

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ. ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ

1.1 Стан і тенденції розвитку систем автоматизації станів прокатки

Проблеми побудови і оптимізації систем автоматичного керування (САК) взаємопов'язаних електроприводів технологічних ліній привертають до себе широку увагу фахівців. Зазначені питання вирішувалися багатьма вченими. У працях М.М. Дружиніна [25, 27], Ю.М. Файнберга [28], Ю.А. Борцова, Г.Г. Соколовського [29, 30], В.М. Єгорова [31], А.Б. Зеленова [32-35], А.В. Башарина [36], В.А. Новікова [37], В.І. Ключева [38, 39], А.В. Садового [40, 41], Л.Г. Лимонова [42], В.Б. Клепікова [43], О.І. Толочко і П.Х. Коцегуба [44-50] інших розроблені питання теорії взаємопов'язаних електромеханічних систем з пружними зв'язками, визначено основні шляхи їх аналізу і синтезу.

У роботах М.М. Дружиніна дано глибокий аналіз статичного і динамічного режимів багатодвигунного електроприводу безперервного стану з урахуванням впливу характеристик електроприводу, пружності механічної системи і параметрів технологічного процесу, була, зокрема, показана домінуюча роль пружних властивостей системи валок-кліть. В його працях широко висвітлені також фізичні процеси, що відбуваються під час намотування і розмотування смуги з барабана моталки. Використання введеного В.І. Ключовим коефіцієнта електромеханічного зв'язку при оцінках впливу пружності механічних передач на динаміку ЕП і синтезі корекції спростило аналітичні дослідження і підвищило їх наочність. Ю.А. Борцов і Г.Г. Соколовський розглянули вплив пружних зв'язків на динаміку тиристорних систем ЕП, побудованих за принципами підлеглого регулювання. Необхідність здійснення в короткий час проектування і налагодження ЕП прокатних станів зумовила роботу вчених О.В. Слежановського, Н.П. Куницького в цьому напрямку. А.Б. Зеленовим були викладені принципи побудови систем електромашинного управління і регулювання. О.І. Толочко і П.Х. Коцегуб приділили увагу дослідженню систем підлеглого регулювання з

спостерігачами стану динамічного і статичного струмів, системам позиційного ЕП з комбінованим управлінням по задаючому і збурюючих впливів.

Однак, в більшості випадків авторами була розглянута двомасова система, що значно спрощує взаємний вплив пружних зв'язків на електроприводи.

Ю.М. Файнберг наведені фізичне трактування, математичний опис законів, що визначають зв'язку електромеханічних величин з параметрами технологічного процесу, математичний опис процесів намотування і корекції розчину валків.

З урахуванням аналізу літератури можна виділити наступні тенденції розвитку прокату:

- підвищення продуктивності станів за рахунок комплексної автоматизації процесу прокатки;
- поліпшення якісних характеристик прокату (точність геометричних розмірів, стан поверхні, разнотолщинність, фізико-математичні властивості і однорідність структури металу та інше);
- оптимізація технологічних параметрів процесу прокатки;
- зниження металоємності і енергоємності обладнання;
- переоснащення і модернізація систем управління ЕП.

Комплексна автоматизація процесу прокатки передбачає побудову багаторівневої системи автоматичного керування (САК), вирішальною наступні завдання управління:

- вироблення керуючих впливів для приводів основних і допоміжних механізмів відповідно до виробничої програмою і поточними параметрами прокатки;
- пряма або непряма оцінка технологічних параметрів для регулювання натягу і петлеутворення, контролю руху прокату, стартових команд для ножиць, передач, штовхачів, охолоджуючих сопел та інше;
- уявлення і зображення настановних і поточних значень параметрів і координат, таких як навантаження двигунів, величина петель, натяг прокату,

частоти обертання двигунів, швидкості прокатки, довжини кінцевої обрізки смуги та інші виробничі параметри;

- діалог між обслуговуючим персоналом і системою управління (СУ), а також дисплейне обслуговування і управління ЕП прокатного стану і протоколювання основних даних процесу;

- використання результатів моніторингу для підтвердження адекватності створених імітаційних моделей СХП, які будуть в подальшому використані при створенні нового і реконструкції існуючого прокатного обладнання.

Відповідно до ідеології блочно-модульного виконання комплектних електроприводів, як правило, передбачається можливість широкого варіювання силових модулів і модулів управління, що входять в склад силових блоків і блоків управління комплектного електроприводу, з метою їх адаптації до режимів і умов роботи технологічного обладнання.

Велика частина, існуючих прокатних станів має такі загальні характеристики:

- використання приводів постійного струму з аналоговими системами управління;

- побудова СУ ЕП на базі локальних контролерів і реле;

- надійна робота силових випрямних секцій і двигунів в умовах наявності достатньої кількості запчастин і якісного обслуговування;

- висока жорсткість елементів електромеханічної системи головних приводів прокатних клітей, що визначає динамічні можливості приводів;

- відсутність системи інформаційного супроводу роботи електроприводів, що впливає на оперативність управління технологічним процесом прокатки.

У цих умовах можуть бути розглянуті кілька кроків модернізації САУ станів прокатки - заміна аналогових і релейно-контактних систем управління на цифрові з використанням промислових комп'ютерів, технологічних контролерів, логічних контролерів, інтелектуальних модулів периферії та інше, відповідних верхньому і середньому рівню автоматизації. Наступний крок - доповнення перерахованих вище замін аналогових блоків управління комплектних ЕП постійного струму цифровими з використанням контролерів

приводу. Це доцільно, якщо силове випрямний обладнання нині діючих комплектних електроприводів в хорошому, робочому стані. При цьому привід постійного струму представляється як новий сучасний цифровий комплектний електропривод, що зберіг старі тиристорні секції, які є найбільш дорогими. Після модернізації створюються сприятливі умови для організації багаторівневої автоматичної системи управління технологічним процесом (АСУТП), так як головні приводу можуть бути легко пов'язані з рівнем управління і організацією виробництва. Наступний крок модернізації - додаток заміною силових блоків комплектних електроприводів. Електродвигуни і мережі електроживлення залишаються незмінними. Завершальний крок - повна модернізація автоматизованих електроприводів шляхом заміни електроприводів постійного струму на електроприводи змінного струму.

Сучасний підхід в області модернізації прокатного виробництва - заміна двигунів постійного струму на двигуни змінного струму [51, 52], проте як і раніше залишається актуальним і затребуваним проведення модернізації на існуючому обладнанні, а саме, розумне поєднання заміни зношеного, морально і фізично застарілого електроустаткування новим, що мають високі показники надійності і якості, з обґрунтованим максимально можливим збереженням діючого устаткування, яке за своїми технічними характеристиками допускає тривалу подальшу експлуатацію. Щоб підтвердити правильність прийняття рішення про такого роду модернізації, досить важливою є можливість проведення математичного експерименту за допомогою імітаційного моделювання. Цей метод дозволяє підвищити ефективність реконструкції, скоротити час і витрати на проведення натурного експерименту, а також при введенні нового обладнання в промислову експлуатацію.

Відомо, що нормальне функціонування нових, високопродуктивних цехів гарячої прокатки неможливо без використання АСУТП. Їх застосування дає позитивні результати, але особливо необхідно воно на основному технологічному агрегаті - прокатному стані. Якість продукції, що випускається у вирішальній мірі залежить від роботи автоматичних систем, керуючих самим процесом прокатки.

1.2 Особливості побудови систем автоматичного керування станами прокатки

Завдання управління при прокатці. При обробці сталевих штаб на прокатних станах секції агрегатів пов'язані єдиним технологічним процесом. При цьому вали приводних двигунів з'єднані з механізмами шпинделем, який можна уявити у вигляді пружних механічних передач (пружні зв'язку першого роду), а самі секції пов'язані через опрацьований матеріал, який утворює в першому наближенні пружні зв'язку другого роду.

Система управління технологічними агрегатами, пов'язаними через опрацьований матеріал є багатовимірною багатозв'язною системою, в загальному випадку зі змінними параметрами, в якій електричні, механічні і технологічні чинники взаємопов'язані певним чином. У цьому випадку кожен агрегат має свою систему управління, але оскільки агрегати пов'язані єдиним технологічним процесом, то і сигнал управління повинен формуватися з урахуванням необхідності координації окремих агрегатів.

Одним з основних вимог, які пред'являються до системи багатодвигунового ЕП прокатного стану, є забезпечення транспортування металу із заданою швидкістю у всіх режимах роботи на всіх ділянках агрегату або будь-якої його частини. Це є необхідною умовою забезпечення якісного ведення технологічного процесу, підтримки якості і товщини матеріалу, що транспортується, якості змотування рулону, зниження кількості обривів смуги. Для виконання зазначеної вимоги один з механізмів агрегату або його окремої частини визначається як провідний. ЕП цього механізму виконується з САУ швидкості електродвигуна.

Системи управління двигунами постійного струму ЕП, побудовані за принципом підпорядкованого регулювання і налаштовані на модульний або симетричний оптимум, дозволяють легко синтезувати СУ з необхідними показниками якості перехідних процесів. Для того, щоб зробити систему підлеглого регулювання швидкості астатичної по навантаженні, зазвичай

заміняють пропорційний регулятор швидкості пропорційно-інтегральним. Більш високої якості перехідних процесів в однозонних системах ЕП постійного струму при відпрацюванні як керуючого так і обурює впливів можна домогтися введенням додаткової позитивного зворотного зв'язку по статичному току або заміною зворотного зв'язку по повному струму якірного ланцюга зворотним зв'язком по його динамічній складовій при збереженні регулятором швидкості П-структури. Для поліпшення динаміки астатичних систем підпорядкованого регулювання швидкості можна також замикаючи контур струму по ідентифікованого за допомогою спостерігача стану динамічному току або доповнювати систему каналом компенсації впливу навантаження на статичні властивості приводу, використовуючи для цього ідентифікований момент статичного опору.

