

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ І РОЗРАХУНОК РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО  
РОЗРАХУНКОВО ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ  
«КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»

для студентів спеціальності 7.050702  
«Електричні машини і апарати»  
денної та заочної форм навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою радою  
НТУ «ХП»,  
протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_

Харків  
НТУ «ХП»  
2006

Взаємозамінність і розрахунок розмірних ланцюгів в електричних машинах [Електронний ресурс] : навч. посібник : для студ. машинобудівних спец. денної та заочної форм навчання / О.С. Рабешко // Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – 25 с.

Укладач: О.С. Рабешко

Рецензент А.Г. Мірошніченко

Кафедра електричних машин

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Мета методичних вказівок

У спеціальних курсах з конструювання, технології виготовлення і ремонту електричних машин студенти-електромеханіки спеціальності 7.092206 – «Електричні машини та апарати» систематично торкаються питань, пов'язаних з інтенсифікацією, автоматизацією і комплексною механізацією виробничих процесів, підвищенням якості й надійності електричних машин. Ці питання можуть бути успішно вирішені в умовах взаємозамінного виробництва, обов'язковою умовою реалізації якого є дотримання норм на всі параметри виробів, в тому числі геометричних (розміри, форма і таке інше), які забезпечуються стандартизацією і удосконаленням оброблюючого устаткування та виміральної техніки.

Однією з важливих складових системи взаємозамінності є стандарти Єдиної системи допусків і посадок (ЄСДП), вивчення якої є обов'язковим для майбутніх спеціалістів, що будуть займатися проектуванням, виготовленням та ремонтом електричних машин.

Основна мета даних методичних вказівок – навчити студентів користуватися стандартами ЄСДП і правильно визначати допуски на деталі електричної машини, що проектується, з урахуванням її функціонального використання. В даних вказівках цього досягають на прикладі виконання курсової роботи – «Розрахунки розмірних ланцюгів в електричних машинах».

Дані методичні вказівки можуть бути теж використані студентами денного і заочного навчання при виконанні курсових проектів по електричним машинам постійного і змінного струму, випускних бакалаврських робіт і дипломних проектів на здобуття кваліфікації спеціаліста або магістра.

Пояснювальна записка

У «Вступі» пояснювальної записки до курсової роботи слід коротко відмітити особливу роль взаємозамінності в підвищенні якості продукції електромашинобудування та інтенсифікації його виробництва.

Звернути увагу на зв'язок взаємозамінності з організаційно-технічними принципами організації виробництва і його спеціалізацією, кооперуванням, комплексною механізацією і автоматизацією.

Охарактеризувати сучасний стан і завдання стандартизації в електромашинобудуванні.

Вказати також на мету проведення в курсовій роботі розрахунків конкретного розмірного ланцюга.

В «Основній частині» змісту пояснювальної записки привести розрахунки заданого розмірного ланцюга електричної машини, виконані способом однакового квалітету і двома методами: максимуму–мінімуму та імовірісним.

Оформлення пояснювальної записки виконати на аркушах формату А4 (210x297) відповідно до вимог СТП НТУ «ХП». Розрахунки ілюструвати зображеннями повздожнього розрізу електричної машини (рисунок 4.1) і схеми розмірного ланцюга (рисунок 4.2). Номінальні розміри на схемі ланцюга показати з допусками.

#### Порядок виконання робіт

Ознайомитись з основними відомостями про взаємозамінність (розділ 1), поняттями і умовними зображеннями параметрів ЄСДП (розділ 2), поняттями і методами рішення ланцюгів в електричних машинах (розділ 3).

Одержати від керівника проектування один із варіантів схеми розмірного ланцюга і номінальні дані його складових ланок, які наведені в додатку до цих вказівок.

Провести обґрунтування вибору заданого розмірного ланцюга електричної машини, скласти його схему і виконати розрахунки відповідно до розпорядку і методики, приведеної в розділі 4 і викладеної на прикладі розрахунків одного із варіантів розмірного ланцюга «А» асинхронного двигуна (рисунок 4.1).

Для упорядкування розрахунків вихідні дані, результати проміжних і кінцевих рішень занести в таблиці (дивись таблицю 4.4. і 4.5). Розрахунки імовірісним методом за рекомендацією керівника проектування виконати для одного або декількох значень процента ризику  $P$  (п.п. 4.3.1.2).

Після закінчення розрахунків провести порівняльну характеристику кінцевих результатів, одержаних методом максимуму-мінімуму та імовірісним.

## 1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ

Взаємозамінність – це властивість незалежно виготовлених деталей займати своє місце в складальній одиниці без попереднього механічного або ручного оброблення (підгонки) при складанні, при збереженні всіх вимог до працездатності виробів у цілому [1, 2].

Взаємозамінність забезпечується комплексом розрахункових, конструкторських і технологічних заходів.

Розрахунки деталей за всіма якісними показниками повинні бути узгоджені з вимогами до кінцевого виробу – електричної машини. Важливе значення мають хімічні, фізичні та механічні властивості застосованих матеріалів, стабільність розмірів і форми деталей та півфабрикатів.

При конструюванні машини необхідно широко застосовувати загальнотехнічні норми і стандарти, а також уніфіковані і стандартні деталі, складальні одиниці і комплектуючі вироби, забезпечувати технологічність конструкцій, погоджувати точність виготовлення деталей з умовами їх функціонування.

До технологічних заходів можна віднести правильно розроблену і точно видержану технологію, відповідність технологічному процесу устаткування, приладів, ріжучого і вимірюючого інструмента, перевірку виробів за розмірами, твердістю, зносостійкістю, хімічним складом.

