

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Автоматизація процесу первинної обробки молока на ФГ
«Ювента»»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Білан Р. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)


Рецензент Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Бакалавр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер
 «01» квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
 НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ
 Білану Ростиславу Сергійовичу

1. Тема проекту (роботи) «Автоматизація процесу первинної обробки молока на ФГ «Ювента»»
 керівник проекту (роботи) Ігнат'єв Станіслав Євгенович, к.г.н., професор
 затверджена наказом вищого навчального закладу від 03. 03. 2025 року
 № 306/1- ф,а.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідними даними до кваліфікаційної роботи є матеріали зібрані під час проходження практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз технологічного процесу на ФГ «Ювента». Опис технологічних процесів виробництва та обробки молока. Аналіз стану електрифікації та існуючих систем автоматизації технологічних процесів обробки молока. Розрахунок електричних навантажень, вибір джерела живлення та розрахунок електричних мереж. Розрахунок потужності та вибір основних елементів перетворювача. Розрахунок параметрів регуляторів системи регулювання. Аналіз якості електроенергії в розподільчій електромережі та вплив її якості на роботу електроспоживачів. Задачі регулювання напруги в електромережі та технічні засоби для цього. Розрахунок параметрів вольтододаткових трансформаторів. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Актуальність та мета роботи. Генеральний план молочного комплексу ФГ «Ювента». Технологічна схема виробництва молока ФГ «Ювента». Технологічна схема обробки молока. Технологічна схема теплохолодильної установки. Схема електрична принципова керування холодильною установкою. Добовий графік

навантажень та схема розподілення і електропостачання споживачів. Схеми регуляторів струму та швидкості. Розрахункова схема системи регулювання. Структурна схема системи автоматичного регулювання. Удосконалена схема технологічного процесу первинної обробки молока. Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

| Пор. № | Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра | Термін виконання етапів роботи | | | Примітки (плакати) |
|--------|---|--------------------------------|-----------|----------|--------------------|
| | | Дата | Категорія | Відсоток | |
| 1 | Аналіз та опис технологічних процесів виробництва та обробки молока на ФГ «Ювента». | 22.04.25 | I | 20% | Пл. 1,2 |
| 2 | Аналіз стану електрифікації та існуючих систем автоматизації технологічних процесів обробки молока. Розрахунок електричних навантажень, вибір джерела живлення та розрахунок електричних мереж. | 08.05.25 | | 40% | Пл. 3,4 |
| 3 | Аналіз якості електроенергії в розподільчій електромережі та вплив її якості на роботу електроспоживачів. | 22.05.25 | II | 60% | Пл. 5,6 |
| 4 | Задачі регулювання напруги в електромережі та технічні засоби для цього. Розрахунок параметрів вольтододаткових трансформаторів. | 30.05.25 | | 80% | Пл. 7,8 |
| 5 | Робота над висновками та оформлення кваліфікаційної роботи. | 10.06.25 | III | 100% | Пл. 9-10 |

Студент

(підпис)

Білан Р.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)

Зміст

| | |
|--|----|
| Вступ | 5 |
| 1. Технологічна частина | 7 |
| 1.1 Аналіз технологічного процесу на ФГ «Ювента» | 7 |
| 1.2 Опис технологічних процесів виробництва та обробки молока | 8 |
| 1.3 Первинна обробка молока | 9 |
| 2. Конструкторська частина | 15 |
| 2.1 Аналіз стану електрифікації та існуючих систем автоматизації технологічних процесів обробки молока | 15 |
| 2.2 Постановка задач кваліфікаційної роботи бакалавра | 22 |
| 3. Розрахункова частина | 23 |
| 3.1. Розрахунок електричних навантажень, вибір джерела живлення та розрахунок електричних мереж | 23 |
| 3.1.1. Розрахунок електричних навантажень | 23 |
| 3.1.2. Розрахунок навантажень в молочному комплексі та вибір джерела живлення | 26 |
| 3.1.3. Розрахунок зовнішніх електричних мереж | 28 |
| 3.1.4. Розрахунок та вибір конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності | 30 |
| 3.2. Розрахунок потужності та вибір основних елементів перетворювача | 31 |
| 3.2.1. Вибір тиристорного перетворювача для якірного кола | 31 |
| 3.2.2. Розрахунок системи фазо-імпульсного керування | 41 |
| 3.2.3. Розрахунок параметрів об'єкту регулювання | 52 |
| 3.2.4. Вибір датчиків | 54 |
| 3.3. Розрахунок параметрів регуляторів системи регулювання | 55 |
| 4. Технічні рекомендації та заходи по удосконаленню електричної мережі ФГ «Ювента» | 76 |
| 4.1 Аналіз якості електроенергії в розподільчій електромережі та вплив її якості на роботу електроспоживачів | 76 |
| 4.1.1 Задачі регулювання напруги в електромережі та технічні засоби для цього | 77 |
| 4.1.2 Розрахунок параметрів вольтододаткових трансформаторів | 78 |
| Висновки | 81 |
| Список використаних джерел | 83 |
| ДОДАТКИ | 85 |

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку аграрної галузі важливо забезпечити високу якість молочної продукції при мінімізації витрат та втрат. Одним із ключових етапів виробничого циклу є первинна обробка молока, що включає такі операції, як фільтрація, охолодження, нормалізація температури, санітарна обробка та контроль якості. Ефективність цих процесів значною мірою визначає кінцеву якість продукту та безпеку споживачів [1-4].

Фермерське господарство «Ювента», що спеціалізується на молочному виробництві, стикається з низкою проблем, пов'язаних із ручним контролем параметрів обробки, низькою продуктивністю і ризиком виникнення людського фактору, що впливає на стабільність технологічного процесу. Впровадження автоматизованої системи управління первинною обробкою молока дозволить оптимізувати виробничі операції, забезпечити точний контроль параметрів (температура, час обробки, якість сировини) та своєчасне виявлення відхилень.

Дане виробництво потребує використання таких автоматизованих систем керування, які повинні не тільки задовольняти певним показникам, але й бути оптимальними по відношенню до критерію, який характеризує ефективність виробництва в цілому. В зв'язку з цим питання реалізації ефективної системи автоматизованого керування процесом охолодження молока є актуальним.

Одним із засобів підвищення ефективності роботи теплохолодильної установки є застосування системи керування на базі тиристорного перетворювача напруги. Властивості ТПН дозволяють підняти рівень таких показників, як економічність, надійність установки. Належить підкреслити, що досягнута при використанні тиристорного привода економія електроенергії віддзеркалює загальну тенденцію скорочення енергетичних витрат в умовах обмеженості енергетичних ресурсів.

Автоматизація включає застосування сучасних датчиків. Для реалізації автоматизованого контролю необхідно розробити систему, що забезпечує збір та аналіз технологічних параметрів у режимі реального часу, а також можливість оперативного втручання у процес за потребою.

Метою даної роботи є розробка та впровадження комплексної системи автоматизації первинної обробки молока на ФГ «Ювента», яка включає вибір оптимального обладнання та проектування системи управління й контролю технологічних процесів.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення продуктивності, забезпечення стабільної якості молока, зменшення витрат на виробництво та впровадження сучасних інноваційних технологій у молочну галузь фермерського господарства.

1. Технологічна частина

1.1. Аналіз технологічного процесу на ФГ «Ювента»

Проектом передбачена наступна технологія утримання тварин: система утримання стійло – пасовищна; спосіб утримання дійних, сухостійних корів та нетелей – груповий; глибокотільних та новотільних корів і телят в профілакторії – індивідуальний. Метод утримання усього поголів'я – безпідстилочний; в корівниках – на щільній підлозі, в родильному відділенні – на суцільній. Роздача кормів здійснюється мобільними кормороздавачами КТУ–10, прибирання гною – за допомогою самостійної системи та фекальних насосів. Доїння проводиться в доїльному блоці на установці типу «ялинка». Новотільних корів в родильному відділенні доять в переносні відра.

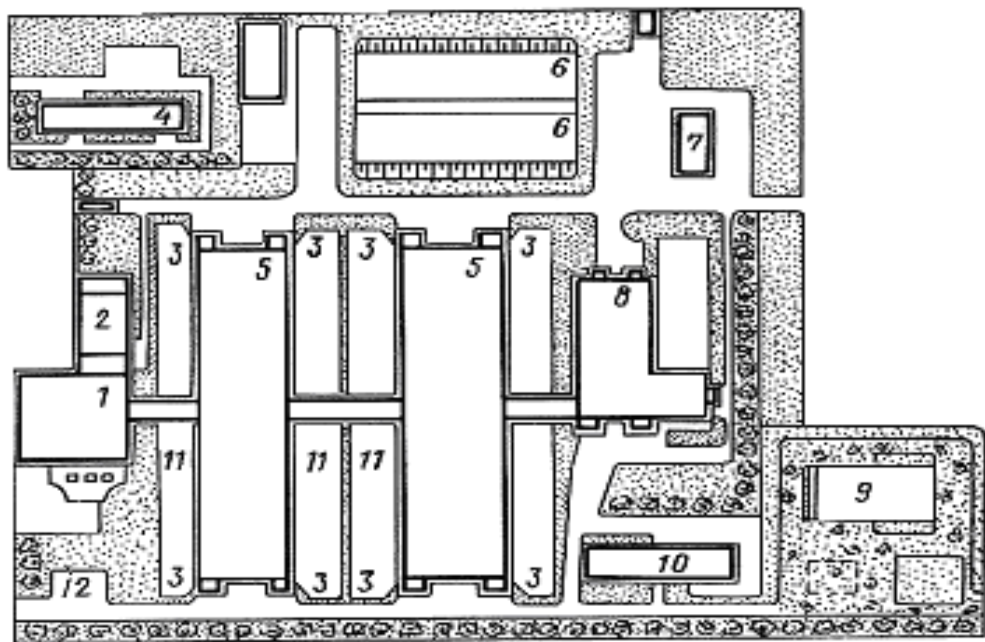


Рисунок 1 - Генеральний план молочного комплексу ФГ «Ювента»:

1 - доїльно-молочний блок (цех); 2 - ветсанпропускник; 3 - вигульні площадки; 4 - котельня; 5 - корівники на 400 голів; 6 - сінажні траншеї; 7 -

кормоцех; 8 - родильне відділення; 9 - гноєсховище; 10 - стаціонар та ізолятор; 11 - сполучувальні галереї; 12 - площадка для відвантаження скота

Для вихулу тварин є вихульні площадки. Водопостачання централізоване від насосної станції на території комплексу. Напування тварин здійснюється автонапувалками. Доїння корів відбувається при допомозі доїльних установок АДМ–8. Молоко з корівника транспортується в молочний блок (цех), звідки, після первинної обробки направляється на Полтавський молокозавод, а частина реалізується безпосередньо на ринках населенню.

Прибирання гною відбувається за допомогою транспортерів ТСН–3.0Б з подальшим відвантаженням у гноєсховище.

Для транспортування кормів використовуються транспортні засоби. Роздавання кормів здійснюється за допомогою кормороздавача КТУ– 10.

1.2. Опис технологічних процесів виробництва та обробки молока

Технологічна схема виробництва молока на комплексі наведена на рис. 1.2.

Характерна для тваринництва різноманітність предметів праці з різними фізико – механічними властивостями обумовлює необхідність мати велику кількість різних типів машин та комплектів технологічного обладнання.

При поточній організації виробництва продукт, отриманий в результаті роботи попередньої машини, є вихідним матеріалом для наступної, і операції на всіх робочих місцях виконуються в проміжки часу, рівні або кратні ритму потоку (при умові неперервності руху матеріалу, що обробляється).

На комплексі застосовується прив'язне утримання тварин в приміщеннях на 400 голів. Молочне стадо знаходиться на прив'язано-випасному утриманні. На протязі зимового періоду тварини знаходяться в приміщеннях. Влітку тварини знаходяться на випасу, а на ніч і на доїння їх

переміщують в корівники. Корм роздається у той час, коли тварини у корівнику відсутні.

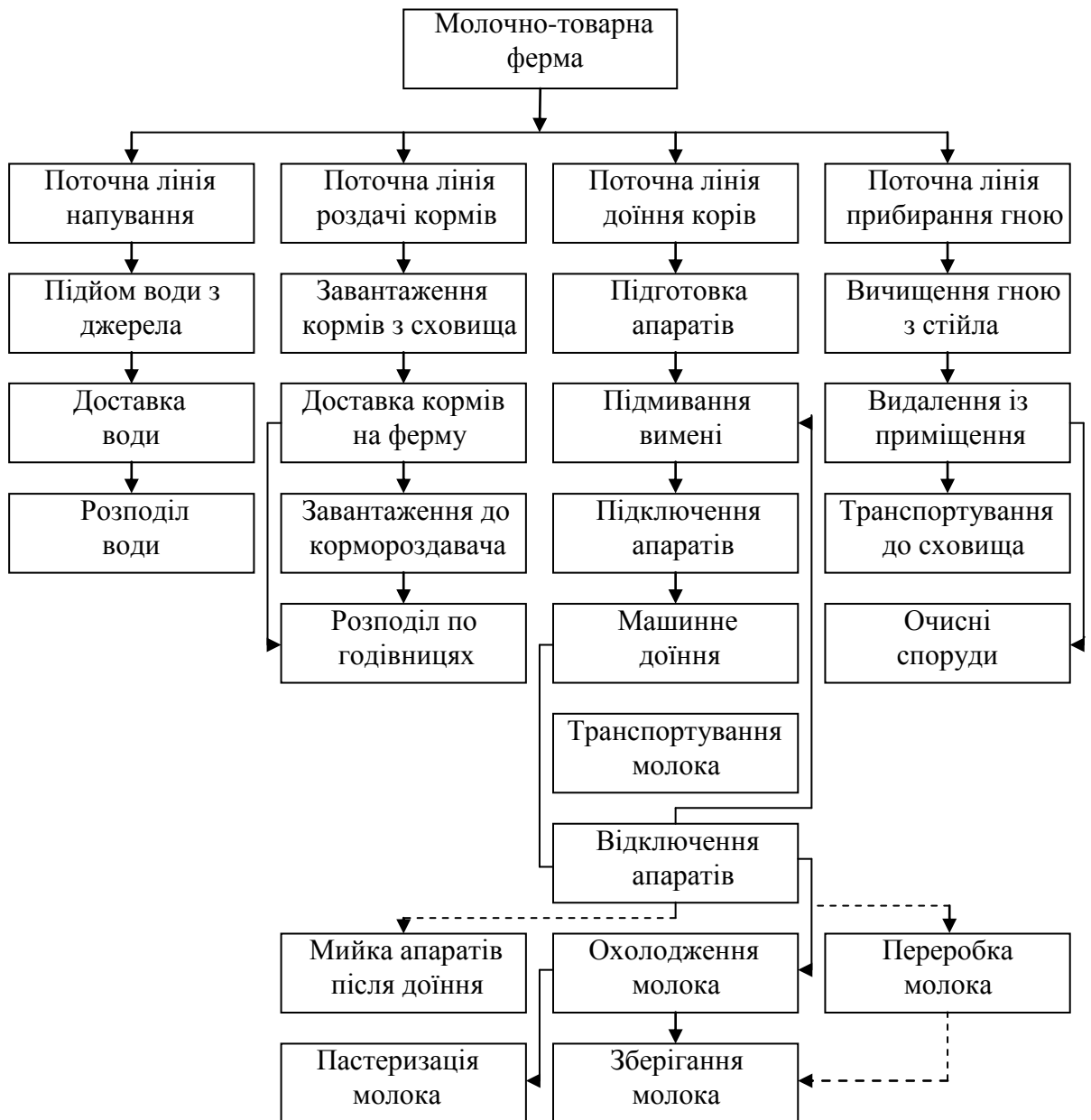


Рисунок 1.2 - Технологічна схема виробництва молока ФГ «Ювента»

1.3 Первинна обробка молока

У молочному цеху для цих операцій застосовується така біотехнологічна поточна лінія, яка зображена на рис. 7 та листі 3 графічної частини проекту.

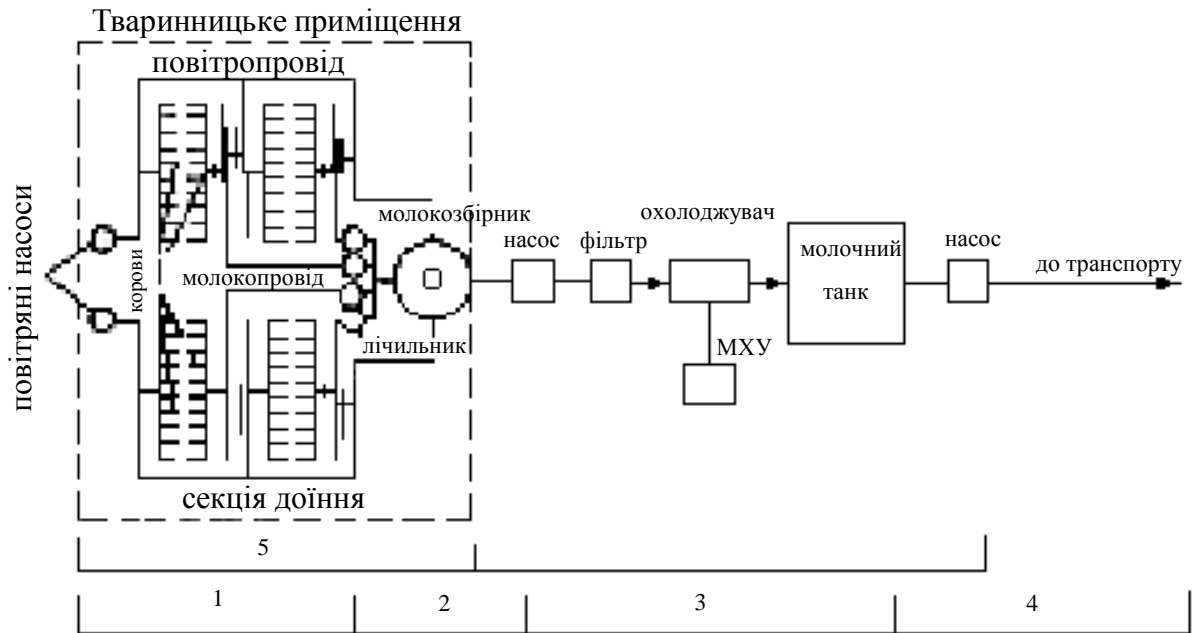


Рисунок 1.3 - Структурна схема біотехнологічної поточної лінії доїння корів та первинної обробки молока:

1 - ділянка доїння; 2 - ділянка обліку та збору молока; 3 - ділянка транспортування та первинної обробки молока; 4 - ділянка зберігання та видачі; 5 - секція первинної обробки молока.

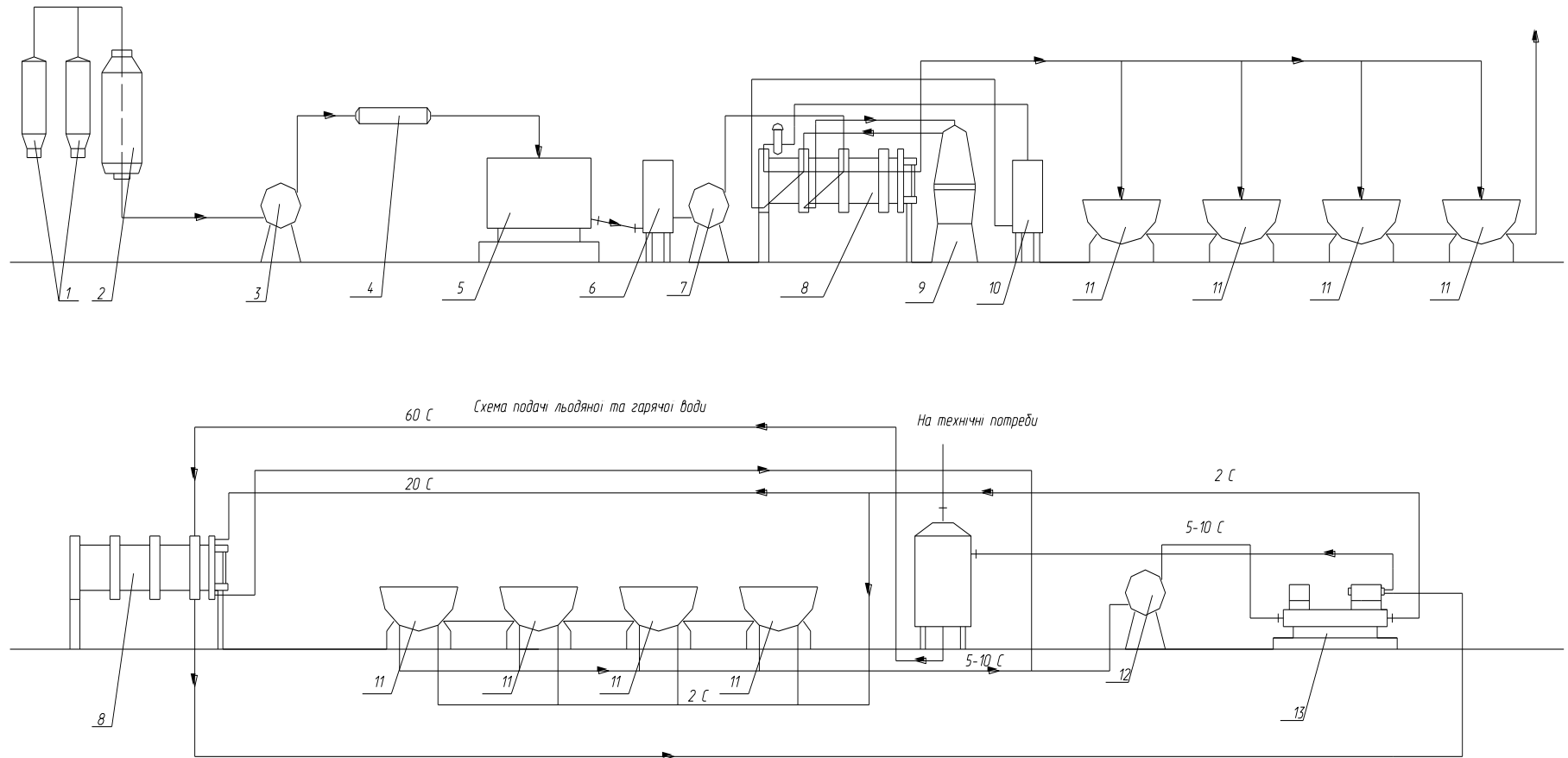


Рисунок 1.4 - Технологічна схема обробки молока:

1-доїльні апарати; 2-молокозбиральний резервуар; 3-7-молочні насоси; 4-фільтр; 5-молокоприймальний бак; 6-зрівнювальний бак; 8-плистинчатий теплообмінник; 9-сепаратор-очисник; 10-молокозбиральний резервуар; 11-резервуари для зберігання молока; 12-насос для води; 13-теплохолодильна установка.

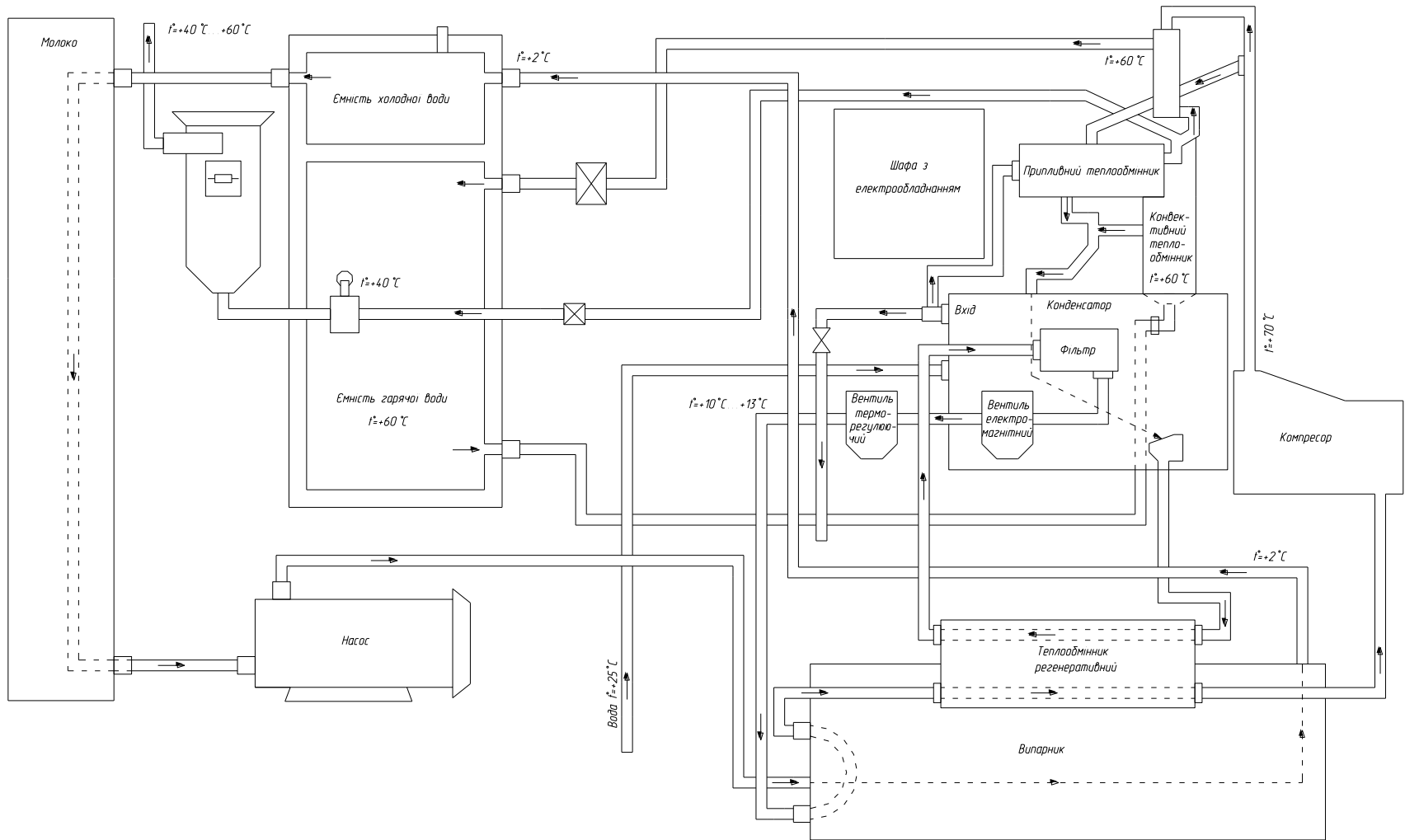


Рисунок 1.5 - Технологічна схема теплохолодильної установки

Ця поточна лінія складається з двох послідовно розташованих секцій: секції доїння з ділянками доїння, обліку та збору молока та секції первинної обробки, що включає ділянку транспортування, очищення, охолодження та ділянку зберігання та видачі молока. Між секціями розташовується проміжна ємність – молокозбірник, місткість якої визначається розрахунковим методом, виходячи з величини потоку молока. На даному комплексі для охолодження молока застосовується теплохолодильна установка.

Холодильна машина скомпонована із безсальникового компресора, конденсатора водяного охолодження, випарника, щита керування, трьох теплообмінників, фільтра – осушника, приладів автоматики і контролю [5].