Аналіз варіантів систем управління. Існує кілька методів синтезу систем управління багатовимірними об'єктами. В основу синтезу може бути покладено принцип автономності сепаратних систем. Тут використовується комбіноване управління. Спочатку, шляхом компенсації взаємозв'язків, що розглядаються як обурення, забезпечують інваріантність, тобто автономність підсистем (сепаратних систем). Потім виконують синтез кожної підсистеми, як одновимірної.

До багатовимірним об'єктів можна застосовувати метод оптимального управління, заснований на мінімізації інтегрального квадратичного критерію, що дає можливість вирішити задачу аналітичного конструювання оптимальних регуляторів [41, 53]. В результаті оптимізації виходить структура, в якій кожна підсистема охоплена зворотними зв'язками за своїми змінним стану від інших підсистем.

В багатовимірних системах управління в деяких випадках потрібно не автономність підсистем, а їх скоординований рух, тобто, певна взаємна залежність вихідних величин. таке узгоджене рух можна здійснювати двома способами: з умови автономності підсистем шляхом формування узгоджених задають впливів або шляхом використання взаємної залежності змінних стану підсистем. Таким чином, сигнал управління будь-якої підсистеми містить в

загальному випадку інформацію про всі змінних стану системи.

Аналіз багатовимірної системи не має принципових особливостей в порівнянні з аналізом одновимірної системи, однак, як правило, і більш трудомісткий. Стійкість системи досліджується по повній багатоконтурною структурній схемі. Визначення точності, якості і побудова перехідних процесів здійснюється окремо для кожної вихідної змінної з допомогою складеної для неї передавальної функції системи і відповідних частотних характеристик.

Точність і показники якості перехідних характеристик для кожної з вихідних змінних визначаються за своїм рівняння. При цьому, аналіз статички і динаміки для кожної з вихідних змінних нічим не відрізняється від випадку одновимірної системи з декількома зовнішніми впливами.

Що стосується завдання синтезу багатовимірної системи, то рішення її має істотну особливість, яка полягає в необхідності одночасного задоволення вимог по точності і якості перехідних процесів для декількох вихідних змінних, які в загальному випадку взаємно пов'язані і часто потребують протилежних заходи корекції. Тому тут необхідно компромісне рішення, при якому задовольняються вимоги, пред'явлені до всіх вихідних змінним.

1.3 Технологічні вимоги до системи автоматичного керування стану

Для ведення процесу прокатки потрібно здійснення в необхідній послідовності ряду технологічних операцій. Цим визначаються час включення і відключення окремих двигунів, а також співвідношення їх частот обертання. Виконання цих функцій, а також деяких інших операцій є об'єктом автоматизації. Крім того, системи управління і регулювання станів гарячої прокатки повинні включати елементи, що забезпечують надійне функціонування пристроїв автоматики і захист системи від пошкоджень і аварійних режимів.

При прокатці полоси САК головною лінією стану має передбачати можливість виконання ряду операцій і функцій і відповідати наступним вимогам:

- можливість окремого управління двигунами кліті і механізмів, а для багатоклітового стану двигунами кожної кліті окремо, двигунами всієї групи клітей в цілому або певною комбінацією двигунів окремих клітей, можливої в умовах конкретного стану;

- можливість швидкої зупинки як стану в цілому, так і окремих його клітей (для багатоклітьового стану);

- вимикання двигуна однієї кліті, що послідувало в результаті дії автоматичних захисних пристроїв або впливу оператора на відповідні органи управління, викликає відключення і останов двигунів всіх клітей стану, що важливо і для запобігання псуванню металу або поломки валків;

- якщо робота з металом в валках була перервана, то для продовження прокатки після подачі імпульсу на пуск, двигуни повинні автоматично придбати швидкість попередню аномальної роботі стану;

- ручна і автоматична регулювання частоти обертання кожного з двигунів повинна бути можлива і поза зв'язком з двигунами інших механізмів;

- можливість реверсу валків кліті як з металом, так і вхолосту;

- система повинна забезпечувати можливість роботи поштовхом, тобто повинна допускати короткочасне обертання або короткочасне зміна частоти обертання двигунів. Весь стан в цілому також повинен допускати повертання валків поштовхом в будь-якому напрямку [3];

- можливість повідомлення кожному з двигунів короткочасно більш інтенсивного прискорення;

Для визначення вимог до САУ станів прокатки важливо знати необхідну величину прискорень двигунів в перехідних процесах регулювання. Вона визначається швидкостями зміни основних технологічних регульованих параметрів: товщини металу, що прокочується. Знаючи закономірності, яким повинні слідувати прискорення регульованих двигунів в різних режимах управління і регулювання, можна визначити необхідні закони зміни їх магнітного потоку збудження і напруги на їх затискачах, знайти передавальні коефіцієнти різних ланок системи регулювання, і інші параметри.

1.4 Функціональна електрична схема та опис конструкції, роботи механізму головного руху чорнової

Для прикладу наведемо найбільш часто зустрічаються САК кліті.

Функціональна електрична схема електроприводу кліті (рис. 1.1) представлена двоконтурна САК: внутрішній контур регулювання струму якірного ланцюга, зовнішній - напруга. На рисунку Т - трансформатор, L - струмообмежувальним реактор, VS1-VS12 - вентилі керованого реверсивного перетворювача, ДТ - датчик струму, ДН - датчик напруги, М - приводний двигун постійного струму, LM - обмотка збудження ДПТ, ДЕ - датчик ЕРС, РТ - регулятор струму, РЕ - регулятор ЕРС, БО - блок обмеження, ЗІ - задатчик інтенсивності, СИФУ - система імпульсно-фазового управління, КУ - командне пристрій, Ф - фільтр, ФП - функціональний перетворювач, ВУ - обчислювальний пристрій, ФБ - функціональний блок.

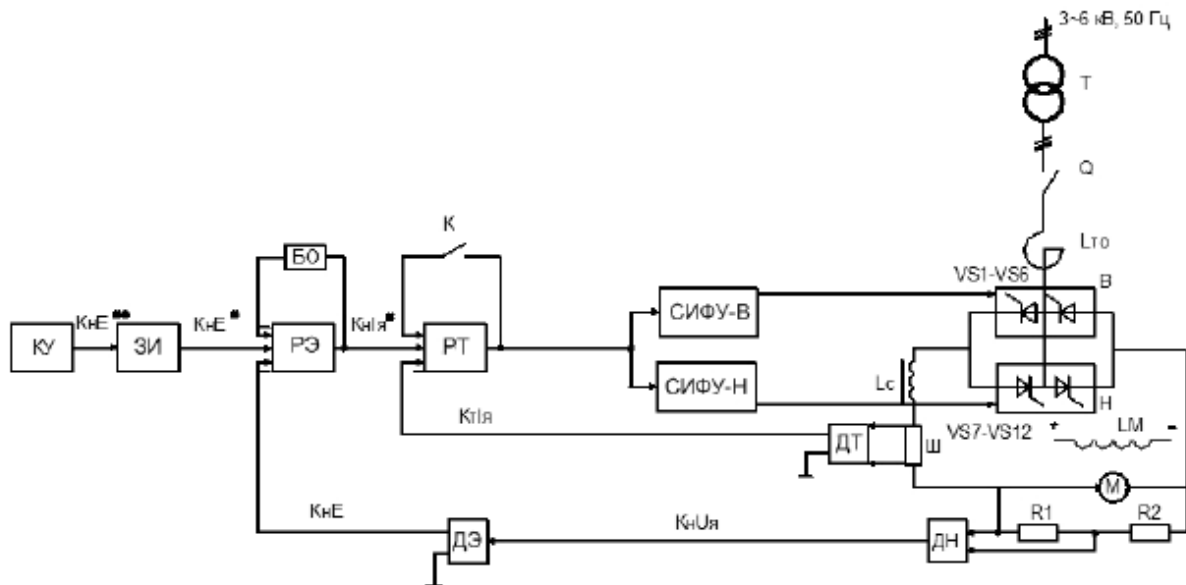


Рисунок 1.1 - Функціональна електрична схема ЕП прокатної кліті

Чорнова кліть «Кварто» містить два робочих валки і два опорних (рис. 1.2). Робочі валки (поз.1, рис. 1.2) виконуються із гладкою циліндровою бочкою.

Опорні валки (поз.2, рис. 1.1) - цільноковані. Ці валки спираються на чотирирядні роликпідшипники із циліндровими роликами, вбудованими в

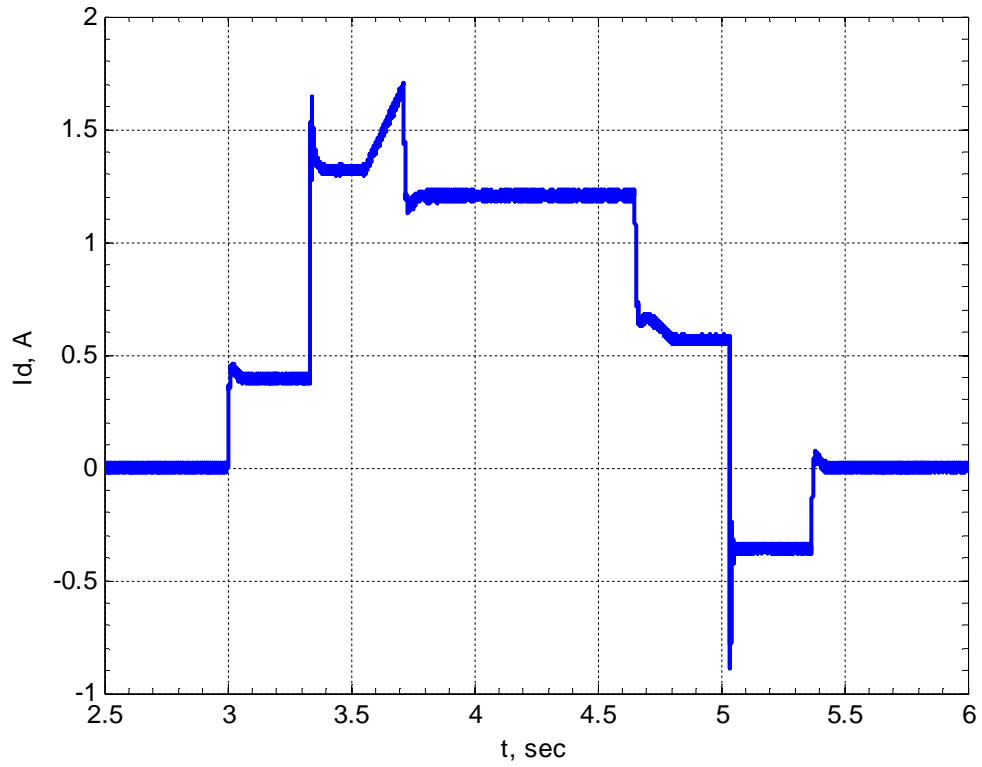


Рисунок 5.38 – Графік перехідного процесу струму якоря (в.о.) при зменшенні опору якірного ланцюга в 2 рази (перший прохід лист $12 \times 2250 \times 18000$ мм)