Взаємозамінність сприяє впровадженню у виробництво спеціальних верстатів, пристосувань, ріжучого і вимірюючого інструмента, що забезпечує зниження вартості і підвищення якості виробів.

Розвиток взаємозамінності стимулює широку стандартизацію різноманітних виробів масового використання – напівфабрикатів, сортового прокату, кріпильних деталей, електродвигунів, редукторів, приладів і т.ін. Це, в свою чергу, сприяє розвитку спеціалізації і кооперуванню підприємств.

Взаємозамінність спрощує і прискорює ремонт електричних машин.

Деталі і вузли будуть взаємозамінювані тільки тоді, коли їх розміри, форма, фізичні властивості матеріалів та інші кількісні і якісні характеристики знаходяться в заданих границях. Для відповідальних вузлів необхідно також забезпечити оптимальну якість поверхні (чистість, наклеп, залишкове напруження, текстура матеріалів).

Для практичного здійснення принципу функціональної взаємозамінності виробів необхідна чітка система конструкторської, технологічної, метрологічної і експлуатаційної документації.

Взаємозамінність може бути повною та неповною. Рівень взаємозамінності виробництва може характеризуватися коефіцієнтом взаємозамінності, рівним відношенню трудомісткості виготовлення взаємозамінюваних деталей і вузлів до загальної трудомісткості виготовлення виробу. Значення цього коефіцієнта може бути різним. Але ступінь його приближення до одиниці є об'єктивним показником технічного рівня виробництва.

## 2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ДОПУСКИ І ПОСАДКИ

Однією з основних умов здійснення взаємозамінності при виготовленні електричних машин є забезпечення точності деталей, вузлів і комплектуючих виробів за геометричними параметрами, до яких належить: точність розмірів або нормовані допуски, характер спряження деталей при складанні (посадка), точність форми і розташування поверхні, чистість (шорсткість) і хвилястість поверхні.

Перераховані параметри на сучасному рівні розвитку техніки оцінюються мікронами, і для визначення дійсних їх значень потрібно мати відповідні вимірювальні засоби.

Поверхні бувають такі, що спряжуються, і що не спряжуються.

Поверхні, що спряжуються, – це поверхні, по яких деталі сполучаються між собою в складальні одиниці (вузли).

Поверхні, що не спряжуються (вільні), – це поверхні, які конструктивно не призначені для сполучення з поверхнями інших деталей.

Розміри виражають чисельні значення лінійних величин (довжин, діаметрів і т.ін.) і поділяються на номінальні, дійсні і граничні.

Номінальний розмір ( $D$ ) – розмір, відносно якого визначають граничні розміри і відраховують відхилення.

Дійсний розмір ( $D_r$  – для отвору,  $d_r$  – для вала) – розмір, установлений вимірюванням з допустимою погрішністю.

Граничні розміри – це два гранично допустимі розміри, між якими повинен знаходитись номінальний розмір. Один із граничних розмірів може бути рівним номінальному розміру. Найбільший і найменший граничні розміри визначають для отвору і вала і позначають відповідно –  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  і  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$ .

Відхиленням називають алгебраїчну різницю між дійсним (граничним) розміром і відповідним номінальним розміром. Відхилення можуть мати як від'ємне, так і додатне значення.

Дійсні відхилення

$$\begin{aligned} E_r &= D_r - D, \\ e_r &= d_r - D. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Граничне відхилення дорівнює алгебраїчній різниці граничного і номінального розмірів.

Верхнє граничне відхилення

$$\begin{aligned} ES &= D_{\max} - D, \\ es &= d_{\max} - D. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Нижнє граничне відхилення

$$\begin{aligned} EI &= D_{\min} - D, \\ ei &= d_{\min} - D. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Середнє відхилення

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{ES + EI}{2}, \\ e_m &= \frac{es + ei}{2}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Граничні відхилення, як і граничні розміри, характеризують точність дійсних розмірів і погрішність оброблення деталей.

Допуск ( $TD$  – отвору,  $Td$  – вала) дорівнює різниці найбільшого і найменшого граничних розмірів

$$\begin{aligned} TD &= D_{\max} - D_{\min}, \\ Td &= d_{\max} - d_{\min}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

або абсолютній величині алгебраїчної різниці верхнього і нижнього відхилення

$$\begin{aligned} TD &= ES - EI, \\ Td &= es - ei. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Поле допуску – поле обмежене верхнім і нижнім відхиленням. Поле допуску визначається величиною допуску і його розташуванням відносно номінального розміру (нульової лінії) – рисунок 2.1÷2.3.

Менше за абсолютним значенням відхилення від нульової лінії називають основним.

Точність розмірів визначають допуском. Чим більше розмір, тим більше величина допуску і навпаки. Узагальнення досвіду оброблення деталей на металооброблювальному устаткуванні дозволило встановити зв'язок

між економічно досяжною точністю і номінальними розмірами з допомогою умовної величини – одиниці допуску  $i$ .

Одиниця допуску, мкм, служить базою для визначення стандартних допусків:

1) для розмірів до 500 мм

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D_m} + 0,001 \cdot D_m, \quad (2.7)$$

2) для розмірів від 500 до 10000 мм

$$i = 0,004 \cdot D_m + 2,1, \quad (2.8)$$

де  $D_m$  – середній геометричний розмір інтервалу в мм.

Середній геометричний розмір

$$D_m = \sqrt{D_b \cdot D_M}, \quad (2.9)$$

де  $D_b$  і  $D_M$  – більший і менший розміри інтервалу.

У формулах (2.7) і (2.8) перший доданок враховує погрішність оброблення, а другий – вплив погрішностей замірів і температурних погрішностей.

