію її приводу у вигляді кулачкового механізму для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка. Також запропоновано конструкцію роликвої формувальної установки з кулачковим приводним механізмом з обох боків формувального візка для унеможливлення його осьового перекошування, що, в свою чергу, приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші, зниження динамічних навантажень в елементах приводу, зменшення зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до підвищення довговічності установки в цілому.

Проведено аналіз режимів руху кулачкових механізмів. Запропонована методика синтезу оптимальних режимів руху, яка дозволяє отримати будь-які режими, що відображають ті або інші властивості кулачкового механізму. Найбільш перспективним є комплексні оптимальні режими руху, що враховують одночасно декілька властивостей кулачкових механізмів. Такі оптимальні режими руху можуть бути отримані на базі комплексних критеріїв з урахуванням оптимальних режимів руху кулачкових механізмів за одиничними інтегральними критеріями.

Розраховано оптимальний динамічний режим руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого, оптимальний ривковий режим, оптимальний режим за прискоренням третього порядку та комплексний оптимальний режим руху.

Проведено розрахунки комбінованих режимів руху формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого з оптимальним динамічним, оптимальним ривковим та оптимальним за прискорен-

ням третього порядку розгоном та гальмуванням. При цьому на більшій частині руху формувального візка між крайніми положеннями (дві третини) його швидкість є постійною величиною.

Здійснено оптимізацію реверсування формувального візка роликової формувальної установки за оптимальним динамічним режимом руху, оптимальним ривковим режимом та оптимальним режимом за прискоренням третього порядку.

Для оптимального ривкового режиму реверсування проведено оптимізацію крайових умов – встановлено оптимальне значення прискорення формувального візка при досягненні ним крайніх положень. При оптимальному режимі реверсування за прискоренням третього порядку визначено оптимальні значення прискорення та ривка формувального візка при досягненні ним крайніх положень.

Для кожного з перерахованих режимів руху формувального візка роликової формульної установки розраховані кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка, наведено вирази для визначення змінного радіуса кулачка та побудовано його профіль.

Результати досліджень можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку приводних механізмів машин роликового формування та кулачкових механізмів як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А. с. 1468759 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 28 В 13/02. Устройство для формования изделий из бетонных смесей. / Гарнец В.М., Кучеровский В.Б., Ловейкин В.С., Стасюк А.Г. (СССР) – опубл. 30.03.89, Бюл. № 12.
2. А. с. 1604625 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 28 В 13/02. Устройство для формования изделий из бетонных смесей. / Ловейкин В.С., Гарнец В.М., Кучеровский В.Б., Стасюк А.Г. (СССР) – опубл. 07.11.90, Бюл. № 41.
3. А. с. 1609673 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 28 В 13/02. Устройство для формования изделий из бетонных смесей. / Ловейкин В.С. (СССР) – опубл. 30.11.90, Бюл. № 44.
4. Анохин А.И. Дорожные машины, основы теории и расчета. / Анохин А.И., Хархута Н.Я.. – М.: Дорожно-техническая литература ГУШОСДОРА, 1950. – 286 с.
5. Артоболевский И.И. Динамические критерии режима движения машин. / Артоболевский И.И. // Теоретична и приложена механика. / Болгария /. – 1971. – №1. – С. 11–24.
6. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. / Артоболевский И.И. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
7. Артоболевский С.И. Теория механизмов и машин: Учебное пособие. / Артоболевский С.И. – М.: Высш. шк., 1967. – 367 с.
8. Архипкин А.А. Опыт формования бетонных и железобетонных изделий с применением роликовой технологии. / Архипкин А.А., Лавринев П.Г. // Сб. научн. трудов “Исследование и практика заводского производства железобетона”. – Москва, 1982. – С. 86-91.
9. Баранов Д.С. О методике измерения давления бетонной смеси на элементы форм. Сб. НИИЖБ Стальные формы для сборного железобетона. / Баранов Д.С., Карамзин В.Е. – М.: Стройиздат. – 1966. – 186 с.
10. Баранов Д.С. Тензометрические приборы для исследования строительных конструкций. / Баранов Д.С. – М.: Стройиздат, 1970. – 166 с.