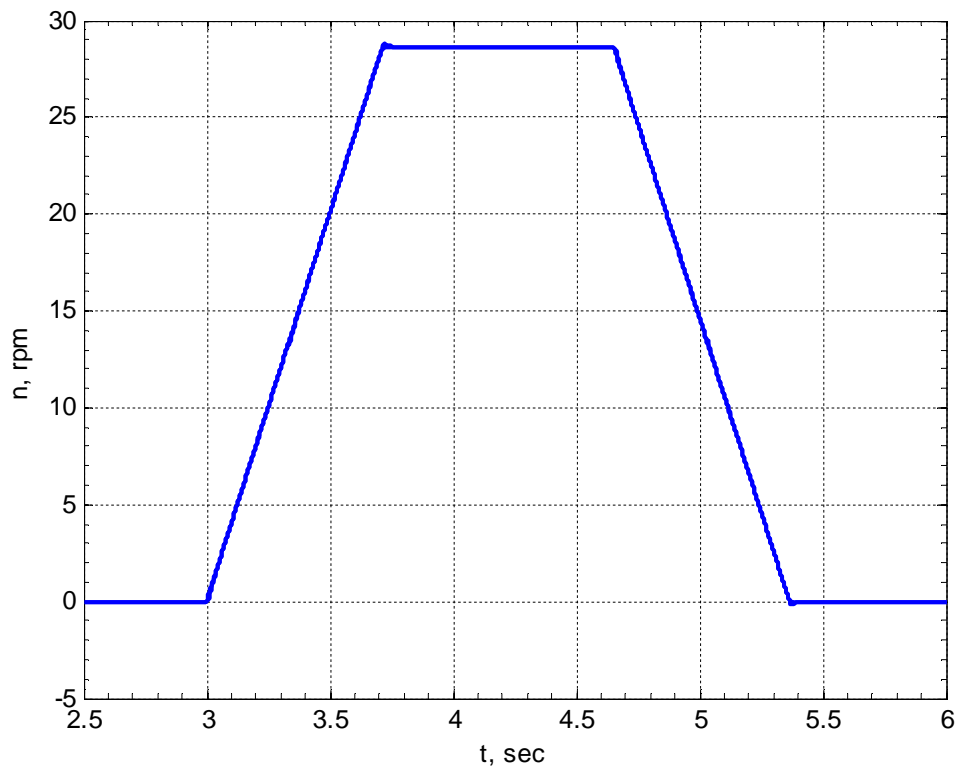


Рисунок 5.39 – Графік перехідного процесу частоти обертання при зменшенні опору якірного ланцюга в 2 рази (перший прохід лист $12 \times 2250 \times 18000$ мм)

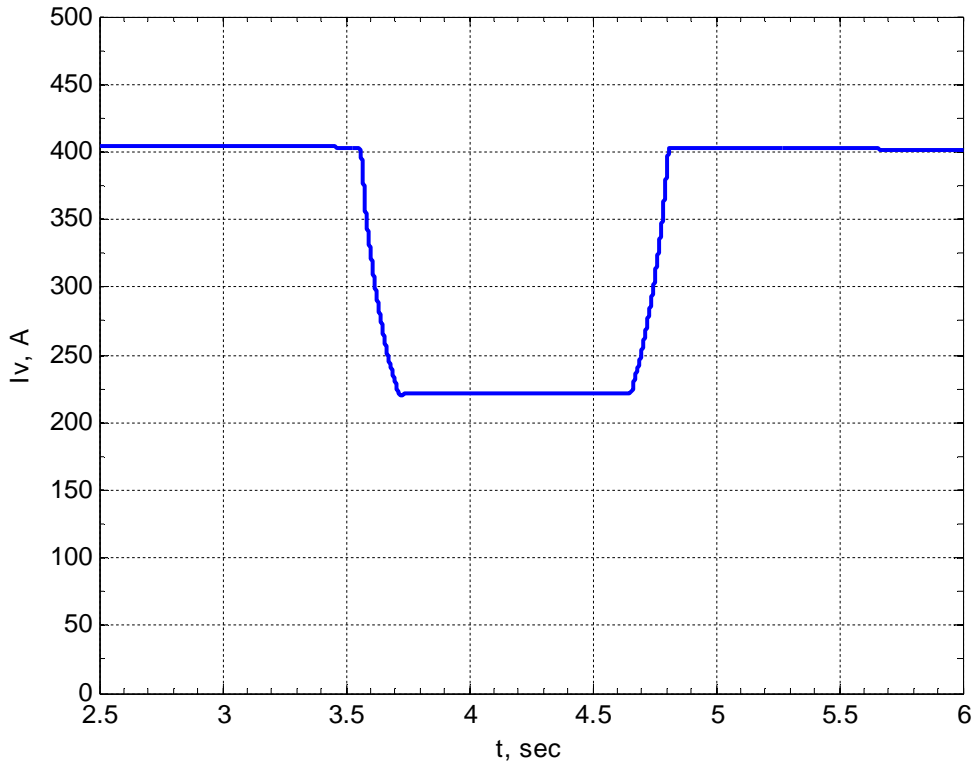


Рисунок 5.40 – Графік перехідного процесу струму збудження при зменшенні опору якірного ланцюга в 2 рази (перший прохід лист $12 \times 2250 \times 18000$ мм)

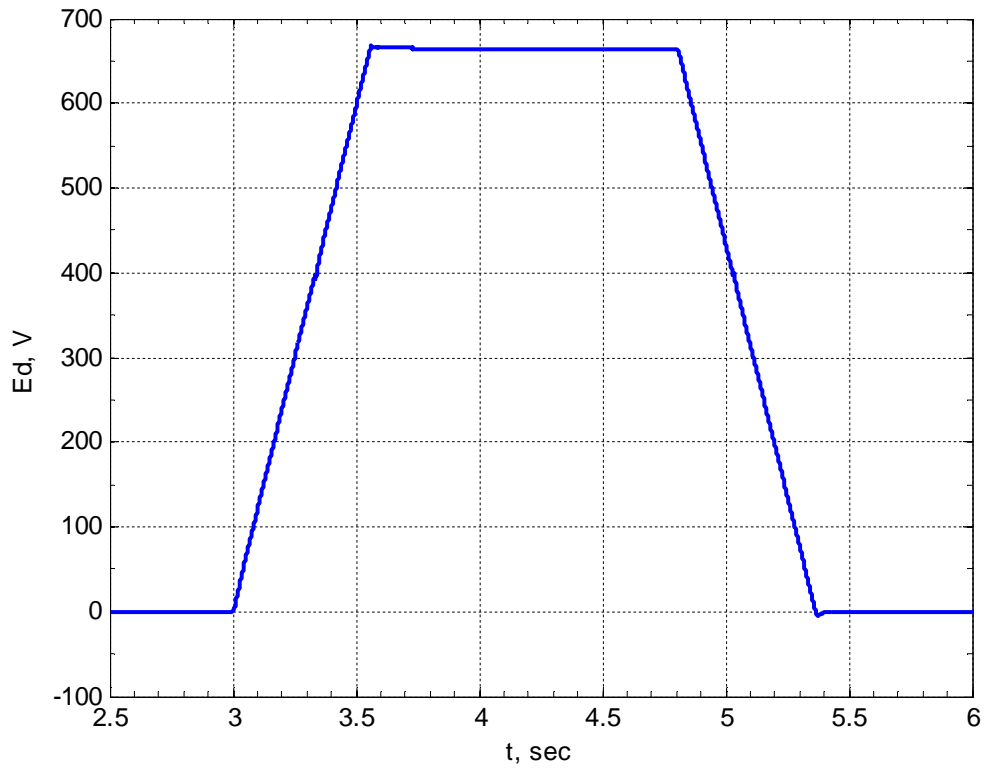


Рисунок 5.41 – Графік перехідного процесу ЕРС при зменшенні опору якірного ланцюга в 2 рази (перший прохід лист $12 \times 2250 \times 18000$ мм)

Об'єктом розгляду у цьому розділі є створена модель та алгоритм розрахунку енергосилових параметрів листопрокатного стану гарячої прокатки на базі математичної моделі силових умов прокатки що забезпечує альтернативний вибір, серед існуючих методик А.І. Целікова, М.Я. Бровмана, С. Екелунда та ін., рис. 6.1-6.3, тієї, яка відповідає певним умовам при кожному і-тому обтисненні металу, а також реалізація автоматичного розрахунку й інтерактивного представлення результатів розрахунків за умови завдання необхідних початкових параметрів прокатки.