Квалітет – це сукупність допусків, які мають однакову точність для всіх номінальних розмірів.

Допуск для квалітетів, за деяким винятком, знаходять із формул:

$$\begin{aligned} TD &= a \cdot i, \\ Td &= a \cdot i, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $a$  – число одиниць допуску, яке в границях одного і того ж квалітету має постійну величину.

Системою допусків і посадок для розмірів до 10000 мм встановлено 19 квалітетів: IT0, IT1, IT2, ..., IT17 і в кожному з них по 28 основних відхилень (рисунок 2.1).

В порядку зменшення точності допуски квалітетів умовно визначають IT01, IT0, IT1, IT2, ..., IT17.

Посадка – це характер спряження охоплюючих і охоплених деталей, який визначається величиною одержаних в ньому зазорів і натягів.

Зазором  $S$  називають різницю розмірів отвору і вала, коли розмір отвору більше розміру вала, тобто

$$S = D - d. \quad (2.11)$$

Натягом  $N$  називають різницю розмірів вала і отвору до складання, якщо розмір вала більше розміру отвору, тобто

$$N = d - D. \quad (2.12)$$



Залежно від розміщення полів допусків отвору і вала (рисунок 2.1–2.3) посадки підрозділяють на три групи:

- 1) посадки з зазором;
- 2) посадки з натягом;
- 3) посадки перехідні.

Посадки всіх трьох груп можемо одержати, якщо будемо міняти розміщення полів допусків обох деталей, що спряжуються. Але в технологічному і експлуатаційному відношенні зручніше і вигідніше різноманітні посадки одержувати, в одному разі змінюючи розміщення поля допуску тільки вала – система отвору; а в іншому – змінюючи розміщення поля допуску тільки отвору – система вала. При цьому деталь, у якій розміщення поля допуску не залежить від виду посадки, називають основною деталлю.

В системі отвору основною є обхоплююча деталь, а в системі вала – обхоплена деталь.

Поверхня, що спряжується, в основній обхоплюючій деталі з нижнім нульовим відхиленням ( $EI=0$ ) і поверхня, що спряжується, основної обхопленої деталі з верхнім нульовим відхилення ( $es=0$ ) називають відповідно основним отвором і основним валом.

Посадки в системі отвору (з різними зазорами і натягами) одержують сполученням різних (неосновних) валів з основним отвором, а посадки в системі вала – сполученням різних (неосновних) отворів з основним валом. Необхідні зазори і натяги одержують, змінюючи відхилення неосновних деталей: валів в системі отвору і отворів в системі вала.

### 3 РОЗМІРНІ ЛАНЦЮГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ

Якість електричної машини забезпечується в значній мірі точністю розміщення деталей і вузлів, з яких вона складається. При цьому число операцій, зв'язаних з підгонкою деталей і регулюванням їх положення в процесі складання, повинно зводитися до мінімуму. Зазори, граничні розміри та інші параметри, які координують взаємне положення складальних об'єктів, як правило, залежать від режимів роботи, конструктивних, технологічних і експлуатаційних особливостей машини.

Взаємозв'язок між граничними розмірами і допустимими помилками (допусками) деталей і вузлів машини часто встановлюють за допомогою розрахунків, оснований на теорії розмірних ланцюгів [1, 2].

Розмірний ланцюг (РЛ) – це сукупність взаємозв’язаних лінійних або кутових розмірів (ланок), які утворюють замкнутий контур і безпосередньо беруть участь у визначенні розмірів вихідної (замикаючої) ланки. Розрахунки розмірних ланцюгів дозволяють обґрунтовано позначати допуски на взаємозв’язані розміри деталей і складальних одиниць; полегшують установити раціональну систему постановки розмірів на кресленнях, узгоджену з порядком оброблення деталей і складання електричних машин.

В РЛ один із розмірів називається замикаючим, а всі інші складовими. Замикаючий розмір у порядку виконання технологічних операцій виготовлення деталі або складання вузла є функцією складових розмірів. У більшості випадків замикаючими розмірами складових РЛ є зазори або розміри, які визначають положення однієї деталі відносно другої. Розрізняють лінійні, кутові, площинні і просторові РЛ.

Збільшуюча ланка РЛ – ланка, зі збільшенням якої збільшується замикаюча ланка.

Зменшуюча ланка РЛ – ланка, зі зменшенням якої зменшується замикаюча ланка.

При розрахунках РЛ може вирішуватися пряма і зворотна задача.

При вирішуванні прямої задачі, виходячи із вимог до замикаючої ланки, визначають номінальні розміри, допуски, координати середин полів допусків і граничні відхилення всіх складових ланок РЛ.

При вирішуванні зворотної задачі визначають номінальний розмір, допуск і координату його середини, граничні відхилення замикаючої ланки, знаючи аналогічні параметри складових ланок. Вирішуваннями цієї задачі перевіряється також правильність рішення прямої задачі.

Граничні відхилення номінальних розмірів складових РЛ установлюють, виходячи із прийнятих або намічених до застосування технологічних процесів, виду використаного устаткування і оснастки, метрологічних можливостей (засобів і методів вимірювання), а також використання наявного досвіду проектування і виготовлення аналогічних електричних машин.

Розрахунок РЛ електричних машин може бути виконаний двома методами:

1) методом максимуму – мінімуму, який враховує тільки граничні відхилення складових ланок, та

2) імовірнісним методом, який враховує імовірність різних комбінацій відхилень складових ланок.

