

# **ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ АТЗ**

**Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРЕДМЕТУ**

**Доц. Бороденко Ю.М.**

## СТРУКТУРА КУРСУ

**VII семестр: 36 год Лекцій + 36 год Практичних Занять = Залік**

**VIII семестр: 28 год Л + 28 год ПЗ + 4x30 год КП = Захист КП + Екзамен**

### **Розділ 1. Загальні положення предмету**

1.1. Основні положення та методи проектування

1.2. Теоретичні основи розрахунку електричних пристроїв та систем

### **Розділ 2. Аналіз та синтез систем електростартерного пуску ДВЗ**

### **Розділ 3. Аналіз та синтез систем електропостачання АТЗ**

### **Розділ 4. Аналіз та синтез систем запалювання**

### **Розділ 5. Методи розрахунку електромагнітних пристроїв систем ЕО**

5.1. Стартерних електродвигунів

5.2. Тягових реле стартера

5.3. Вентильних генераторів з дзьобоподібним ротором

5.4. Вентильних генераторів індукторного типу

5.5. Котушок запалювання

### **Розділ 6. Методи розрахунку електронних пристроїв систем ЕО**

6.1. Загальні принципи розробки електронних пристроїв

6.2. Електронного реле блокування стартера

6.3. Транзисторного регулятора напруги

6.4. Транзисторного комутатора струму

## ЗМІСТ РОЗДІЛУ

### **1.1. Основні положення та методи проектування**

- 1.1.1. Визначення, методи й завдання проектування.
- 1.1.2. Обмеження при проектуванні та вимоги до пристроїв, що проектуються.
- 1.1.3. Алгоритм й етапи процесу проектування.
- 1.1.4. Термінологія в технічних документах.
- 1.1.5. Використання комп'ютерних технологій при проектуванні електричних пристроїв.
- 1.1.6. Види та зміст проектів.

### **1.2. Теоретичні основи розрахунку електричних пристроїв та систем**

- 1.2.1. Методи розрахунку електричних кіл.
- 1.2.2. Методи розрахунку електромагнітних пристроїв.
- 1.2.3. Характеристики електричних машин.
- 1.2.4. Моделі та параметри напівпровідникових приладів.

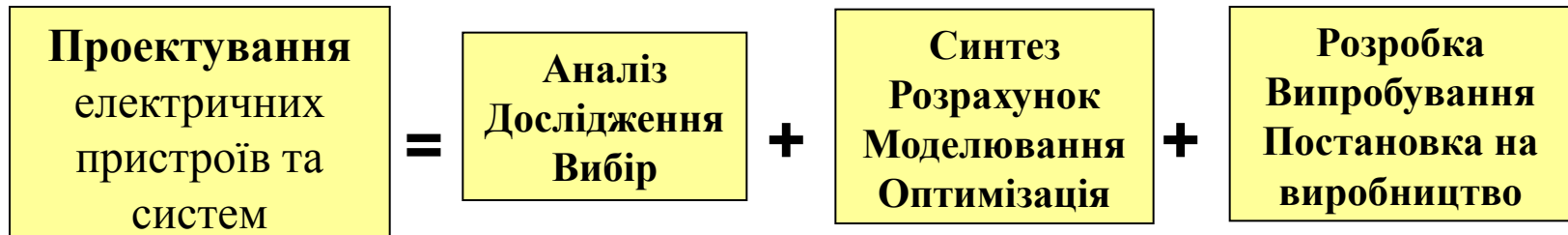
# Передмова

Електричні, електротехнічні, електромагнітні, електромеханічні пристрої  
електричні апарати, електричні машини.

Електронні, аналогові, цифрові, рохунково-логічні, мікропроцесорні

## Дисципліни, що передують проектуванню

Фізика	ТОЕ	Математика	Технічна експлуатація	Електричні машини та апарати	Ел.обладнання автомобілів	ДВЗ	Автомобілі
Електроніка	САПР Кресл.	Електротехніка	Теорія надійності	Конструкційні та електроматеріали	Технологія виробництва	ВСТІ	Економіка Ергономія



*припущення    емпіричні дані    апроксимація функціональних залежностей*

Пряма задача – розрахунок

Зворотна задача – проектування

Напівзворотна задача – оптимізація

Задача в загальному вигляді – моделювання

Коректно сформульоване завдання

Некоректно сформульоване завдання

Попередній розрахунок

Перевірочний розрахунок

**Проектування** – творчий процес конкретного рішення техніко-економічного завдання зі створення виробу, що відповідає заданому комплексу технічних вимог при мінімальних витратах.

**Аналіз** розбивка об'єкта самостійні частини з наступним дослідженням кожної з них.

**Вибір** технічного рішення проводиться за результатами аналізу й на підставі рекомендацій, одержаних з дослідних даних та конструкторських довідників.

**Синтез** полягає у творчому поєднанні окремих частин у єдине ціле за умови, що отримана комбінація виконує функції за призначенням і є оригінальною.

**Моделювання** – побудування та дослідження математичних, віртуальних або фізичних моделей з метою попереднього визначення можливості його функціонування згідно з вимогами ТЗ, забезпечення необхідних характеристик та оптимізації параметрів і структури для досягнення бажаного результату.

**Оптимізація** – процес одержання найкращого результату за визначеними критеріями (мінімальна вартість, маса, максимальна надійність, технологічність, екологічність, мінімальні експлуатаційні витрати, довговічність), пріоритети критеріїв.