При створенні моделі були:

- побудований алгоритм розрахунку зусилля прокатки із застосуванням ряду існуючих методик Целікова, Бровмана, Екелунда й ін., який забезпечує оптимальний вибір схеми розрахунку енергосилових параметрів для індивідуальних умов прокатки в кожному пропуску металу;

- створена підсистема по визначенню дійсного опору деформації металу в кожному пропуску яка використовує методику аналітичного визначення межі міцності (плинності) сталей і сплавів залежно від їхнього хімічного складу;

- створена підсистема з розрахунку еквівалентних моментів (струмів) приводних електродвигунів головного руху прокатних клітей з наступним аналізом їх завантаження й перевірки за перевантажувальною здатністю з урахуванням роботи електродвигунів на швидкостях вище номінальної;

- враховані особливості роботи головного привода чорнової кліті стану 3000 ВАТ «АМК» при роботі в системі двухзонного регулювання швидкості.

Вихідними даними для визначення енергосилових параметрів є:

- параметри листа, що прокатується (товщина, ширина, довжина);
- марка/хім. состав сталі;
- параметри слябів (вага, товщина, ширина, довжина, температура нагрівання);

– продуктивність прокатного стану (швидкість прокатки).

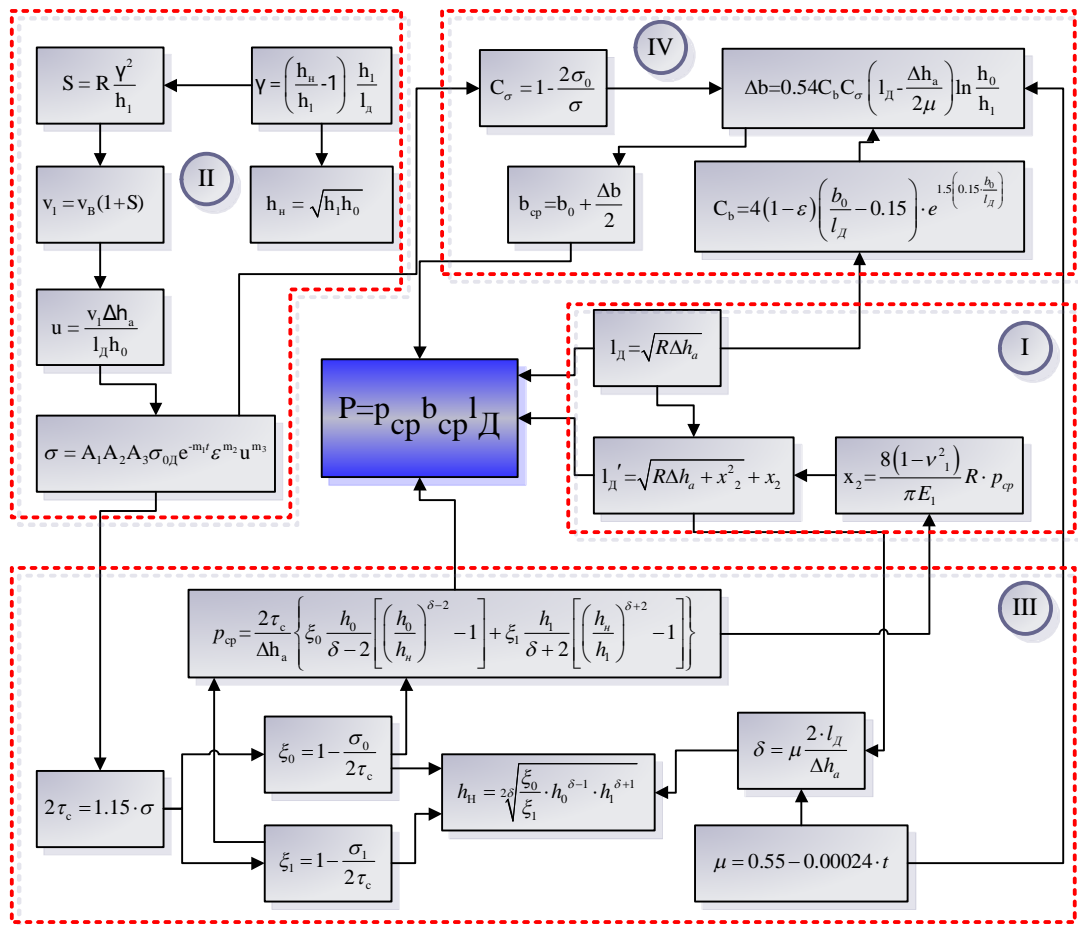


Рисунок 6.1 – Блок-схема розрахунку зусиль прокатки за методикою А.І. Целікова

Розрахунок енергосилових умов прокатки умовно розділений на наступні етапи:

1. визначення опору металу деформації;
2. розрахунок зусиль прокатки;
3. розрахунок моментів і потужності прокатки;
4. перевірка встановленого електроустаткування відповідності технологічним вимогам або ж його вибір у випадку проектування прокатних станів «з нуля» і зміни швидкісних режимів деформації.