У серійних електричних машинах, в яких, як правило, повинна бути забезпечена 100% взаємозамінність деталей, розрахунок РЛ ведеться методом максимуму – мінімуму. В тому випадку коли економічно недоцільне або технічно неможливе виготовлення деталей складових ланок з істотно більшою точністю, ніж це передбачено діючою технічною документацією, розрахунок РЛ ведеться імовірнісним методом.

У даних методичних вказівках у завданнях на курсову роботу даються приклади (дивись додаток), в яких пропонується вести розрахунки РЛ асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою ротора [3, 4].

Ці розрахунки зв'язані з визначенням розмірів і допусків деяких замикаючих ланок, повний перелік яких дається в таблиці 3.1. Деякі із РЛ цієї таблиці є паралельно пов'язані, тобто мають частково спільні складові ланки.

Таблиця 3.1 – Перелік замикаючих ланок розмірних ланцюгів асинхронного двигуна\*

Позначення розмірних ланцюгів	Найменування замикаючих ланок розмірних ланцюгів
1	2
А	1. <u>У повздовжніх площинах (розрізах) двигуна</u>
Б	Відстань від торця упорного виступу підшипникової кришки до торця зовнішнього кільця підшипника
В	Відстань від заплечика виступаючого кінця вала до осі найближчого отвору в лапі ( $L_{31}$ , ГОСТ 4541–70)
Г	Відстань від заплечика виступаючого кінця вала до опорного торця кріпильного фланця ( $L_{39}$ , ГОСТ 4541-70)
Д	Відстань від лобової частини обмотки статора до найближчої точки станини (щита) двигуна.
Е	Відстань від найбільш виступаючої в осьовому напрямку частини ротора, який обертається, до найближчої нерухомої частини (підшипникового щита або кришки).
Е	Відстань від вентилятора зовнішнього обдуву до найближчої частини підшипникового щита і кожуха вентилятора.

Продовження таблиці 3.1

1	2
	<u>2. В поперечних площинах (розрізах) двигуна</u>
Ж	Довжина повітряного зазору.
З	Нерівномірність повітряного зазору.
І	Величина торцевого биття опорного фланця.
К	Величина непаралельності осі обертання вала відносно опорної площини лап.
Л	Величина радіального биття заточки кріпильного фланця відносно осі обертання вала.
М	Величина радіального биття виступаючого кінця вала відносно осі обертання.

#### 4 ПОРЯДОК І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ

##### 4.1 Вихідні дані

4.1.1 Накреслити повздовжній розріз електричної машини і скласти схему лінійного ланцюга, яка повинна бути замкнутою. Установити замикаючу ланку РЛ. Збільшуючі і зменшуючі (замикаючу ланку) ланки позначити стрілками, спрямованими відносно вправо і вліво по відношенню до замикаючої ланки. Провести розрахунок заданого розмірного ланцюга (в даних вказівках для прикладу взяли РЛ «А» – рисунок 4.1 і 4.2). Нижче наводяться розрахунки способом однакового квалітету і двома методами: максимуму–мінімуму та імовірнісним.

Розмірний ланцюг «А» включає в себе ланку – підшипник кочення, точність розмірів якого відома і може бути взята із [5] для 6–го класу точності.

4.1.2 При вирішенні прямої (проектної) і зворотної (перевірочної) задачі необхідно спочатку встановити такі дані:

4.1.2.1 Номінальний розмір замикаючої (вихідної) ланки розмірного ланцюга «А»

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot A_i = (-1) \cdot 31 + (-1) \cdot 4,5 + (+1) \cdot 1,5 + (+1) \cdot 40 + (-1) \cdot 4,5 = 1,5 \text{ мм}, \quad (4.1)$$

де  $i$  – порядковий номер ланки,  $i = 1, 2, 3 \dots m$ ;

$A_i$  – номінальний розмір  $i$ -ої складової ланки (таблиця 4.4);

$\xi_{i(A)}$  – передаточне відношення  $i$ -ої ланки РЛ «А».