Принцип роботи установки полягає в наступному:

холодильний хладагент стискається компресором до тиску нагнітання і через теплообмінники подається в конденсатор, де охолоджується і конденсується, віддаючи тепло проточній воді. Із конденсатора рідкий агент подається в регенеративний теплообмінник, потім в фільтр-осушник, в якому осушується і очищується від домішок. Через мембранний вентиль з електромагнітним приводом хладагент подається на терморегулюючий вентиль. Проходячи терморегулюючий вентиль, рідкий хладагент доводиться до відповідного тиску кипіння і температури і поступає до випарника. В випарнику хладагент кипить забираючи тепло і охолоджуючи хладоносій. Пари хладона із випарника через регенеративний теплообмінник відсмоктуються компресором. Далі цикл повторюється.

Холодна вода – хладоносій здійснює замкнутий цикл в системі охолодження молока.

Тепла вода на виході із конденсатора розділяється на два потоки. Частина поступає на теплообмінники для подальшого підігріву. Підігрівання води в теплообмінниках виконується за рахунок теплообміну з гарячими парами хладона.

Проточний теплообмінник через 10 – 15 хвилин після ввімкнення машини забезпечує нагрів води до температури $40 + 5^{\circ}\text{C}$.

Теплообмінник законвективного контуру за цикл роботи нагріває воду до температури $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Інша частина води після конденсатора з температурою $25 + 5^{\circ}\text{C}$ може бути використана для напування тварин і інших технологічних потреб.

Специфічною особливістю даної поточної лінії доїння корів є наявність на її вході своєрідного резервуару молока – ємності, практично необмеженої місткості. В якості останньої можна умовно розглядати корівник з його поголів'ям дійного стада корів. З неї доїльні апарати, за допомогою повітряних насосів, відкачують масу молока, рівну разовому надою даного поголів'я. В кінці поточної лінії розташована додаткова (накопичувальна) ємність для тимчасового зберігання охолодженого молока до прибуття зовнішнього транспорту для транспортування молока на молокозавод.

2. Конструкторська частина

2.1 Аналіз стану електрифікації та існуючих систем автоматизації технологічних процесів обробки молока

Аналіз стану електрифікації процесів виробництва та обробки молока показав, що електропостачання здійснюється по повітряній лінії 10 кВ довжиною 12 км від підстанції 110/10 кВ. Електропостачання в середині господарства здійснюється від трансформаторних підстанцій по низьковольтній мережі 0,38 кВ з допомогою повітряних ліній.

Молочний комплекс відноситься до групи споживачів електроенергії першої категорії.

Показники електрифікації молочного комплексу наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Показники електрифікації молочного комплексу

| Показники | Значення |
|--|----------|
| Річне споживання електроенергії, кВт·год | 105660 |
| В тому числі на виробничі потреби, кВт·год | 58890 |
| Загальна кількість трансформаторних підстанцій, шт | 1 |
| Кількість і потужність електродвигунів, шт/кВт | 112/ 498 |
| Кількість і потужність електроустаткування, шт/кВт | 5/ 400 |
| Загальна довжина низьковольтних ліній, км | 2 |

Основними споживачами електроенергії у процесі виробництва молока є механізми та обладнання, що забезпечують проведення технологічних процесів та операцій. Сучасний тваринницький комплекс, за енергонасиченістю та кількістю електрифікованих механізмів та апаратів не має собі рівних у сільськогосподарському виробництві.

На даному комплексі якість електричної енергії недостатня. Погіршення якості електричної енергії приводить до порушення нормальної роботи електроприймачів. При цьому зміна різних показників по-різному впливає на роботу окремих видів приймачів.

Відхилення частоти живильного струму можуть впливати на роботу асинхронних двигунів. При збільшенні частоти струму трохи зменшуються сила струму в обмотках двигуна, максимальний момент і нагрів, а при зниженні частоти вони збільшуються. Однак зміни частоти в межах декількох відсотків від номінальної практично не порушують нормальної роботи електродвигунів, а також інших електроприймачів.

В сільських електричних мережах найбільш важливий показник якості напруги – її відхилення. Особливо чуттєві до зміни напруги освітлювальні установки.

При зниженні напруги на 10 % у ламп розжарення на 30 % падає світловий потік. При тривалому підвищенні напруги на 10 % термін служби ламп знижується в 4 рази, що призводить до швидкого їхнього перегорання. При цьому також відбувається перевитрата електричної енергії. Термін служби люмінесцентних ламп при відхиленні напруги на $\pm 10\%$ знижується на 20 %. Досить чуттєві до відхилення напруги ультрафіолетові й інфрачервоні джерела променистої енергії, використовувані у тваринництві.

Ультрафіолетові лампи не запалюються при зниженні напруги на 10 %. Потік променистої енергії цих ламп змінюється приблизно на 2 % на кожен відсоток зміни напруги. У результаті змінюється доза опромінення і не витримується необхідна температура при обігріві молодняку.

Зниження напруги збільшує тривалість роботи електро-нагрівальних установок, що порушує ритм потокового виробництва, а підвищення напруги веде до зниження терміну служби нагрівальних елементів.

Відхилення напруги дуже впливають на роботу асинхронних електродвигунів. Обертаючий момент двигуна пропорційний квадратові напруги на його зажимах.

При значному зменшенні напруги може відбутися «перекидання» двигуна, тобто зупинка. У цьому випадку момент опору може виявитися більше максимального моменту обертання. При відхиленні напруги на 10 % від номінального знижується надійність включень магнітних пускачів.

Коливання напруги найбільше несприятливо впливають на роботу освітлювальних установок, викликаючи миготіння ламп, що дратує тварин і знижує продуктивність праці обслуговуючого персоналу.

Тому, в ході дипломного проектування доцільно розробити комплекс заходів по забезпеченню якості електроенергії на комплексі. Необхідно, також уточнити проаналізувати та дослідити електричні навантаження, розрахувати електричні мережі та витрати джерела живлення, а також вирішити питання компенсації реактивної потужності.

Аналіз стану автоматизації на комплексі показав, що автоматизованими процесами виробництва та обробки молока є такі процеси:

Охолодження молока. Автоматичне керування забезпечує роботу установки на протязі циклу охолодження молока, захист від аварійних режимів роботи, світлової сигналізацію і підтримання заданих параметрів стосовно температури холодної та гарячої води. Принципова електрична схема керування холодильною установкою наведена на рис. 2.1.

Режим ручного керування передбачений для налагодження, огляду машини та виявлення несправностей при аварійному відключенні установки.

Перед ввімкненням машини в роботу в режимі ручного керування перемикач SA1 повинен знаходитись в положенні Р, перемикачі SA2, SA3 повинні знаходитись в положенні А, вимикач QF2 повинен знаходитись в положенні 1.

Ввімкненням вимикача QF1 в положення 1 подається напруга у коло ручного керування, з'являється сигнал „Ручне керування” (лампа HL1). При ввімкненні перемикача SA2 в положення Р вмикається пускач KM1 електродвигуна компресора і вентиль з електромагнітним приводом.

Переведенням перемикача SA3 в положення Р вмикається пускач KM2 двигуна насоса.

Для роботи машини в режимі автоматичного керування необхідно перемикачі SA2 і SA3 перевести в положення А. Напруга подається в коло автоматичного керування, запалюється сигнальна лампа HL2 – автоматичне керування.

При замкнених контактах датчика – реле температури SK2 вмикається пускач KM2, який своїми контактами замикає коло ввімкнення пускача KM1 і вентиля з електромагнітним приводом, а при замкнутих контактах датчика – реле температури SK1 вмикається пускач KM1 і вентиль з електромагнітним приводом. При розімкненні контактів датчика – реле температури SK вмикається пускач KM2, який своїми контактами подає команду на вимкнення пускача KM1 і вентиля.

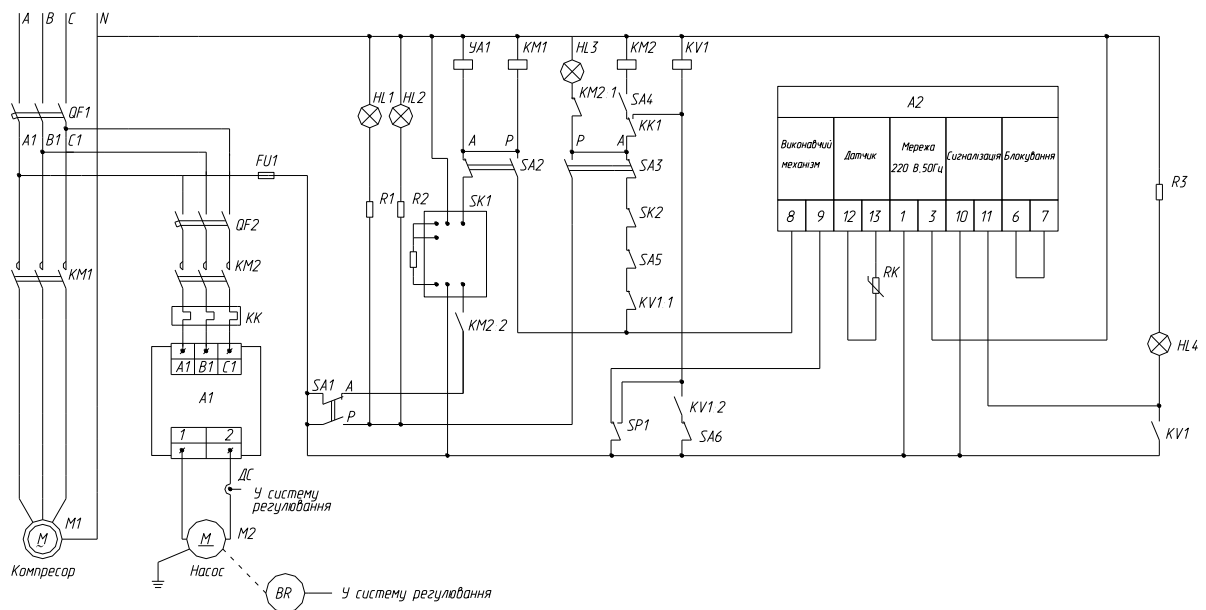


Рисунок 2.1 - Схема електрична принципова керування холодильною установкою

При спрацюванні датчика – реле тиску SP1 вмикається реле KV1, яке своїми контактами зупиняє машину, самоблокується і вмикає лампу аварійної сигналізації HL4.

При поверненні контактів датчика – реле тиску в вихідне положення машина не запускається.

При спрацюванні термореле захисту електродвигуна А1 останнє розриває коло керування насосом, машина вимикається аварійно, при цьому запалюється сигнальна лампа НЛ4. Компресор самоблокується.

При спрацюванні реле електротеплового захисту вимикається пускач КМ2, зупиняється машина і запалюється сигнальна лампа НЛ3 – несправно насос.

Для повторного ввімкнення машини необхідно вимикачем QF1 знеструмити її, усунути несправність і знову ввімкнути вимикачем QF1.

Вимикачі QF1, QF2 забезпечують автоматичне відключення машини при короткому замиканні в силових колах.

Запобіжник FU1 забезпечує вимкнення кіл керування при короткому замиканні.

Досвід експлуатації такої системи керування виявив резерви для підвищення ефективності роботи холодильної установки.

Пастеризація. Це теплова обробка молока в діапазоні температур 63...90°C з метою його знезараження. Для цього на молочному комплексі застосовують пластинчасту автоматизовану пастеризаційно-охолоджувальну установку.

Робота пластинчастої автоматизованої пастеризаційно-охолоджувальної установки здійснюється так [4-7]. Сире молоко з танка подається насосом до проміжного баку. Рівень молока у баку підтримується поплавковим пристроєм. З баку молоко насосом подається через стабілізатор 11 потоку у секцію регенерації пластинчатого апарату, де підігрівається. Потім молоко йде у змінно працюючі молокоочищувачі 17. Очищене молоко під напором надходить до секції пастеризації пластинчатого апарату, у якій нагрівається гарячою водою до температури $76\pm 2^{\circ}\text{C}$, потім потрапляє у трубчатий витримувач 5, а потім - у секцію 14 регенерації. При тем-пературі

пастеризації нижче заданої молоко автоматично клапаном повертається в бак 10 для повторної теплової обробки. При заданій температурі пастеризації молоко із витримувача 5 послідовно проходить секції 15 і 16 водяного та росольного охолодження пластинчатого апарату, охолоджуючись до температури $4\pm 2^{\circ}\text{C}$. Вода для секції пастеризації підігрівається в інжекторі 4 та подається водяним насосом 2.

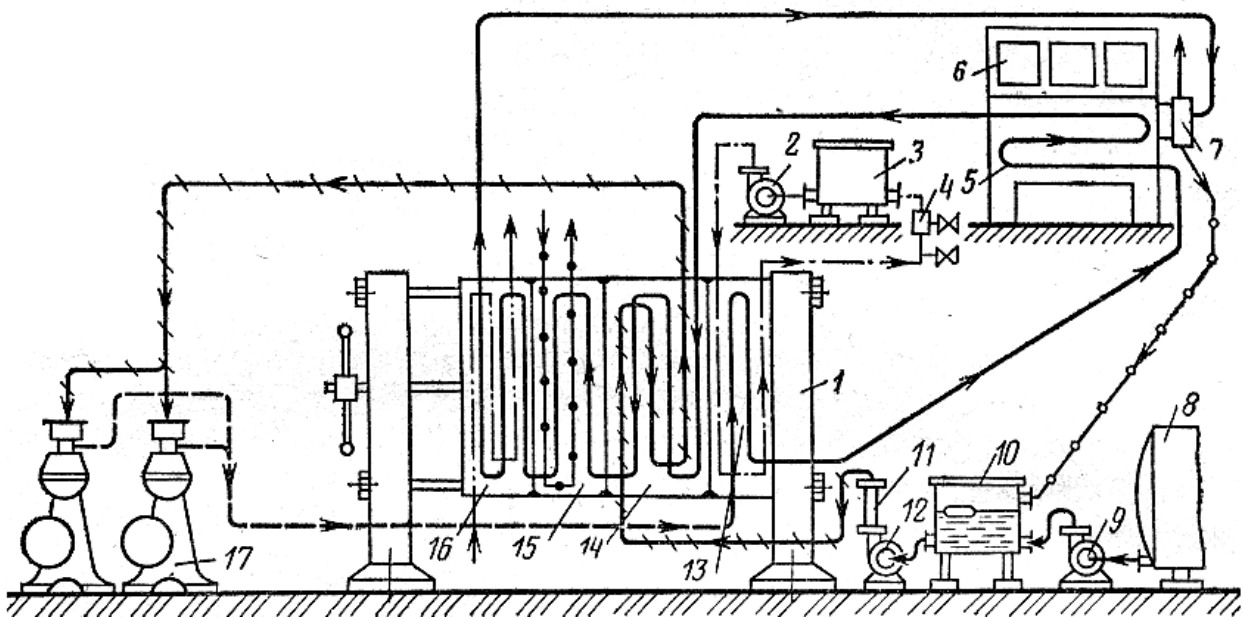


Рисунок 2.2 - Автоматизована пастеризаційно-охолоджувальна установка:

1 - теплообмінний апарат; 2 - насос для гарячої води; 3 - бойлер; 4 - інжектор; 5 - трубчатий витримувач; 6 - щит керування; 7 - клапан автоматичного повернення недопастеризованого молока; 8 - танк; 9 - насос для молока; 10 - проміжний бак; 11 - стабілізатор потоку; 12 - насос; 13 - секція пастеризації; 14 - секція регенерації; 15 - секція водяного охолодження; 16 - секція росольного охолодження; 17 - молокоочищувачі.

Водопостачання. Застосування автоматизації дозволяє знизити затрати праці на напування тварин та підвищити надійність водопостачання.

Для приводу насосів застосовують електродвигуни серій АО, АО2, АО2СХ та 4А, які з'єднують з робочими органами безпосередньо або через муфту.

Погружні насоси приводять в дію спеціальними погружними асинхронними трифазними двигунами типу МАП, ПЕДВ, АПД. Ці двигуни розраховані на роботу у воді. При зниженні рівня води у свердловині нижче рівня електродвигуна, вони перегріваються і виходять з ладу.

Для керування роботою водонапірних башт в автоматичному режимі використовують станції керування типу ПЕТ.

Більш досконале керування роботою погружних насосів здійснюється станціями типу ШЕТ, ланцюги керування яких виконані на логічних елементах серії «Логіка-Т».

Для керування роботою насосів з використанням безбаштових водокачок застосовують реле тиску або безконтактні системи керування на базі електронного вимикача БВК-24.

Якщо вода у ємності відсутня, контакти реле тиску замкнені і струм проходить через котушку магнітного пускача, який керує роботою електродвигуна. Вода нагнітається всередину ємності і тиск у ній підвищується. При досягненні необхідного тиску, контакти реле тиску розмикаються і відключають двигун.

Із матеріалів практики, літературних джерел, відгуків експлуатаційного персоналу комплексу впливає, що суттєво підвищити економічні показники молочного комплексу можливо за рахунок:

- забезпечення якості напруги в електричних мережах комплексу;
- оптимізації електричних навантажень;
- модернізації електричних мереж;
- застосування сучасних джерел живлення;
- застосування сучасних систем керування технологічним процесом охолодження молока.

2.2. Постановка задач кваліфікаційної роботи бакалавра

Проведений аналіз дозволяє зробити ряд загальних висновків та поставити задачі кваліфікаційної роботи бакалавра:

1. Технологічному процесу виробництва та переробки молока притаманні суттєві особливості у порівнянні з іншими подібними процесами сільськогосподарського виробництва.

2. Рівень автоматизації процесів виробництва та переробки молока не в повній мірі задовольняє вимогам, що можуть забезпечити необхідну якість кінцевого продукту.

3. Невирішеність проблеми ефективного керування цим процесом обумовлена, головним чином, труднощами здійснення неперервного автоматичного контролю вихідних параметрів, непристосованістю окремих елементів контролю та керування до конкретних виробничих умов, недостатньою вивченістю процесу, як об'єкту керування.

Враховуючи вищесказане, метою роботи є розв'язання комплексу задач по вдосконаленню технології виробництва та переробки молока. Це можливо за рахунок вдосконалення схеми електропостачання та автоматизації таких процесів: доїння та первинна обробка молока (у першу чергу його зберігання в охолодженому стані).

У відповідності з даною метою, необхідно:

- дослідити електричну мережу молочного комплексу та розробити заходи по розширенню меж регулювання напруги;
- розрахувати електричні навантаження, обґрунтувати та вибрати джерела живлення;
- розробити сучасну систему автоматизації процесу охолодження молока.

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок електричних навантажень, вибір джерела живлення та розрахунок електричних мереж

3.1.1. Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок електричних навантажень проведено за допомогою графіка навантаження. Даний графік побудовано у залежності від потужності електричних установок та часу їх роботи. При цьому враховане максимальне значення потужності. Так як молочний блок є виробничим споживачем, то для нього визначені значення денних максимумів навантажень.

Графік навантажень побудований з урахуванням графіку роботи молочного блоку (таблиця 3.1), що включає в себе основні технологічні, потужність установок для виконання технологічних операцій та час роботи протягомі робочого дня.

Споживана потужність для процесу видачі молока визначена так:

$$P_{\text{сп}} = \frac{P_{\text{уст}} \cdot K_3 \cdot n}{\eta} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{уст}}$ - встановлена потужність електродвигуна насоса, кВт;

K_3 - коефіцієнт завантаження електродвигуна насоса, ($K_3=0,7$);

n - кількість насосів, шт;

η - коефіцієнт корисної дії двигуна.

$$P_{\text{сп}} = \frac{1,1 \cdot 0,7 \cdot 2}{0,8} = 2,2 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Аналогічно визначено потужність електродвигунів для інших технологічних операцій. Результати розрахунків занесені у табл. 3.1. За даними розрахунків побудований добовий графік навантаження молочного блоку. У результаті аналізу цього графіку зроблено висновок, що денний і вечірній максимуми навантаження відрізняються між собою несуттєво.

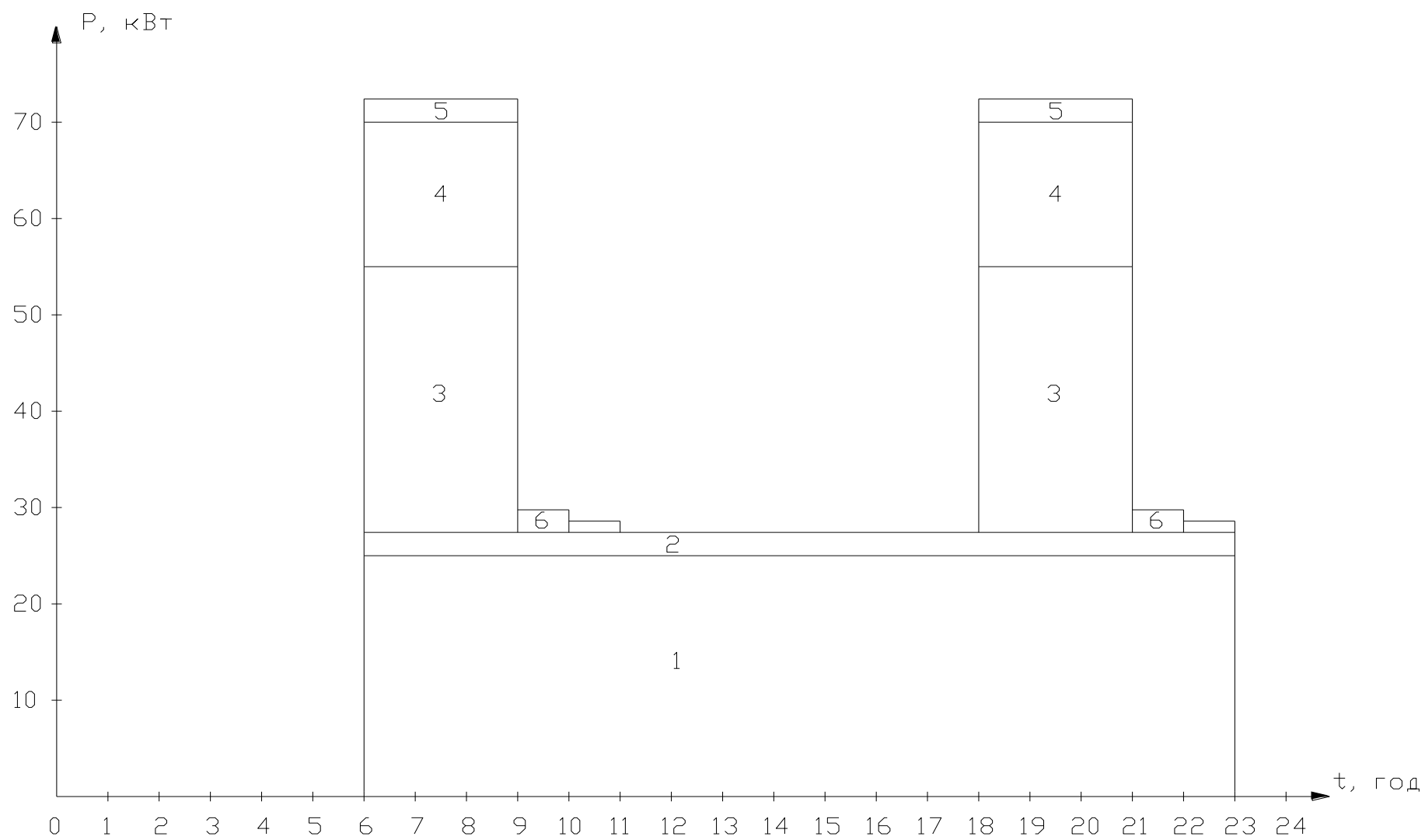


Рисунок 3.1 - Добовий графік навантажень

3.1.2. Розрахунок навантажень в молочному комплексі та вибір джерела живлення

Кількість і тип трансформаторних підстанцій визначено з урахуванням призначення споживачів, конфігурації мережі, розподілення навантажень, допустимих втрат напруги в мережі і трансформаторі та ряду інших факторів.

Проведено розрахунок навантажень для споживачів. Для цього сформовано таблицю електричних навантажень споживачів електроенергії на комплексі.

Електричні навантаження

Таблиця 3.2

| Назва споживача | | $P_{д\ max,кВт}$ | $P_{в\ max,кВт}$ |
|-----------------|--|------------------|------------------|
| 1. | Молочний блок | 72 | 72 |
| 2. | Корівник на 400 голів | 16 | 18 |
| 3. | Блок службових приміщень | 1,5 | 4 |
| 4. | Санпропускник | 1 | 2 |
| 5. | Дезпроїзд | 0,5 | 1 |
| 6. | Родильне відділення | 20 | 20 |
| 7. | Майданчик для обробітку шкіряного покрыву тварин | 2 | 1 |
| 8. | Стационарне відділення | 8 | 10 |
| 9. | Амбулаторія | 1 | 1 |
| 10. | Ізолятор | 4 | 6 |
| 11. | Насосна станція | 2,2 | 22 |

З урахуванням схеми (рис. 3.2) визначені максимальні потужності на ділянках для вечірнього максимуму на лініях 1, 2, 3 та загальну потужність:

$$P = P_{\delta} + \sum \Delta P_M, \quad (3.3)$$

де P_{δ} - найбільша потужність на ділянці, кВт;

$\sum \Delta P_M$ - сума надбавок, яка залежить від значення меншої потужності, кВт [10]:

$$P_1 = 22 + (3,6 + 0,6 + 6 + 0,7) = 33,5 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

$$P_2 = 18 + (11,2 + 11,2 + 11,2 + 0,6) = 52,2 \text{ кВт} \quad (3.5)$$

$$P_3 = 72 + (2,4 + 1,2 + 0,6 + 12,5 + 0,7) = 89,4 \text{ кВт} \quad (3.6)$$

$$P = 89,4 + 21,5 + 35,5 = 146,4 \text{ кВт} \quad (3.7)$$

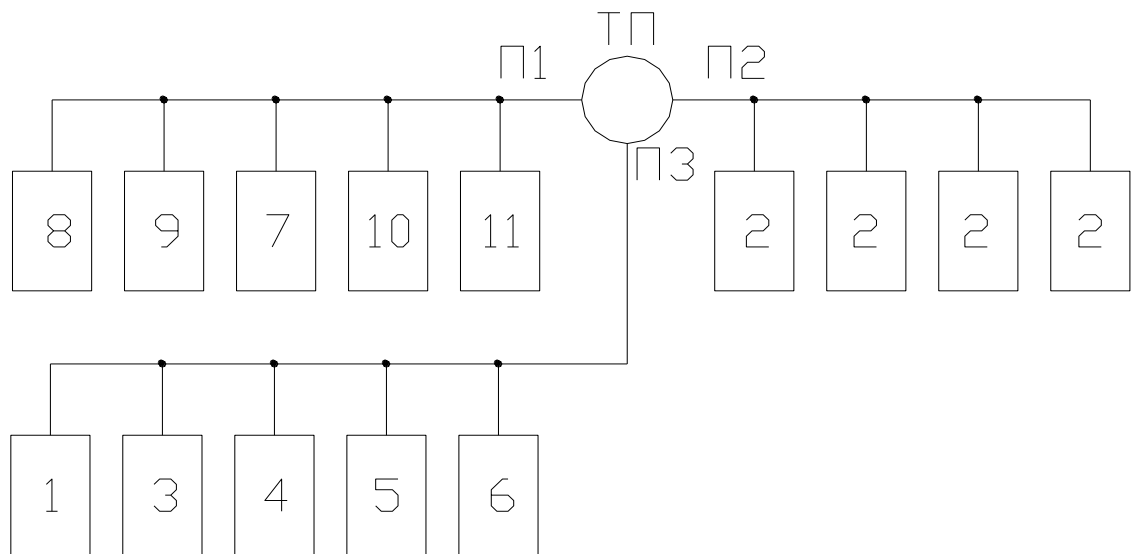


Рисунок 3.2 - Схема розподілення і електропостачання споживачів

Аналізуючи дані таблиці 3.2, можна зробити висновок, що вечірній максимум навантаження більший за денний. Тому за розрахунковий прийнято вечірній максимум навантаження.