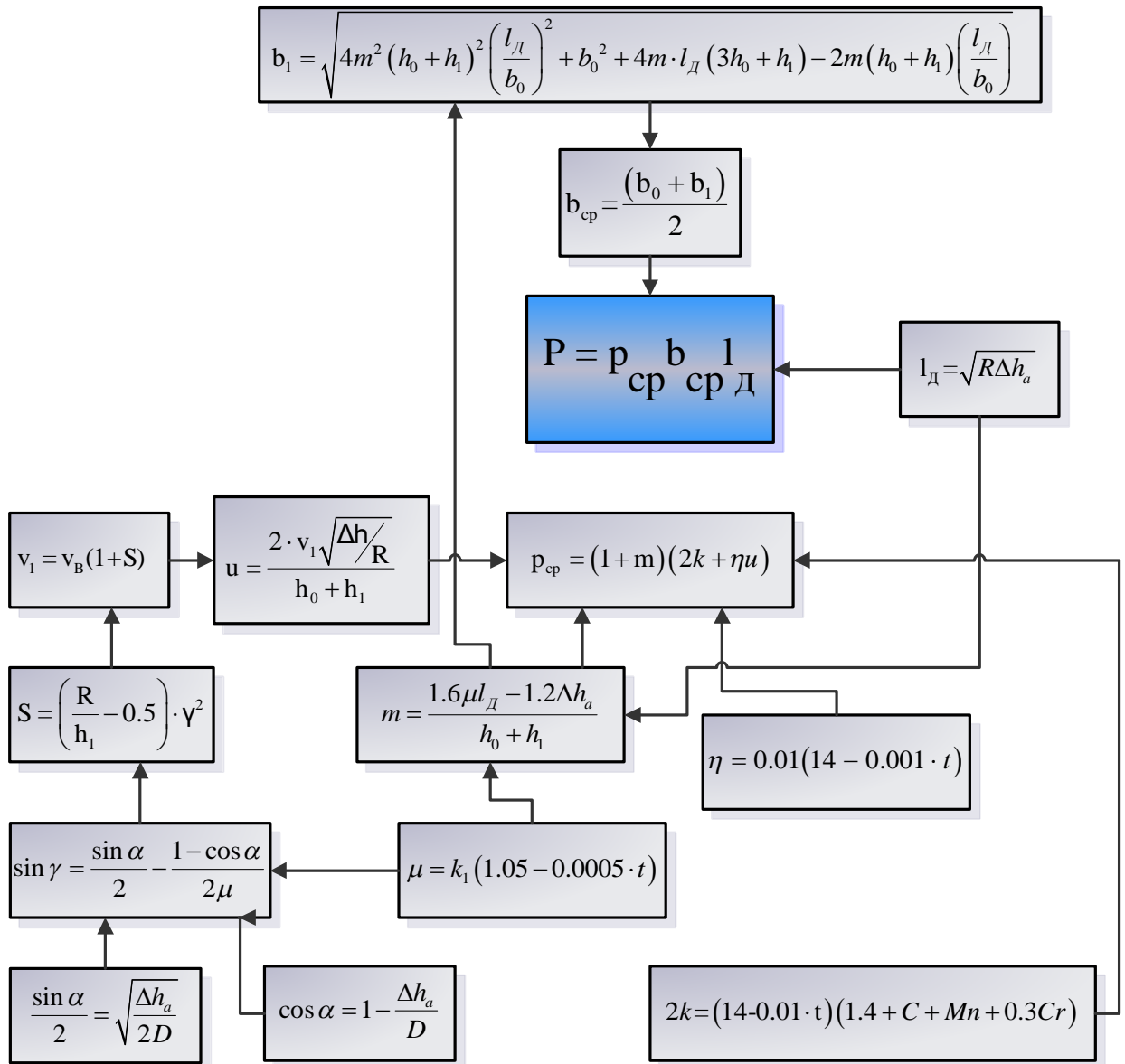


Рисунок 6.2 – Блок-схема розрахунку зусиль прокатки за методикою С. Екелунда

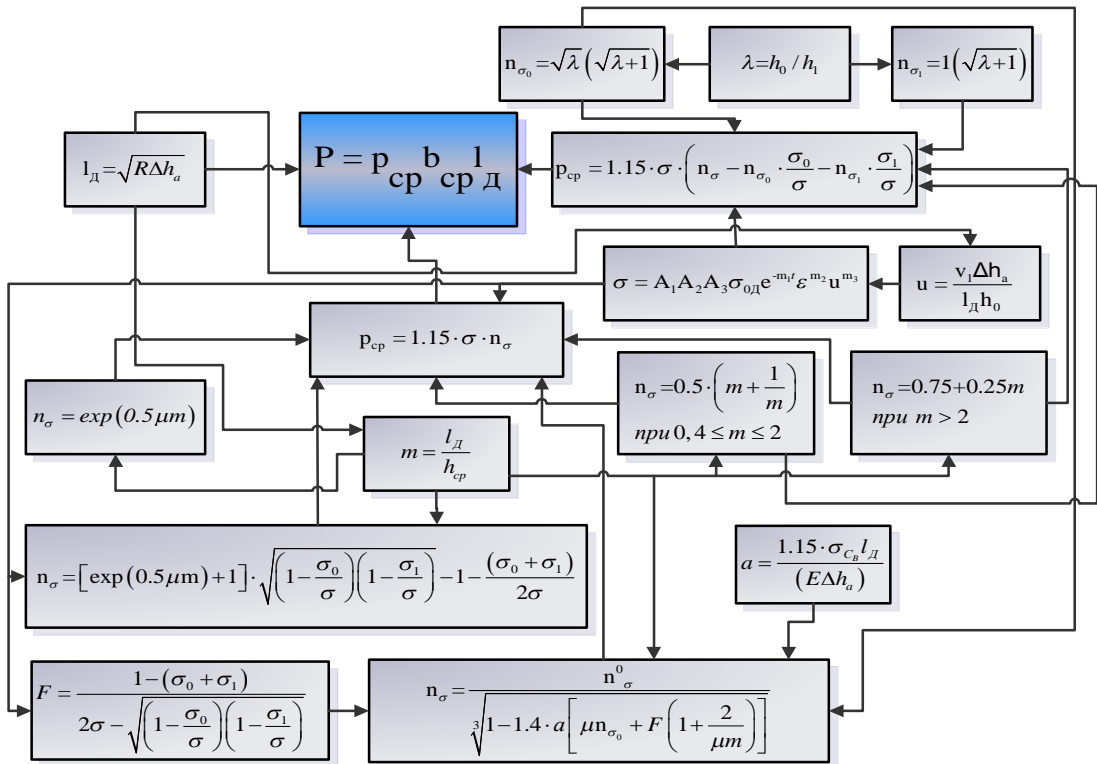


Рисунок 6.3 – Блок-схема розрахунку зусиль прокатки за методикою М.Я. Бровмана



Рисунок 6.4 – Загальна схема побудови розрахункового алгоритму енергосилових параметрів листопркатного стану

Отже, для розрахунку зусилля прокатки необхідно знати опір деформації σ , коефіцієнт напруженого стану й контактну площу.

Точність розрахунку енергосилових умов прокатки багато в чому залежить від вибору способу визначення опору пластичної деформації, металу що прокатується. Методики розрахунку опору деформації при гарячій прокатці представлені в роботах В.І. Зюзіна, Л.В. Андреюка [10, 11] й інших авторів, що дозволяють аналітично визначити границі плинності сталей і сплавів (так звані методи термомеханічних коефіцієнтів). Так само існують методи засновані на отриманих експериментальних даних на пластомерах і зведені в графічні залежності $\sigma = f(u)$ із вказівкою температури й ступені обтиснення - графічний метод, і йому подібні - графоаналітичний, номографічний. Ці методи мають певні незручності, що полягають у тому, що при спробі алгоритмізувати і автоматизувати розрахунок енергосилових умов прокатки, використання графіків при множинних розрахунках незручне й небажане, навіть у випадку застосування обчислювальної техніки.

У створеній підсистемі по визначенню дійсного опору деформації металу в кожному пропуску використовується метод аналітичного розрахунку межі міцності (плинності) сталей і сплавів залежно від їхнього хімічного складу, запропонованої Л.В. Андреюком:

$$\sigma_{\delta} = s\sigma_0 u^a (10\varepsilon)^b (t/1000)^c, \quad (6.1)$$

$$\text{де: } s\sigma_0 = 66,8 + 0,1 \left[\left(K'_1 X_1 + K''_1 X_1^{1,5} \right) + \dots + \left(K'_{13} X_{13} + K''_{13} X_{13}^{1,5} \right) \right];$$

$$a = 0,126 + 0,01 \left[\left(l'_1 X_1 + l''_1 X_1^{1,5} \right) + \dots + \left(l'_{13} X_{13} + l''_{13} X_{13}^{1,5} \right) \right];$$

$$b = 0,125 + 0,01 \left[\left(m'_1 X_1 + m''_1 X_1^{1,5} \right) + \dots + \left(m'_{13} X_{13} + m''_{13} X_{13}^{1,5} \right) \right];$$

$$c = -2,82 + 0,01 \left[\left(n'_1 X_1 + n''_1 X_1^{1,5} \right) + \dots + \left(n'_{13} X_{13} + n''_{13} X_{13}^{1,5} \right) \right].$$

Значення коефіцієнтів $K'_1, K''_1, l'_1, l''_1, m'_1, m''_1, n'_1, n''_1$, отримані в результаті

пластометричних досліджень. Символами $X_1 - X_{13}$ позначені хімічні елементи С, Mn, Si, Cr, Ni, W, Mo, V, Ti, Al, Co, Nb і Cu відповідно. Як зазначають автори методики, можлива помилка визначення середніх значень опору деформації оцінюється як $\pm 4\%$ з довірчою ймовірністю 0,95.

Для визначення середнього контактного тиску при гарячій прокатці листів на товстолистових станах без натягу використані теоретичні формули, А.А. Корольова, А.І. Целікова, А.Д. Томльонова, М.Я. Бровмана [2,12, 13, 14] та ін.:

- А.І. Целіков (для $l/h_{cp} = 1,0 \div 2,0$):

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{\delta} \left(1 + \frac{l}{6h_{cp}} \right), \quad (6.2)$$

для $l/h_{cp} < 1,0$:

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{\delta} \left(1 + \frac{1}{6h_{cp}} \right) \left(\frac{l}{h_{cp}} \right)^{0,4}, \quad (6.3)$$

- А.А Корольов (для $l/h_{cp} > 1,0$):

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{\delta} \frac{2}{\varepsilon\delta} \left[\left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right] \quad (6.4)$$

- А.Д. Томльонов (для $0,275 \leq l/h_{cp} \leq 1,0$):

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{\delta} \left[0,5 \frac{l}{h_{cp}} + 0,5 \frac{h_{cp}}{l} - 0,04 \left(\frac{h_{cp}}{l} \right)^2 \right] \quad (6.5)$$

- М.Я. Бровман (для $0,5 \leq l/h_{cp} \leq 2,0$):

$$p_{cp} = \frac{1,15\sigma_{\delta}}{2} \left(\frac{l}{h_{cp}} + \frac{h_{cp}}{l} \right) \quad (6.6)$$

для $l/h_{cp} > 2,0$:

$$P_{cp} = 1,15\sigma_{\delta} \left(0,75 + 0,25 \frac{l}{h_{cp}} \right) \quad (6.7)$$

Отримані значення зусилля прокатки не повинні перевищувати припустимих величин, розрахованих за умовами міцності валків, а якщо ні, то проводиться перерозподіл обтиснень по проходах.

Результатом роботи математичної моделі є розрахункові дані одержані у розділі 2:

- величини струмів якоря й моментів на валу двигуна у всіх режимах роботи стану для кожного пропуску (розгін до основної швидкості із захватом металу, розгін вище основної швидкості зміною поля двигуна, прокатка на швидкості, що встановився, гальмування привода з викидом металу з валків);

- еквівалентний момент (струм) за цикл прокатки з видачею проміжних складових M^2t у кожному з перерахованих режимів роботи стану для оцінки частки кожного з компонентів у завантаженні двигуна;

- максимальна кратність перевантаження двигуна;

- графіки перехідних процесів основних регульованих координат головного привода в часі (лінійна й окружна швидкість прокатки, моменту й струму електродвигуна й т.п.).

Створена модель розрахунків енергосилових умов прокатки перевірена шляхом порівняння результатів обчислень із моделлю, запропонованою компанією Converteam (розрахункова величина моменту прокатки в моделі Converteam трохи занижена, відмінність становить близько 10%), а також з реальними енергосиловими параметрами, що зберігаються на ІВА-сервері у процесі прокатки розглянутого сортаменту листів на стані 3000. Математична модель заснована на аналітичних залежностях що повністю виключає необхідність додаткових розрахунків у яких використовуються графічні, графоаналітичні, номографічні методи що значно спрощує роботу ІТП. Отримана модель у відмінності від базових розробок розрахунку енергосилових

параметрів прокатки враховує властивості й особливості систем двохзонного регулювання швидкості й специфіку роботи силового електроустаткування, а також наочно ілюструє їх. Детальний опис математичної моделі листопрокатного стану гарячої прокатки та розрахунок енергосилових параметрів прокатки наведений у [15].

5.1. Системи модального управління

5.1.1. Загальна характеристика модального управління

Ряд сучасних регульованих електроприводів навіть в лінійному наближенні є об'єкти управління, яким важко додати стійкість, тим більше необхідні високі динамічні показники руху робочого органу. До таких електроприводів можна віднести приводи з багатьма взаємопов'язаними координатами, з кількома входами і виходами, з багатомасовою рухомою частиною, наприклад, багатодвигунні електроприводи деяких типів маніпуляторів, роботів, локаторів, електроприводи деяких підйомно-транспортних машин, поворотних антенних установок і т.п. Такі електроприводи як динамічні системи характеризуються великою розмірністю (високим порядком результуючого диференціального рівняння).

Для даного типу електроприводів може виявитися ефективним відомий з ТАУ спосіб управління, званий модальним керуванням [10]. Відомо, що негативний зворотний зв'язок по будь-якої координаті об'єкта управління (ОУ) стабілізує цю координату, т.е. В тій чи іншій мірі підтримує її постійної при незмінному завданні і наявності збурень всередині контуру. Тому можна вважати, що якщо замкнути ОУ по всіх координатах, що характеризує його стан в будь-який момент часу і званим змінними стану, то при відповідному підборі коефіцієнтів зворотних зв'язків можна отримати бажані характеристики об'єкта управління щодо вихідних координат.