11. Баранов Ю.О. Методика експериментальних досліджень взаємодії середовища з робочим органом ударно-вібраційної площадки. / Баранов Ю.О., Клименко М.О., Басараб В.А. // Техніка будівництва. – 2002. – № 11. – С. 24–28.
12. Баранов Ю.О. Експериментальні дослідження взаємодії середовища з робочим органом електромагнітної ударно-вібраційної площадки. / Баранов Ю.О., Клименко М.О., Басараб В.А. // Техніка будівництва. – 2003. – № 14. – С. 43–47.
13. Бетонные и железобетонные работы. / [Башлай К.И., Гендин В.Я. Евдокимов Н.И. и др.]; под ред. Топчия В.Д. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
14. Боголюбов А.Н. История механики машин. / Боголюбов А.Н. – К.: Наук. думка, 1964. – 463 с.
15. Бондаренко Л.М. Деформаційні опори в машинах. / Бондаренко Л.М., Довбня М.П., Ловейкін В.С. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-VAL”, 2002. – 200 с.
16. Васильев А.А. Дорожные машины. / Васильев А.А. – М.: Машиностроение, 1987. – 415 с.
17. Вербовский Г.Г. Теория механизмов и машин: Учебное пособие. / Вербовский Г.Г. – Х.: Изд. Харьковского ун-та, 1968. – 276 с.
18. Вульфсон И.И. Динамика машин с упругими звеньями. / Вульфсон И.И. – Л.: Машиностроение, 1969. – 286 с.
19. Вульфсон И.И. Динамические расчеты цикловых механизмов. / Вульфсон И.И. – Л.: Машиностроение, 1976. – 246 с.
20. Гарнець В.М. Бетноформувальні агрегати. Конструктивно-функціональні схеми, принцип дії, основи теорії. / Гарнець В.М., Зайченко С.В., Човнюк Ю.В., Шаленко В.О., Приходько Я.С.. – К.: Інтерсервіс, 2015. – 238 с.
21. Гарнець В.М. Визначення опору перекочуванню безвібраційного робочого органу для виробництва пустотних виробів. / Гарнець В.М.,

- Зайченко С.В. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 1999. – № 53. – С. 49–55.
22. Гарнец В.Н. Оценка эффективности конструкций машин роликового формования. / Гарнец В.Н., Ловейкин В.С. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1988. – № 41. – С. 51–55.
  23. Гарнец В.М. Методология проектирования и конструирования машин: Учеб. пособие. / Гарнец В.М. – К.: УМК ВО, 1988. – 160 с.
  24. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуєчі агрегати і комплекси. / Гарнець В.М. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
  25. Гарнец В.Н. Определение режимов работы поверхностного вибропресса. / Гарнец В.Н. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1976. – № 22. – С. 65–69.
  26. Гарнец В.Н. Аналитическое определение контактного давления при роликовом формовании. / Гарнец В.Н., Рюшин В.Т. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1983. – № 36. – С. 58–62.
  27. Гарнец В.Н. Исследование процесса роликового формования бетона. / Гарнец В.Н., Рюшин В.Т. // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. – Рига, 1979. – С. 218, 219.
  28. Гарнец В.Н. К вопросу определения режимов роликового формования бетона. / Гарнец В.Н., Рюшин В.Т. // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. – Юрмала, 1982. – С. 348–350.
  29. Гарнец В.Н. Опыт роликового формования железобетонных изделий в заводских условиях. / Гарнец В.Н., Рюшин В.Т., Пархиловский И.Е. // Материалы, технология и конструкции для нечерноземья. – Брянск, 1985. – С. 87, 88.
  30. Гарнец В.Н. Роликовый метод формования бетонных изделий. / Гарнец В.Н., Рюшин В.Т., Коврыжников А.А. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1980. – № 30. – С. 67–69.