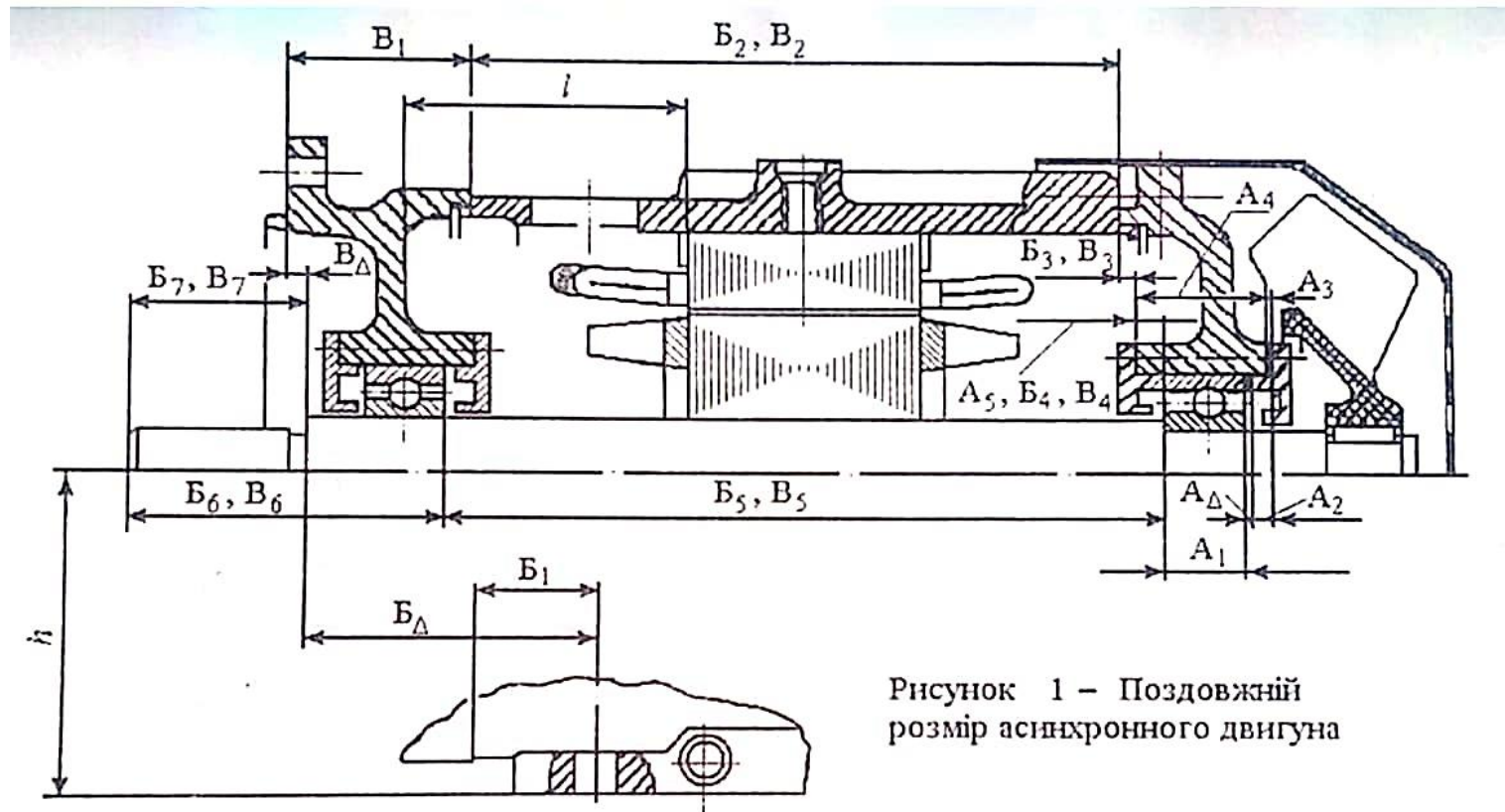


Рисунок 1 – Поздовжній розмір асинхронного двигуна

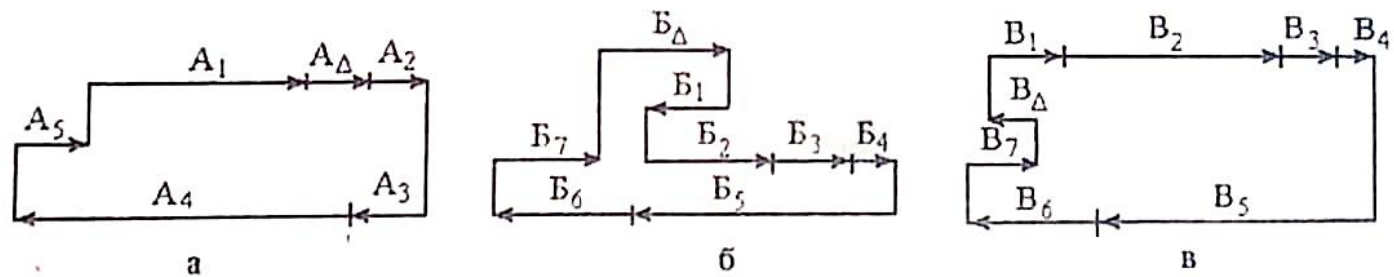


Рисунок 4.2 – Схеми розмірних ланцюгів

Для лінійних РЛ з паралельними ланками  $\xi_i = +1$  для збільшуючих складових ланок і  $\xi_i = -1$  для зменшуючих складових ланок. Для ланок повернутих відносно координатних осей, роль передаточних відношень виконують тригонометричні функції, одержані при проектуванні складових ланок на відповідні координатні вісі.

#### 4.1.2.2 Допуск замикаючої ланки

$$T_{\Delta} = es_{\Delta} - ei_{\Delta} = +125 - (-125) = 250 \text{ мкм}, \quad (4.2)$$

де  $es_{\Delta}$  і  $ei_{\Delta}$  – відповідно верхнє і нижнє граничне відхилення замикаючої ланки, які для вищевизначеного номінального розміру ланки  $A_{\Delta}$  знаходимо задавшись, практично доцільною точністю його виконання за 14 квалітетом (таблиця 4.1).

#### 4.1.2.3 Координата середини поля допуску замикаючої ланки

$$e_{m\Delta} = \frac{es_{\Delta} + ei_{\Delta}}{2} = \frac{125 + (-125)}{2} = 0. \quad (4.3)$$

#### 4.1.2.4 Допуск на розмір ширини кільця шарикопідшипника (ланка $A_1$ )

$$T_1 = es_1 - ei_1 = 0 - (-120) = 120 \text{ мкм}, \quad (4.4)$$

де  $es_1$  і  $ei_1$  – відповідно верхнє і нижнє відхилення розміру шарикопідшипника. Для шарикопідшипників, виготовлених за 6-м класом точності, розмір за шириною кільця у межах 10–50 мм виконується з верхнім відхиленням  $es = 0$  і нижнім  $ei = -120$  мкм [6].

#### 4.1.2.5 Координата середини поля допуску шарикопідшипника

$$e_{m1} = \frac{es_1 + ei_1}{2} = \frac{0 + (-120)}{2} = -60 \text{ мкм}. \quad (4.5)$$

## 4.2 Розрахунок розмірного ланцюга методом максимуму-мінімуму

### 4.2.1 Вирішення прямої (проектної) задачі

4.2.1.1 При відомих допусках і граничних відхиленнях замикаючої і шарикопідшипникової ланок вирішення прямої задачі зводиться до визначення допусків і граничних відхилень решти складових ланок РЛ. При цьому вважається, що номінальні розміри цих ланок відомі, а допуски на всі або більшість із них будемо визначати способом однакового квалітету точності.