Розглянемо математичний опис системи з модальним керуванням і синтез модального регулятора (МР) для лінійного об'єкта управління. У загальному випадку ОУ може мати кілька входів U_1, U_2, \dots, U_m , Кілька виходів Y_1, Y_2, \dots, Y_r і n змінних стану x_1, x_2, \dots, x_n , Число яких дорівнює числу незалежних диференціальних рівнянь, що описують динаміку ОУ (рис. 5.1). Об'єкт управління замикається за сукупністю всіх x_1 , тобто по вектору

стану (ВС) $X(t) = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$. Сигнали зворотного зв'язку підсумовуються в модальному регуляторі в сигнали, що утворюють вектор $U_p(t) = [u_{p1} u_{p2} \dots u_{pm}]^T$, Який подається на входи об'єкта управління, де віднімається з вектора задають сигналів $V(t) = [v_1 v_2 \dots v_m]^T$, В результаті чого утворюється вектор керуючих сигналів $U(t) = [u_1 u_2 \dots u_m]$

Об'єкт управління описується системою диференціальних рівнянь у формі Коші:

$$\dot{x}_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + b_{i1}u_1 + \dots + b_{im}u_m,$$

де $i = 1, \dots, n$;

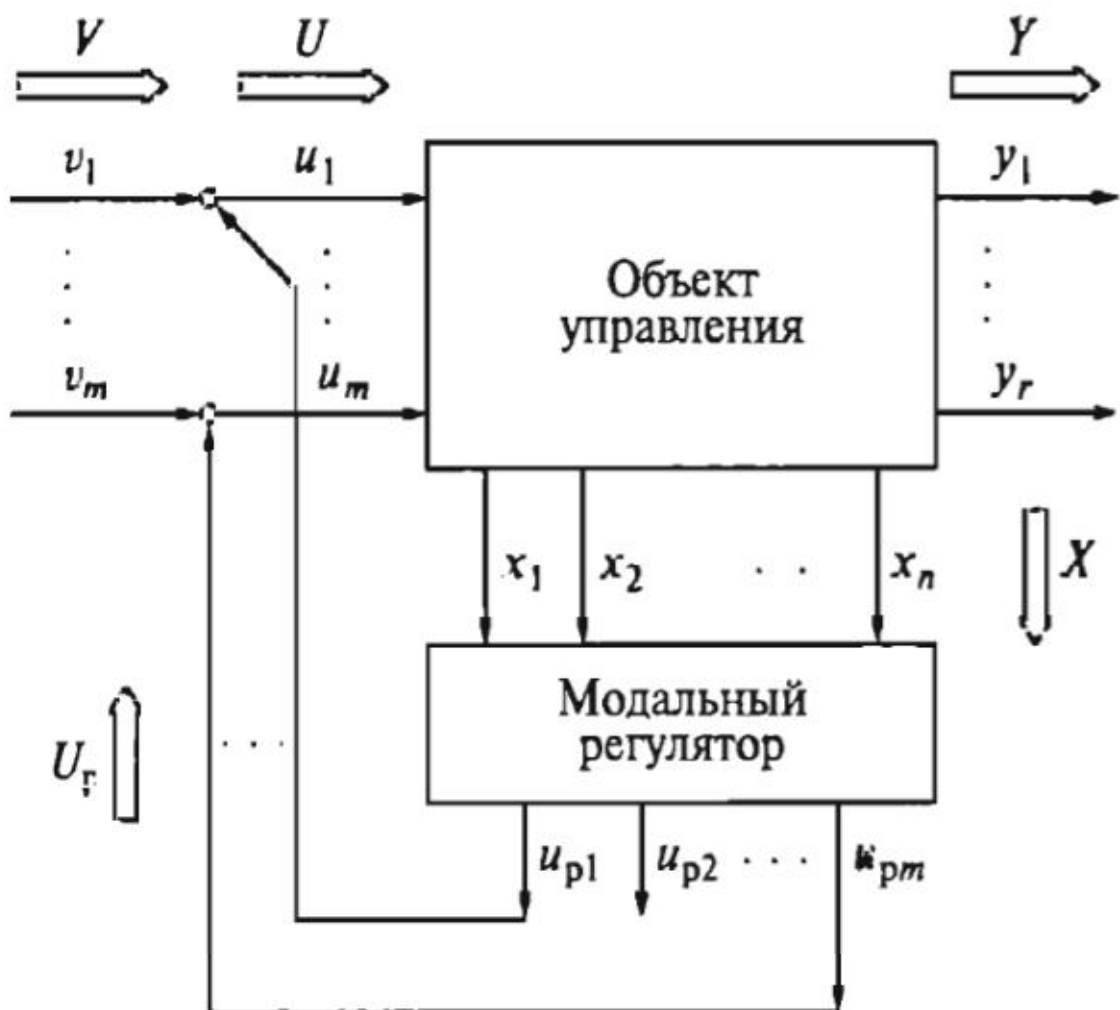


Рис. 5.1. Загальний вигляд системи з модальним керуванням

$$y_j = c_{j1}x_1 + c_{j2}x_2 + \dots + c_{jn}x_n,$$

де $j = 1, \dots, r$.

Рівняння модального регулятора:

$$U_{pj} = k_{j1}x_1 + k_{j2}x_2 + \dots + k_{jn}x_n,$$

де $j = 1, \dots, m$.

управління замикання:

$$U_j = V_j - U_{pj}$$

де $j = 1, \dots, m$.

Опис системи з модальним керуванням $n + r + m$ рівняннями більш компактно представляється в матричній формі:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t);$$

$$Y(t) = CX(t); \quad (5.1)$$

$$U_p(t) = KX(t);$$

$$U(t) = V(t) + U_p(t);$$

де A - квадратна матриця об'єкта управління ($n \times n$), $A = [a_{ij}]$; B - прямокутна матриця управління ($n \times m$), $B = [b_{ij}]$; C - прямокутна матриця виходів ($r \times n$), $C = [c_{ij}]$; K - прямокутна матриця модального регулятора ($m \times n$), $K = [k_{ij}]$.

Для замкнутого по вектору стану ОУ перше, третє і четверте рівняння системи (5.1) спільно дають результуюче матричне рівняння в тимчасовій області:

$$\dot{X}(t) = (A - BK)X(t) + BV(t). \quad (5.2)$$

Рівнянням (5.1) і (5.2) відповідає векторно-матрична схема (рис. 5.2).

Рівняння (5.2) в операторній формі має вигляд

$$DX(p) = BV(p), \quad (5.3)$$

де D - характеристична квадратна матриця ($n \times n$);

$$D = pl - A + BK, \quad (5.4)$$

де l - одинична матриця.

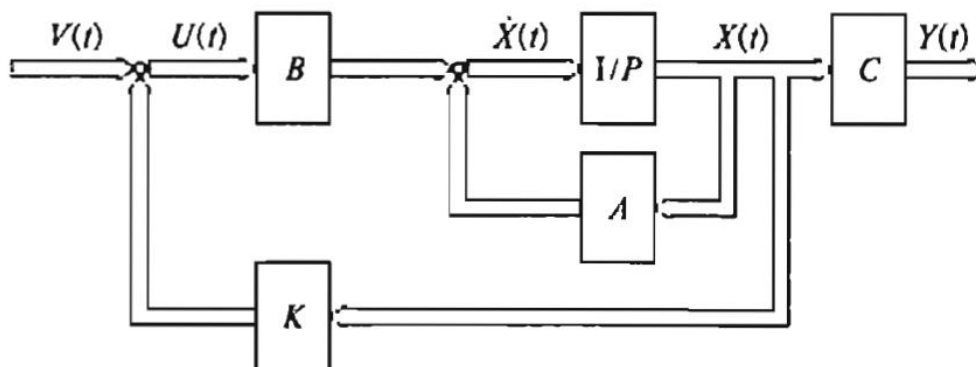


Рис. 5.2. Векторно-матрична схема системи модального керування

Детермінант від матриці D є характеристичним поліномом замкнутого по ВС об'єкта управління:

$$D(p) = \det(pl - A - BK) = \sum_{j=1}^{n_r} (-1)^{i+j} d_{ij} D_{ij}, \quad (5.5)$$

де i - номер рядка; j - номер стовпця; d_{ij} - елемент i -го рядка і j -го стовпця характеристичної матриці; D_{ij} - мінор, відповідний елементу d_{ij} .

Рішення характеристичного рівняння $D(p) = 0$ дає коріння ОУ, замкнутого по ВС. Так як коріння визначають динамічні властивості системи, замкненої через МР, то для отримання бажаних динамічних показників будуть потрібні відповідні корені характеристичного полінома. Звідси випливає принцип синтезу модального регулятора: підібрати матрицю. До модального регулятора так, щоб отримати в комплексній площині бажане розподіл коренів характеристичного полінома замкнутого по вектору стану об'єкта управління.

Синтез МР виконується методом стандартних рівнянь, які в нормованій формі наведені в довідковій літературі. Для отримання нормованої форми вихідне рівняння n -го порядку

$$D(p) = D_0 p^n + D_1 p^{n-1} + \dots + D_i p^{n-1} + D_{n-1} p + D_n = 0$$

ділиться на коефіцієнт D_0 і набуває кореневу форму

$$p^n + c_1 \omega_6 p^{n-1} + \dots + c_i \omega_6^i p^{n-i} + \dots + c_{n-1} \omega_6^{n-1} p + c_n \omega_6^n = 0. \quad (5.6)$$

Тут ω_6 - базова частота (середньо геометричний корінь),

$$\omega_6 = \sqrt[n]{\frac{D_n}{D_0}}; \quad c_i = \frac{D_i}{D_0 \omega_6^i}.$$

Розподілом рівняння (5.6) на ω_6^n здійснюється перехід до нормованого рівняння

$$S^n + c_1 S^{n-1} + \dots + c_i S^{n-i} + \dots + c_{n-1} S + 1 = 0 \quad (5.7)$$

з відносним оператором $S = \frac{p}{\omega_6} = \frac{d}{d\tau}$ і відносним часом $\tau = \omega_6 t$.