31. Горский Б.Е. Безразмерные критерии динамического совершенствования механических систем. / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Критерии качества и эффективности механических систем. – Киев: Знание, 1978. – С. 12-15.
32. Горский Б.Е. Динамическое совершенствование механических систем. / Горский Б.Е. – К: Техника, 1987. – 200 с.
33. Горский Б.Е. Комплексные параметры динамики машин. / Горский Б.Е. // Реферативная информация “Строительная механика и расчет сооружений”. – Киев: Выща шк., 1972. – № 3. – С. 29, 30.
34. Горский Б.Е. Критерии динамического совершенства механических систем. / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Теория машин металлургического и горного оборудования. – Свердловск: УПИ, 1989. – Вып. 13. – С. 98-102.
35. Горский Б.Е. О критериях совершенства механических систем. / Горский Б.Е. // Прикладная механика. – 1974. – Т. X. – № 2. – С. 74–80.
36. Горский Б.Е. Применение метода удельных действий в поисковом конструировании. / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1981. – № 32. – С. 80–89.
37. Горский Б.Е. Расширение понятия коэффициента полезного действия на все удельные действия. / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Динамика и прочность тяжелых машин. – Днепропетровск : ДГУ, 1982. – № 6. – С. 13–20.
38. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. / Джонсон К. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
39. Живов Л.Г. Привод и автоматика самоходных кранов. / Живов Л.Г. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
40. Зайченко С.В. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуючих агрегатів при виробництві пустотних панелей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.02 “Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій”. / Зайченко С.В. – Київ, 2001. – 19 с.



41. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1 (ч. 1). Машини та знаряддя для обробітки ґрунту. / Заїка П.М. – Харків: Око, 2001. – 444 с.
42. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 2 (ч. 1). Машини для заготівлі кормів. / Заїка П.М. – Харків: Око, 2003. – 360 с.
43. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 2 (ч. 2). Зернозбиральні машини. / Заїка П.М. – Харків: Око, 2003. – 376 с.
44. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей : Автореф. дис. на соискание уч. ступени докт. техн. наук : спец. 05.05.04 “Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины” / Захаренко А.В. – Омск, 2005. – 44 с.
45. Ишлинский А.Ю. О качении жестких и пневматических колес по деформируемому грунту. / Ишлинский А.Ю. // Прикладные задачи механики. Книга первая. Механика вязкоупругих и не вполне упругих тел. – М.: Наука, 1986. – С. 293–314.
46. Казаков Е.Г. Оборудование для изготовления крупноразмерных сборных железобетонных изделий. / Казаков Е.Г., Сквирский Е.Ю. // Обзор. информ. ЦНИИТЭСтроймаш. Сер. 7. Оборудование для производства цемента и сборного железобетона. – 1986. – № 2. – С. 42.
47. Калужский Я.А. Закономерности укатки грунтовых слоев жесткими катками. / Калужский Я.А. // Сборник трудов ХАДИ. – Харьков, 1953. – № 20. – С. 37–45.
48. Кильческий Н.А. Курс теоретической механики. Т.2. / Кильческий Н.А. – М.: Наука, 1977. – 543 с.
49. Кіницький Я.Т. Практикум із теорії механізмів і машин: навчальний посібник. / Кіницький Я.Т. – Львів: Вид-во “Афіша”, 2004. – 453 с.
50. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин: Підручник. / Кіницький Я.Т. – К.: Наукова думка, 2002. – 662 с.

51. Клименюк О.В. Технологія наукового дослідження: Авторський підручник. / Клименюк О.В. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2006. – 308 с.
52. Ковбаса В.П. Кінематика взаємодії ущільнюючого котка з середовищем обмеженої глибини. / Ковбаса В.П., Ловейкін В.С., Почка К.І. // Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Луцьк: ЛДТУ, 2007. – № 15. – С. 139–147.
53. Ковбаса В.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ. / Ковбаса В.П., Швайко В.М., Гуцол О.П. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2015. – 536 с.
54. Коган Б.Ю. Сто задач по механике. / Коган Б.Ю. – М.: Наука, 1973. – 80 с.
55. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин: Учебное пособие. / Кожевников С.Н. – М.: Машиностроение, 1969. – 584 с.
56. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. / Крайнев А.Ф. – М.: Машиностроение, 1981. – 438 с.
57. Краснов М.Л. Вариационное исчисление. / Краснов М.Л., Макаренко Г.И., Киселев А.И. – М.: Наука, 1973. – 192 с.
58. Красовский И.И. Теория управления движением (линейные системы). / Красовский И.И. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
59. Кузин В.Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов : Автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук.: спец. 05.05.04 “Дорожные и строительные машины” / Кузин В.Н. – Москва, 1981. – 20 с.
60. Кулен А. Современная земледельческая механика. / Кулен А., Куперс Х.; / [пер. с англ. А.Э. Габриэляна]; [под ред. и с предисл. Ю.А. Смирнова]. – М.: Агропромиздат, 1986. – 349 с.
61. Ловейкін В.С. Аналіз динамічного режиму руху роликової формувальної установки з керованим гідроприводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І.,