Розрахункове навантаження трансформаторної підстанції визначено таким чином:

$$S_{\text{тп}} = \frac{\sum P}{\cos \varphi} = \frac{146,4}{0,77} = 190,1 \text{ кВА} \quad (3.9)$$

де $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності трансформаторної підстанції з виробничим навантаженням, ($\cos \varphi = 0,77$).

Згідно з нормативною документацією, для таких об'єктів мінімальне значення коефіцієнта потужності повинно складати $\cos \varphi_e = 0,93$. Тому в даному проекті передбачена компенсація реактивної потужності з допомогою конденсаторної установки типу УК-0,38-75-У3, яка розрахована нижче. Застосування конденсаторної установки дозволяє підняти коефіцієнт потужності до значення $\cos \varphi_\phi = 0,953$.

Потужність трансформаторної підстанції з врахуванням конденсаторної установки визначена, як:

$$S_{\text{т.п.}} = \frac{\sum P}{\cos \varphi_\phi} = \frac{146,4}{0,953} = 153,6 \text{ кВА} \quad (3.10)$$

В якості джерела живлення вибраний трансформатор типу ТМ-250 із $S_n = 250$ кВА [8], який встановлений в двотрансформаторному КТП, так як молочний комплекс відноситься до першої категорії за надійністю електропостачання. Другий трансформатор живить інші споживачі молочного комплексу.

Технічні дані трансформатора ТМ-250:

| | |
|--|------|
| 1. Номінальна потужність, кВА | 250 |
| 2. Номінальна напруга на високій стороні, кВ | 10 |
| 3. Номінальна напруга на низькій стороні, кВ | 0,4 |
| 4. Втрати холостого ходу, Вт | 740 |
| 5. Втрати короткого замикання, Вт | 3700 |
| 6. Напруга короткого замикання, % | 4,5 |
| 7. Струм холостого ходу, % | 2,3 |

3.1.3. Розрахунок зовнішніх електричних мереж

Для забезпечення нормальної роботи споживачів електроенергії лінії електропередачі необхідно розрахувати так, щоб при максимальному навантаженні в точці найбільш віддаленій від джерела, відхилення напруги

було не менше -5%, а при мінімальному навантаженні в найближчій точці не більше +5%.

Значення допустимої втрати напруги наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Відхилення напруги

| Елементи мереж | Режим навантаження | |
|--------------------------------|--------------------|------|
| | 25% | 100% |
| Шини 10 кВ ТП 10/0,4 кВ | 0 | -1 |
| Постійна надбавка | +5 | +5 |
| Втрати | -1 | -4 |
| Регульоване розгалуження | 0 | 0 |
| Шини 0,4 кВ | +4 | 0 |
| Допустимі втрати | 0 | -5 |
| Відхилення напруги в споживача | +4 | -5 |

Допустима втрата напруги в мережі 0,38 кВ, із таблиці складає $\Delta U_{\text{доп}} = -5\%$.

Втрата напруги в лініях:

Втрата напруги в лінії Л1 становить:

$$\Delta U_1 = \frac{P_1 \cdot l_1 \cdot 10^5}{S_1 \cdot \sigma \cdot U^2} = \frac{33,5 \cdot 90 \cdot 10^5}{25 \cdot 32 \cdot 380^2} = 2,6\% \quad (3.11)$$

де P_1 - розрахункове навантаження на лінії Л1, кВт, ($P_1 = 33,5$ кВт);

l_1 - довжина лінії, м, ($l_1 = 90$ м);

S_1 - переріз проводу в залежності від навантаження, мм²,

($S_1 = 25$ мм²);

σ - питома провідність алюмінію, м/(Ом · мм²),

($\sigma = 32$ м/(Ом · мм²) [8]).

Втрата напруги в лінії Л2 становить:

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 \cdot l_2 \cdot 10^5}{S_2 \cdot \sigma \cdot U^2} = \frac{52,2 \cdot 150 \cdot 10^5}{35 \cdot 32 \cdot 380^2} = 4,8\% \quad (3.12)$$

де P_2 - розрахункове навантаження лінії Л2, кВт, ($P_2 = 52,2$ кВт);

l_2 - довжина лінії, м, ($l_2 = 150$ м);

S_2 - переріз проводу, мм², ($S_2 = 35$ мм²).

Втрата напруги в лінії Л3 становить:

$$\Delta U_3 = \frac{P_3 \cdot l_3 \cdot 10^5}{S_3 \cdot \sigma \cdot U^2} = \frac{89,4 \cdot 180 \cdot 10^5}{70 \cdot 32 \cdot 380^2} = 4,9\% \quad (3.13)$$

де P_3 - розрахункове навантаження лінії Л3, кВт, ($P_3 = 89,4$ кВт);

l_3 - довжина лінії, м, ($l_3 = 180$ м);

S_3 - переріз проводу, мм², ($S_3 = 70$ мм²).

Аналізуючи розрахунки, видно, що втрати в зовнішніх мережах не перевищують допустимі втрати напруги $\Delta U = 5\%$.

3.1.4. Розрахунок та вибір конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності

Раніше був визначений коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,77$, тому для його штучного підвищення доцільно використати статичні конденсатори. Вони мають незначні втрати потужності, безшумні в роботі, зносостійкі, прості і зручні в експлуатації. Крім того, статичні конденсатори можуть бути підібрані на малі потужності, що особливо важливо для сільських установок.

Конденсаторна батарея вмикається паралельно мережі, а конденсатори різних фаз з'єднуються в „трикутник”, так як це дає можливість при одній і тій самій ємності отримати потужність в 3 рази більшу ніж при з'єднанні в „зірку”.

Вибрані конденсаторні батареї для компенсації реактивної потужності.

Розрахункова потужність конденсаторів визначена так:

$$Q_K = P_{\max} \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 146,6 \cdot (0,829 - 0,395) = 63,6 \text{ квар}$$

де P_{\max} - максимальна потужність, кВт, ($P_{\max} = 146,4$ кВт);

$tg\varphi_1$ - кут зсуву фаз до компенсації реактивної потужності, ($tg\varphi_1 = 0,829$, що відповідає $\cos \varphi_1 = 0,77$);

$tg\varphi_2$ - кут зсуву фаз після компенсації реактивної потужності, ($tg\varphi_2 = 0,395$, що відповідає $\cos \varphi_2 = 0,93$).

Прийнята конденсаторна установка типу УК-0,38-75-У3 з потужністю $Q_D = 75$ квар.

Дійсне значення $\cos \varphi$ (з врахуванням компенсації) визначено як:

$$tg\varphi_2 = tg\varphi_1 - \frac{Q_D}{P_{\max}} = 0,829 - \frac{75}{146,4} = 0,317 \quad (3.14)$$

Таке значення $tg\varphi_2 = 0,317$ відповідає коефіцієнту потужності $\cos \varphi_2 = 0,953$. Отже, дійсне значення коефіцієнта потужності після компенсації реактивної потужності буде складати $\cos \varphi = 0,953$.

3.2. Розрахунок потужності та вибір основних елементів перетворювача

3.2.1. Вибір тиристорного перетворювача для якірного кола

Планується, що ТП буде підключатися до мережі змінного струму через трансформатор.

Силкові кола стандартних ТП підключаються до мережі трифазного змінного струму ($f = 50$ Гц, $U = 380$ В ± 10 %).

При виборі перетворювачів із числа серійних (КТЕ, АТР, ТРПЗ, ЕПУ, КТУ і т.д.) необхідно дотримуватись слідує чого: номінальні значення

напруги $U_{дн}$ і струму $I_{дн}$ перетворювача повинні бути рівні номінальним значенням напруги і струму двигуна:

$$\left. \begin{array}{l} U_{дн} \geq U_{н} \\ I_{дн} \geq I_{н} \end{array} \right\} \quad (3.15)$$

Крім того необхідно врахувати, що всі перетворювачі передбачені для живлення якірних кіл, допускають роботу в циклічному режимі. При чому циклічне перевантаження не повинне перевищувати 75 % на протязі перевантаження до 1 хв. і 100 % на протязі перевантаження до 15 с. Крім цього необхідно забезпечити перевищення максимального струму ТП над максимальним струмом двигуна з умови:

$$I_{д\max} \geq I_{дв\max} \quad (3.16)$$

Також повинна виконуватись умова:

$$\lambda_{п} \cdot I_{дп} \geq \lambda_{дв} \cdot I_{н} \quad (3.17)$$

$$I_{дп} \geq I_{н} \frac{\lambda_{дв}}{\lambda_{п}} \quad (3.18)$$

де, $\lambda_{дв}$ і $\lambda_{п}$ - коефіцієнти перевантажувальної здатності по струму відповідно двигуна і перетворювача.

$$\lambda_{дв} = 2,5 \text{ згідно з каталожними даними [8]}$$

$$\lambda_{п} = 2 \text{ згідно з каталожними даними [9]}$$

Напруга на виході ТП повинна відповідати вимозі:

$$U_{дн} \geq 1,05U_{н} \quad (3.19)$$

Згідно [9] прийнято реверсивний ТП типу ЕТУ 3601-3620 з $I_{ном} = 40$ А;

$$U_{ном} = 220 \text{ В.}$$

Розрахунок потужності і вибір силового трансформатора

При виборі потужності силового трансформатора основними вихідними величинами є:

- номінальна випрямлена напруга і струм ТП;

- напруга живлячої мережі;
- допустимі коливання напруги мережі;
- число фаз первинної і вторинної обмоток трансформатора;
- частота мережі.

Виходячи з умов найменшої пульсації випрямленої напруги прийнято до розробки трифазну мостову схему Ларіонова.

Стала $C = k\Phi$ визначена, як:

$$C = (U_n - I_n R_{я}) / \omega_n \quad (3.20)$$

Кутова швидкість складає:

$$\omega_n = 2\pi \cdot n_n / 60 = 2\pi \cdot 3000 / 60 = 314,1593 \text{ рад/с} \quad (3.21)$$

Номінальний струм якоря визначено, як:

$$\eta = P_n / U_n I_n \quad (3.22)$$

$$I_n = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta} = \frac{6,7 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,86} = 35,412 \text{ А} \quad (3.23)$$

Після підстановки числових значень у вираз (3.20), отримано:

$$C = \frac{220 - 35,412 \cdot 0,12 \cdot 1,24}{314,1593} = 0,6835 \text{ В} \cdot \text{с}$$

ЕРС якоря складає:

$$E = C \cdot \omega_n = 0,6835 \cdot 314,1593 = 214,7279 \text{ В} \quad (3.24)$$

Величина випрямленої напруги при $\alpha = 0^\circ$ складає:

$$U_{d0} = \frac{E + 1,1 I_n R_{я} + a_v \cdot \Delta U_a}{\cos \alpha_{\min} - a_v (v \cdot k_{\text{мереж}} \varepsilon_{\text{кн}} \% + C_T \cdot \Delta P_M) - d \Delta U_c}, \quad (3.25)$$

де, E - ЕРС якоря, В;

I_n - номінальне значення струму двигуна, А;

$R_{я}$ - активний опір якоря двигуна, Ом;

$\varepsilon_{\text{кн}}$ - напруга к.з., %; $\varepsilon_{\text{кн}} = (5 - 10) \% ;$

ΔP_M - втрати в міді, Вт; $\Delta P_M = (1 - 3) \% ;$

ΔU_c - запас на коливання напруги в мережі; $\Delta U_c = 5\%$;

k_b - коефіцієнт, який залежить від схеми випрямлення.

Якщо до електроприводу особливих вимог у відношенні динамічних показників не ставиться тоді значення $\alpha_{\min} = 15 - 20^\circ$ і $a_g \cdot \Delta U \approx \Delta U_g = (1 \div 2)$

В.

Значення $k_{\text{мереж}}$ для малопотужних приводів складає 1,02.

Таблиця 3.4

| Схема випрямляча | Коефіцієнти | | | | | | | |
|------------------|-------------|-------|--------|--------|-------------------|--------|-------|-----|
| | k_b | a_b | v | C_T | $k_{\text{гарм}}$ | d | k_r | m |
| трифазна нульова | 1,17 | 1 | 0,007 | 0,0148 | 0,53 | 0 | 1,345 | 3 |
| трифазна мостова | 2,34 | 2 | 0,0025 | 0,0052 | 0,1245 | 0,0043 | 1,045 | 6 |

Після підстановки числових значень у вираз (3.25), отримано:

$$U_{d0} = \frac{214,7279 + 1,1 \cdot 35,412 \cdot 0,12 \cdot 1,24 + 2}{\cos 20 - 2(0,0025 \cdot 1,02 \cdot 6 + 0,0052 \cdot 2) - 0,0043 \cdot 5} = 256,72126 \text{ В.}$$

Фазна напруга трансформатора:

$$U'_{2\phi} = \frac{U_{d0}}{k_b} = \frac{256,72}{2,34} = 109,71 \text{ В} \quad (3.26)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора з урахуванням коливань напруги живлячої мережі (10 %) становить:

$$k_T = \frac{U_{\text{IНОМ}} - 0,1U_{\text{IНОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U'_{2\phi}} = \frac{380 - 0,1 \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 109,71} = 1,799 \quad (3.27)$$

Діючий струм первинної обмотки трансформатора становить:

$$I_{\text{IНОМ}} = \frac{I_n}{k_T} = \frac{35,412}{1,799} = 19,675 \text{ А} \quad (3.28)$$

Розрахункові потужності обмоток трансформатора знайдені за формулою:

$$S_T = k_n \cdot U_{d0} \cdot I_n \cdot 10^{-3} \quad (3.29)$$

Після підстановки числових значень отримано:

$$S_T = 1,045 \cdot 256,72 \cdot 35,412 = 9,5 \text{ кВ} \cdot \text{А} \quad (3.30)$$

Згідно [17, с. 84, табл.11] прийнято трансформатор ТС – 10 з параметрами:

$$S_n = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}; U_{1л} = 380 \text{ В}; \varepsilon_{кн} = 4,5 \%; U_{2ф} = 133 \text{ В}; I_{xx} = 7,0 \%; P_{xx} = 200 \text{ Вт}; P_{кз} = 350 \text{ Вт}.$$

Реактивний опір трансформатора становить:

$$X_T = \frac{1,1 \cdot \varepsilon_{кн} \cdot U_{1л}}{I_{1н} \cdot k_T^2 \cdot 100} = \frac{1,1 \cdot 4,5 \cdot 380}{19,675 \cdot 1,799^2 \cdot 100} = 0,2953896 \text{ Ом} \quad (3.31)$$

Кути комутації γ струму в випрямлячі визначені із умови $\alpha=0^\circ$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 \cdot I_n \cdot X_T}{\sqrt{6} \cdot U'_{2ф}} \quad (3.32)$$

Після підстановки числових значень отримано:

$$1 - \cos \gamma = \frac{2 \cdot 35,412 \cdot 0,2954}{\sqrt{6} \cdot 109,71} = 0,0778518$$

$\cos \gamma$ знайдено, як:

$$\cos \gamma = 1 - 0,0778518 = 0,9221482$$

Кут комутації становить:

$$\gamma = \arccos 0,9221482 = 22,757829^\circ = 22^\circ 45' 28''$$

Кут зсуву першої гармоніки становить:

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2} = 0 + \frac{22,757829}{2} = 11,3789145^\circ = 11^\circ 22' 44'' \quad (3.33)$$

При $\alpha = 60^\circ$ згідно формул (3.32 - 3.33) $\gamma = 5,03^\circ$ і $\varphi = 62,515^\circ$.

Коефіцієнт спотворення форми напруги мережі, що використовується при $L \rightarrow \infty$ буде:

$$k_H \cong \frac{3}{\pi} = 0,9549296 \quad (3.34)$$

Коефіцієнт потужності випрямляча:

$$\lambda = K_H \cdot \cos \varphi = 0,95492 \cdot \cos 11,3789^\circ = 0,9361594 \quad (3.35)$$

Індуктивність трансформатора становить:

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,2953896}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,94 \text{ мГн} \quad (3.36)$$

Активний опір трансформатора становить:

$$R_T = \frac{\Delta P_M}{m \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot k_T^2} = \frac{P_{\text{кз}}}{m \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot k_T^2} = \frac{350}{3 \cdot 19,68^2 \cdot 1,799^2} = 0,093 \text{ Ом} \quad (3.37)$$

Опір живлячих дротів:

$$R_{\text{пр}} = 0,1 \cdot R_{\text{я}} = 0,1 \cdot 1,24 \cdot 0,12 = 0,01488 \text{ Ом} \quad (3.38)$$

Еквівалентний опір якірного ланцюга становить:

$$R_Q = R_{\text{я}} + R_{\text{пр}} + a_{\text{в}} (R_T + X_T / 2\pi) = 1,24(0,12 + 0,01488 + 2(0,093 + \frac{0,2953896}{2\pi})) = 0,5144827 \text{ Ом} \quad (3.39)$$

Допустимий струм тиристора:

$$I_{\text{а ср}} = \frac{I_H}{3} = \frac{35,412}{3} = 11,804 \text{ А} \quad (3.40)$$

Допустиму зворотну напругу визначено з умови:

$$U_{\text{обр.мах}} \geq \frac{\pi}{3} U_{\text{d0}} = \frac{\pi}{3} \cdot 256,72126 = 268,83787 \text{ В} \quad (3.41)$$

Коливання напруги мережі 10 %. В зв'язку з цим знайдене значення збільшене на 30 – 40 %, тобто

$$U'_{\text{обр.мах}} = U_{\text{обр.мах}} + 0,35U_{\text{обр.мах}} = 268,83787(1 + 0,35) = 362,9311 \text{ В} \quad (3.42)$$

З [10] вибраний тиристор КУ210В з параметрами: $I_y = 150 \text{ мА}$;

$U_y = 5 \text{ В}$; $t_{\text{вкл}} = 20 \text{ мкс}$; $I_{\text{уд}} = 250 \text{ А}$; $\Delta U_a = 1,1 \text{ В}$; $U_{\text{обр}} = 400 \text{ В}$; $I_a = 20 \text{ А}$.

Втрати потужності в випрямлячі і падіння напруги на тиристорі становить:

$$\Delta P_B = m_B \cdot \Delta U_a \cdot I_a = 6 \cdot 1,1 \cdot 20 = 132 \text{ Вт}, \quad (3.43)$$

де m_B - кількість тиристорів, шт.

Тепловий режим тиристора знайдено із співвідношення

$$P_{a \text{ доп}} \geq \Delta U_a I_{a \text{ дійсн}} = 1,1 \cdot 11,804 = 12,9844 \text{ Вт} \quad (3.44)$$

$$P_{a \text{ доп}} = \Delta U_a \cdot I_{a \text{ доп}} = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ Вт} \quad (3.45)$$

Поставлена умова виконується.

ККД випрямляча становить:

$$\eta = \frac{P_{дн}}{P_{дн} + \Delta P_B + \Delta P_{тр}} = \frac{9,091 \cdot 10^3}{9,091 \cdot 10^3 + 132 + 550} = 0,9202, \quad (3.46)$$

$$\text{де } P_{дн} = U_{d0} \cdot I_n = 256,7212 \cdot 35,412 = 9,091 \text{ кВт} \quad (3.47)$$

$$\Delta P_{тр} = P_{xx} + P_{кз} = 200 + 350 = 550 \text{ Вт} \quad (3.48)$$

Розрахунок індуктивності реакторів

В вентильному електроприводі реактори виконують такі основні функції:

- зменшують зону перервних струмів;
- згладжують пульсації випрямлених напруги і струмів;
- обмежують струм через вентилі в перший напівперіод напруги живлення при короткому замиканні на стороні випрямленого струму.

В реверсивному вентильному електроприводі на реактори покладають допоміжні функції:

- обмеження урівнюючих струмів при спільному керуванні вентильними групами;
- обмеження швидкості зростання аварійного струму при „перекиданні” інвертора.

Індуктивність реактора залежить від його призначення, силової схеми перетворювача і місця реактора в схемі.

Дроселі служать для обмеження урівнюючих струмів в реверсивних вентильних перетворювачах. Як правило застосовують два однакових урівнюючих дроселя по одному на кожне направлення струму двигуна. Ці дроселі повинні бути насичуючими, в наслідок чого індуктивність дроселя, по якому тече струм двигуна практично дорівнює нулеві.

Розрахункова індуктивність урівнюючого дроселя знайдена як:

$$L_{\text{ур}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot k_{\text{гарм}} \cdot U_{2\phi}}{314 \cdot n \cdot I_{\text{а ур}}}, \quad (3.49)$$

де, $I_{\text{а ур}} = (0,02 \div 0,05)I_{\text{н}}$ - амплітуда змінної складової урівнюючого струму;

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм перетворювача, А;

n - порядок основної гармоніки;

$k_{\text{гарм}}$ - коефіцієнт зв'язуючий значення основної гармоніки n -го порядку змінної складової напруги при куті $\alpha = 90^\circ$.

Урівнюючий дросель вибирається так, щоб його індуктивність була більшою або рівною розрахунковій, а струм був більшим або рівним номінальному струму перетворювача або двигуна.

$$L_{\text{ур}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,1245 \cdot 133}{314 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 40} = 74,577 \text{ мГн}$$

Обмеження струму при „перекиданні” інвертора

Індуктивність необхідна для обмеження аварійного струму на час спрацювання захисту. Вона визначається за формулою:

$$L_{\Sigma}^{\text{ог}} = \frac{0,01 \cdot 1,24 \cdot R_{\text{я}}}{\ln \frac{\frac{E_{\text{нач}}}{1,24 \cdot R_{\text{я}}} - I_{\text{нач}}}{\frac{E_{\text{нач}}}{1,24 \cdot R_{\text{я}}} - I_{\text{доп}}}} \quad (3.50)$$

де, $E_{\text{нач}}$ - ЕРС двигуна в момент перекидання, В;

$I_{\text{нач}} = I_{\text{ном}} = 35,412$ А- струм двигуна перед перекиданням;

$I_{\text{доп}} = I_{\text{уд}} = 250$ А- допустимий струм вентиля на протязі одного напівперіода;

$R_{\text{я}}$ - опір якірного кола при $t^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}$, Ом.

ЕРС двигуна в момент перекидання визначено за формулою:

$$E_{\text{нач}} = C \cdot \omega_{\text{max}},$$

$$\text{де } \omega_{\text{max}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{max}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 4000}{60} = 418,879 \text{ рад/с}$$

$$E_{\text{нач}} = 0,6835 \cdot 418,879 = 286,3038 \text{ В}$$

Після підстановки числових значень у вираз (3.50), отримано:

$$L_{\Sigma}^{\text{оз}} = \frac{0,01 \cdot 1,24 \cdot 0,12}{\frac{286,30381}{1,24 \cdot 0,12} - 35,412} = 12,337 \text{ мГн}$$

Індуктивність струмообмежуючого реактора $L_{\Sigma}^{\text{оз}} = 12,34$ мГн менша за індуктивність урівнюючого реактора $L_{yp} = 74,58$ мГн, тобто $L_{\text{оп}} = L_{yp} = 74,58$ мГн.

Обмеження струму через тиристори при КЗ на стороні постійного струму.

При КЗ на стороні постійного струму струмообмежуючий реактор повинен обмежити швидкість зростання аварійного струму, щоб він не перевищив небажаного для тиристорів значення, на протязі власного часу спрацювання захисних пристроїв. Обмеження струму через вентиля може бути одержано за рахунок індуктивності розсіювання обмоток трансформатора і індуктивності в ланцюзі постійного струму.

Величина загальної індуктивності для мостової схеми визначена за формулою:

$$L_{\Sigma}^{\kappa} = \frac{2,34 \cdot U_{2\phi}}{\omega_c (I_{нач} - I_{доп})} ; \quad (3.51)$$

де, $I_{нач}$ - початковий струм в момент КЗ, А;

$I_{доп} = I_a$ - максимально допустимий струм вентиля, А;

$U_{2\phi}$ - фазна напруга, В.

Після підстановки числових значень в формулу (3.51), отримано:

$$L_{\Sigma}^{\kappa} = \frac{2,34 \cdot 133}{2\pi \cdot 50 \cdot (35,412 - 20)} = 64,277 \text{ мГн.}$$

Значення $L_{yp} = 74,58 \text{ мГн} > L_{\Sigma}^{\kappa} = 64,277 \text{ мГн}$. Прийнято

$$L_{доп} = L_{yp} = 74,58 \text{ мГн.}$$

Пульсації випрямленої напруги приводять до пульсацій випрямленого струму, які погіршують комутацію двигуна і збільшують його нагрівання.

В мостових схемах найбільшу амплітуду мають основні гармоніки ($k = 1$).

Амплітуди гармонік більш високої кратності ($k = 2, 3$) значно менші, а дія реакторів на них більш ефективна. Тому розрахунок індуктивності дроселя ведеться лише по основній гармоніці, тобто ($k = 1$).

Амплітудне значення гармонік, які складають випрямлену напругу E_{nm} знайдено за формулою:

$$E_{nm} = \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot E_{доп}}{k^2 \cdot p^2 - 1} \sqrt{1 + k^2 \cdot p^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha} \quad (3.52)$$

де, p - число пульсацій за період;

$k = 1$ - основна гармоніка;

$\alpha = 80^\circ$ - для максимально можливої величини E_{dnm} ;

$E_{доп}$ - максимальне значення ЕРС двигуна, В.

$$E_{nm} = \frac{2 \cdot \cos 80 \cdot \sqrt{2} \cdot 109,71}{1^2 \cdot 6^2 - 1} \sqrt{1 + 1^2 \cdot 6^2 \cdot \text{tg}^2 80} = 52,41 \text{ В}$$

Необхідна величина індуктивності ланцюга випрямленого струму знайдено за формулою:

$$L_{\Sigma}^n = \frac{E_{nm} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot k \cdot p \cdot \omega_c \cdot p_1 \% \cdot I_n} = \frac{52,41 \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 314 \cdot 10 \cdot 35,412} = 5,55 \text{ мГн}$$

Оскільки $L_{\Sigma}^n = 5,55 \text{ мГн} < L_{yp} = 74,58 \text{ мГн}$, прийнято

$$L_{др} = L_{yp} = 74,58 \text{ мГн.}$$

По результатах розрахунку вибраний дросель типу ДСА-554 з індуктивністю $L = 74,6 \text{ мГн}$ [7, с. 32, табл. 12].