#### 4.2.1.2 Визначаємо середнє число одиниць допуску складових ланок

$$a = \frac{T_{\Delta} - T_1}{\sum_{i=1}^{(m-1)-q} i_i} = \frac{250 - 120}{0,73 + 0,55 + 1,56 + 0,73} = 36,4, \quad (4.6)$$

де  $q$  – число складових ланок з відомими допусками, тут для РЛ «А»  $q = 1$ ;  
 $i_i$  – одиниця допуску  $i$ -тої складової ланки, яка виражає залежність допуску від номінального розміру і є базою для визначення стандартних величин допусків. Величини  $i_i$ , мкм, для номінальних розмірів до 500 мм порашовано за формулою (2.7) і зведено в таблицю 4.2, з якої беремо її для підстановки у формулу (4.6).

У формулі (4.6) і наступних запис границі  $(m - 1) - q$  необхідно читати так: підсумовувати дані всіх ланок крім останньої замикаючої і  $q$ -відомих складових.

Установимо за таблицею 4.3 квалітет на виконання всіх або більшості розмірів складових ланок в залежності від числа одиниць допуску  $a_c$ , найближчого до  $a$ .

Оскільки  $a_c$  взагалі не дорівнює числу  $a$ , то одну із ланок необхідно вибирати як коригуючу. В даному випадку як коригуючу приймаємо просту в виконанні ланку  $A_2$ .

4.2.1.3 Узнавши квалітет ІТ за таблицею 4.1, визначаємо допуски складових ланок  $T_i$  (крім коригуючої і відомих) в залежності від їх номінальних розмірів.

4.2.1.4 Визначаємо допуск коригуючої ланки

$$T_2 = T_{\Delta} - \sum_{i=1}^{(m-1)-i_k} T_i = 250 - 120 - 14 - 39 - 18 = 59 \text{ мкм}, \quad (4.7)$$

де  $(m - 1) - i_k$  – границя без замикаючої і коригуючої ланки.

4.2.1.5 Визначаємо граничні відхилення складових ланок (за винятком відомої  $A_1$  і коригуючої  $A_2$ ).

Приймаємо граничні відхилення складових ланок рівними допуску на виготовлення. Знак граничних відхилень назначаємо для обхоплюючих розмірів як для основного отвору, а для обхоплених розмірів – як для основного вала.

4.2.1.6 Визначаємо середнє відхилення поля допуску коригуючої ланки

$$e_{m2} = \frac{e_{m\Delta} - \sum_{i=1}^{(m-1)-i_k} \xi_i \cdot e_{mi}}{\xi_2} = \quad (4.8)$$

$$= \frac{0 + (-1) \cdot 60 + (+1) \cdot 7 + (+1) \cdot 19,5 + (-1) \cdot 9}{-1} = 42,5 \text{ мкм},$$

де  $e_{mi}$  – середнє відхилення полів допусків складових ланок, які визначаємо із формул:

$$e_{mi} = EI_i + \frac{T_i}{2} \quad \text{або} \quad e_{mi} = es_i + \frac{T_i}{2}. \quad (4.9)$$

Відповідно до п.п. 2.2.1.5  $EI_i = 0$  і  $es_i = 0$ .

4.2.1.7 Визначаємо граничні відхилення коригуючої ланки

$$\begin{aligned} es_2 &= e_{m2} + \frac{T_2}{2} = 42,5 + \frac{59}{2} = 72 \text{ мкм}, \\ ei_2 &= e_{m2} - \frac{T_2}{2} = 42,5 - \frac{59}{2} = 13 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2 Вирішення зворотної (перевірчої) задачі

4.2.2.1 Вирішення зворотної задачі зводиться до визначення номінального розміру, допуску і граничних відхилень замикаючої ланки за відомими розмірами і граничними відхиленнями складових ланок. Номінальний розмір замикаючої ланки  $A_\Delta$  визначаємо за формулою (4.1).

4.2.2.2 Визначаємо допуск замикаючої ланки

$$T_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \cdot T_i = 120 + 59 + 14 + 39 + 18 = 250 \text{ мкм}. \quad (4.11)$$

4.2.2.3 Визначаємо середнє відхилення поля допуску замикаючої ланки

$$\begin{aligned} e_{m\Delta} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot e_{mi} = (-1) \cdot (-60) + (-1) \cdot (+42,5) + (+1) \cdot (-7) + \\ &+ (+1) \cdot (-19,5) + (-1) \cdot (-9) = 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

4.2.2.4 Визначаємо відповідно верхнє і нижнє граничне відхилення номінального розміру замикаючої ланки

$$\begin{aligned} es_\Delta &= e_{m\Delta} + \frac{T_\Delta}{2} = 0 + \frac{250}{2} = 125 \text{ мкм}, \\ ei_\Delta &= e_{m\Delta} - \frac{T_\Delta}{2} = 0 - \frac{250}{2} = -125 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Результати, одержані від вирішення прямої і зворотної задач методом максимуму-мінімуму, зведені в таблицю 4.4.

У даному конкретному випадку, як видно із таблиці 4.4, вирішення зворотної задачі підтверджує, що розмірні параметри ланок РЛ «А» в проектній задачі вирішені правильно.