- Шевченко Т.В. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії (збірник наукових праць). – 2005, № 1. – С. 149-154.
62. Ловейкін В.С. Аналіз нерівномірності руху роlikової формовочної установки з гідромеханічним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2005 р. – № 65. – С. 26–36.
63. Ловейкін В.С. Аналіз нерівномірності руху роlikової формовочної установки з кривошипно-повзунним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Паламарчук Д.А. // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА, 2005. – № 33. – С. 157–169.
64. Ловейкін В.С. Аналіз нерівномірності руху роlikової формовочної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Підйомно-транспортна техніка. – 2005. – № 4. – С. 19–33.
65. Ловейкін В.С. Аналіз руху роlikової формовочної установки з врівноваженим приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – № 27, 2004 р. – С. 95–101.
66. Ловейкин В.С. Аналитическое представление коэффициента сопротивления и внешних гистерезисных потерь при качении. / Ловейкин В.С., Бондаренко Л.Н. // Техніка будівництва. – 2000. – № 7. – С. 45–48.
67. Ловейкін В.С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роlikової формуальної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127–134.
68. Ловейкін В.С. Вплив кута зміщення кривошипів на нерівномірність руху роlikової формовочної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С. Почка К.І. // Техніка будівництва. – 2006. – № 18. – С. 12–22.

69. Ловейкін В.С. Динаміка роlikової формувальної установки. / Ловейкін В.С., Почка К.І. – К.-Ромни: КНУБА, «ІСА-Інтерпапір», 2009. – 228 с.
70. Ловейкін В.С. Динамічний аналіз роlikової формовочної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM - I). – Тернопіль, 2004. – С. 507–514.
71. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація режиму реверсування роlikової формувальної установки. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Збірник наукових праць «Машинобудування». – Харків: УПА, 2015. – № 15. – С. 76-86.
72. Ловейкін В.С. Дослідження робочого процесу роlikової центрифуги з акумулятором енергії. / Ловейкін В.С., Богуславський В.Є., Душанін Я.С. // Техніка будівництва. – 1999. – № 5. – С. 66–70.
73. Ловейкін В.С. Критерії синтезу режимів руху механізмів і машин. / Ловейкін В.С. // Техніка будівництва. – К.: КНУБА, 2005. – № 17. – С. 58-62.
74. Ловейкін В.С. Методика проведення експериментальних досліджень роlikової формувальної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2007 р. – № 70. – С. 43–47.
75. Ловейкин В.С. О некоторых путях снижения энергетических затрат роlikовых центрифуг. / Ловейкин В.С., Богуславский В.Е. // Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій. – К.: МНС України, КНУБА, 1999. – Вип. 2. – С. 61-63.
76. Ловейкін В.С. Одна трактовка фізичної та геометричної моделі коефіцієнта гістерезисних витрат при коченні. / Ловейкін В.С., Бондаренко Л.М. // Вісник ХДТУСГ “Механізація сільськогосподарського виробництва”. – Харків: ХДТУСГ, 2003. – С. 282–289.