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга двигуна складає:

$$L_a = L_m + L_{yp} + L_{я} = 10^{-3} \cdot (0,94 + 74,6 + 2,9) = 78,44 \text{ мГн} \quad (3.53)$$

3.2.2. Розрахунок системи фазо-імпульсного керування

Приймаємо схему керування на операційних підсилювачах. Розрахунок проведено для одного тиристора, для інших тиристорів він аналогічний.

Кожен з каналів складається із наступних блоків:

- фазозсуваючий пристрій;
- підсилювач-обмежувач (компаратор);
- генератора лінійно змінюючої напруги;
- схема зрівнювання (нуль-орган);
- диференційний ланцюг;
- підсилювач-формувавч.

Фазозсуваючий пристрій використаний для формування опорної напруги кожної з фаз. В якості опорної напруги використана напруга кожної з фаз зсунута на кут $\alpha = 30^\circ$. Для отримання необхідного зсуву використаний інтегруючий RC ланцюг.

Компаратор (DA1) служить для формування прямокутних імпульсів, які використовуються для запуску генератора лінійно змінюючої напруги, виконаного на операційному підсилювачі DA2.

ГЛЗН служить для одержання лінійно змінюючої напруги, яка використовується зрівнюючим пристроєм.

Зрівнюючий пристрій (DA3) призначений для отримання сигналу (імпульсу), який запізнюється відносно моменту природного відпирання на кут α , пропорційний керуючій напрузі U_α . Змінюючи значення напруги U_α від 0 до $U_{\alpha \max}$ регулюється кут α .

Підсилювач-формувавч призначений для формування відпираючого імпульсу необхідної амплітуди і тривалості.

Розрахунок фазозсуваючого пристрою

Фазозсуваючий пристрій виробляє опорну напругу для кожної фази. Із часових діаграм видно, що при прийнятті початкової фази $U_a = 0^\circ$, $U_b = 120^\circ$ і $U_c = 240^\circ$. Тоді:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= U_\phi \sin \omega t \\ U_b &= U_\phi \sin(\omega t - 120^\circ) \\ U_c &= U_\phi \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} (3.54)$$

Кути природної комутації тиристорів будуть:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) для VS1: } \beta_1 &= -30^\circ \\ \text{для VS4: } \beta_4 &= -180^\circ - 30^\circ = -210^\circ \\ \text{б) для VS3: } \beta_3 &= -120^\circ - 30^\circ = -150^\circ \\ \text{для VS6: } \beta_6 &= -120^\circ - 180^\circ - 30^\circ = -330^\circ \\ \text{в) для VS5: } \beta_5 &= -240^\circ - 30^\circ = -270^\circ \\ \text{для VS2: } \beta_2 &= -240^\circ - 180^\circ - 30^\circ = -450^\circ = -90^\circ \end{aligned} \right\} (3.55)$$

В якості опорної напруги вибрана синусоїда для кожної з фаз, причому така, що має нульові значення при кутах природної комутації. Тоді:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) для фази А: } U'_a &= U \sin(\omega t - 30^\circ) \\ \text{б) для фази В: } U'_b &= U \sin(\omega t - 150^\circ) \\ \text{в) для фази С: } U'_c &= U \sin(\omega t - 270^\circ) \end{aligned} \right\} (3.56)$$

В показниковій формі дані вирази мають вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_a &= U \cdot e^{-j30^\circ} \text{ В} \\ U'_b &= U \cdot e^{-j150^\circ} \text{ В} \\ U'_c &= U \cdot e^{-j270^\circ} \text{ В} \end{aligned} \right\} (3.57)$$

В якості опорної напруги використана напруга кожної з фаз, зсунута на кут 30° . Таким чином:

$$\left. \begin{aligned} U'_a &= U_a \cdot e^{-j30^\circ} \text{ В} \\ U'_b &= U_b \cdot e^{-j30^\circ} \text{ В} \\ U'_c &= U_c \cdot e^{-j30^\circ} \text{ В} \end{aligned} \right\} (3.58)$$

Для одержання необхідного зсуву використаний інтегруючий RC ланцюг:

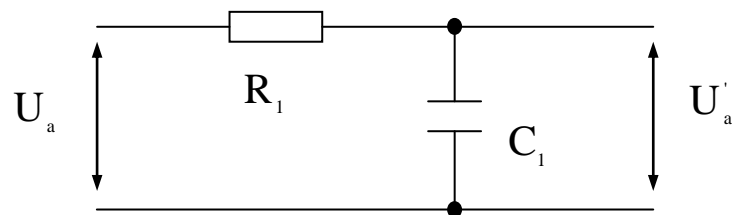


Рисунок 3.3 - Інтегруючу RC коло

Напруга на виході RC ланцюга складає:

$$U'_a = \frac{U_a}{Z \cdot e^{-j\varphi}} \cdot X_{c1} \cdot e^{-j90^\circ} \quad (3.59)$$

де, $Z = \sqrt{R_1^2 + X_{c1}^2}$ - модуль опору RC ланцюга, Ом;

φ - аргумент опору RC ланцюга;

X_{c1} - ємнісний опір конденсатора, Ом.

Після перетворення виразу (3.59), маємо:

$$U'_a = \frac{U_a \cdot X_{c1}}{\sqrt{R_1^2 + X_{c1}^2}} \cdot e^{-j90^\circ + j \arctg \frac{X_{c1}}{R_1}} \quad (3.60)$$

Оскільки зсув опорної напруги становить 30°

$$e^{-j30^\circ} = e^{-j90^\circ + j \arctg \frac{X_{c1}}{R_1}} \quad (3.61)$$

Отримано

$$\arctg \frac{X_{c1}}{R_1} = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ \quad (3.62)$$

Після перетворення виразу (3.62) отримано:

$$X_{c1} = R_1 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ = R_1 \cdot 1,732$$

Ємність конденсатора вибрана рівною 1 мкФ. Тоді:

$$X_{c1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 3,183 \text{ кОм} \quad (3.63)$$

Опір R_1 RC ланцюга становить:

$$R_1 = \frac{X_{c1}}{1,732} = \frac{3,183}{1,732} = 1,8378 \text{ кОм} \quad (3.64)$$

Напруга на виході RC ланцюга буде:

$$U'_a = \frac{U_a \cdot X_{c1}}{\sqrt{R_1^2 + X_{c1}^2}} = \frac{3,183}{\sqrt{1,8378^2 + 3,183^2}} U_a = 0,866 U_a \quad (3.65)$$

Вибрано $U_a = 6,3$ В. Тоді

$$U'_a = 0,866 \cdot 6,3 = 5,456 \text{ В}$$

Розрахунок підсилювача-обмежувача

В якості операційного підсилювача вибрана мікросхема К140УД1А [4].

Параметри операційного підсилювача наступні:

$U_{\text{живл}} = \pm 6,3 \text{ В}$ – напруга живлення ;

$R_{\text{вх}} = 4 \text{ кОм}$ – вхідний опір ;

$U_{\text{вх}} = \pm 1,5 \text{ В}$ – вхідна напруга ;

$R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$ – опір навантаження;

$U_{\text{вих}} = \pm 2,8 \text{ В}$ – вихідна напруга .

Так як $U'_a = 5,456 \text{ В}$, то на вхід підсилювача ввімкнено подільник напруги.

Розрахунок подільника напруги

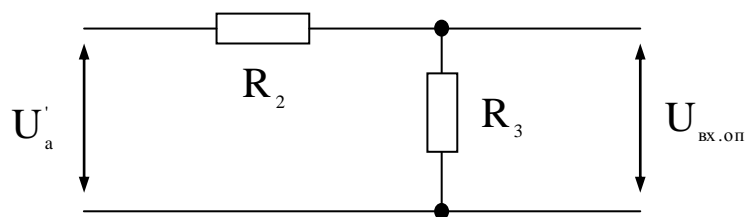


Рисунок 3.3 - Подільник напруги

Вхідна напруга операційного підсилювача становить:

$$U_{\text{вх.оп}} = \frac{U'_a \cdot \sqrt{2}}{R_2 + R_3} \cdot R_3 \quad (3.66)$$

Після підстановки числових значень у вираз (3.66) одержано:

$$1,5 = 5,456 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (3.67)$$

Перетворюючи вираз (3.67), маємо:

$$0,194 = \frac{R_3}{R_2 + R_3}; R_3 = 0,194 \cdot (R_2 + R_3); R_2 = R_3 \cdot 4,144. \quad (3.68)$$

Опір резистора прийнято $R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Опір резистора R_3 становить:

$$R_3 = \frac{R_2}{4,144} = \frac{10}{1,144} = 2413,15 \text{ Ом} \quad (3.69)$$

Розрахунок схеми підсилювача-обмежувача

Схема підсилювача-обмежувача має вигляд:

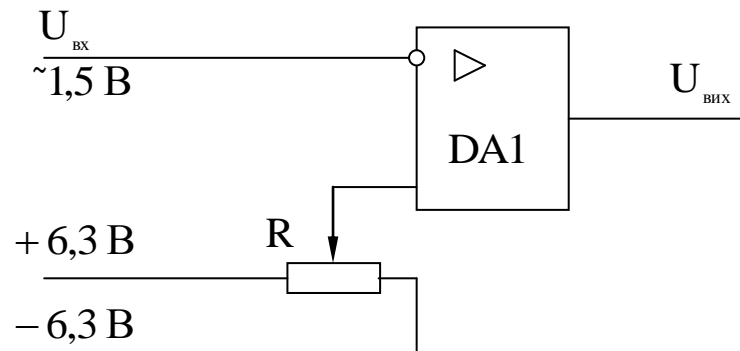


Рисунок 3.4 - Підсилювач-обмежувач

Струм подільника становить $I = 10^{-4}$ А.

Струм подільника розраховано, як:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6,3 + 6,3}{R} = \frac{12,6}{R} \quad (3.70)$$

Із виразу (3.70) отримана величина опору R:

$$R = \frac{12,6}{10^{-4}} = 126 \text{ кОм} \quad (3.71)$$

Для більш ретельного визначення напруги зміщення замість одного резистора R прийнято набір з трьох послідовно з'єднаних резисторів: R_4, R_5, R_6 , ввімкнених за схемою:

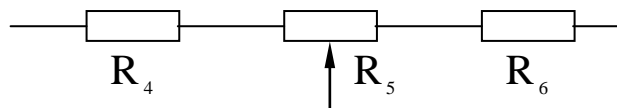


Рисунок 3.5 - Набір резисторів

Так як опір резистора R складає 126 кОм, прийнято опір резисторів R_4 і R_6 рівним 50 кОм, а опір резистора R_5 рівним 25 кОм.

Розрахунок генератора лінійно змінюючої напруги

В генераторі лінійно змінюючої напруги застосований ОП серії К140УД1А [4, с. 11, табл. 4]. Принципова схема генератора має наступний вигляд:

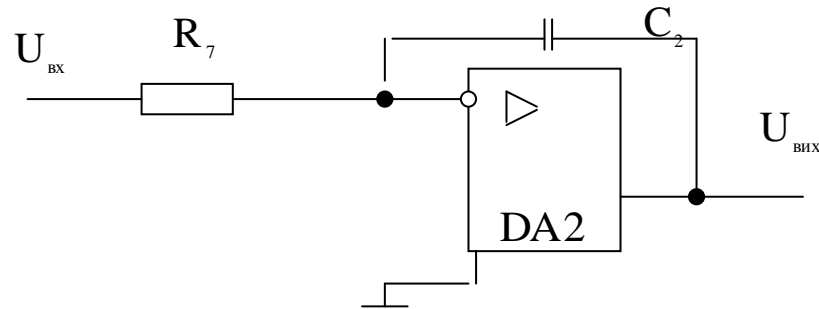


Рисунок 3.5 - Генератор лінійно змінюючої напруги

Для визначення величини резистора R_7 і конденсатора C_2 прийнята величина вихідної напруги ГЛЗН:

$U_{\text{вих}} = \pm 1,5$ В. З урахуванням цього:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_7} = -C_2 \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \quad (3.72)$$

З виразу (3.72) отримана формула для розрахунку вихідної напруги:

$$U_{\text{вих}} = \frac{1}{C_2 \cdot R_7} U_{\text{вх}} \cdot dt \quad (3.73)$$

Період імпульсу становить:

$$T_{\text{імп}} = \frac{1}{2 \cdot f_{\text{мер}}} = \frac{1}{2 \cdot 50} = 0,01 \text{ с} \quad (3.74)$$

де, $f_{\text{мер}}$ - частота мережі, Гц.

Напруга входу ГЛЗН становить $U_{\text{вх}} = \pm 2,8$ В.

Після перетворення виразу (3.73) отримано:

$$U_{\text{вих max}} = -\frac{1}{C_2 \cdot R_7} U_{\text{вх}} \cdot T_{\text{імп}} \quad (3.75)$$

Із виразу (3.75) значення $C_2 \cdot R_7$ становить:

$$C_2 R_7 = -\frac{U_{\text{вх}} \cdot T_{\text{імп}}}{U_{\text{вих max}}} = \frac{2,8 \cdot 0,01}{1,5} = 18,66 \cdot 10^{-3} \text{ с} \quad (3.76)$$

Значення опору R_7 становить:

$$R_7 = 18,66 \cdot 10^{-3} / C_2$$

Прийнята ємність конденсатора $C_2 = 1 \text{ мкФ}$.

Опір резистора R_7 знайдено за виразом (3.76)

$$R_7 = \frac{18,66 \cdot 10^{-3}}{C_2} = \frac{18,66 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 18,66 \text{ кОм}$$

Розрахунок схеми зрівнювання

В якості схеми зрівнювання використаний компаратор на операційному підсилювачі серії К140УД1А.

Схема компаратора має вигляд:

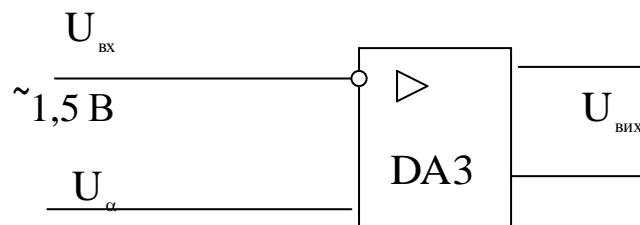


Рисунок 3.6 - Компаратор

Розрахунок диференціюючого ланцюга $C_3 R_8$

Розрахунок цієї ланки полягає в виборі тривалості імпульсу на виході ланцюга і виборі режиму зміщення транзистора VT1. Схема диференціюючого ланцюга має вигляд:

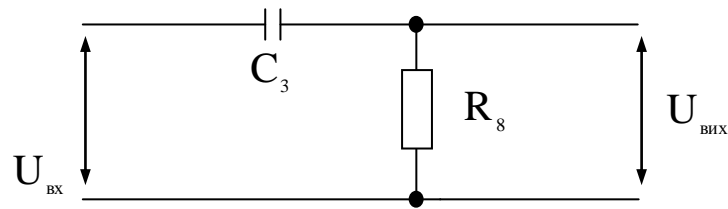


Рисунок 3.7 - Диференціюючий ланцюг

Вихідна напруга диференційної ланки розрахована за формулою:

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot U_m \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.77)$$

Тривалість імпульсу відпирання тиристора вибрана з умови $t_i > t_{\text{відп}}$; час відпирання тиристора складає $t_{\text{відп}} = t_{\text{вкл}} = 20 \cdot 10^{-6}$ с. Прийнято $t_i = 25 \cdot 10^{-6}$ с.

Із умови повного відпирання транзистора VT1 визначився опір резистора R_8 із наступного співвідношення:

$$I_{\text{б.доп}} \leq E_k / R_8 \quad (3.78)$$

Допустимий струм бази прийнято рівним:

$I_{\text{б.доп}} = 10 \cdot 10^{-4}$ А, а $E_k = 40$ В. Величина R_8 знайдена із співвідношення:

$$R_8 \geq E_k / I_{\text{б.доп}} = 40 / 10^{-3} = 40 \text{ кОм} \quad (3.79)$$

Опір резистора становить $R_8 = 40$ кОм.

Враховуючи, що тривалість імпульсу по величині спаду від $U_{\text{вих.мах}}$ до $0,1U_{\text{вих.мах}}$ отримано:

$$U_{\text{вих.мах}} - 0,1U_{\text{вих.мах}} = 2U_m \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.80)$$

Після перетворення виразу (3.80) отримано:

$$0,9 = e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.81)$$

Із виразу (3.81) ємність C_3 становить:

$$C_3 = -\frac{t}{R \cdot \ln 0,9} \quad (3.82)$$

Після підстановки числових значень у вираз (3.82) отримано:

$$C_3 = -\frac{25 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^3 \cdot \ln 0,9} = 5,9 \text{ мкФ} \quad (3.83)$$

Розрахунок підсилювача-формуєвача запускаючих імпульсів

Для розрахунку задані вихідні параметри вибраного тиристора: $U_y = 5$

В; $I_y = 0,15$ А; $t_{\text{вкл}} = 20$ мкс.

Принципова схема вихідного пристрою має вигляд:

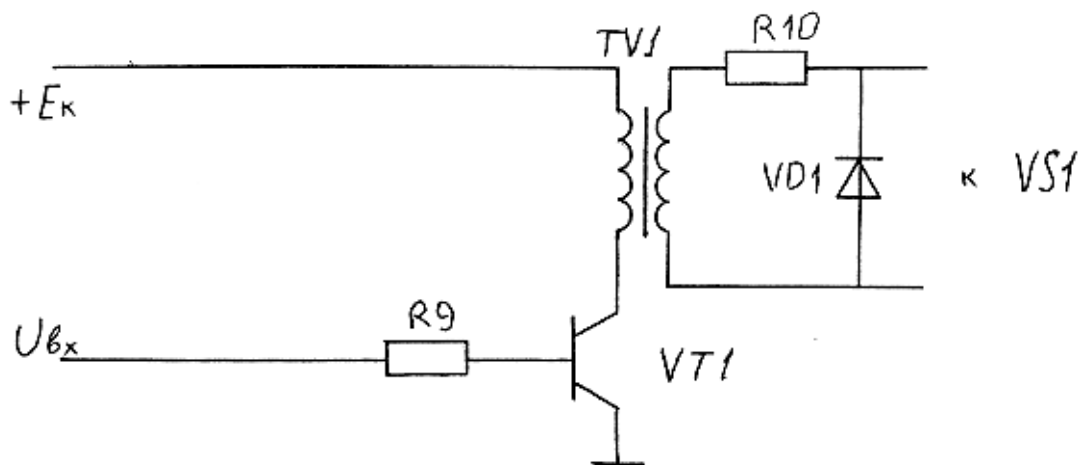


Рисунок 3.8 - Принципова схема вихідного пристрою

Тривалість керуючих імпульсів визначена з умови

$$t_i > t_{\text{вмк}}; t_i = 25 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Потужність керуючого імпульсу становить:

$$P_{\text{імп}} = U_y \cdot I_y = 5 \cdot 0,15 = 0,75 \text{ Вт} \quad (3.84)$$

По розрахованій потужності керуючого імпульсу і визначеного значення $E_k = 40$ В розраховано імпульсний трансформатор.

Коефіцієнт трансформації імпульсного трансформатора знайдено із співвідношення:

$$n \approx \frac{E_k}{U_y} = \frac{40}{5} = 8 \quad (3.85)$$

Максимальний струм колектора вихідного транзистора становить:

$$I_{k_{\max}} = I_y / n = 0,15 / 8 = 0,0187 \text{ А}$$

Отриманим значенням відповідає серійний кремнієвий транзистор КТ919В [11] з параметрами: $h_{21\beta} = 12$; $U_{к\text{э доп}} = 45 \text{ В}$; $I_{к\text{ доп}} = 0,2 \text{ А}$; $U_{эб\text{ доп}} = 3,5 \text{ В}$; $I_{б\text{ доп}} = 0,05 \text{ А}$; $T_{\max} = +100^\circ\text{С}$; $T_{\min} = -45^\circ\text{С}$.

По отриманим даним побудовані навантажувальна і вхідна характеристики:

$$\text{а) } I_{к.\text{імп}} = 0 \text{ А} \quad U_{к\text{э}} = E_k = 40 \text{ В}$$

$$\text{б) } I_{к.\text{імп}} = 18 \text{ мА} \quad U_{к\text{э}} = 0 \text{ В}$$

Із графіка визначено:

$$I_{б.\text{імп}} = 1,5 \text{ мА} \quad I_k = 7,5 \text{ А}$$

$$U_{бэ} = 0,57 \text{ В} \quad U_{к\text{э}} = 22 \text{ В}$$

Величина опору, обмежуючого струм бази, визначена по формулі:

$$R_b = R_9 = \frac{U_{вк} - U_{бэ}}{I_{б.\text{імп}}} = \frac{3 - 0,57}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 1,62 \text{ кОм} \quad (3.86)$$

Еквівалентний опір колектора становить:

$$U_{к\text{е}} = E_k - I_k \cdot R_{к.\text{екв}} \cdot n \quad (3.87)$$

Виходячи з (3.87) розраховано $R_{к.\text{екв}}$

$$R_{к.\text{екв}} = R_{10} = \frac{E_k - U_{к\text{е}}}{I_k \cdot n} = \frac{40 - 22}{7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8} = 300 \text{ Ом} \quad (3.88)$$

Із умови $U_{обр.\text{мах}} > E_k$ з [11,с.80] вибрано діод серії КД103А з параметрами: $U_{обр.\text{мах}} = 50 \text{ В} > E_k = 40 \text{ В}$.

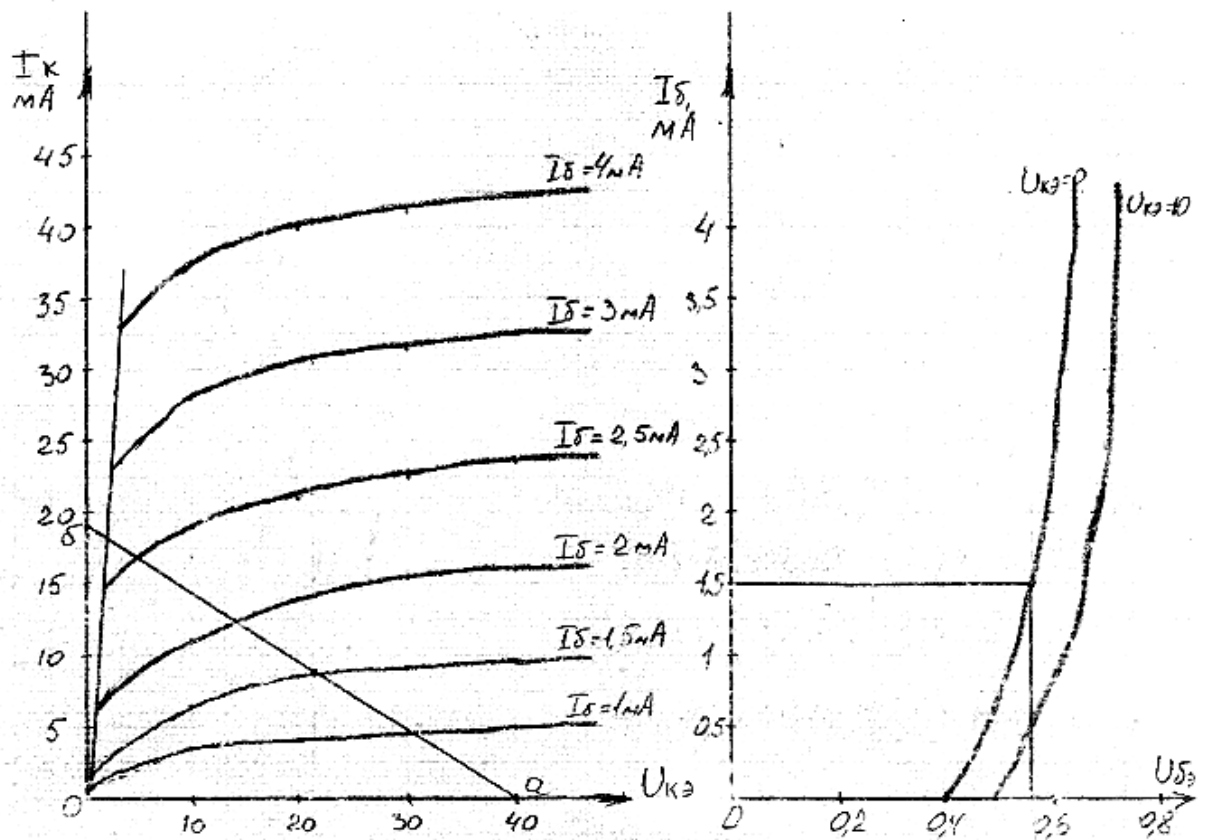


Рисунок 3.9 - Навантажувальна і вхідна характеристики

Напруга ізоляції становить:

$$U_{\text{ізол}} \approx (1,5 \div 2)U_d \quad (3.89)$$

$$U_{\text{ізол}} \approx 2 \cdot U_d = 2 \cdot 256,72 = 513,44 \text{ В}$$

3.2.3. Розрахунок параметрів об'єкту регулювання

Електромагнітна стала часу T_a , с- час необхідний для нарощування струму в обмотці якоря до 0,63 номінального значення при подачі на загальмований якір двигуна напруги $U = I_{\text{ном}} \cdot R_a$ [11].

$$T_a = L_a / R_a \quad (3.90)$$

Після підстановки числових значень у (3.90), отримано:

$$T_a = 78,44 \cdot 10^{-3} / 0,5144827 = 0,1524638 \text{ с}$$

Електромеханічна стала часу T_m , с- час необхідний для розгону двигуна до 0,63 номінальної швидкості при прямому включенні якоря двигуна при номінальній напрузі [11]

$$T_m = \frac{I_{np} \cdot R_a}{c^2} \quad (3.91)$$

Після підстановки значень у (3.91), отримано:

$$T_m = \frac{0,0537741 \cdot 0,5144827}{0,6835^2} = 0,0592197 \text{ с}$$

Власна частота $\omega_0, \text{с}^{-1}$ величина, яка характеризує смугу пропускання електродвигуна

$$\omega_0 = 1/\sqrt{T_m \cdot T_a} = 1/\sqrt{0,1525 \cdot 0,0592} = 10,52 \text{с}^{-1} \quad (3.92)$$

Застосована СІФК з арккосинусною характеристикою $\alpha = \arccos(U_y)$

Статична характеристика такого ТП лінійна

$$K_{тп} = \frac{E_{оп}}{U_y}; \quad (3.93)$$

де, $E_{оп}$ - максимальне значення випрямленої ЕРС, В;

$$E_{оп} = U_{до};$$

При $U_y = 5$ В – напрузі керування на вході ТП, відповідна максимальній ЕРС на виході ТП, $K_{тп}$ становить:

$$K_{тп} = \frac{256,72126}{5} = 51,344252$$

Стала часу ТП

$$T_{тп} = T_{п.о.} + 2/(m \cdot f_c); \quad (3.94)$$

де, $T_{п.о.}$ - стала часу СІФК з урахуванням фільтрів, с;

$$T_{п.о.} \approx t_{вкл} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$2/(m \cdot f_c)$ - середньостатистичне запізнення перетворювача:

m - кількість фаз перетворювача

f_c - частота мережі живлення, Гц.