У випадку, коли вирішення зворотної задачі проведено для перевірки правильності проставлених допусків на розмірах існуючих конструкторських кресленнях машини і коли допуск замикаючого розміру  $A_{\Delta}$  вийшов занадто великий і не забезпечує визначного положення підшипника в осьовому напрямку, необхідно правильно намітити допуск розміру  $A_{\Delta}$ , виходячи із працездатності підшипникового вузла і за цим допуском визначити допуски і граничні відхилення розмірів складових ланок РЛ, як показано в п. 4.2.1.

### 4.3 Розрахунок розмірного ланцюга імовірнісним методом

#### 4.3.1 Вирішення прямої задачі

4.3.1.1 У виробничих умовах розміри деталей виконуються з відхиленням в одну і другу сторону від середини поля допуску. Крім того, одночасна збіжність граничних розмірів складових ланок (наприклад, найбільших – для збільшуючих ланок і найменших – для зменшуючих ланок) мало ймовірна. Це дає можливість при однаковій точності замикаючої ланки значно розширити допуски складових ланок. Визначення цих допусків може бути здійснено з використанням імовірнісного методу.

4.3.1.2 Середнє число одиниць допуску складових ланок РЛ «А» визначаємо з такого виразу:

$$a = \frac{T_{\Delta} - T_1}{t \cdot \sqrt{\lambda \cdot \sum_{i=1}^{(m-1)-q} i^2}} = \frac{250 - 120}{3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot (0,53 + 0,3 + 2,43 + 0,53)}} = 66,77, \quad (4.14)$$

де  $i^2$  – квадрат одиниці допуску  $i$ -тої складової ланки в залежності від їх номінальних розмірів дається в таблиці 4.2;

$t$  – коефіцієнт, який в залежності від прийнятого процента ризику  $P$  при збіганні центра групування з координатою центра відхилення (для нормального закону розподілення і рівномірною виходу за границі поля допуску) вибирається із такого ряду (ГОСТ 16320-70):

$P$	32	10	4,50	1,00	0,27	0,10	0,01
$t$	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

$\lambda$  – коефіцієнт відносного розсіювання, який характеризує закон розподілення розмірів. Для виробів крупносерійного виробництва припускається, що крива розсіювання буде мати нормальний закон розподілення (закон Гауса), при якому з достатнім для практичних розрахунків ступенем точності можна вважати  $\lambda=1/9$ .

При повній взаємозамінності деталей приймаємо, що  $P = 0,27\%$  і  $t = 3$ .  
Встановимо квалітет складових ланок (таблиця 4.3) і виберемо коригуючу ланку. Як і раніше як коригуючу візьмемо ланку  $A_2$ .

4.3.1.3 Оскільки квалітет на більшість складових ланок відомий – IT10, то за таблицею 4.1 визначимо їх допуски  $T_i$ .

4.3.1.4 Визначимо допуск коригуючої ланки із виразу:

$$T_2 = t \cdot \sqrt{\lambda \cdot \sum_{i=1}^{(m-1)-q} \xi_i^2 \cdot T_i^2 + T_1^2}. \quad (4.15)$$

Підставимо в цей вираз значення його параметрів і одержимо таке рівняння:

$$250 = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot [(-1)^2 \cdot T_2^2 + (+1)^2 \cdot 40^2 + (+1)^2 \cdot 100^2 + (-1)^2 \cdot 46^2]} + 120,$$

із якого знаходимо, що допуск коригуючої ланки  $T_2 = 56,4$  мкм.

4.3.1.5 Визначаємо граничні відхилення складових ланок, які приймаємо рівними допуску для охоплюючих розмірів як на основний отвір, а для охоплених розмірів – як на основний вал.

4.3.1.6 Середнє відхилення поля допуску складових ланок визначаємо за формулою (4.9).

4.3.1.7 Середнє відхилення поля допуску коригуючої ланки визначаємо за формулою (4.8):

$$e_{m2} = \frac{e_{m\Delta} - \sum_{i=1}^{(m-1)-i_k} \xi_i \cdot e_{mi}}{\xi_2} = \frac{0 - [(-1) \cdot (-60) + (+1) \cdot (-20) + (+1) \cdot (-50) + (-1) \cdot (-23)]}{-1} = 13 \text{ мм.}$$

4.3.1.8 Граничне відхилення коригуючої ланки визначаємо за формулою (4.10).

### 4.3.2 Вирішення зворотної задачі

4.3.2.1 Номінальний розмір замикаючої ланки  $A_\Delta$  визначаємо за формулою (4.1).

4.3.2.2 Визначимо поле розсіювання (допуск) замикаючої ланки

$$T_\Delta = t \cdot \sqrt{\lambda \cdot \sum_{i=1}^{(m-1)-q} \xi_i^2 \cdot T_i^2 + T_1^2} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} [(-1)^2 \cdot 56,4^2 + (+1)^2 \cdot 40^2 + (+1)^2 \cdot 100^2 + (-1)^2 \cdot 46^2]} + 120 = 250 \text{ мм.}$$

4.3.2.3 Визначаємо відхилення поля розсіювання (допуски) замикаючої ланки  $e_{m\Delta}$  за формулою (4.12).

4.3.2.4 Визначаємо відхилення замикаючої ланки  $es_{\Delta}$  і  $ei_{\Delta}$  за формулою (4.13).

Результати проведених розрахунків розмірного ланцюга «А» імовірнісним методом зведені в таблицю 4.5.

Порівняння допусків розмірів складових ланок одного і того ж розмірного ланцюга «А», визначених методом максимуму-мінімуму та імовірнісним методом, показує, що допуски в останньому в 2–3 рази ширші, якщо розсіювання погрешностей виготовлення деталей підлягає закономірному розподіленню.