77. Ловейкин В.С. Определение оптимальных режимов движения механизмов грузоподъемных машин. / Ловейкин В.С. // Подъемно-транспортное оборудование. – 1987. – № 18. – С. 31–35.
78. Ловейкін В.С. Оптимізація крайових умов ривкового режиму реверсування роlikової формувальної установки. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 226. – С. 356-368.
79. Ловейкин В.С. Оптимизация режима движения манипуляционных систем роботов по комплексному критерию. / Ловейкин В.С. // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1988. – № 2. – С. 8–11.
80. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму реверсування роlikової формувальної установки за прискоренням третього порядку. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – № 3 (36). – С. 16-26.
81. Ловейкін В.С. Оптимізація ривкового режиму реверсування роlikової формувальної установки. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С. 186-197.
82. Ловейкін В.С. Оптимізація гідроприводного механізму машин для ущільнення ґрунту. / Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Свідерський А.Т. // Зб. наук. праць “Механізація сільськогосподарського машинобудування”. – К.: НАУ, 1998. – С. 8–12.
83. Ловейкін В.С. Оптимізація конструктивних параметрів приводного механізму роlikової формувальної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Паламарчук Д.А. // Техніка будівництва. – 2004. – № 15. – С. 40–48.
84. Ловейкін В.С. Оптимізація режимів руху кулачкових механізмів за одиничними критеріями. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Ловейкін А.В. //

- Збірник „Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні”. – НУ «Львівська політехніка», 2014. – Вип. 48. – С. 114-123.
85. Ловейкин В.С. Оценка движения механизмов и машин. / Ловейкин В.С. // Подъемно-транспортное оборудование. – 1989. – № 21. – С. 16–18.
86. Ловейкин В.С. Оценка эффективности конструкций машин роликового формования. / Ловейкин В.С., Гарнец В.М. // Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. – К.: Техніка, 1988 — Вып 41. – С. 43–47.
87. Ловейкин В.С. Порівняльний аналіз нерівномірності руху роликової формувальної установки з механічним та рекупераційним приводом. / Ловейкин В.С., Почка К.І. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування) Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – 2005. – № 16. – С. 126–130.
88. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин: Учеб. пособие. / Ловейкин В.С. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
89. Ловейкин В.С. Реалізація комплексного оптимального режиму руху роликової формувальної установки з кулачковим приводним механізмом. / Ловейкин В.С., Почка К.І. // Збірник тез доповідей XV міжнародної конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (23–27 березня 2015 року). Секції факультету конструювання та дизайну / НДІ техніки, енергетики та інформатизації АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 37-40.
90. Ловейкин В.С. Реалізація оптимальних режимів руху робочих органів машин з гідроприводом. / Ловейкин В.С. // Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій: Збірник наукових статей. – К.: КНУБА, МНС України; 2000. – № 4. – С. 100-105.

91. Ловейкін В.С. Реалізація оптимального ривкового режиму реверсування роликів формувальної установки. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Робоча програма та тези доповідей Першої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Буд-Майстер-Клас 2015». – К.: КНУБА, 2015. – С. 158.
92. Ловейкін В.С. Реалізація ривкового режиму реверсування роликів формувальної установки з оптимальними крайовими умовами. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Аграрна наука, освіта, виробництво: європейський досвід для України: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 17-18 листопада 2015 р. – Житомир: ЖНАЕУ, 2015. – С. 49-55.
93. Ловейкін В.С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Том 1. – С. 465–474.
94. Ловейкін В.С. Силовий аналіз роликів формувальної установки з врівноваженим приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Науковий вісник Національного аграрного університету. – Вип. 80, 2005 р. – С. 346-356.
95. Ловейкін В.С. Силовий аналіз роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Техніка будівництва. – 2003. – № 14. – С. 27–37.
96. Ловейкін В.С. Синтез кулачкового приводного механізму роликів формувальної установки з комбінованим режимом руху. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Техніка будівництва. – № 33. – 2014 р. – С. 11-17.
97. Ловейкін В.С. Синтез кулачкового приводного механізму роликів формувальної установки з оптимальним динамічним режимом руху. / Ловейкін В.С., Почка К.І. // Техніка будівництва. – № 22. – 2009. – С. 16-18.
98. Ловейкін В.С. Синтез кулачкового приводного механізму роликів формувальної установки з оптимальним ривковим режимом руху. /