Після підстановки числових значень у вираз (3.94) отримано:

$$T_{\text{тп}} = 20 \cdot 10^{-6} + \frac{2}{6 \cdot 50} = 0,0066866 \text{ с}$$

3.2.4. Вибір датчиків

Датчик кутової швидкості

Для вимірювання кутової швидкості обертання в системах електроприводу постійного струму прийняті тахогенератори постійного струму:

При виборі тахогенератора врахована вимога:

$$\omega_{\text{н.дв}} 314,16 \text{ рад/с} < \omega_{\text{тг max}} \quad (3.95)$$

Таким чином прийнято тахогенератор типу СЛ-М [13,с.41].

Каталожні данні тахогенератора наступні:

$U_{\text{в}} = 110 \text{ В}$ – напруга збудження;

$I_{\text{в}} = 0,05 \text{ А}$ – струм збудження;

$K_{\text{тг}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ – коефіцієнт передачі;

$\omega_{\text{max}} = 600 \text{ рад/с}$ – максимальна частота обертання;

$m = 0,49 \text{ кг}$ – маса;

$I_{\text{як}} = 2,35 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції якоря;

$I_{\text{max нагр}} = 0,1 \text{ А}$ – максимальний струм навантаження.

Опір зворотного зв'язку для даного тахогенератора складає:

$$R_{\text{ос.с}} = \frac{\omega_{\text{тг max}} \cdot K_{\text{тг}}}{I_{\text{max .агр}}} - R_{\text{об.як}} \quad (3.96)$$

В результаті підстановки числових значень у формулу (3.96), отримано:

$$R_{oc.c} = \frac{600 \cdot 3,35 \cdot 10^{-2}}{0,1} - 170 = 31 \text{ Ом}$$

Максимальна вихідна напруга тахогенератора становить:

$$U_{вих. макс} = K_{тг} \cdot \omega_{тг. макс} \quad (3.97)$$

В результаті підстановки числових значень у формулу (3.97), отримано:

$$U_{вих. макс} = 3,35 \cdot 10^{-2} \cdot 600 = 20,1 \text{ В}$$

Датчик струму

В системах керування електроприводами подач сигнали, пропорційні струму, знімаються з шунтів або трансформаторів струму. В якості датчика струму вибрано шунт з коефіцієнтом передачі $K_{д.т.} = 1,5 \text{ мВ/А}$

Номінальний струм шунта становить:

$$I_{ном.ш.} = 2,5 \cdot I_{ном.дв.} \quad (3.98)$$

В результаті підстановки числових значень у вираз (3.98), отримано:

$$I_{ном.ш.} = 2,5 \cdot 35,412 = 88,53 \text{ А}$$

Падіння напруги на шунті визначено як:

$$U_{ш} = K_{д.т.} \cdot I_{н.ш.} \quad (3.99)$$

В результаті підстановки числових значень у вираз (3.99), отримано:

$$U_{ш} = 1,5 \cdot 88,53 = 132,795 \text{ мВ}$$

Опір шунта залежить від параметрів:

$$R_{ш} = U_{ш} / I_{ш} \quad (3.100)$$

В результаті підстановки числових значень у вираз (3.100), отримано:

$$R_{ш} = 132,795 \cdot 10^{-3} / 88,53 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

3.3. Розрахунок параметрів регуляторів системи регулювання

Тиристорні електроприводи з регуляторами швидкості забезпечують з тим або іншим ступенем точності відповідність кутової швидкості вала

електродвигуна заданому значенню або зміні швидкості за заданим законом. Вихідним параметром системи регулювання таких електроприводів є швидкість, і регулятор швидкості є основним (зовнішнім) регулятором. Більшість електроприводів, що працюють у промисловості, відноситься до такого класу. Технічні вимоги до них досить різноманітні. Аналіз технічних показників електроприводів постійного струму середньої і великої потужності, виготовлених ведучими підприємствами в СНД і за рубежом, показує, що більшість з них забезпечує: статичну похибку по швидкості не більше 0,1-0,3% при зміні навантаження від нуля до номінального і 0,5-1,5% при зміні температури навколишнього середовища в межах 1-40 °С та напруги живильної мережі $\pm 10\%$, глибину регулювання швидкості (1:5)-(1:100), час реверса струму якоря від $+I_{\text{НОМ}}$ до $-I_{\text{НОМ}}$ не більше 20-30 мс і час відновлення швидкості при поштовху навантаження не більше 0,2-0,3 с. Приведені вище показники точності забезпечуються аналоговими системами регулювання; більш висока точність може бути отримана тільки при застосуванні цифрових регуляторів. Ці показники не охоплюють деякі спеціальні типи електроприводів, наприклад електроприводи подач металорізальних верстатів, де необхідний діапазон зміни швидкості досягає 1:1000 і більше.

Для збільшення діапазону регулювання швидкості часто передбачається двохзонне регулювання (перша зона- зміною напруги на якорі, друга зона-зміною магнітного потоку).

Як правило, використовується залежна система керування полем двигуна, при якій ослаблення потоку збудження відбувається в тому випадку, коли ЕРС або напруга на якорі двигуна перевищить заздалегідь установлене значення, близьке до номінального. При цьому повна зміна поля двигуна повинна забезпечуватися відносно невеликою зміною напруги на якорі: $0,01U_{\text{НОМ}}$ у статичному й $0,03U_{\text{НОМ}}$ у динамічних режимах. При навантаженнях і роботі привода на упор потрібне обмеження моменту

двигуна. Нахил механічної характеристики в режимі стопоріння при цьому повинний складати не менше $10(\omega_{\text{НОМ}} / I_{\text{НОМ}})$, час перебування двигуна під струмом упору повинний бути обмежений 5-10 с.

В системах керування електроприводами передбачається можливість задання швидкості або в кілька ступіней, або плавно; у деяких випадках потрібні обидва типи задання. Звичайно використовується також пристрій для задання прискорення привода (або динамічного струму). Крім того, часто передбачаються додаткові вузли, що дозволяють виконати задані за технологією режими.

Усю різноманітність вимог вдається задовольнити застосуванням систем керування з підлеглим регулюванням параметрів, що забезпечують високі статичні і динамічні характеристики тиристорних електроприводів і гнучкість при побудові систем регулювання. Системи регулювання даних електроприводів мають контур регулювання швидкості і підлеглий йому контур регулювання струму якоря. У багатьох випадках застосовується контур напруги, внутрішній стосовно контуру струму. При необхідності в регулюванні потоку збудження двигуна застосовується одно- або двоконтурний регулятор ЕРС. Іноді доцільне застосування спеціальних систем регулювання. Застосовуються також нереверсивні електроприводи, у яких потрібно мати контрольоване і досить швидке гальмування; у таких випадках в електроприводах невеликої потужності використовують реверсивні електроприводи, однак при великих потужностях доцільне застосування нереверсивних ТП і реверсивних збудників, причому система регулювання повинна забезпечити режим гальмування з рекуперацією енергії і контролем струму якоря.

По своїй структурі електродвигун є нелінійною динамічною ланкою (рис 38, а). При роботі з постійним магнітним потоком його структура істотно спрощується (мал. 38, б); при впливі з боку ЕРС перетворювача E_d

структурну схему електродвигуна можна представити у виді, зображеному на рис. 3.10,в.

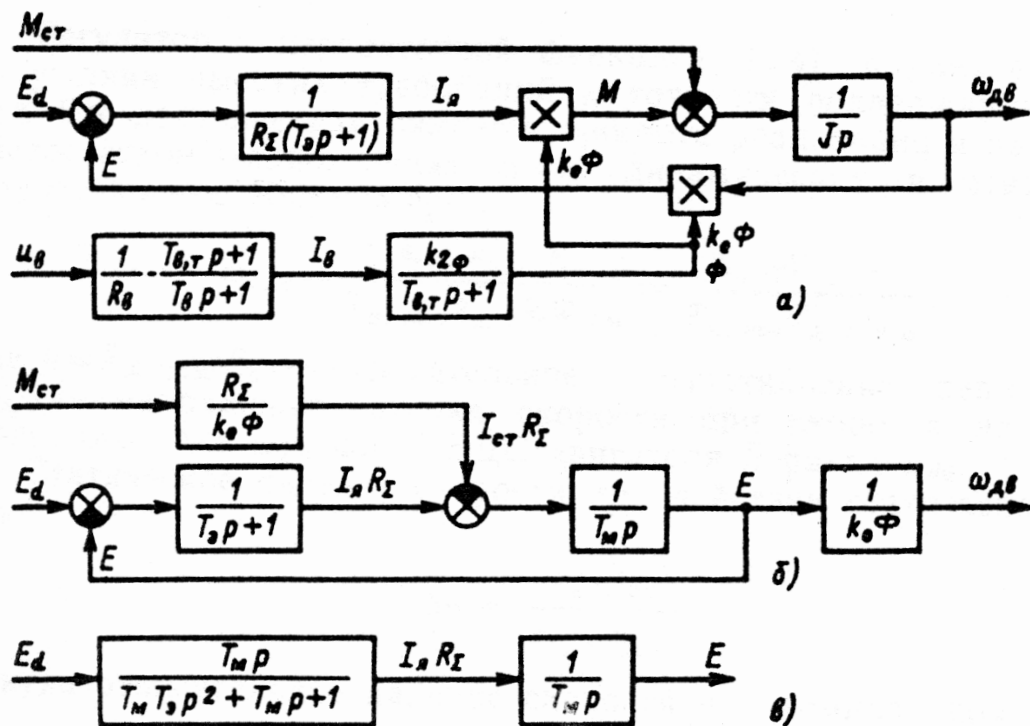


Рисунок 3.10 - Структурна схема силових кіл тиристорного електропривода:
а) повна схема; б) при постійному магнітному потоці Φ ; в) при постійному Φ та зміні напруги ТП

На рисунку 3.11 наведена функціональна схема системи керування електроприводом.

Основними структурними елементами системи керування електроприводом є ПІ-регулятор швидкості, адаптивний пристрій лінеаризації характеристик електропривода, схема імпульсно-фазового керування СІФК (СИФУ). В електроприводі реалізована система двоконтурного підпорядкованого регулювання зі зворотними зв'язками за швидкістю та струмом. Силова частина електропривода складається з двох повністю керованих випрямлячів КТ "В" і КТ "Н", виконаних за трифазною мостовою схемою, включених зустрічно-паралельно і працюючих за

принципом відокремленого керування. До силової частини схеми також відносяться силовий узгоджуючий трансформатор Т5, автоматичний вимикач F6, згладжуючий дросель L у ланцюзі якоря електродвигуна М. Для контролю напруги і струму двигуна використовуються відповідно амперметр А (з шунтом Р) і вольтметр V. Керування двома тиристорними вентиляними комплектами відбувається за допомогою схеми імпульсно-фазового керування (СІФК), яка призначена для перетворення однополярної постійної напруги в послідовність керуючих імпульсів відповідної фази, що подаються на керуючі електроди тиристорів.

Вхідні сигнали СІФК обмежуються на рівні α_{\min} і α_{\max} , а також зміщуються на значення α_0 відповідно резисторами R50, R49 і R41. Логічний пристрій УЛ здійснює керування силовими вентиляними комплектами "В" і "Н" і виконує наступні функції:

а) вибір необхідного напрямку обертання у залежності від знака вхідного сигналу нелінійної ланки (НЗ) шляхом включення відповідних ключів, що визначають необхідний напрямок струму перетворювача;

б) блокування входу логічного пристрою сигналом датчика провідності вентилів ДПВ;

в) формування затримки часу між моментами зняття імпульсів з робочого раніше комплексу і подачею їх на вступаючий у роботу комплект.

У свою чергу датчик провідності вентилів призначений для контролю стану ("відкритий" - "закритий") і працює за принципом контролю падіння напруги на переході анод-катод тиристорів. Принцип адаптації дозволяє лінеаризувати структуру електропривода в режимі переривистих струмів і тим самим поліпшити динамічні властивості привода.

Адаптивний пристрій складається з нелінійної ланки (НЗ) і функціонального перетворювача ЕРС (ФПЕ).

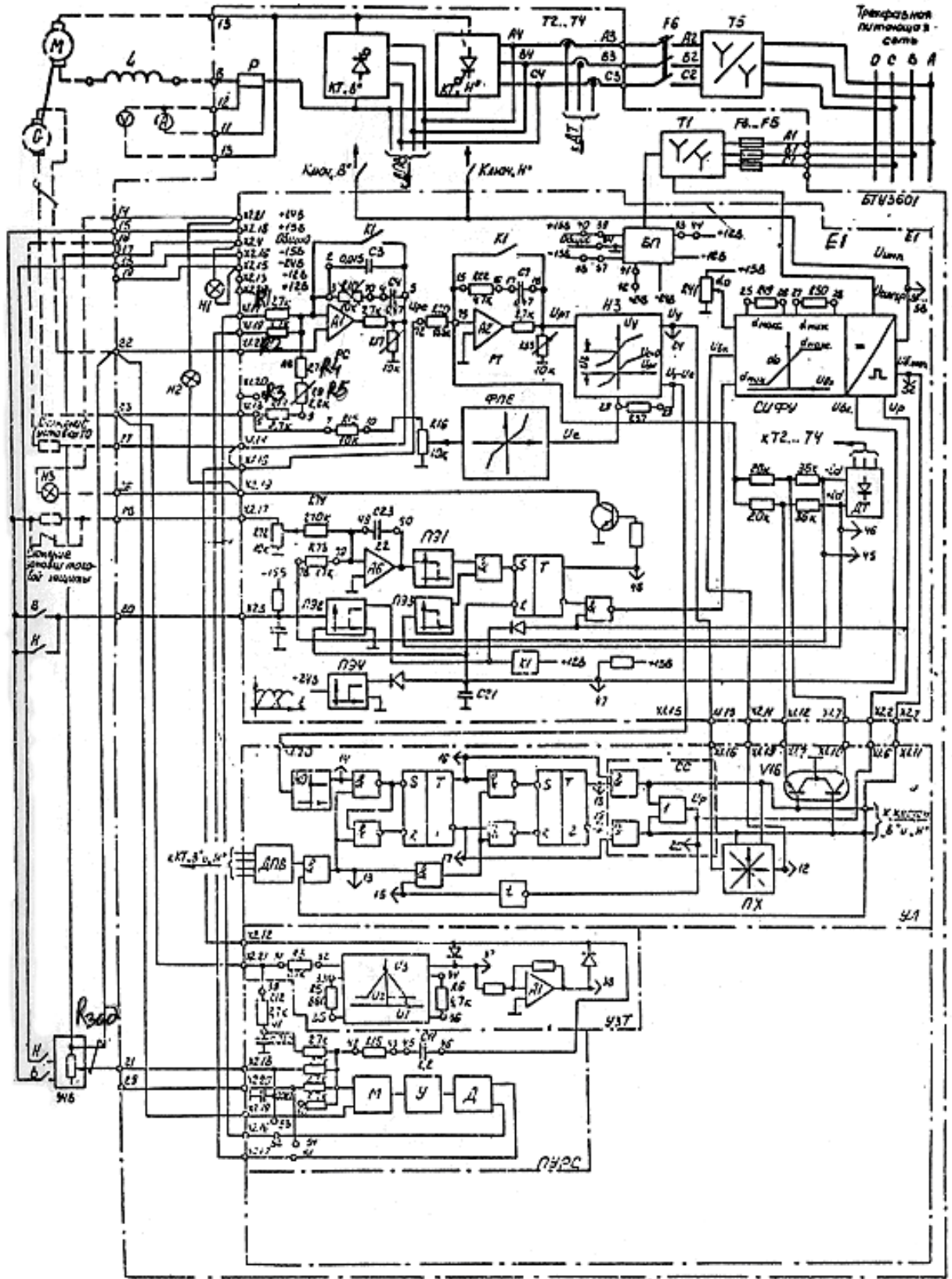


Рисунок 3.11 - Функціональна схема системи керування електроприводом

Нелінійна ланка має характеристику, зворотною регулюючій характеристиці керованого випрямляча в режимі переривистого струму, а ФПЕ має залежність типу $y = \arcsin E$, де E -відносна електрорушійна сила двигуна. Для погодження однополярної регулюючої характеристики СІФК з реверсивним сигналом нелінійної ланки використовується перемикач характеристик (ПХ), керований логічним пристроєм (УЛ). Регулятор швидкості (РС) виконаний двоканальним. Перший канал (А1) забезпечує підсилення сигналу і швидкодію.

Другий канал (МУД), по входу включений паралельно, виконує компенсацію температурної і часової нестабільності регулятора. МУД являє собою підсилювач постійного струму, працюючий за принципом модулятор-демодулятор. На вході регулятора швидкості (РС) додаються сигнали завдання швидкості і зворотного зв'язку з тахогенератора (G). Глибина зворотного зв'язку за швидкістю регулюється змінним резистором R9, що задає нульову частоту обертання вала двигуна. Вимикачі K1 необхідні для вимкнення регуляторів швидкості і струму із ланцюга керування. Схема обмеження струму якоря (УЗТ) забезпечує обмеження струму якоря на заданому рівні (струму відсічки) у функції швидкості. Принцип роботи схеми струмообмеження базується на обмеженні вихідної напруги регулятора швидкості, яке визначає максимальний заданий струм якоря. Резисторами R5 та R6 встановлюється точка перегину та кутовий коефіцієнт за точкою перегину на характеристиці струму двигуна від частоти обертання. В електроприводі забезпечується захист елементів схеми при аварійних ситуаціях. При спрацюванні будь-якого виду захисту порогові елементи ПЕ1, ПЕ2, ПЕ3, ПЕ4 переводять RS-тригер в активний стан і через логічний елемент "І" впливають на СІФК, формуючи керуючі імпульси для кута α_{max} . Одночасно відкривається транзистор і загораються лампочки Н2, Н3 аварійного стану. Живлення схеми виконується через трансформатор Т1 та допоміжний блок живлення БП.

Розрахункова схема системи регулювання координат з П-регулятором швидкості та з ПІ-регулятором струму представлена на рисунку 40.

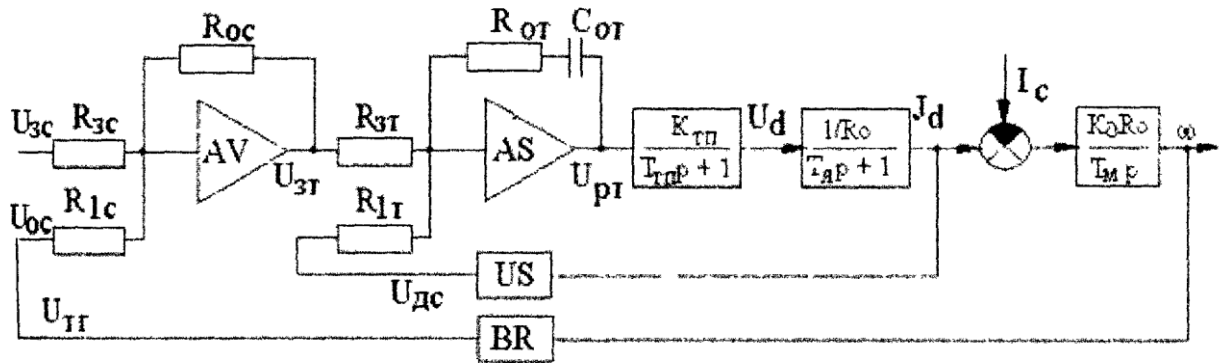


Рисунок 3.12 - Розрахункова схема системи регулювання

Регулятор швидкості виконаний на підсилювачі А1 з корегуючою ланкою С4. Резистори R1...R5 забезпечують установку нуля підсилювача. Конденсатор може під'єднуватися паралельно С4.

Контакт К1 використовується для встановлення самоходу двигуна із-за дрейфу нуля підсилювача А1 при відсутності задаючої напруги.

Резистор $R_{злд}$ служить для вводу задаючої напруги в діапазоні від -15В до +15В.

Регулятор струму складається з елементів: підсилювача А2, резистора R22, конденсатора С7.

Розрахунковий опір якорного ланцюга двигуна складає:

$$R_0 = 1,2(R_{яд} + R_{д.п.}) + (R_{тр} + R_a) + R_{щ} + R_y \quad (3.101)$$

$R_{яд}$ -опір обмотки якоря при 15°C, Ом;

$R_{д.п.}$ -опір додаткових полюсів при 15°C, Ом;

$R_{тр}$ -опір обмоток трансформатора, приведений до ланцюга випрямленого струму, Ом;

R_a -опір за рахунок перекриття анодних струмів, Ом;

$R_{щ}$ -опір щіткового контакту, Ом;

R_y -опір зрівняльного реактора.

Розрахункове значення напруги вторинної обмотки трансформатора буде:

$$U_2 = E_2 \cdot k_\alpha \cdot k_{\text{мережі}} \cdot k_R \quad (3.102)$$

де $E_2 = k_e U_H$ -теоретичне значення ЕРС вториннонь обмотки силового трансформатора, В; (k_e -відношення напруги вторинної обмотки силового трансформатора до середнього значення випрямленої напруги, для трифазної схеми з нульовим виводом слід прийняти $k_e = 0,857$);

k_α -коефіцієнт запасу, що враховує неповне відкриття вентилів при максимальному сигналі. Слід прийняти $k_\alpha = 1,2$;

$k_{\text{мережі}}$ - коефіцієнт запасу по напрузі, який враховує можливе зниження напруги мережі. Слід прийняти $k_{\text{мережі}} = 1,1$;

k_R - коефіцієнт запасу, що враховує падіння напруги в вентилях і обмотках трансформатора, а також наявності кутів комутації. Слід прийняти $k_R = 1,05$.

$$U_2 = 188,54 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 261,32 \text{ В.}$$

Слід рахувати, що напруга вторинної обмотки вибраного трансформатора рівна розрахунковому значенню. Струм вторинної обмотки трансформатора буде:

$$I_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot I_{\text{я.н}} \quad (3.103)$$

де k_1 -коефіцієнт прямокутності струму, що враховує відхилення форми струму від прямокутної. Слід прийняти $k_1 = 1,1$;

k_2 -коефіцієнт, рівний відношенню діючого значення лінійного струму вторинної обмотки силового трансформатора до середнього значення випрямленого струму. Слід прийняти $k_2 = 0,578$;

$I_{я.н}$ -номінальний струм двигуна, А.

$$I_2 = 1,1 \cdot 0,578 \cdot 35,4 = 22,51 \text{ А.}$$

Опір обмоток трансформатора і створюваний за рахунок перекриття анодних струмів:

$$R_{тр} + R_a = 0,06U_{2Л} / I_2 \quad (3.104)$$

$$R_{тр} + R_a = 0,06 \cdot 261,32 / 22,51 = 0,697 \text{ Ом.}$$

Опір щіткового контакту за умови, що падіння напруги на ньому буде дорівнювати 2 В, знайдеться як:

$$R_{щ} = \frac{2}{I_{я.н}} = \frac{2}{35,4} = 0,056 \text{ Ом} \quad (3.105)$$

Опір урівняльного реактора становить:

$$R_y \approx (0,1 \dots 0,2) R_d \quad (3.106)$$

$$R_d = 1,2(R_{я.д} + R_{д.п}) + (R_{тр} + R_a) + R_{щ} \quad (3.107)$$

$$R_d = 1,2(0,245 + 0,162) + 0,697 + 0,056 = 1,241 \text{ Ом}$$

$$R_y = 0,1 \cdot 1,241 = 0,1241 \text{ Ом}$$

Розрахунковий опір якірного ланцюга двигуна складає:

$$R_0 = 1,2(R_{я.д} + R_{д.п}) + (R_{тр} + R_a) + R_{щ} + R_y \quad (3.108)$$

$$R_0 = 1,2(0,245 + 0,162) + 0,697 + 0,056 + 0,1241 = 1,366 \text{ Ом}$$

Розрахункова індуктивність якірного ланцюга становить:

$$L_0 = L_{я} + L_{тр} \quad (3.109)$$

де $L_{тр}$ -індуктивність трансформаторної обмотки.

$$L_{тр} = \frac{X_{тр}}{2\pi f} \quad (3.110)$$

Реактивна складова опору трансформаторної обмотки буде:

$$X_{тр} = \frac{U_k \cdot U_2}{I_2} = \frac{0,095 \cdot 261,32}{22,51} = 1,1 \text{ Ом} \quad (3.111)$$

де U_k -напруга короткого замикання трансформатора в відсотках. Слід прийняти $U_k = 0,095$;

$$L_{\text{тр}} = \frac{1,1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0035 \text{ Гн}$$

Індуктивність обмотки якоря двигуна знаходиться, як:

$$L_{\text{я}} = k_k \cdot \frac{U_n}{2p \cdot n_n \cdot I_{\text{я.н}}} = 5 \cdot \frac{220}{2 \cdot 3000 \cdot 35,4} = 0,0052 \text{ Гн} \quad (3.112)$$

де $k_k = 5 \dots 6$ для компенсованих машин;

n_n -номінальна частота обертання, об/хв.

$$L_0 = 0,0052 + 0,0035 = 0,0087 \text{ Гн}$$

Електромагнітна постійна часу ланцюга якоря знаходиться як:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_0}{R_0} = \frac{0,0087}{1,366} = 0,0064 \text{ с.} \quad (3.113)$$

Електромеханічна постійна часу для заданого значення J_{Σ} буде:

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_0 \cdot \omega_n^2}{(U_n - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}})^2} \quad (3.114)$$

Швидкість обертання вала двигуна знаходиться як:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,16 \text{ рад/с} \quad (3.115)$$

Опір обмотки якоря двигуна буде:

$$R_{\text{яд}} = 1,2(R_{\text{я.д}} + R_{\text{д.п}}) = 1,2(0,245 + 0,162) = 0,4884 \text{ Ом} \quad (3.116)$$

Передавальний коефіцієнт двигуна знаходиться як:

$$k_{\text{д}} = \frac{\omega_n}{e_{\text{д.н}}} = \frac{\omega_n}{U - I_{\text{я.н}} R_{\text{я.д}}} = \frac{314,16}{220 - 35,4 \cdot 0,4884} = 1,55 \quad (3.117)$$

Передавальний коефіцієнт тахогенератора буде:

$$k_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{н.т}}}{\omega_{\text{н.т}}} = \frac{230}{314,16} = 0,732 \quad (3.118)$$

$$T_M = \frac{1,05 \cdot 0,038 \cdot 1,366 \cdot 314,16^2}{(220 - 35,4 \cdot 0,4884)^2} = 0,131 \text{ с}$$

Для знаходження передавального коефіцієнта тиристорного перетворювача слід використати регульовальну характеристику перетворювача $E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha$. Слід прийняти максимальну напругу керування $U_{к, \max} = 10 \text{ В}$, де E_{d0} - максимальне значення ЕРС тиристорного перетворювача при куті керування, що рівний нулю:

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \sqrt{2} \cdot 261,32 \cdot \frac{3}{3,14} \cdot \sin \frac{3,14}{3} = 305,62 \text{ В}$$

Для мінімальної швидкості, при роботі з номінальним навантаженням величина α дорівнює:

$$\alpha_{\omega, \min} = \arccos \left[\frac{\omega_{\min} c + I_{я} R_0}{E_{d0}} \right] \quad (3.119)$$

$$\text{де } \omega_{\min} = \frac{\omega_n}{D}, \text{ рад/с, } \omega_{\min} = \frac{314,16}{2000} = 0,157 \text{ рад/с}$$

$$c = \frac{1}{k_d}, \text{ В} \cdot \text{с/рад, } c = \frac{1}{1,46} = 0,685 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

$$\alpha_{\omega, \min} = \arccos \left[\frac{0,157 \cdot 0,685 + 35,4 \cdot 1,366}{305,62} \right] = 80,9^\circ$$

Це відповідає ЕРС тиристорного перетворювача:

$$E_d = E_{тп} = E_{d0} \cos \alpha_{\omega, \min} = 305,62 \cdot \cos 80,9^\circ = 48,3 \text{ В}$$

По арккосинусоїдальній залежності $E_d = f(U_k)$ знаходиться U_k і коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача $k_{тп}$:

$$k_{тп} = \frac{E_{тп}}{U_k} = \frac{48,3}{0,77} = 62,73 \quad (3.120)$$

Напруга від'ємного зворотного зв'язку по струму подається на датчик струму US з шунта якірного ланцюга двигуна. Передавальний коефіцієнт

шунта знаходиться, як:

$$k_{\text{ш}} = 1,2R_{\text{ш}} = 1,2 \cdot 0,1026 = 0,1231 \text{ Ом}$$

Двигун слід уявити у вигляді двох ланок з постійними часу $T_{\text{я}}$ та $T_{\text{м}}$.