У табл. 5.1 наведено деякий набір нормованих рівнянь з другого по шостий порядок [18]. Кожне наведене рівняння характеризується певним розподілом коренів, яким відповідають значення пере регулювання σ і відносного часу перехідного процесу $\tau_{n,n}$ при відпрацюванні замкнутим по ВС об'єктом управління стрибка задає сигналу.

Таблиця 5.1

Типові нормовані рівняння

Нормированные уравнения	Перерегуливание σ , %	Относительное время переходного процесса $\tau_{п.п}$	Условия определения коэффициентов уравнения
$S^2 + 2S + 1$ $S^3 + 3S^2 + 3S + 1$ $S^4 + 4S^3 + 6S^2 + 4S + 1$ $S^5 + 5S^4 + 10S^3 + 10S^2 + 5S + 1$	0 0 0 0	4,8 6,3 7,5 9,1	Биномиальное разложение $(S + 1)^n$
$S^2 + \sqrt{2}S + 1$ $S^3 + 2S^2 + 2S + 1$ $S^4 + 2,6S^3 + 3,4S^2 + 2,6S + 1$ $S^5 + 3,24S^4 + 5,24S^3 + 5,24S^2 + 3,24S + 1$ $S^6 + 3,86S^5 + 7,46S^4 + 9,13S^3 + 7,46S^2 + 3,86S + 1$	4,5 7,1 12 9,5 12	2,8 5,9 6,9 7,8 8	Разложение по Баттерворту $\sqrt{\alpha^2 + \omega^2} = \omega_{г}$
$S^2 + \sqrt{2}S + 1$ $S^3 + 2S^2 + 2S + 1$ $S^4 + 2,82S^3 + 4S^2 + 2,82S + 1$ $S^5 + 4S^4 + 8S^3 + 8S^2 + 4S + 1$	4,5 7,1 6,2 5	2,8 5,9 7,0 7,5	Модульный оптимум
$S^2 + \sqrt{2}S + 1$ $S^3 + 1,75S^2 + 2,15S + 1$ $S^4 + 2,1S^3 + 3,4S^2 + 2,7S + 1$ $S^5 + 2,8S^4 + 5S^3 + 5,6S^2 + 3,4S + 1$ $S^6 + 3,2S^5 + 6,6S^4 + 8,6S^3 + 7,45S^2 + 3,9S + 1$	4,5 3 10 6 3	2,8 3,6 4,7 7,8 5,4	Минимум интеграла $\int_0^{\infty} t (1-x) dt$

5.1.2. Синтез модального регулятора электроприводу

Отримана на підставі математичного опису векторно-матрична схема системи з модальним керуванням представляє собою при відсутності

зовнішніх впливів замкнутий контур, що складається з двох частин - об'єкта управління і керуючого пристрою, званого в даній системі модальним регулятором. Кожна з цих двох частин характеризується відповідними матрицями. Модальний регулятор перетворює вектор стану $X(t)$ об'єкта управління в вектор управління $U(t)$.

Мета синтезу МР згідно сформульованому в підрозділ. 5.1.1 принципом полягає в відповідному підборі матриці K , тобто у визначенні параметрів МР, що забезпечують бажані показники якості об'єкта управління, замкнутого по ВС.

До показників якості відносяться:

перерегулювання σ , що характеризує рівень демпфірування системи або рівень плавності руху робочого органу;

час перехідного процесу $t_{п.п}$ характеризує швидкодію системи;

жорсткість β , або статизм δ_z механічної характеристики, коли об'єктом управління є електропривод.

Процедура виконання синтезу МР методом стандартних рівнянь здійснюється в три етапи.

1. Визначення кількості і вибір змінних стану, складання відносно вихідної координати характеристичних рівнянь для разомкнутого об'єкта управління (ОУ)

$$(d_0 p^n + d_1 p^{n-1} + \dots + d_i p^{n-1} + \dots + d_{n-1} p + d_n) x_n = \sum_{i=1}^m b_i(p) U_i \quad (5.8)$$

і ОУ, замкнутого по ВС,

$$(D_0 p^n + D_1 p^{n-1} + \dots + D_i p^{n-1} + \dots + D_{n-1} p + D_n) x_n = \sum_{i=1}^m B_i(p) V_i \quad (5.9)$$

У рівняннях (5.8) і (5.9) x_n - вихідна змінна стану; m - число впливів на ОУ;

$$D_0 = d_0;$$

$$D_i = d_i + \sum_{j=1}^n a_j k_j, \quad (5.10)$$

де a_j - параметр ОУ по j -й змінній стану; k_j - коефіцієнт посилення МР по j -й змінній стану.

2. Вибір по бажаним показникам якості (σ і $\tau_{n.n}$) Нормованого рівняння (5.7), порядок n якого дорівнює порядку рівняння об'єкта управління.

3. Визначення параметрів МР з системи рівнянь

$$D_i = d_i + \sum_{j=1}^n a_j k_j = \phi = D_{i_{жел}} = d_0 c_i \omega_6^i \quad (5.11)$$

де $i = 1, \dots, n$.

В системі з n алгебраїчних рівнянь (5.11) відомими є параметри a_j , d_0 , d_i , c_1 , а шуканими - k_j . Якщо задано бажане швидкодію системи $t_{n.n.жел}$ то базова частота виявляється відомою і рівною $\omega_6 = \tau_{n.n} / t_{n.n.жел}$. В цьому випадку система рівнянь (5.11) виявляється лінійною, рішення її дає шукані значення параметрів МР k_j . При цьому сталий режим об'єкта управління характеризується рівнянням (5.9) при підстановці в нього $p = 0$:

$$D_n x_n = \sum_{i=1}^n B_i(0) V_i. \quad (5.15)$$

Для електроприводу з рівняння (5.12) може бути визначена жорсткість його механічної характеристики (β_3), яка виявляється функцією k_j , тобто $\beta_3 = f(k_j)$, і значення якої може бути неприпустимо низьким - $\beta_3 < \beta_{жел}$. Щоб забезпечити бажане значення жорсткості, систему рівнянь (5.11) слід доповнити рівнянням $\beta_3 = f(k_j)$. Тоді в числі шуканих величин буде додатково ω_6 . Однак при цьому система рівнянь (5.11) стає нелінійною і її рішення при високому порядку n є складною розрахунковою завданням. Практично це завдання простіше вирішити, задаючи ряд значень ω_6 і визначаючи відповідні їм значення β_3 .

Таким чином, в синтезі модального регулятора динамічні і статичні показники взаємопов'язані. Забезпечуючи бажані динамічні показники $\sigma_{ж.ел.}$, $t_{п.п.ж.ел.}$ отримуємо підлеглий їм статичний показник β_3 , і навпаки, задаючи потрібні значення $\sigma_{ж.ел.}$ і $\beta_{ж.ел.}$, Отримуємо підлегле їм значення $t_{п.п.}$.

Виконаємо синтез МР для електроприводу з пружним механічним ланкою. Таким ланкою може бути кінематична ланцюг (КЦ), передає механічну енергію від вала двигуна (Д) до робочого органу (РО) і володіє помітною пружною піддатливістю (довгий вал, редукторні передача, канатна, ланцюгова, ремінна передачі). Пружне ланка з коефіцієнтом жорсткості C_{12} пов'язує між собою дві маси (ротора двигуна і робочого органу), що характеризуються при обертальному русі моментами інерції J_1 і J_2 . Структурно електропривод з такою ланкою є двомасових електромеханічну систему (ДЕМС) (рис. 5.3), якій при певному співвідношенні параметрів притаманний різко коливальний характер руху. Завдання управління для даного електроприводу складається в забезпеченні стійкості,

Синтез МР для наведеної на рис. 5.3 структури виконаємо на базі електроприводу постійного струму з інерційним керуванням перетворювачем (УП) з коефіцієнтом посилення k_n і постійної

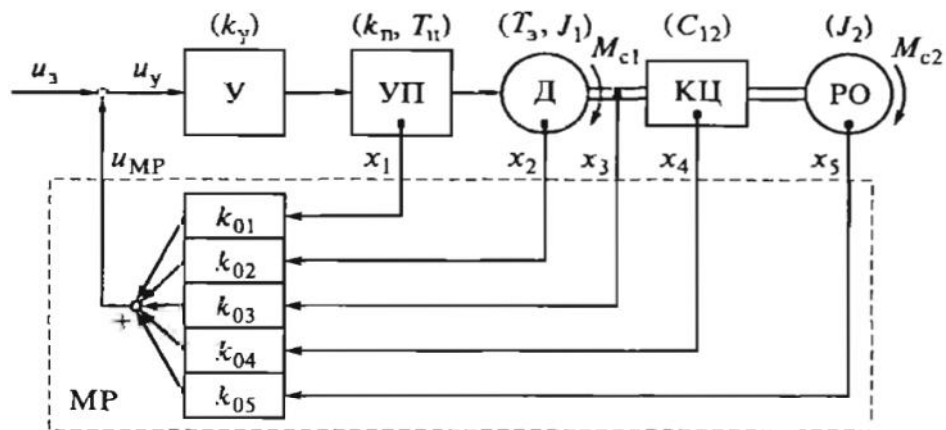


Рис. 5.3. Структура двомасової електромеханічної системи з модальним регулятором

часу T_n і без інерційним підсилювачем (У) з коефіцієнтом посилення k_y . Моменти опору M_{c1} , M_{c2} , швидкість робочого органу РО ω_2 і параметри рухомої частини J_1 , J_2 , C_{12} приведені до швидкості двигуна ω_1 . Електропривод описується вихідною системою рівнянь

$$(T_n p + 1)e_n = k_n k_y u_y;$$

$$(T_3 p + 1)i = \frac{1}{R} \left(e_n - \frac{1}{k_n} \omega_1 \right);$$

$$J_1 p \omega_1 = \frac{1}{k_a} i - M_c - M_{12};$$

$$M_{12} = C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2);$$

$$J_2 p \omega_2 = M_{12} - M_{c2};$$

$$\omega_1 = p \omega_1;$$

$$\omega_2 = p \omega_2;$$

де e_n - ЕРС УП, В; T_e - електромагнітна постійна часу, с;

i - струм якоря двигуна, А; R - опір якірного ланцюга, Ом;

K_n - коефіцієнт передачі двигуна, рад / (В · с).