Таблиця 4.1 – Допуски для розмірів до 500 мм [7]

Інтервали номінальних розмірів, мм		Числові індекси квалітетів													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
більш	до	Величини допусків для позначених квалітетів, мкм													
0	3	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	1000
3	6	4	5	8	12	18	30	46	75	120	180	300	480	750	1200
6	10	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500
10	18	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800
18	30	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100
30	50	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500
50	80	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000
80	120	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500
120	180	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000
180	250	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600
250	315	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200
315	400	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700
400	500	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300

Таблиця 4.2 – Залежність величини одиниці і її квадрата від номінальних розмірів [7]

Одиниця допуску і квадрат цієї одиниці	Інтервали величин номінальних розмірів в мм (більш – до)												
	До 3	3÷6	6÷10	10÷18	18÷30	30÷50	50÷80	80÷120	120÷180	180÷250	250÷315	315÷400	400÷500
$i$ , мкм	0,55	0,73	0,90	1,08	1,31	1,56	1,86	2,17	2,52	2,89	3,22	3,54	3,89
$i^2$ , мкм <sup>2</sup>	0,30	0,53	0,81	1,17	1,72	2,43	3,46	4,71	6,35	8,41	10,43	12,53	15,52

Таблиця 4.3 – Залежність індексу якості від числа одиниць допуску

Числовий індекс якості	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Позначення допуску	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17
Число одиниць допуску $a_c$	–	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600

Таблиця 4.4 – Результати розрахунків РЛ «А» методом максимуму-мінімуму

Позначення ланки, $A_i$	Номінальні розміри ланок, мм	$\xi_{i(A)}$	$i_i$	Пряма задача						Зворотна задача			
				Квалітет	$T_i$	$\frac{T_i}{2}$	$es_i$	$ei_i$	$e_{mi}$	Розміри ланок з допусками	$\xi_i \cdot A_i$	$T_i$	$\xi_i \cdot e_{mi}$
$A_1$	31	-1	1,56	10–11	120	60	0	-120	-60	$31_{-0,120}$	-31	120	+60
$A_2$	4,5	-1	0,73	10	59	29,5	+72	+13	+42,5	$4,5_{+0,013}^{+0,072}$	-4,5	59	-42,5
$A_3$	1,5	+1	0,55	8	14	7	0	-14	-7	$1,5_{-0,014}$	+1,5	14	-7
$A_4$	40	+1	1,56	8	39	19,5	0	-39	-19,5	$40_{-0,039}$	+40	39	-19,5
$A_5$	4,5	-1	0,73	8	18	9	0	-18	-9	$4,5_{-0,018}$	-4,5	18	+9
$A_\Delta$	1,5	-	-	14	250	125	+125	-125	0	$1,5 \pm 0,125$	+1,5	250	0

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків РЛ «А» імовірнісним методом

Позначення ланки, $A_i$	Номинальні розміри ланок, мм	$\xi_{i(A)}$	$i_i$	Пряма задача						Зворотна задача			
				Квалітет	$T_i$	$\frac{T_i}{2}$	$es_i$	$ei_i$	$e_{mi}$	Розміри ланок з допусками	$\xi_i \cdot A_i$	$T_i$	$\xi_i \cdot e_{mi}$
					МКМ						мм	МКМ	
$A_1$	31	-1	2,43	10–11	120	60	0	-120	-60	$31_{-0,12}$	-31	120	+60
$A_2$	4,5	-1	0,53	10–11	56,4	28,2	41,2	-15,2	+13	$4,5_{-0,0152}^{+0,0412}$	-4,5	56,4	-13
$A_3$	1,5	+1	0,30	10	40	20	0	-40	-20	$1,5_{-0,04}$	+1,5	40	-20
$A_4$	40	+1	2,43	10	100	50	0	-100	-50	$40_{-0,1}$	+40	100	-50
$A_5$	4,5	-1	0,53	10	46	23	0	-46	-23	$4,5_{-0,046}$	-4,5	46	+23
$A_\Delta$	1,5	–	–	14	250	125	+125	-125	0	$1,5 \pm 0,125$	1,5	250	0

ДОДАТОК  
Варіанти завдань

Позначення РЛ та їх ланок		Передаточне відношення ланок РЛ	Номера варіантів завдань і номінальні величини розмірів ланок РЛ					
А (Рис. 4.1, 4.2а)	$A_i$	$\xi_{i(A)}$	1	2	3	4	5	6
	$A_1$	-1	29	31	33	35	37	39
	$A_2$	-1	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
	$A_3$	+1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	$A_4$	+1	37	39	42	44	47	49
	$A_5$	-1	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
	$A_\Delta$	-						
Б (Рис. 4.1, 4.2б)	$B_i$	$\xi_{i(B)}$	7	8	9	10	11	12
	$B_1$	+1	42	37	34,5	46,5	56	72
	$B_2$	-1	350	355	360	365	370	375
	$B_3$	-1	10	10	12	10	10	12
	$B_4$	-1	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
	$B_5$	+1	380	385	390	394	400	405
	$B_6$	+1	130	135	140	170	172	174
	$B_7$	-1	80	80	80	110	110	110
	$B_\Delta$	-						
В (Рис. 4.1, 4.2в)	$V_i$	$\xi_{i(B)}$	13	14	15	16	17	18
	$V_1$	-1	67	76	83,5	75,5	82	87
	$V_2$	-1	350	355	360	365	370	375
	$V_3$	-1	10	10	12	10	10	12
	$V_4$	-1	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
	$V_5$	+1	380	385	390	394	400	405
	$V_6$	+1	130	135	140	170	172	174
	$V_7$	-1	80	80	80	110	110	110
	$V_\Delta$	-						