Схеми регуляторів слід представити в наступному вигляді:

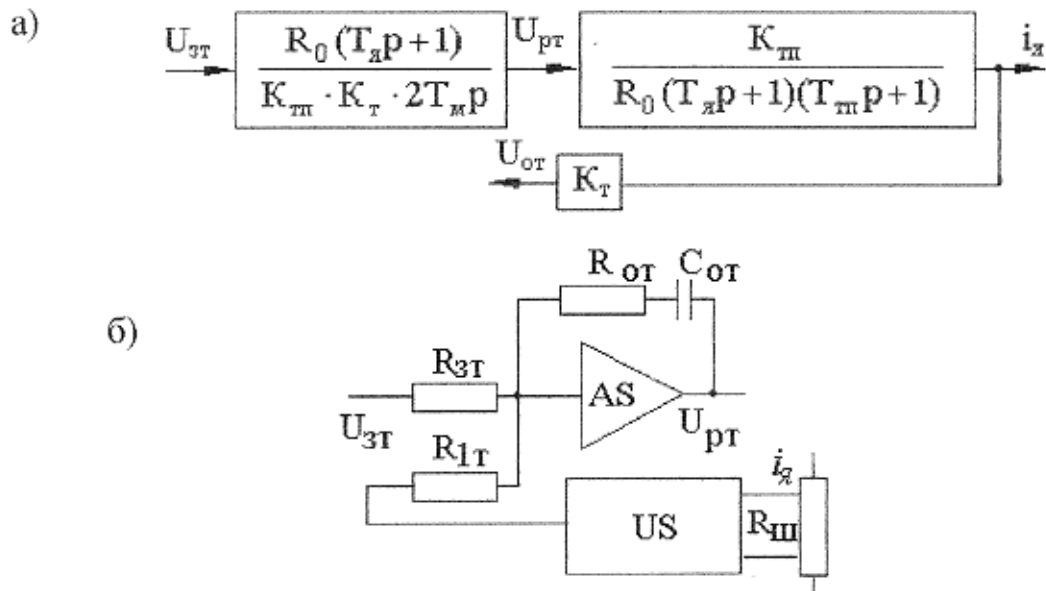


Рисунок 3.13 - Схема регулятора струму

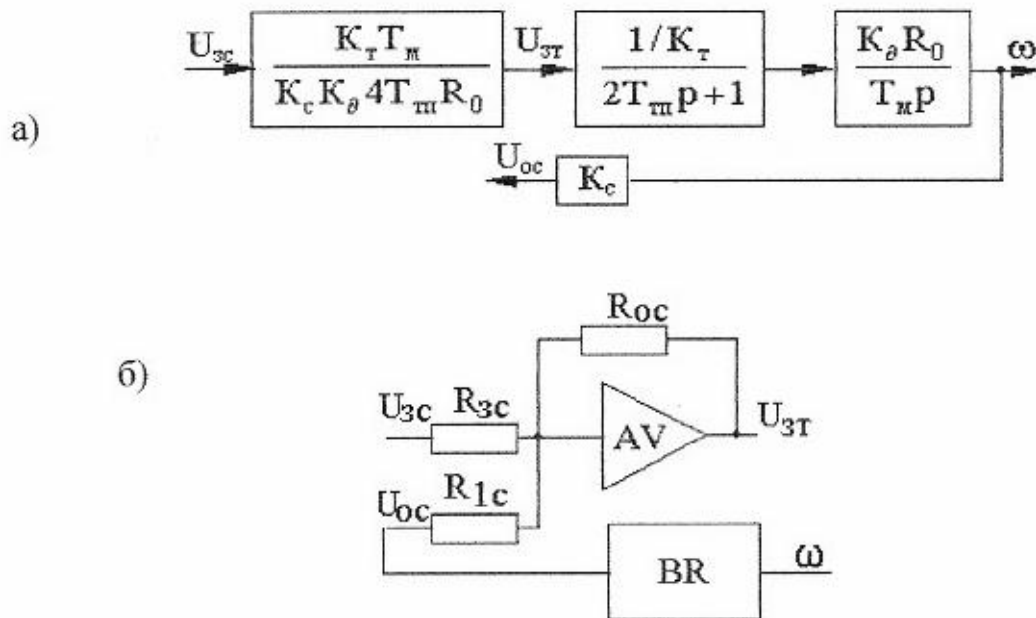


Рисунок 3.14 - Схема регулятора швидкості

При розгляді тиристорного перетворювача слід враховувати його інерційність. В системі утворений внутрішній контур (рис. 41.а,б)

регулювання струму з датчиком струму US (зворотній зв'язок по струму) і регулятором струму AS. Зовнішній контур регулювання швидкості (рис. 3.14.а,б) має датчик швидкості тахогенератор BR і регулятор швидкості AV. На вхід регулятора швидкості AV подаються сигнал задання $U_{зс}$ і сигнал $U_{зз}$ зворотного зв'язку, що пропорційний величині швидкості двигуна. Регулятор швидкості виробляє сигнал $U_{зт}$ для регулятора струму, на другий вхід якого подається сигнал $U_{от}$, пропорційний величині струму двигуна.

В цьому випадку передавальну функцію електродвигуна при статичному моменті $M_c = 0$ слід представити як:

$$H_{дв}(p) = H_{ид}(p) \cdot H_{од}(p) = \frac{1}{R_0(T_я p + 1)} \cdot \frac{K_d R_0}{T_m p} \quad (3.121)$$

Передавальна функція тиристорного перетворювача буде:

$$H_{тп} = \frac{K_{тп}}{T_{тп} p + 1} \quad (3.122)$$

де $T_{тп}$ - постійна часу тиристорного перетворювача. $T_{тп} = 0,007$ с.

Слід виконати оптимізацію внутрішнього контура струму по технічному (модульному) оптимуму. В якості малої постійної часу, що не компенсується, слід прийняти $T_\mu = 0,007$ с.

Передавальна функція об'єкта регулювання контура струму знаходиться як:

$$H_{а.рт}(p) = \frac{1}{R_0(T_я p + 1)} \cdot \frac{K_{тп}}{T_{тп} p + 1} \quad (3.123)$$

Постійна інтегрування контура струму визначається з умови на модульний оптимум таким чином:

$$T_{кт} = a \cdot T_\mu = a \cdot T_{тп} = 2T_\mu \quad (3.124)$$

Передавальна функція розімкненого оптимізованого контура струму (див. рис. 41, а) буде:

$$H_{\text{окт}}(p) = \frac{1/K_T}{a \cdot T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = \frac{1/K_T}{2T_{\text{тп}}p(T_{\text{тп}}p + 1)} \quad (3.125)$$

Передавальна функція ПІ-регулятора струму може бути представлена у вигляді:

$$H_{\text{пт}}(p) = \frac{H_{\text{окт}}}{H_{\text{орг}}} = \frac{R_0(T_{\text{я}}p + 1)}{K_{\text{тп}}K_T 2T_{\mu}p} = \frac{R_0T_{\text{я}}}{2T_{\mu}K_{\text{тп}}K_T} + \frac{R_0}{K_{\text{тп}}K_T 2T_{\mu}p} = K_{\text{пт}} + \frac{1}{T_{\text{рс}}p}$$

$$\text{де } K_{\text{пт}} = \frac{R_0T_{\text{я}}}{2T_{\mu}K_{\text{тп}}K_T}; T_{\text{пт}} = \frac{2T_{\mu}K_{\text{тп}}K_T}{R_0}$$

$K_{\text{рс}}$ і $T_{\text{рс}}$ - відповідно, коефіцієнт підсилення і постійна часу регулятора швидкості.

Для обмеження величини струму граничним значенням $I_{\text{я}}$ достатньо обмежити значенням $U_{\text{рш.мах}}$ сигнал на виході регулятора швидкості, тобто задаючий сигнал для контура струму.

Коли розузгодження на виході регулятора швидкості досягне величини напруги насичення, то на виході регулятора швидкості напруга постійна; при цьому система підтримує постійним струм якоря двигуна. Обмеження рівня вихідного сигналу регулятора швидкості здійснюється шунтуванням ланцюга зворотного зв'язку регулятора швидкості зустрічно увімкненими стабілітронами. При цьому $U_{\text{рс.мах}} = I_{\text{ст}} \cdot k_T$.

Слід використати стабілітрони типу Д814Г з напругою пробою $U_{\text{пр}} = 10 \text{ В}$.

Передавальний коефіцієнт ланцюга зворотного зв'язку по струму знаходиться як:

$$k_T = \frac{U_{\text{рс.мах}}}{I_{\text{ст}}} \quad (3.126)$$

$$\text{Прийняти } I_{\text{ст}} = 2,35 \cdot I_{\text{я.н}} = 2,35 \cdot 35,4 = 83,19$$

$$k_T = \frac{10}{83,19} = 0,12$$

Слід визначити величини коефіцієнта підсилення і постійної часу регулятора струму:

$$k_{pc} = \frac{R_0 T_y}{2T_\mu K_T K_{T.п}} = \frac{1,366 \cdot 0,0064}{2 \cdot 0,007 \cdot 62,73 \cdot 0,12} = 0,0829 \quad (3.127)$$

$$T_{pc} = \frac{2T_\mu K_T K_{T.п}}{R_0} = \frac{2 \cdot 0,007 \cdot 62,73 \cdot 0,12}{1,366} = 0,0771 \text{ с} \quad (3.128)$$

Параметри регулятора струму (рис.3.14, б) слід визначити в такій послідовності:

Прийнявши $T_{от} = T_y$ і $C_{от} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, отримаємо:

$$R_{от} = \frac{T_y}{C_{от}} = \frac{0,0064}{10^{-6}} = 6400 \text{ Ом} \quad (3.129)$$

Аналогічно, прийнявши $R_{зт} = R_{1T}$, отримаємо:

$$R_{зт} = R_{1T} = \frac{T_{рТ}}{C_{от}} \quad (3.130)$$

Величину коефіцієнта підсилення датчика струму одержимо з відношення:

$$k_{д.т} = \frac{k_T}{k_{ш}} \quad (3.131)$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контура струму матиме вигляд:

$$H_{з.кт}(p) = \frac{1/k_T}{2T_\mu p(T_\mu p + 1) + 1} \quad (3.132)$$

Із цього виразу, відкинувши член другого порядку в знаменнику, отримаємо так звану усічену передавальну функцію:

$$H_{з.кт}(p) = \frac{1/k_T}{2T_\mu p + 1} = \frac{1/k_T}{T_{КТ} p + 1} \quad (3.133)$$

Передавальна функція розімкненого оптимізованого контура швидкості (рис.42, а), що настроєний на симетричний оптимум буде:

$$H_{o.k.c.}(p) = \frac{1/k_c}{a^2 T_{тп} p (a T_{тп} p + 1)} = \frac{1/k_c}{4 T_{тп} p (2 T_{тп} p + 1)} \quad (3.134)$$

Передавальна функція об'єкта регулювання швидкості матиме вигляд:

$$H_{орс}(p) = H_{зкт}(p) \cdot H_{од}(p) = \frac{K_d \cdot R_0}{K_t (2 T_n p + 1) T_m p} \quad (3.135)$$

В контурі швидкості некомпенсованою постійною часу є величина $2 T_{тп} = 2 T_n = T_{кт}$.

Передавальна функція пропорційного регулятора швидкості буде:

$$H_{рш}(p) = \frac{H_{окс}(p)}{H_{орс}(p)} = \frac{k_t T_m}{a^2 T_\mu k_c k_d R_0} \quad (3.136)$$

Слід прийняти напругу задання $U_{зс} = 10$ В, тоді передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості буде:

$$k_{ш} = \frac{U_{зс.max}}{\omega_n} = \frac{10}{314,16} = 0,0318 \quad (3.137)$$

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості знаходиться як:

$$k_{рш} = \frac{k_t \cdot T_m}{4 T_\mu k_{ш} k_d R_0} = \frac{0,12 \cdot 0,131}{4 \cdot 0,007 \cdot 0,0318 \cdot 1,55 \cdot 1,366} = 8,85 \quad (3.138)$$

Слід визначити параметри регулятора швидкості (рис.42, б), враховуючи навантажувальну здатність задавача інтенсивності, виконаного на базі напівпровідникового підсилювача.

Прийнявши $R_{зс} = 50$ кОм, отримаємо

$$R_{ос} = k_{рш} \cdot R_{зс} = k_{рш} \cdot 50000 = 8,85 \cdot 50000 = 442500 \text{ Ом}$$

Опір в ланцюгу зворотного зв'язку по швидкості знайдеться, як:

$$R_{1с} = \frac{k_{тг}}{k_{ш}} R_{зс} = \frac{0,732 \cdot 50000}{0,0318} = 1,15 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

Статичне падіння швидкості в спроектованому електроприводі при

номінальному навантаженні буде:

$$\Delta\omega_c = k_d R_0 I_{я.н} \frac{2T_{к.т}}{T_M} = 1,55 \cdot 1,366 \cdot 35,4 \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,007}{0,131} = 16,02 \text{ рад/с}$$

При необхідності отримання електромеханічної характеристики з меншим статичним падінням швидкості (більшою жорсткістю) можна застосувати ПІ-регулятор швидкості. Якщо необхідно отримати регулятор швидкості з регульованою жорсткістю, то шунтують ємність резистором в його зворотному зв'язку.

Використовуючи структурну схему, зображену на рис. 43, за допомогою програми Matlab побудовано графіки перехідних процесів системи керування.

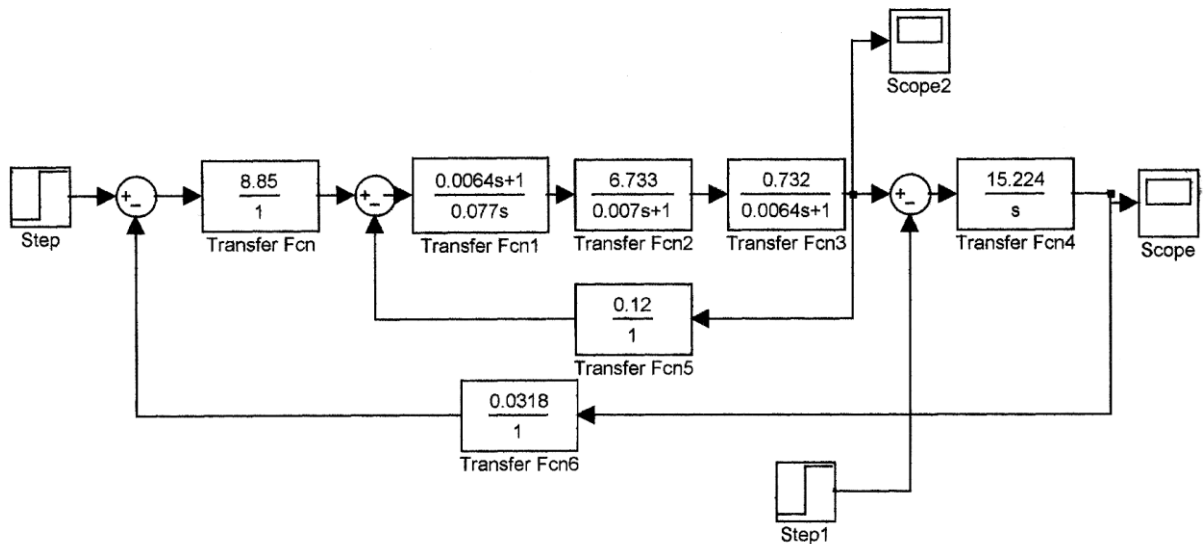
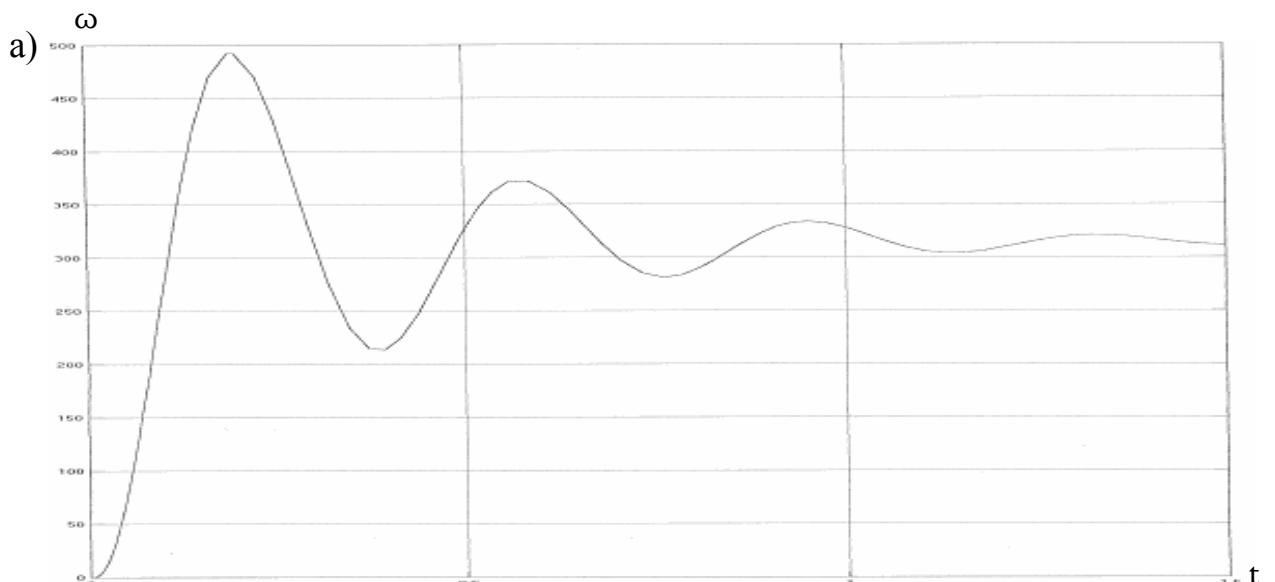


Рисунок 3.15 - Структурна схема системи автоматичного регулювання



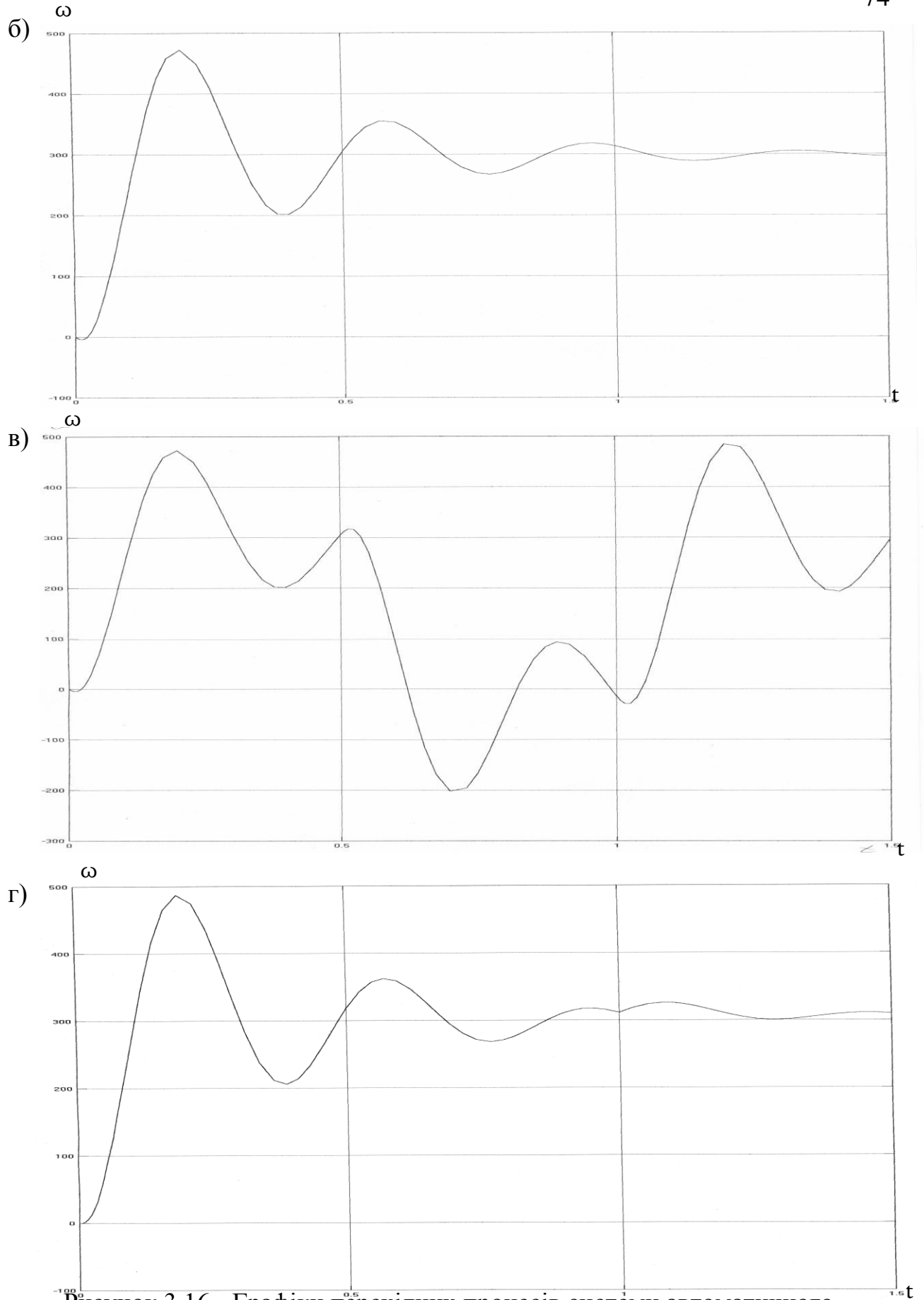


Рисунок 3.16 - Графіки перехідних процесів системи автоматичного регулювання

$$a- U_{\text{зад}} = 10 \text{ В}, I_c = 0 \text{ А};$$

$$б- U_{\text{зад}} = 10 \text{ В}, I_c = 35,4 \text{ А};$$

$$в- U_{\text{зад}} = 10 \text{ В}, I_c = 35,4 \text{ А}, t_c = 0,5 \text{ с};$$

$$г- U_{\text{зад}} = 10 \text{ В}, I_c \text{ -змінне.}$$

Аналізуючи побудовані графічні залежності, можна зробити висновки:

- небезпечно вмикати і одразу вимикати живлення, можливе обертання двигуна в зворотну сторону;
- пилкоподібне змінне навантаження не значно впливає на режим роботи;
- так як система налаштована на симетричний оптимум, маємо досить велике перерегулювання, але система добре тримає навантаження;
- система стійка.

За допомогою графіків перехідних процесів визначено параметри якості системи автоматичного регулювання:

1. Час регулювання (швидкодія) t_p – час із моменту зміни зовнішньої дії (збурення або завдання) до моменту досягнення керованою величиною $\delta_{\text{доп}}$ (допустимої похибки). Вона рівна $0,05\beta_{\text{ном}}$, якщо спеціально не задана. $t_p = 1,3 \text{ с}$.

$$2. \text{ Перерегулювання } \delta = \frac{\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{ном}}}{\beta_{\text{ном}}} = \frac{470 - 314,16}{314,16} = 0,49.$$

3. Коливальність перехідного процесу:

- число коливань nT (n – кількість періодів коливань) $nT = 4$;
- ступінь затухання $\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1} = \frac{470 - 350}{470} = 0,26$ – відносна різниця

сусідніх амплітуд коливального процесу.

Розрахунки та вибір обладнання для автоматизації технологічного процесу первинної обробки молока дає змогу побудувати функціональну схему технологічного процесу (рис 3.17) [12-15]. Схема демонструє

принципову електричну схему для автоматизації процесу пастеризації молока, включаючи керування температурою, насосами та клапанами.

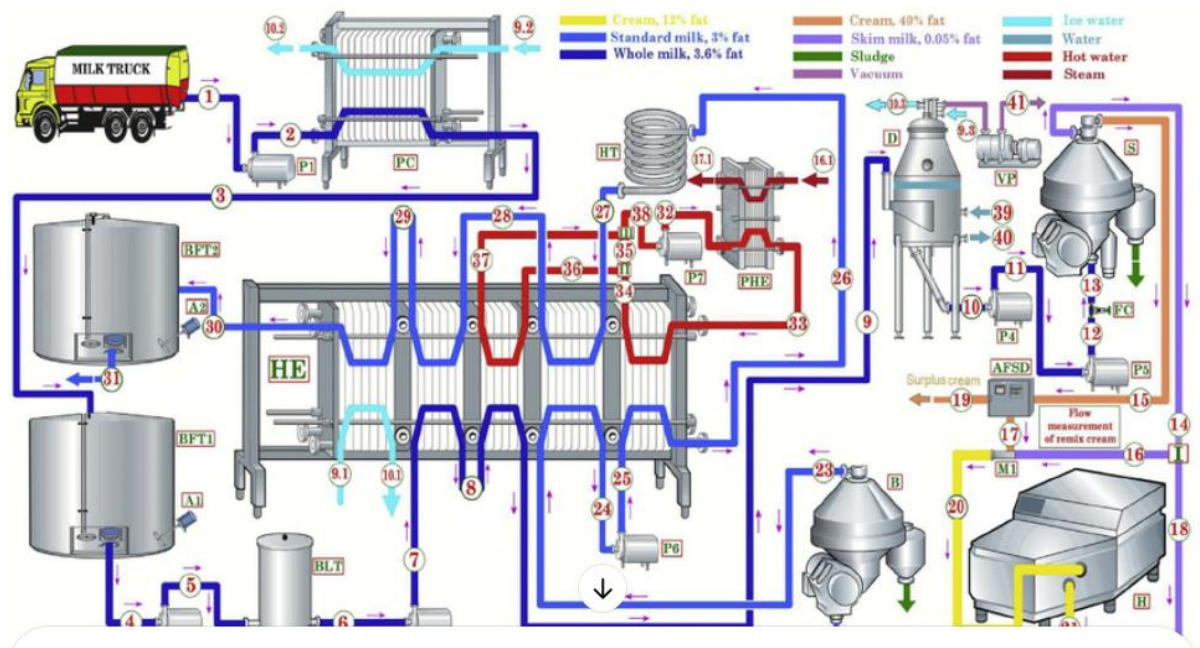


Рисунок 3.17 - Функціональна схема технологічного процесу первинної обробки молока

4. ТЕХНІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЗАХОДИ ПО УДОСКОНАЛЕННЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ФГ «ЮВЕНТА»

4.1 Аналіз якості електроенергії в розподільчій електромережі та вплив її якості на роботу електроспоживачів

Однією із важливих задач електрифікації являється підвищення якості електроенергії, яка передається споживачам. В першу чергу це стосується такого параметру як відхилення напруги, так як від неї залежить не тільки економічність роботи приймачів електроенергії але й економічні показники електричної мережі в цілому. Відносні відхилення напруги знижують строк служби ізоляції, погіршують продуктивність машин і механізмів.