- Ловейкін В.С., Почка К.І. // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование // Сб. научных трудов. № 57.* – Днепропетровск: ПГСА, 2010. – С. 185-188.
99. Ловейкин В.С. Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комплексным оптимальным режимом движения. / Ловейкин В.С., Почка К.И. // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции 9-12 ноября 2015 г.* – Воронеж: ВГЛТУ, 2015. – № 7 часть 2 (18-2). – С. 137-144.
100. Ловейкін В.С. Синтез оптимальних режимів руху вібраційних машин в будівельній індустрії. / Ловейкін В.С. // *Доклады I Всеукраинской НТК “Прогрессивные технологии и машины для производства стойматериалов, изделий и конструкций”.* – Полтава, 1996. – С. 8-12.
101. Ловейкин В.С. Синтез режимов движения манипуляционных систем роботов. / Ловейкин В.С. // *Тез. докл. IV Всесоюзной конференции “Автоматизация поискового конструирования и подготовка инженерных кадров”.* – Волгоград, 1987. – Т. II. – С. 165-167.
102. Ловейкин В.С. Снижение вибрационной напряженности машин путем выбора режима движения. / Ловейкин В.С. // *Тезисы докладов II Всесоюзной НТК “Вибрация и вибродиагностика”.* – Полтава, 1988. – С. 226, 227.
103. Ловейкін В.С. Теорія механізмів і машин: навчальний посібник. / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – Ніжин: Міланік, 2007. – 140 с.
104. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем: навчальний посібник. / Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. – Київ-Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 175 с.



105. Ловейкін В.С. Теоретичні дослідження динаміки тримасових ударно-вібраційних ущільнюючих машин з гідроприводом. / Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Свідерський А.Т. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – К.: КНУБА, 1999. — № 54. – С. 60–63.
106. Лурье А.И. Теория упругости. / Лурье А.И. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
107. Марголин Ш.Ф. Теория механизмов и машин. / Марголин Ш.Ф. – Минск: «Вишэйшая школа», 1968. – 359 с.
108. Маслов А.Г. Исследование вибрационных площадок с двухчастотными пространственными колебаниями. / Маслов А.Г., Иткин А.Ф. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Вып. 38 – Харьков, 2007. – С. 39-44.
109. Маслов А.Г. Исследование виброплощадки для уплотнения цементобетонных смесей горизонтально направленными колебаниями и пригрузом. / Маслов А.Г., Иткин А.Ф. // Интерстроймех 2007: материалы международной научно-технической конференции, 11-14 сентября 2007 г. Самара / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. Самара, 2007. – С. 189-196.
110. Механизация и автоматизация трудоемких процессов на предприятиях сборного железобетона. / [И.И. Назаренко, В.А. Пенчук, В.Н. Гарнец и др.]. – К.: Будівельник, 1988. – 192 с.
111. Назаренко И.И. Высокоэффективные виброформовочные машины. / Назаренко И.И. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1988. – 140 с.
112. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник. / Назаренко І.І. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.
113. Назаренко И.И. Оптимизация конструктивных параметров привода машин роликового формования. / Назаренко И.И., Ловейкин В.С., Гарнец В.Н. // Горные, строительные и дорожные машины. – 1992. – № 46. – С. 19–25.
114. Назаренко И.И. Перспективные направления создания и совершенствования уплотняющих машин в строительстве. / Назаренко И.И., Гарнец В.Н. – К.: О-во “Знание” УССР, 1987. – 16 с.

115. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем. / Назаренко И.И. – К.: ИСИО, 1993. – 216 с.
116. Неклюдов М.К. Механизация уплотнения грунтов. / Неклюдов М.К. – М.: Стойиздат, 1985. – 167 с.
117. Неклюдов М.К. Механизированное уплотнение грунтов. / Неклюдов М.К. – М.: Госстойиздат, 1960. – 143 с.
118. Пат. 30776 А Україна, МКВ В28В13/02 / Пристрій для формування виробів з бетонних сумішей / Гарнець В.М., Зайченко С.В. – № 98062832 заявл. 01.06.98; опубл. 15.12.00, Бюл. № 7-II.
119. Пат. 33971 А Україна, МКВ В28В13/02 / Пристрій для формування виробів з бетонних сумішей / Гарнець В.М., Зайченко С.В. – № 99052546 заявл. 05.05.99; опубл. 15.02.01, Бюл. № 1.
120. Пат. 67091 А Україна, МКВ В28В13/02 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Гарнець В.М., Почка К.І. – № 2003076371 заявл. 08.07.03; опубл. 15.06.04, Бюл. № 6.
121. Пат. 70490 А Україна, МКВ В28В13/02 / Пристрій для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Гарнець В.М., Почка К.І. – № 20031110056 заявл. 07.11.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
122. Пат. 70523 А Україна, МКВ В28В13/02 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Гарнець В.М., Почка К.І. – № 20031110814 заявл. 28.11.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
123. Пат. 7461 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установка для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № 20041210695 заявл. 24.12.04; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6.
124. Пат. 7884 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І., Бичевський В.М. – № 20041209993 заявл. 06.12.04; опубл. 15.07.05, Бюл. № 7.
125. Пат. 9675 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установка для формування виробів із вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф.,