Згідно з процедурою синтезу вибираємо змінні стану: $x_1 = e_n$; $x_2 = i$; $x_3 = \omega_1$; $x_4 = M_{12}$; $x_5 = \omega_2$; і, вирішуючи систему рівнянь (5.13) щодо вихідної координати ω_2 , отримуємо рівняння разомкнутого електроприводу:

$$\begin{aligned} & (d_0 p^5 + d_1 p^4 + d_2 p^3 + d_3 p^2 + d_4 p + d_5) \omega_2 = \\ & = k_0 u_y - b_0 \frac{M_{c1}}{\beta} - (b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5) \frac{M_{c2}}{\beta}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

де k_0 - коефіцієнт передачі разомкнутого електроприводу ($k_0 = k_y k_n k_d$).

У рівнянні (5.14)

$$\begin{aligned}
d_0 &= T_n T_\vartheta T_M T_2^2; & b_0 &= 1; \\
d_1 &= (T_n + T_\vartheta) T_M T_2^2; & b_1 &= T_n T_\vartheta T_1^2; \\
d_2 &= T_M T_2^2 + T_n (\gamma T_\vartheta T_M + T_2^2); & b_2 &= T_1^2 (T_n + T_\vartheta); \\
d_3 &= T_2^2 + \gamma T_M (T_n + T_\vartheta); & b_3 &= T_1^2 + T_n (T_\vartheta + \beta / C_{12}); \\
d_4 &= \gamma T_M + T_n; & b_4 &= T_n + T_\vartheta + \beta / C_{12}; \\
d_5 &= 1; & b_5 &= 1;
\end{aligned}$$

тут T_m - механічна постійна часу двигуна, з ($T_m = J_1 / \beta$); T_2 - резонансна постійна часу РВ, з ($T_2 = \frac{1}{\Omega_2} \sqrt{\frac{J_2}{C_{12}}}$; де Ω_2 - резонансна частота РО); γ - коефіцієнт розподілу моментів інерції в двухмассовій системі ($\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$); T_1 - резонансна постійна часу ротора двигуна, з ($T_1 = \frac{1}{\Omega_1} \sqrt{\frac{J_2}{C_{12}}}$, де Ω_1 - резонансна частота ротора); β - жорсткість механічної характеристики разомкнутого електроприводу.

Для отримання рівняння для замкнутого по ВС електроприводу в (5.14) вставляємо рівняння замикання:

$$u_y = u_3 - \sum_{i=1}^5 k_{0i} x_i = u_3 - (k_{01} e_n + k_{01} i + k_{03} \omega_1 + k_{04} M_{12} + k_{05} \omega_2) \quad (5.15)$$

і, висловлюючи змінні M_{12} , ω_1 , i , e_n через ω_2 , отримуємо

$$\begin{aligned}
& (D_0 p^5 + D_1 p^4 + D_2 p^3 + D_3 p^2 + D_4 p + D_5) \omega_2 = \\
& = k_0 u_3 - B_0 \frac{M_{c1}}{\beta} - (B_1 p^4 + B_2 p^3 + B_3 p^2 + B_4 p + B_5) \frac{M_{c2}}{\beta}.
\end{aligned} \quad (5.16)$$

У рівнянні (5.14)

$$\begin{aligned}
D_0 &= d_0; & B_0 &= 1 + k_1 + k_2; \\
D_1 &= d_1 + k_1 T_9 T_M T_2^2; & B_1 &= b_1; \\
D_2 &= d_2 + (k_1 + k_2) T_M T_2^2; & B_2 &= b_2 + k_1 T_9 T_1^2; \\
D_3 &= d_3 + k_1 (\gamma T_M T_9 + T_2^2) + k_3 T_2^2; & B_3 &= b_3 + (k_1 + k_2) T_1^2; \\
D_4 &= d_4 + (k_1 + k_2) \gamma T_M + k_4 (\gamma - 1) T_M; & B_4 &= b_4 + k_1 \left(T_9 + \frac{\beta}{C_{12}} \right) + k_3 \frac{\beta}{C_{12}}; \\
D_5 &= 1 + k_1 + k_2 + k_5; & B_5 &= 1 + k_1 + k_2 + k_4.
\end{aligned}$$

тут $k_1 = k_y k_n k_{01}$; $k_2 = k_y k_n \frac{k_{02}}{R}$; $k_3 = k_y k_n k_\delta k_{01}$; $k_4 = k_y k_n \frac{k_{04}}{R k_\delta}$; $k_5 = k_y k_n k_u k_{05}$.

Вибираємо нормоване рівняння п'ятого порядку для замкнутого по ВС електроприводу по бажаним параметрам $\sigma_{ж е л}$ і $\tau_{ж е л}$:

$$S_5 + c_1 S_4 + c_2 S_3 + c_3 S_2 + c_4 S + 1 = 0 \quad (5.17)$$

наприклад, для $\sigma \approx 5\%$, $\tau_{n.n} = 7.5$ (Модульний оптимум) $c_1 = c_4 = 4$;
 $c_2 = c_3 = 8$; (Див. Табл. 5.1).

Визначаємо параметри МР з системи управлінь (5.11):

$$\begin{aligned}
k_1 &= (d_0 c_1 \omega_6 - d_1) / (T_9 T_M T_2^2); \\
k_2 &= (d_0 c_2 \omega_6^2 - d_2) / (T_M T_2^2) - k_1; \\
k_3 &= \left[(d_0 c_3 \omega_6^3 - d_3) - k_1 (\gamma T_M T_9 + T_2^2) \right] / T_2^2; \\
k_4 &= \left[(d_0 c_4 \omega_6^4 - d_4) - (k_1 + k_2) \gamma T_M \right] / (\gamma - 1) T_M; \\
k_5 &= (d_0 \omega_6^5 - 1) - (k_1 + k_3);
\end{aligned} \quad (5.18)$$

Параметри МР визначаються системою (5.18), якщо відомо значення $\omega_6 = \tau_{n.n} / t_{n.n}$, Тобто якщо задано бажане швидкодію системи $t_{n.n ж е л}$.

при визначенні k_i бажано виконувати умову $k_i > 0$, що відповідає негативним зворотним зв'язкам, які забезпечують певну робастності системи, тобто знижену чутливість до змін параметрів і впливів всередині контурів x_i . Умова $k_i \geq 0$ накладає обмеження на значення базової частоти:

$$\omega_6 \geq \frac{d_1}{d_0 c_1} = \frac{1}{c_1} \left(\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_n} \right). \quad (5.19)$$

За отриманими загальним коефіцієнтами посилення МР k_i знаходять значення коефіцієнтів зворотних зв'язків, тобто коефіцієнтів власне МР:

$$k_{01} = k_1 / (k_y k_n); \quad k_{02} = k_2 R / (k_y k_n); \quad k_{03} = k_3 / (k_y k_n k_d);$$

$$k_{04} = k_4 R k_d / (k_y k_n); \quad k_{05} = k_5 / (k_y k_n k_d).$$

Механічна характеристика замкнутого електроприводу визначається з виразу (5.16) підстановкою $p = 0$:

$$\omega_2 = \frac{k_0}{1 + k_1 + k_3 + k_5} u_3 - \frac{(1 + k_1 + k_2) M_{c1} + (1 + k_1 + k_2 + k_4) M_{c2}}{\beta (1 + k_1 + k_3 + k_5)}. \quad (5.20)$$

В розглянутому електроприводі M_{c1} є моментом тертя в двигуні і в частині механічної передачі, а M_{c2} - основний момент навантаження. Якщо знехтувати моментом тертя, то жорсткість механічної характеристики замкнутого електроприводу визначиться виразом

$$\beta_3 = \beta \frac{1 + k_1 + k_3 + k_5}{1 + k_1 + k_2 + k_4}. \quad (5.21)$$

В Залежно від параметрів МР β_3 , Може бути і більше, і менше, і дорівнює β .

З виразу (5.21) випливає, що при обраних змінних стану негативні зв'язку по струму і моменту M_{12} знижують жорсткість механічної характеристики електроприводу. Щоб МР підвищував β_3 при будь-якої настроювання, можна взяти інший набір змінних стану без жорстких зв'язків

з i і M_{12} , наприклад, $x_1 = \frac{di}{dt}$, $x_2 = \frac{d\omega_1}{dt}$, $x_3 = \omega_1$, $x_4 = \frac{d\omega_2}{dt}$, $x_5 = \omega_2$. тоді

$$\beta_3 = \beta (1 + k_3 + k_5) > \beta. \quad (5.22)$$

Параметри МР з даними x_1 ; визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
k_1 &= (d_0 c_1 \omega_6 - d_1) / (T_m T_2^2); \\
k_2 &= (d_0 c_2 \omega_6^2 - d_2) / T_2^2; \\
k_3 &= [(d_0 c_3 \omega_6^3 - d_3) - k_1 \gamma T_m] / T_2^2; \\
k_4 &= (d_0 c_4 \omega_6^4 - d_4) - (d_0 c_2 \omega_6^2 - d_2) / T_2^2; \\
k_5 &= (d_0 \omega_6^5 - 1) - k_3.
\end{aligned}
\tag{5.23}$$

До достоїнств модального управління можна віднести:

можливість отримати будь-який демпфірування і швидкодія «в малому» в лінійному електроприводі будь-якої складності;

досяжність будь-якої жорсткості механічної характеристики при заданому демпфіруванні;

робастної системи керування;

простоту синтезу для складних лінійних систем з високим порядком.

Недоліки модального управління:

бажана динаміка досяжна «в малому»;

відсутність струмообмеження;

велике число вимірюваних координат, тобто підвищена потреба в датчиках.