Особливо важливо забезпечити необхідне значення напруги в розподільчих мережах в місцях, де під'єднуються споживачі електроенергії.

Специфічні особливості виконання розподільчих мереж (низькі питомі щільності навантаження, розмежування мереж і взаємна віддаленість приймачів електроенергії з неоднаковими режимами споживання) в значній мірі ускладнюють розв'язання цієї задачі. Забезпечення якості електроенергії споживачів в таких мережах неможливо без регулювання напруги за допомогою спеціальних пристроїв, тобто примусової її зміни в окремих точках мережі.

Разом з тим при великій кількості різноманітних за складом споживачів електроенергії регулювання напруги тільки в центрі живлення мережі (центральне регулювання) не дає позитивних результатів. Для розподільчих мереж доцільно застосовувати систему різних пристроїв, розподіляючи їх вздовж мережі, щоб споживачам забезпечити технічно допустимі значення відхилення напруг.

При нормуванні показників якості електроенергії за параметром відхилення напруги в об'єкті проектування перш за все прийняті технічні вимоги, які забезпечують нормальну і тривалу експлуатацію

електрообладнання. До цих вимог відносяться: забезпечення необхідної швидкості обертання електродвигунів, величини струмів ротора і статора у електродвигунів; потужності світлового потоку ламп розжарювання і ряд інших. Невиконання цих вимог викликає погіршення технічних параметрів роботи електроспоживачів і, як наслідок, зниження економічної ефективності використання електрообладнання. В деяких випадках невиконання технічних вимог до якості напруги приводить до прямих збитків при експлуатації електрообладнання. Тому кожній групі приймачів електроенергії характерні свої межі зміни напруги, з врахуванням техніко-економічних особливостей.

Вплив відхилення напруги на техніко-економічні показники електроприймачів залежить від їх типу, завантаження і виробничо-технологічної схеми використання. Відхилення напруги викликає додаткові витрати на оплату електроенергії.

Основну групу електроприймачів складають асинхронні електродвигуни. При тривалій їх роботі на пониженій нарузі строк їх служби значно скорочується.

Все це свідчить, що збитки при експлуатації електрообладнання суттєво залежать від відхилення напруги. Таким чином, підвищення якості електроенергії за параметром відхилення напруги забезпечує зниження затрат, які включають як енергетичні показники так і економію праці і поточних затрат.

4.1.1 Задачі регулювання напруги в електромережі та технічні засоби для цього

Задачами регулювання напруги в електричній мережі є: вибір засобів регулювання, ступіней регулювання, місце встановлення відповідних пристроїв в мережі. При цьому необхідно виконувати як технічні вимоги, у відповідності з дійсними нормами, так і забезпечувати економічно вигідні рішення.

Необхідно мати на увазі, що задачі регулювання напруги забезпечуються не тільки регулюючими, а й компенсуючими пристроями. Останні повинні забезпечувати умови балансу реактивної потужності при бажаних значеннях напруги, а також допомагати змінювати режим напруг і підвищувати економічність роботи електричних мереж. Тому задачі регулювання напруги, компенсації потужності і розподілення її по електричній системі взаємопов'язані.

Одним із способів місцевого регулювання напруги в сільських мережах 0,38 кВ є використання вольтододаткових трансформаторів, за допомогою яких можна збільшувати і зменшувати напругу. Вторинна (послідовна) обмотка вольтододаткового трансформатора приєднується між джерелом живлення і навантаженням, первинна (обмотка збудження) приєднується на лінійну або фазну напругу мережі. В якості вольтододаткових трансформаторів можна використовувати стандартні трансформатори, які виготовляються вітчизняною промисловістю на напруги 380/36, 380/24, 220/24, 220/12 В.

4.1.2 Розрахунок параметрів вольтододаткових трансформаторів

Параметри вольтододаткових трансформаторів включають в себе активні та реактивні (індуктивні) опори [11].

Параметри первинної обмотки двох трансформаторів з номінальною напругою 220/24/12 В визначені таким чином.

Активний опір при постійній напрузі становить:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{1,2} = 10 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

Сила струму в первинній обмотці становить:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{7}{10}} = 0,84 \text{ А при } U=30 \text{ В.} \quad (4.2)$$

Індуктивний опір становить:

$$X_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{30}{0,84} = 35,7 \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

Реактивний опір становить:

$$X_1 = \sqrt{X_L^2 - R_1^2} = \sqrt{35,7^2 - 10^2} = 34,27 \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

Опір взаємоіндукції визначено таким чином:

$$Z_M = \frac{U_2}{I_1} = \frac{3}{0,84} = 3,57 \text{ Ом.} \quad (4.5)$$

Параметри первинної обмотки вольтододаткових трансформаторів з номінальною напругою 220/24 В визначені у такій послідовності:

Активний опір становить:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{1,35} = 3,7 \text{ Ом.} \quad (4.6)$$

Струм у первинній обмотці становить:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5,2}{3,7}} = 1,18 \text{ А.} \quad (4.7)$$

Індуктивний опір обмотки становить:

$$X_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{25}{1,18} = 21,2 \text{ Ом.} \quad (4.8)$$

Реактивний опір обмотки становить:

$$X_1 = \sqrt{X_L^2 - R_1^2} = \sqrt{21,2^2 - 3,7^2} = 20,9 \text{ Ом.} \quad (4.9)$$

Опір взаємоіндукції становить:

$$Z_M = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2,1}{1,18} = 1,78 \text{ Ом.} \quad (4.10)$$

Аналогічно виконані розрахунки для інших трансформаторів. Дані розрахунків занесені у таблицю 4.1.

Параметри трансформаторів

| | Трансформатори 220/24/12 В | | Трансформатор 220/24 В | | Трансформатор 220/24 В | |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | Первинна обмотка | Вторинна обмотка | Первинна обмотка | Вторинна обмотка | Первинна обмотка | Вторинна обмотка |
| R, Ом | 10 | 0,1 | 3,7 | 0,04 | 11 | 0,013 |
| Z, Ом | 35,7 | 0,26 | 21,2 | 0,18 | 47,6 | 0,173 |
| X, Ом | 34,27 | 0,24 | 20,9 | 0,17 | 46,3 | 0,17 |
| Z_м, Ом | 3,57 | 2,63 | 1,78 | 2 | 3,33 | 2,5 |

Аналіз результатів дослідження показав, що паралельне з'єднання трансформаторів дає змогу ефективно використовувати їх при змінних технологічних процесах з використанням обладнання різної потужності. Послідовне з'єднання дає змогу розширити діапазон регулювання напруги. У випадку, при використанні одного вольтододадового трансформатора з номінальною напругою 220/24 В діапазон регулювання напруги знаходиться в межах від -16,5% до +15,8% із ступенями регулювання (при різних варіантах приєднання обмотки збудження до мережі) -16,5%; -9,9%; 5,12%; +0,4 (0,8)%; +5,04%; +9,8%; +15,8%. При послідовному з'єднанні двох вольтододадових трансформаторів з номінальною напругою 220/24 В діапазон регулювання -33%; -22%; -10,6%; +1,6 (+2,4)%; +10,2%; +21,2%; +29,9%.

Таким чином, використовуючи можливість паралельного і послідовного з'єднання декількох вольтододадових трансформаторів в пристроях регулювання напруги, можна значно розширити межі, збільшити кількість ступенів регулювання і ефективно використовувати ці пристрої для регулювання напруги мережі електрообладнання різної потужності.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи на тему «Автоматизація процесу первинної обробки молока на ФГ «Ювента»» було досягнуто поставлену мету - підвищення ефективності виробництва шляхом впровадження сучасних автоматизованих рішень у процес первинної обробки молока.

На основі аналізу існуючого стану виробництва на фермерському господарстві «Ювента» встановлено, що значна частина технологічних операцій виконується вручну або із застарілими технічними засобами, що призводить до втрат сировини, зниження стабільності якості та неефективного використання ресурсів.

У роботі виконано:

- огляд сучасних рішень у сфері автоматизації молочної промисловості, зокрема щодо первинної обробки сировини;
- визначено ключові параметри технологічного процесу, які підлягають контролю;
- розроблено структурну та функціональну схему автоматизованої системи керування;
- досліджена електрична мережа молочного комплексу та розроблені заходи по розширенню меж регулювання напруги;
- розраховані електричні навантаження, обґрунтовані та вибрані джерела живлення;
- модернізована система автоматичного керування тепло-холодильною установкою.

З технічної точки зору, забезпечено такі показники: час регулювання $t_p = 1,3$ с, перегулювання $\delta = 0,49$, ступінь затухання 0,26. Забезпечено плавне регулювання швидкості. Застосування ЕП з ТПН дало зниження витрат на електроенергію.

Отже, впровадження автоматизованої системи на ФГ «Ювента» сприятиме підвищенню продуктивності, поліпшенню якості молочної продукції, а також забезпечить відповідність сучасним вимогам до харчової безпеки та ефективності агровиробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Дідур І.І., Малик І.П. Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості. – Київ: Центр учбової літератури, 2018. – 312 с.
2. ДСТУ 3662:2018. Молоко коров'яче незбиране. Технічні умови.
3. Олійник О.М., Іванченко С.П. Основи проектування автоматизованих систем управління технологічними процесами. – Харків: НТУ "ХП", 2020. – 225 с.
4. Tamime, A. Y. Milk Processing and Quality Management. – Wiley-Blackwell, 2009. – 344 p.
5. Мацюк О.М. Мікропроцесорна техніка та програмування в системах автоматизації. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. – 198 с.
6. FAO. Milk Processing Guide. – Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. Available: <https://www.fao.org/dairy-production-products>
7. Закон України «Про безпечність та якість харчових продуктів». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97>.
8. Ковальчук В.П. Автоматизація сільськогосподарських процесів: навч. посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 184 с.
9. Holman, J.P. Automation and Control in Food Processing. – CRC Press, 2017. – 280 p.
10. Для енергетиків та інженерів з автоматизації. Загальний каталог. Режим доступу: <https://www.svaltera.ua/download-catalog/>
11. Промислове електрообладнання - Енерджі груп інвест. Режим доступу: https://220-energy-380.com/ua/g651966-silovye-tiristory?srsltid=AfmBOoorNh0Pt_o4w23PrMJU25i3w_WFGiVFMbYj2ldurrkYrBEhnJ4p
12. Smith, G. Introduction to Food Process Engineering. – Springer, 2011. – 472 p.

13. Enright, J. B., Sadler, W. W., & Thomas, R. C. (1997). Automated Control and Monitoring of Thermal Processing Using High Temperature, Short Time Pasteurization. *Journal of Dairy Science*.
14. Comparison of Mechanized and Automated Technologies in the Scope of Cumulative Energy in Sustainable Milk Production. *MDPI Sustainability*.
15. Гаврилюк В.І. «Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості». — Київ: Вища школа, 2019. — 320 с.

ДОДАТКИ

4. TECHNICAL RECOMMENDATIONS AND MEASURES FOR IMPROVING THE ELECTRICITY NETWORK OF THE FG "YUVENTA"

4.1 Analysis of the quality of electricity in the distribution network and the impact of its quality on the operation of electricity consumers

One of the important tasks of electrification is to improve the quality of electricity transmitted to consumers. First of all, this concerns such a parameter as voltage deviation, since not only the efficiency of the operation of electricity receivers but also the economic indicators of the electrical network as a whole depends on it. Relative voltage deviations reduce the service life of insulation, worsen the performance of machines and mechanisms.

It is especially important to ensure the required voltage value in distribution networks in places where electricity consumers are connected.

Specific features of the implementation of distribution networks (low specific load densities, network separation and mutual distance of electricity receivers with different consumption modes) significantly complicate the solution of this problem. Ensuring the quality of electricity for consumers in such networks is impossible without voltage regulation using special devices, i.e. its forced change at individual points of the network.

However, with a large number of electricity consumers of various composition, voltage regulation only in the network power supply center (central regulation) does not give positive results. For distribution networks, it is advisable to use a system of various devices, distributing them along the network to provide consumers with technically permissible voltage deviation values.

When normalizing electricity quality indicators by the voltage deviation parameter in the design object, technical requirements are first adopted that ensure normal and long-term operation of electrical equipment. These requirements

include: ensuring the required speed of rotation of electric motors, the magnitude of the rotor and stator currents of electric motors; power of the luminous flux of incandescent lamps and a number of others. Failure to meet these requirements causes a deterioration in the technical parameters of electrical consumers and, as a result, a decrease in the economic efficiency of using electrical equipment. In some cases, failure to meet the technical requirements for voltage quality leads to direct losses during the operation of electrical equipment. Therefore, each group of electricity receivers is characterized by its own voltage change limits, taking into account technical and economic features.

The impact of voltage deviation on the technical and economic indicators of electrical receivers depends on their type, load and production and technological scheme of use. Voltage deviation causes additional losses in paying for electricity.

The main group of electrical receivers is made up of asynchronous electric motors. With prolonged operation at reduced voltage, their service life is significantly reduced.

All this indicates that losses during the operation of electrical equipment significantly depend on voltage deviation. Thus, improving the quality of electricity by the voltage deviation parameter provides a reduction in costs, which include both energy indicators and labor and current cost savings.

4.1.1 Tasks of voltage regulation in the power grid and technical means for this

The tasks of voltage regulation in the power grid are: selection of regulation means, regulation stages, location of installation of relevant devices in the network. In this case, it is necessary to fulfill both technical requirements, in accordance with current standards, and to provide economically advantageous solutions.

It should be borne in mind that the tasks of voltage regulation are provided not only by regulating, but also by compensating devices. The latter must ensure the conditions for the balance of reactive power at the desired voltage values, as

well as help change the voltage regime and increase the efficiency of the operation of power grids. Therefore, the tasks of voltage regulation, power compensation and its distribution across the power grid are interrelated.

One of the methods of local voltage regulation in rural networks of 0.38 kV is the use of step-up transformers, with which you can increase and decrease the voltage. The secondary (series) winding of the step-up transformer is connected between the power source and the load, the primary (excitation winding) is connected to the line or phase voltage of the network. Standard transformers manufactured by domestic industry for voltages of 380/36, 380/24, 220/24, 220/12 V can be used as step-up transformers.

4.1.2 Calculation of step-up transformer parameters

Step-up transformer parameters include active and reactive (inductive) resistances [11].

The parameters of the primary winding of two transformers with a rated voltage of 220/24/12 V are determined as follows.

The active resistance at constant voltage is:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{1,2} = 10 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

The current in the primary winding is:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{7}{10}} = 0,84 \text{ A} \quad U=30 \text{ B.} \quad (4.2)$$

The inductive reactance is:

$$X_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{30}{0,84} = 35,7 \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

The reactance is:

$$X_1 = \sqrt{X_L^2 - R_1^2} = \sqrt{35,7^2 - 10^2} = 34,27 \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

The mutual inductance resistance is defined as follows:

$$Z_M = \frac{U_2}{I_1} = \frac{3}{0,84} = 3,57 \text{ OM.} \quad (4.5)$$

The parameters of the primary winding of step-up transformers with a rated voltage of 220/24 V are determined in the following sequence:

The active resistance is:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{1,35} = 3,7 \text{ OM.} \quad (4.6)$$

The current in the primary winding is:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5,2}{3,7}} = 1,18 \text{ A.} \quad (4.7)$$

The inductive resistance of the winding is:

$$X_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{25}{1,18} = 21,2 \text{ OM.} \quad (4.8)$$

The reactance of the winding is:

$$X_1 = \sqrt{X_L^2 - R_1^2} = \sqrt{21,2^2 - 3,7^2} = 20,9 \text{ OM.} \quad (4.9)$$

The mutual induction resistance is:

$$Z_M = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2,1}{1,18} = 1,78 \text{ OM.} \quad (4.10)$$

Calculations were performed similarly for other transformers.

Analysis of the research results showed that parallel connection of transformers allows them to be effectively used in variable technological processes using equipment of different power. Serial connection allows you to expand the voltage regulation range. In the case of using one step-up transformer with a nominal voltage of 220/24 V, the voltage regulation range is in the range from -16.5% to +15.8% with regulation steps (with different options for connecting the excitation winding to the network) -16.5%; -9.9%; 5.12%; +0.4 (0.8)%; +5.04%; +9.8%; +15.8%. When connecting two step-up transformers with a nominal

voltage of 220/24 V in series, the regulation range is -33%; -22%; -10.6%; +1.6 (+2.4)%; +10.2%; +21.2%; +29.9%.

Thus, using the possibility of parallel and serial connection of several step-up transformers in voltage regulation devices, it is possible to significantly expand the limits, increase the number of regulation stages and effectively use these devices to regulate the voltage of the network of electrical equipment of various powers.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ
КОНДРАТЮКА»

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**Автоматизація процесу первинної обробки молока на
ФГ «Ювента»**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Р. С. БІЛАН

Керівник:

К.Т.Н.

С.Є. ІГНАТЬЄВ

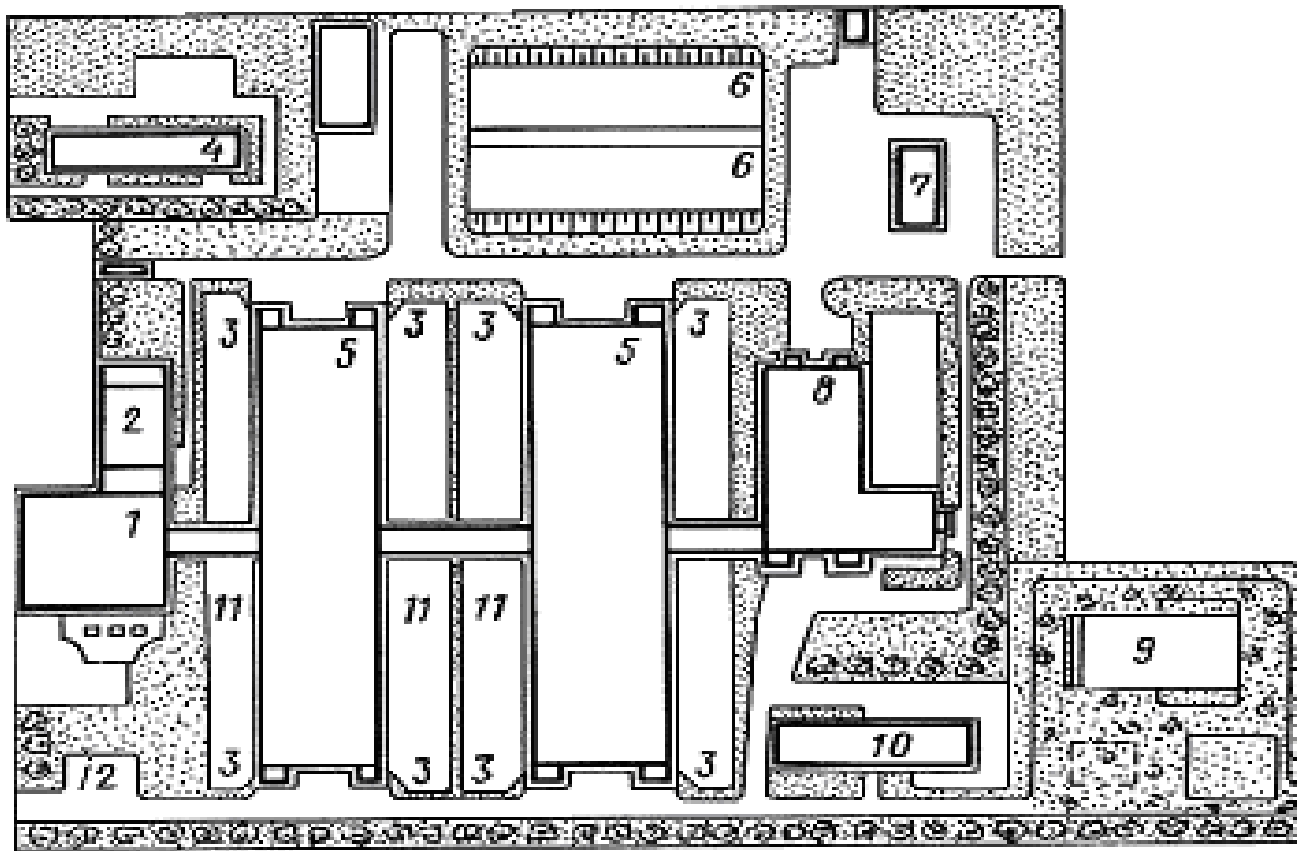
Полтава 2025

Актуальність роботи

зумовлена необхідністю підвищення продуктивності, забезпечення стабільної якості молока, зменшення витрат на виробництво та впровадження сучасних інноваційних технологій у молочну галузь фермерського господарства.

Метою даної роботи бакалавра

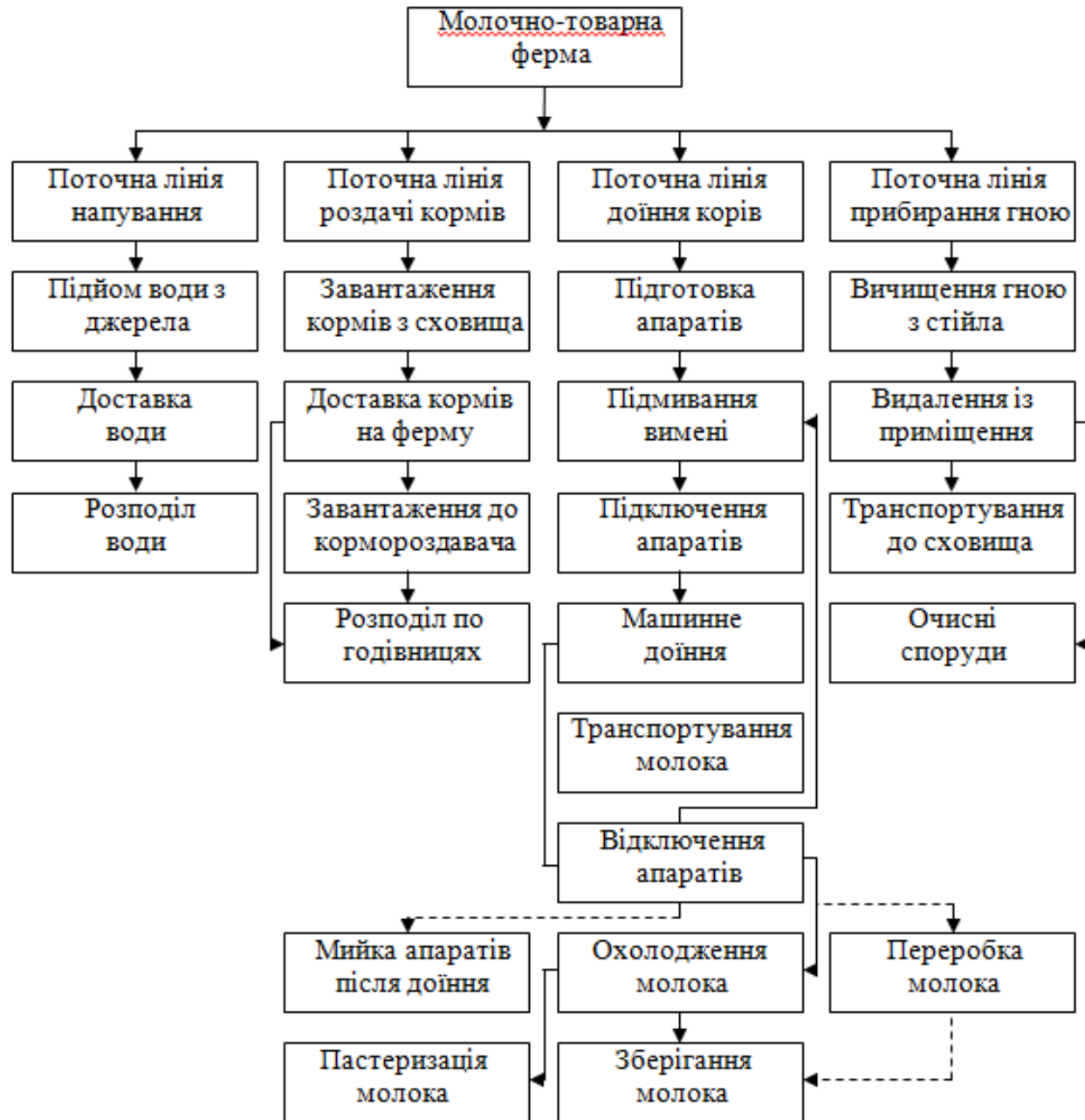
є розробка та впровадження комплексної системи автоматизації первинної обробки молока на ФГ «Ювента», яка включає вибір оптимального обладнання та проектування системи управління й контролю технологічних процесів.