- Почка К.І., Паламарчук Д.А. – № у 200502004 заявл. 04.03.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.
126. Пат. 10414 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установа з гідроприводом для роликового формування плоских виробів / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Гарнець В.М., Почка К.І., Шевченко Т.В. – № у 200503882 заявл. 25.04.05; опубл. 15.11.05, Бюл. № 11.
127. Пат. 10711 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200505494 заявл. 08.06.05; опубл. 15.11.05, Бюл. № 11.
128. Пат. 12135 U Україна, МКВ В28В13/02 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І., Паламарчук Д.А. – № у 200507785 заявл. 05.08.05; опубл. 16.01.06, Бюл. № 1.
129. Пат. 15814 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200600735 заявл. 27.01.06; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7.
130. Пат. 16778 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200602817 заявл. 16.03.06; опубл. 15.08.06, Бюл. № 8.
131. Пат. 21888 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для роликового формування плоских залізобетонних виробів з керованим гідроприводом / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І., Паламарчук Д.А. – № у 200610497 заявл. 03.10.06; опубл. 10.04.07, Бюл. № 4.
132. Пат. 26999 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200706711 заявл. 15.06.07; опубл. 10.10.07, Бюл. № 16.
133. Пат. 27477 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200708595 заявл. 26.07.07; опубл. 25.10.07, Бюл. № 17.

134. Пат. 28047 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установа для формування виробів з вологих сипких сумішей / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Почка К.І. – № у 200707475 заявл. 03.07.07; опубл. 26.11.07, Бюл. № 19.
135. Пат. 32838 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 20041108955 заявл. 02.11.2004; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.
136. Пат. 50032 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 200911443 заявл. 10.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
137. Пат. 53483 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201003748 заявл. 01.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.
138. Пат. 100934 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201502916 заявл. 30.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
139. Пат. 101386 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201502416 заявл. 18.03.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.
140. Пат. 101387 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201502417 заявл. 18.03.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.
141. Пат. 101388 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201502418 заявл. 18.03.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.
142. Пат. 102628 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201504419 заявл. 06.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.
143. Пат. 102629 U Україна, МПК В28В13/00 / Установа для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № у 201504421 заявл. 06.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.

144. Пат. 102630 U Україна, МПК В28В13/00 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № u 201504422 заявл. 06.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.
145. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. / Полянин А.Д. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
146. Попов Н.М. Расчёт и проектирование кулачковых механизмов. / Попов Н.М. – М.: Машиностроение, 1965. – 304 с.
147. Рекомендации по изготовлению железобетонных изделий методом роликового формования. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР. – 1983.
148. Розенбойм Л.С. Малая механизация бетонных работ. / Розенбойм Л.С. – М.: Стройиздат, 1984. – 85 с.
149. Методические рекомендации по технологии роликового формования. / [Руденко И.Ф., Кузин В.Н., Шклярова А.И. и др.] – М.: ЦМИПКС, 1987. – 35 с.
150. Рюшин В.Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей : Автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.04 “Дорожные и строительные машины”. / Рюшин В.Т. – Киев, 1986. – 20 с.
151. Рюшин В.Т. Аналитическое описание роликового формования бетона. / Рюшин В.Т., Човнюк Ю.В. // Новые технологические процессы при производстве сборного железобетона: Сб. Трудов НИИСП. – Киев, 1981. – С. 67–70.
152. Селиванова С.А. О назначении составов бетона роликового формования. / Селиванова С.А., Кузин В.Н. // Сб. научн. трудов “Исследование и практика заводского производства железобетона”. – Москва, 1982. – С. 91-98.
153. Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси. / Сивко В.И. – К.: Вища школа, 1987. – 168 с.
154. Соколов В.А. Самоходные дорожные катки: учебное пособие. / Соколов В.А., Новиков А.Н. – М.: Высшая школа, 1985. – 215 с.

155. Тир К.В. Комплексный расчёт кулачковых механизмов. / Тир К.В. – М.: Машгиз, 1958.
156. Тышкевич В.А. Коэффициенты качества шарнирных четырехзвенников. / Тышкевич В.А. // Анализ и синтез механизмов. – М.: Машиностроение, 1966. – С. 70–95.
157. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. / Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. – М.: Транспорт, 1975. – 257 с.
158. Дорожные машины. / [Хархута Н.Я., Капустин М.И., Семенов В.П., Эвентов И.М.]. – М.: Машиностроение, 1968. – 416 с.
159. Хархута Н.Я. Дорожные машины. / Хархута Н.Я. – Л.: Машиностроение, 1976. – 470 с.
160. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. / Хархута Н.Я. – Л.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
161. Чубук Ю.Ф. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей. / Чубук Ю.Ф., Назаренко И.И., Гарнец В.Н. – К.: Вища школа, 1985. – 168 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
-------------	---

### РОЗДІЛ 1

<b>ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ .....</b>	<b>5</b>
1.1. Огляд машин для виробництва плоских залізобетонних виробів .....	5
1.2. Аналіз конструкцій і параметрів машин роликowego формування плоских залізобетонних виробів .....	9
1.3. Огляд приводів машин роликowego формування .....	15
1.4. Загальні положення про кулачкові механізми .....	27
1.5. Задачі оптимізації кулачкових механізмів .....	28

### РОЗДІЛ 2

<b>ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РУХУ КУЛАЧКОВОГО ПРИВОДУ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ .....</b>	<b>30</b>
2.1. Оптимізація режимів руху кулачкових механізмів за одиничними критеріями .....	30
2.2. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним динамічним режимом руху .....	42
2.3. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним рівковим режимом руху .....	47
2.4. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку .....	49
2.5. Синтез кулачкового приводного механізму з оптимальним комплексним режимом руху .....	51
2.6. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим динамічним режимом руху .....	56
2.7. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим рівковим режимом руху .....	62

2.8. Синтез кулачкового приводного механізму з комбінованим режимом руху за прискоренням третього порядку .....	67
---	----

### **РОЗДІЛ 3**

<b>ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РЕВЕРСУВАННЯ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ .....</b>	<b>76</b>
---	-----------

3.1. Оптимізація динамічного режиму реверсування .....	76
3.2. Оптимізація ривкового режиму реверсування .....	85
3.3. Оптимізація режиму реверсування за прискоренням третього порядку .....	95

### **РОЗДІЛ 4**

<b>ОПТИМІЗАЦІЯ КРАЙОВИХ УМОВ РЕЖИМІВ РЕВЕРСУВАННЯ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ .....</b>	<b>107</b>
---	------------

4.1. Оптимізація крайових умов ривкового режиму реверсування .....	107
4.2. Обґрунтування крайових прискорень режиму реверсування за прискоренням третього порядку .....	117
4.3. Обґрунтування крайових ривків режиму реверсування за прискоренням третього порядку .....	127
4.4. Обґрунтування крайових умов режиму реверсування за прискоренням третього порядку .....	138

### **РОЗДІЛ 5**

<b>ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ МАШИН РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ З КУЛАЧКОВИМ ПРИВОДОМ.....</b>	<b>150</b>
--	------------

<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>155</b>
-----------------------	------------

<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>157</b>
--------------------------------	------------



Наукове видання

**ЛОВЕЙКІН Вячеслав Сергійович**

**ПОЧКА Костянтин Іванович**

**ДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ  
КУЛАЧКОВОГО ПРИВОДУ МАШИН  
РОЛИКОВОГО ФОРМУВАННЯ**

Монографія

Комп'ютерна верстка *К.І. Почки*

Тираж 300 прим.