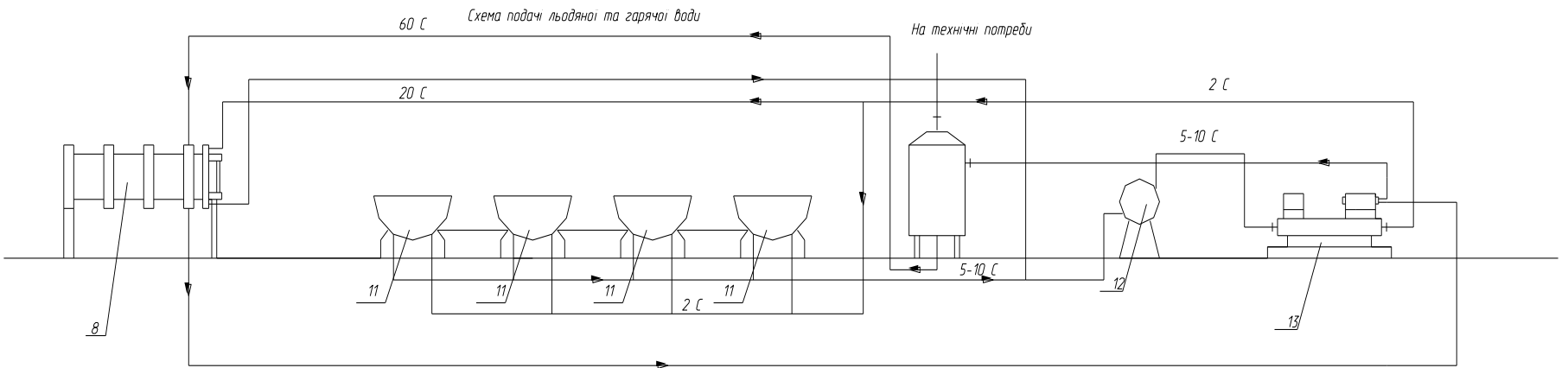
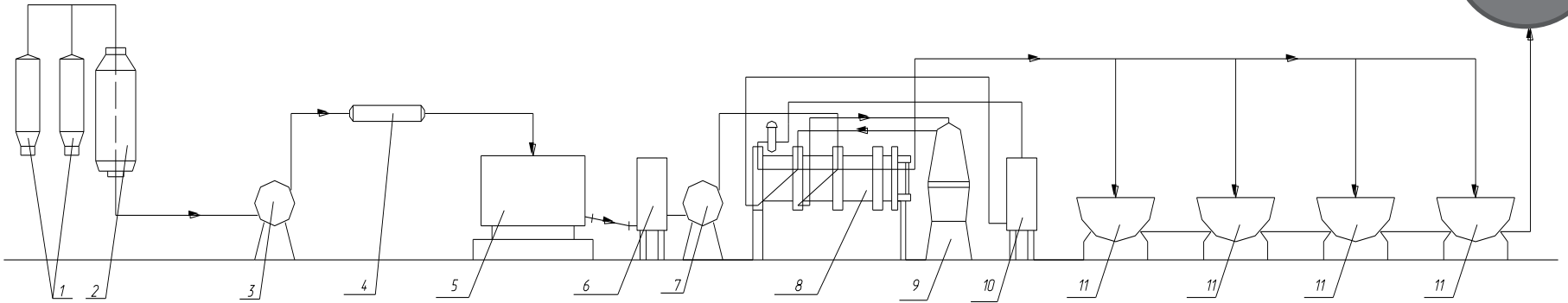


Генеральний план молочного комплексу ФГ «Ювента»:

- 1 - доїльно-молочний блок (цех); 2 - ветсанпропускник; 3 - —вигульні площадки; 4 - котельня; 5 - корівники на 400 голів; 6 - сінажні траншеї; 7 - кормоцех; 8 –родильне відділення; 9 - гноєсховище; 10 - стаціонар та ізолятор; 11 - сполучувальні галереї; 12 - площадка для відвантаження скота

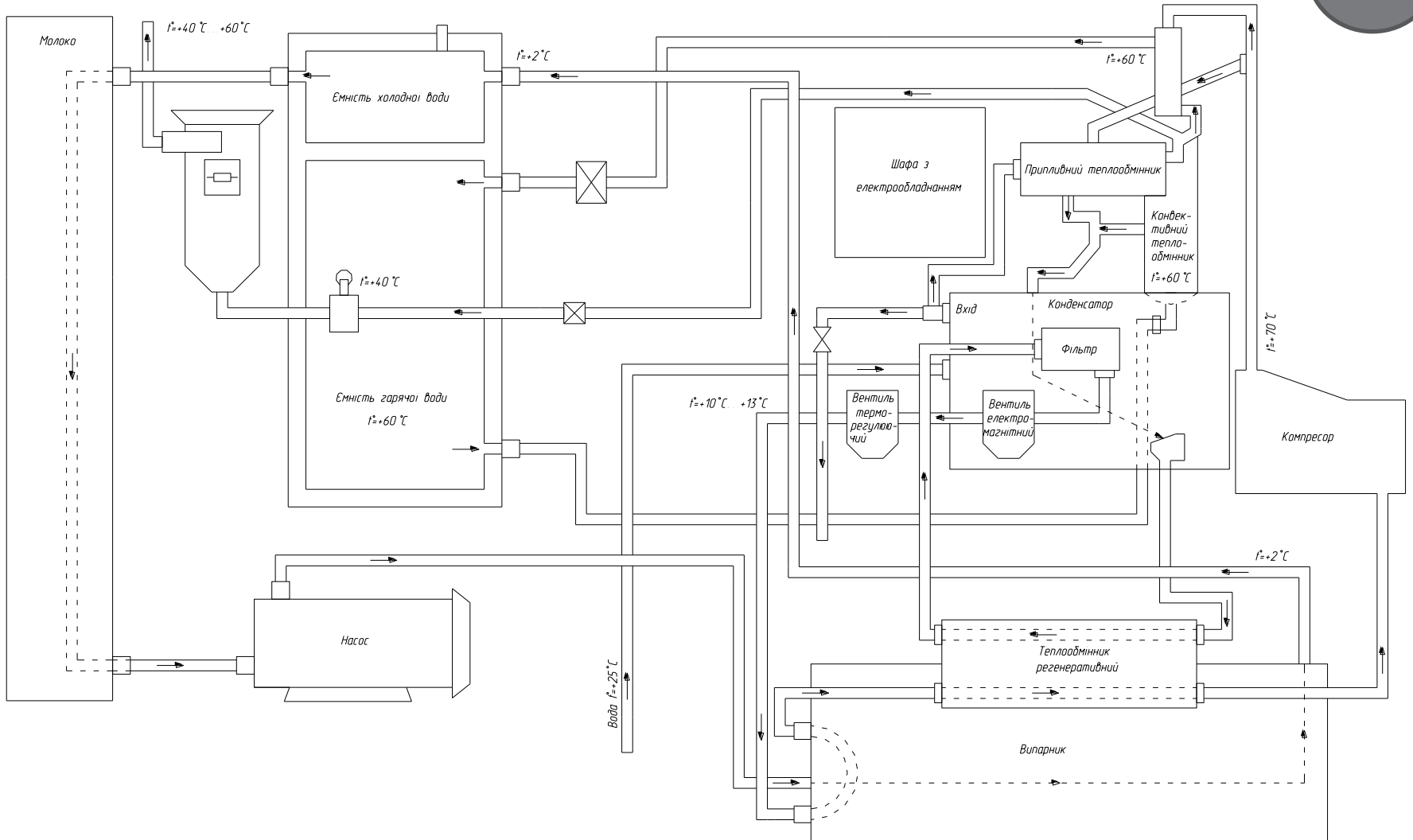
**Технологічна
схема
виробництва
молока ФГ
«Ювента»**





Технологічна схема обробки молока:

1-доїльні апарати; 2-молокозбиральний резервуар; 3-7-молочні насоси; 4-фільтр; 5-молокоприймальний бак; 6-зрівнювальний бак; 8-плистинчатий теплообмінник; 9-сепаратор-очисник; 10-молокозбиральний резервуар; 11-резервуари для зберігання молока; 12-насос для води; 13-теплохолодильна установка.



Технологічна схема теплохолодильної установки

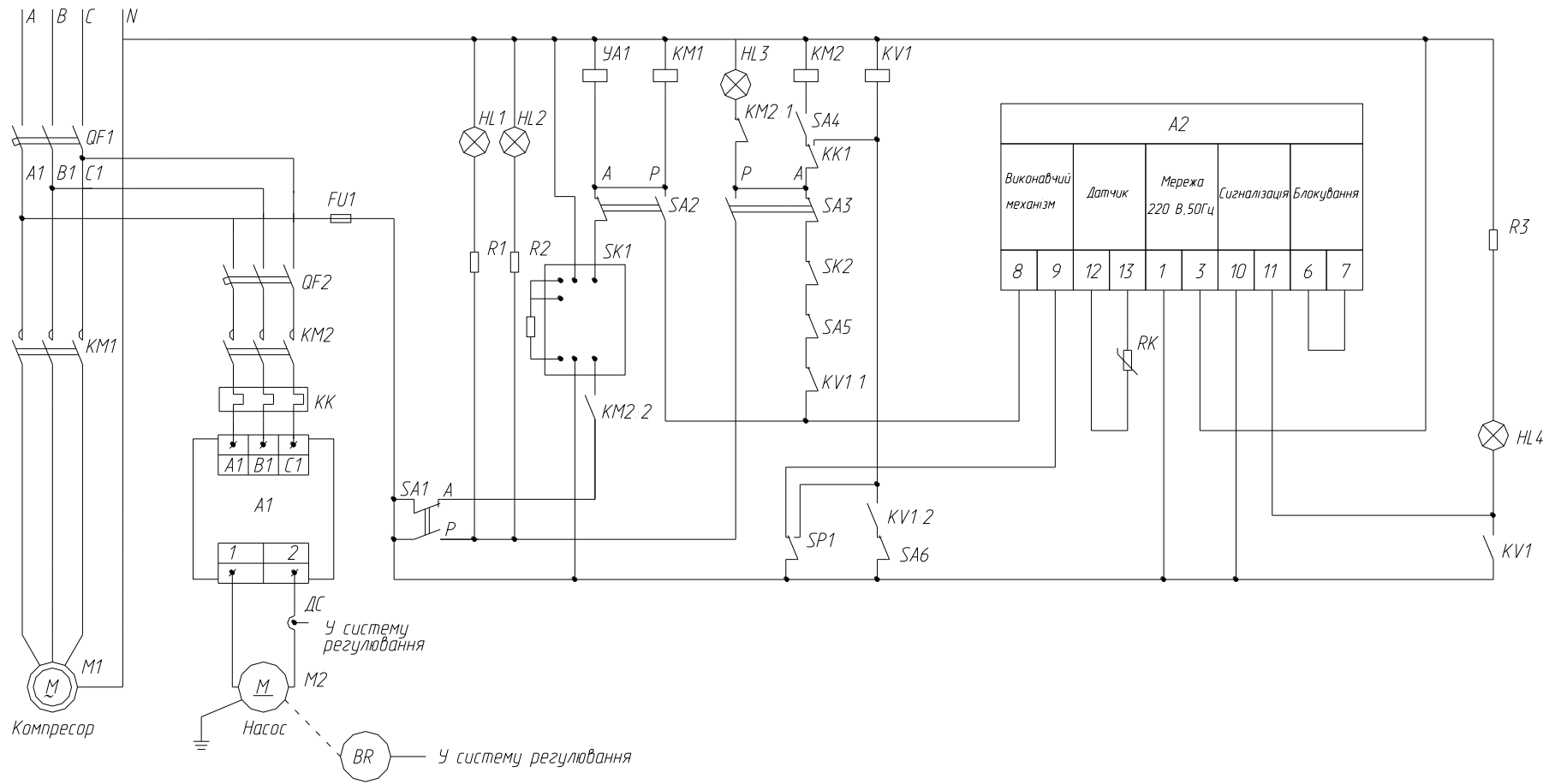
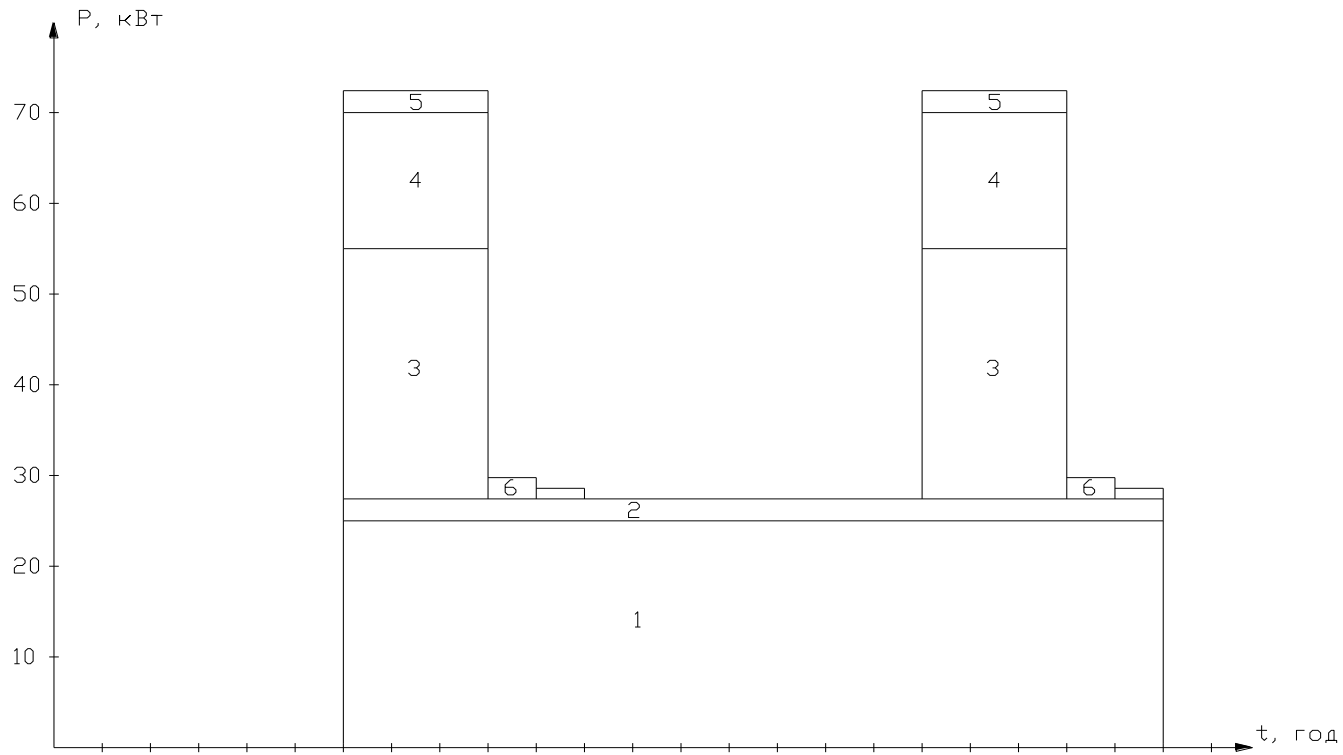


Схема електрична принципова керування холодильною установкою



Добовий графік
навантажень

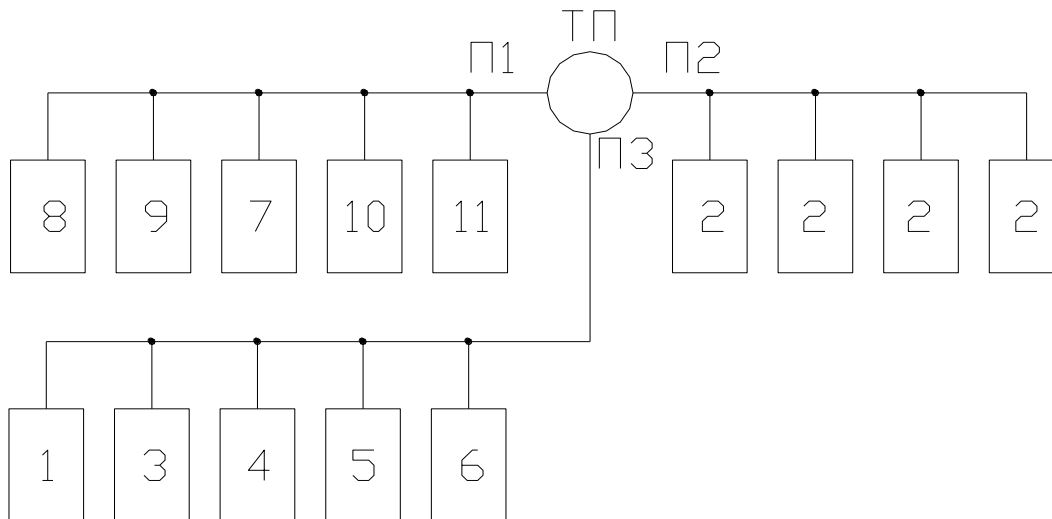


Схема
розподілення і
електропостачан
ня споживачів

Схема регулятора струму

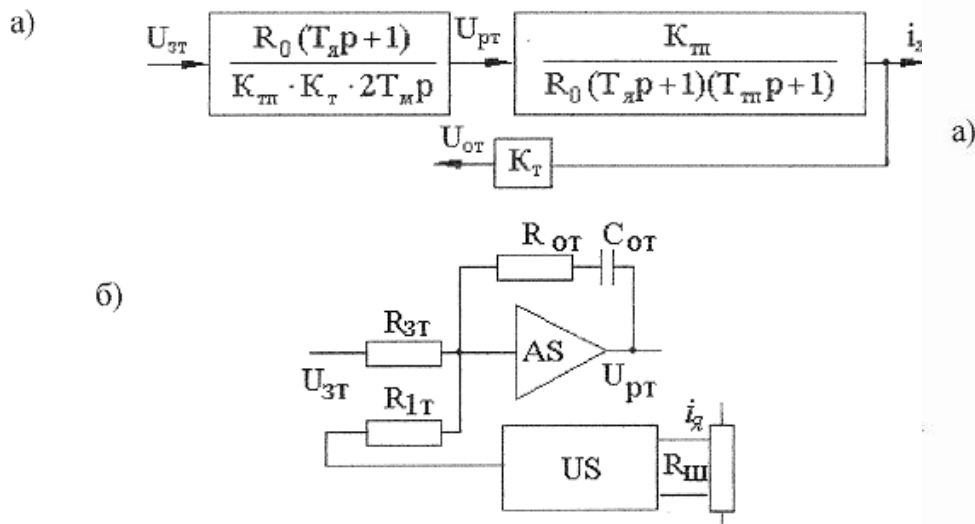
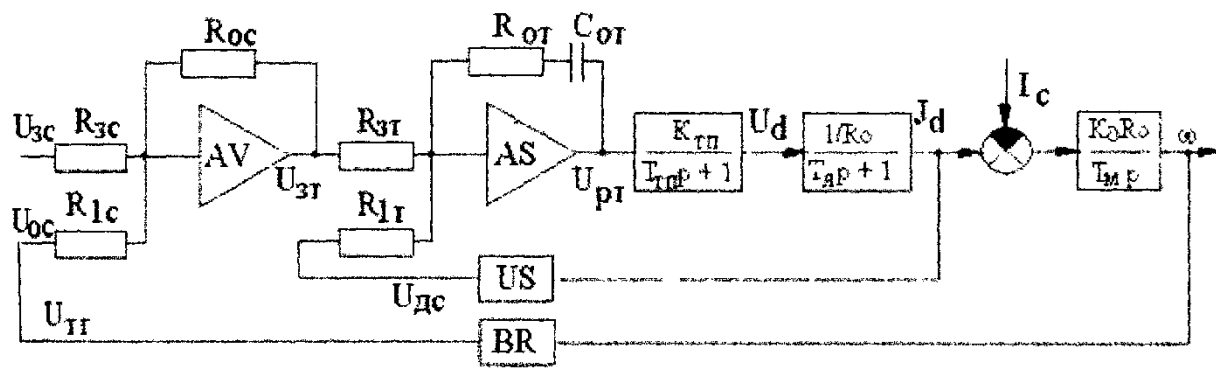
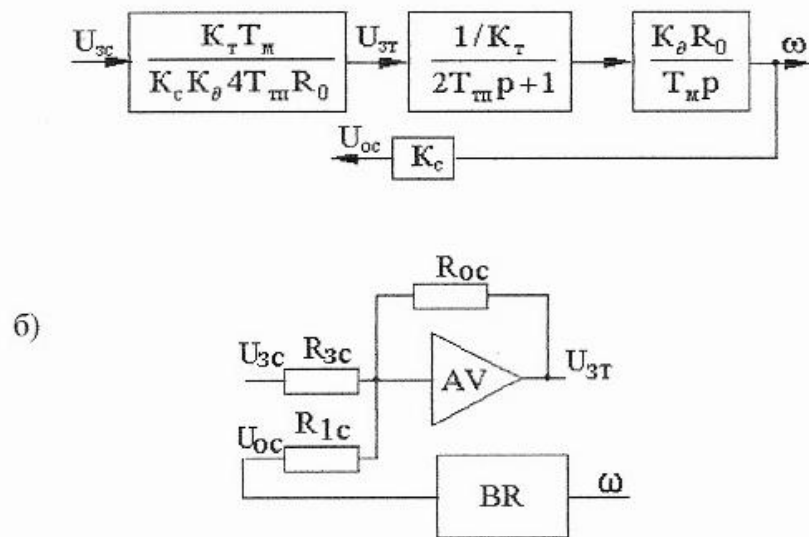
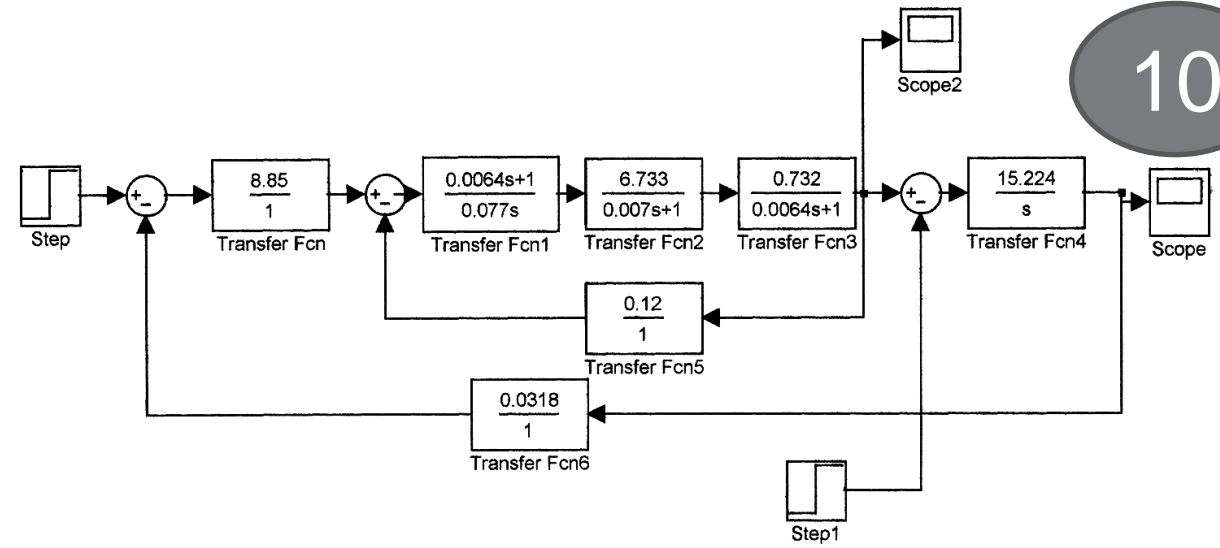


Схема регулятора швидкості

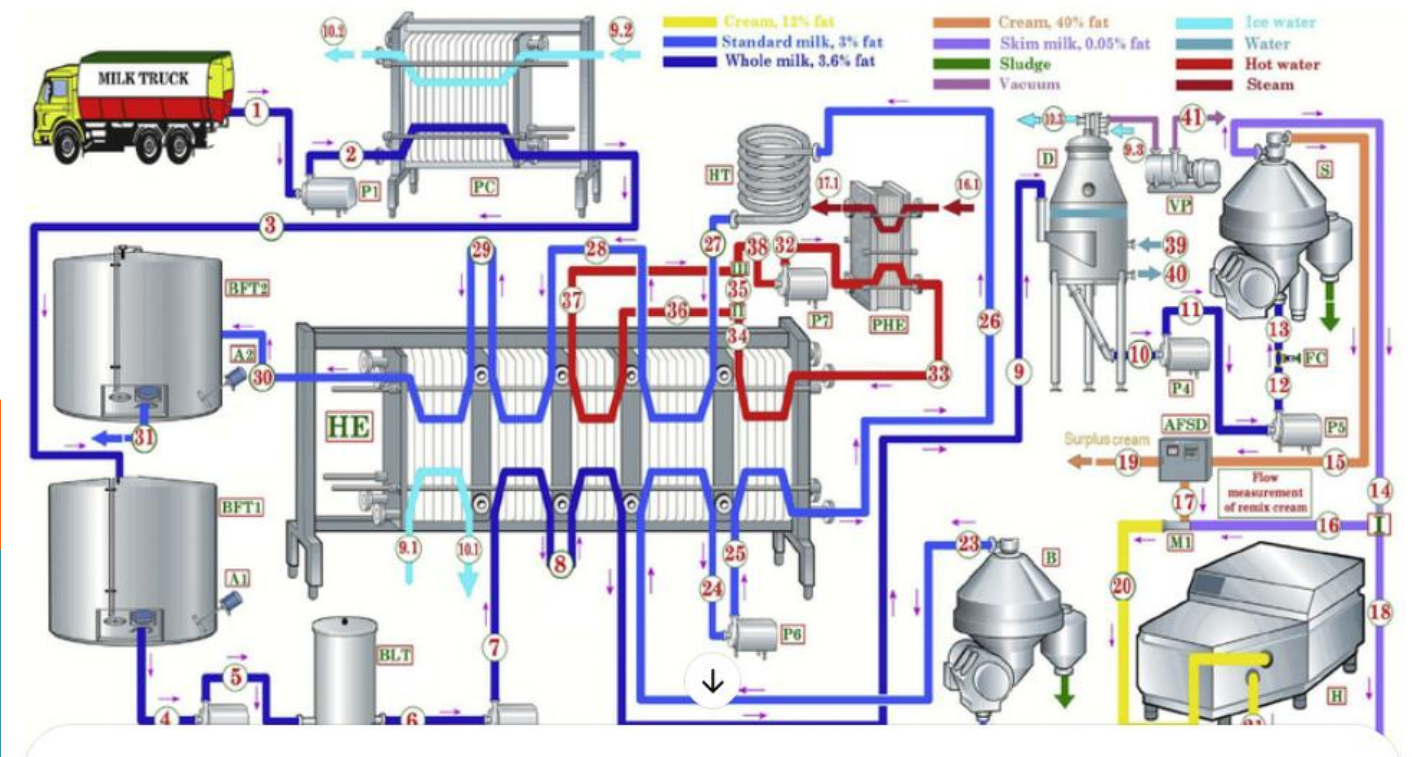


Розрахункова
схема системи
регулювання

Структурна схема системи автоматичного регулювання



Удосконалена схема технологічного процесу первинної обробки



У ході виконання бакалаврської роботи на тему «Автоматизація процесу первинної обробки молока на ФГ «Ювента»» було досягнуто поставлену мету - підвищення ефективності виробництва шляхом впровадження сучасних автоматизованих рішень у процес первинної обробки молока.

На основі аналізу існуючого стану виробництва на фермерському господарстві «Ювента» встановлено, що значна частина технологічних операцій виконується вручну або із застарілими технічними засобами, що призводить до втрат сировини, зниження стабільності якості та неефективного використання ресурсів.

У роботі виконано:

огляд сучасних рішень у сфері автоматизації молочної промисловості, зокрема щодо первинної обробки сировини;

визначено ключові параметри технологічного процесу, які підлягають контролю; розроблено структурну та функціональну схему автоматизованої системи керування;

досліджена електрична мережа молочного комплексу та розроблені заходи по розширенню меж регулювання напруги;

розраховані електричні навантаження, обґрунтовані та вибрані джерела живлення; модернізована система автоматичного керування тепло-холодильною установкою.

З технічної точки зору, забезпечено такі показники: час регулювання $t_p = 1,3$ с, перегулювання, ступінь затухання 0,26. Забезпечено плавне регулювання швидкості. Застосування ЕП з ТПН дало зниження витрат на електроенергію.

Отже, впровадження автоматизованої системи на ФГ «Ювента» сприятиме підвищенню продуктивності, поліпшенню якості молочної продукції, а також забезпечить відповідність сучасним вимогам до харчової безпеки та ефективності агровиробництва.