**Розрахунок** – вирішення завдання з замкненими умовами (**розробка** - з незамкненими ).

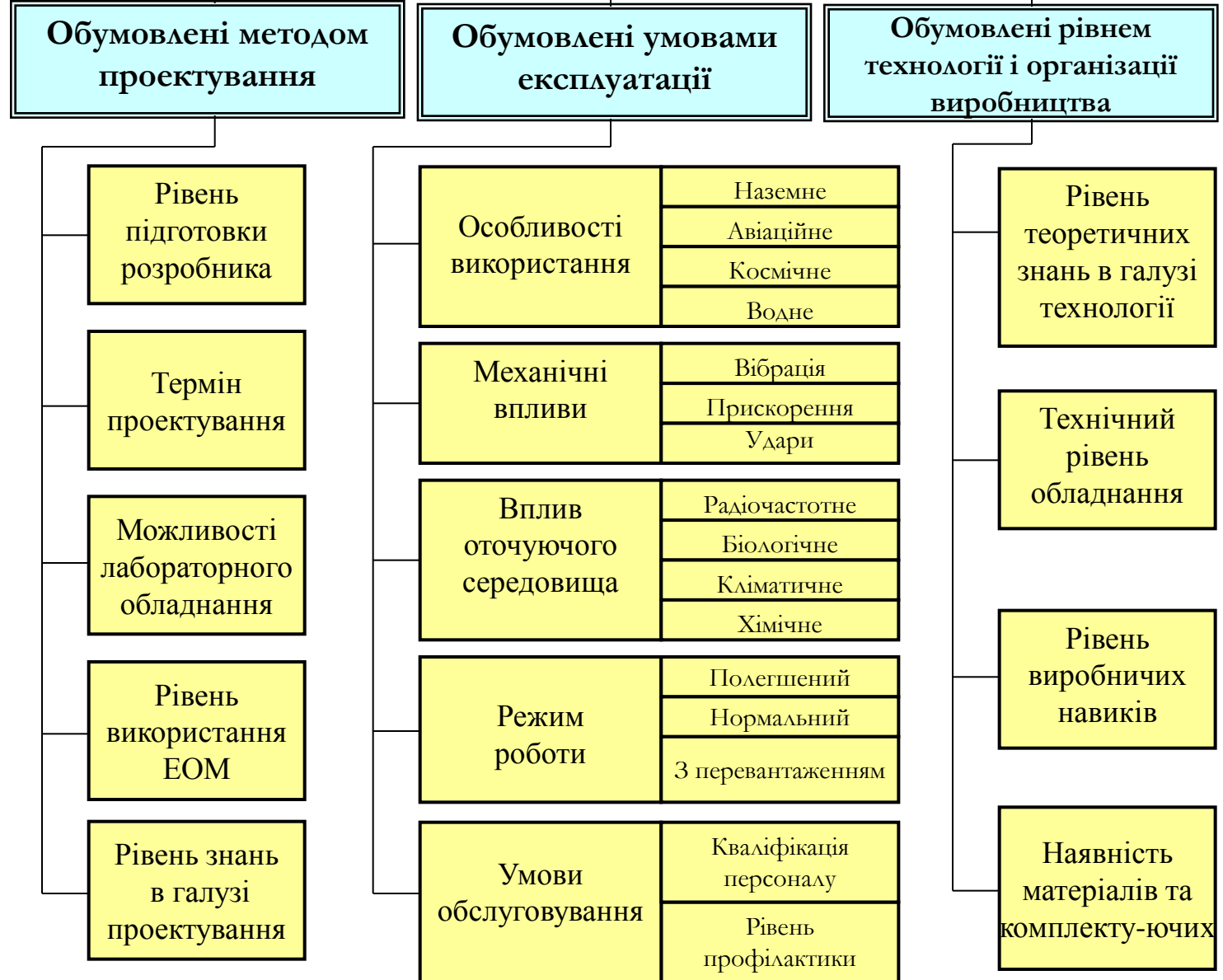
**Пряма задача** полягає у визначенні вихідних параметрів пристрою (потужності на виході, струму в навантаженні, фор-ми сигналу) при відомій структурі (конструкції, схеми) пристрою.

**Зворотної задачі** - створення структури пристрою, який повинен забезпечувати задані вихідні параметри, режими або алгоритми функціонування.

**Напівзворотна задача** - за вихідні дані обираються і вихідні сигнали і структурні параметри.

**Задача в загальному вигляді** – символічне надання залежностей між параметрами об'єкта, об'єднані у систему рівнянь. За відомі та невідомі у виразах можуть обиратися будь-які параметри. Рішенням задачі в загальному вигляді є отримання математичної моделі пристрою чи системи.

## 1.1.2. ОБМЕЖЕННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ



## 1.1.2. Вимоги до пристроїв, що проектуються

### *Функціонально-технічні*

- забезпечення високої роздільної здатності й точності перетворення;
- забезпечення лінійності (функціональності) статичної характеристики;
- мінімальна інструментальна помилка;
- мінімальна інерційність (якщо не обговорене зворотне); відсутність внутрішніх шумів;
- забезпечення необхідної потужності на виході;
- стійкість до нагріву у робочому режимі;
- електрична міцність ізоляційних частин і проміжків;
- механічна міцність і зносостійкість деталей у межах заданого терміну служби;
- простота конструкції, компактність, високі питомі характеристики;
- специфічні вимоги для окремих видів виробів.

### *Експлуатаційні*

- урахування характеру зовнішніх впливів і режимів роботи у процесі експлуатації;
- простота й зручність у настроюванні, регулюванні й ремонті (ремонтпридатність);
- мале споживання енергії (високий КПД); висока надійність.

*Соціальні* безпека у виробництві, монтажі й експлуатації; естетичність; ергономічність

*Економічні* - низька собівартість; низькі експлуатаційні витрати.

*Виробничо-технологічні* - технологічність; урахування виробничих можливостей.

### *Вимоги до транспортування й зберігання:*

- урахування характеру транспортування; можливість тривалого терміну зберігання

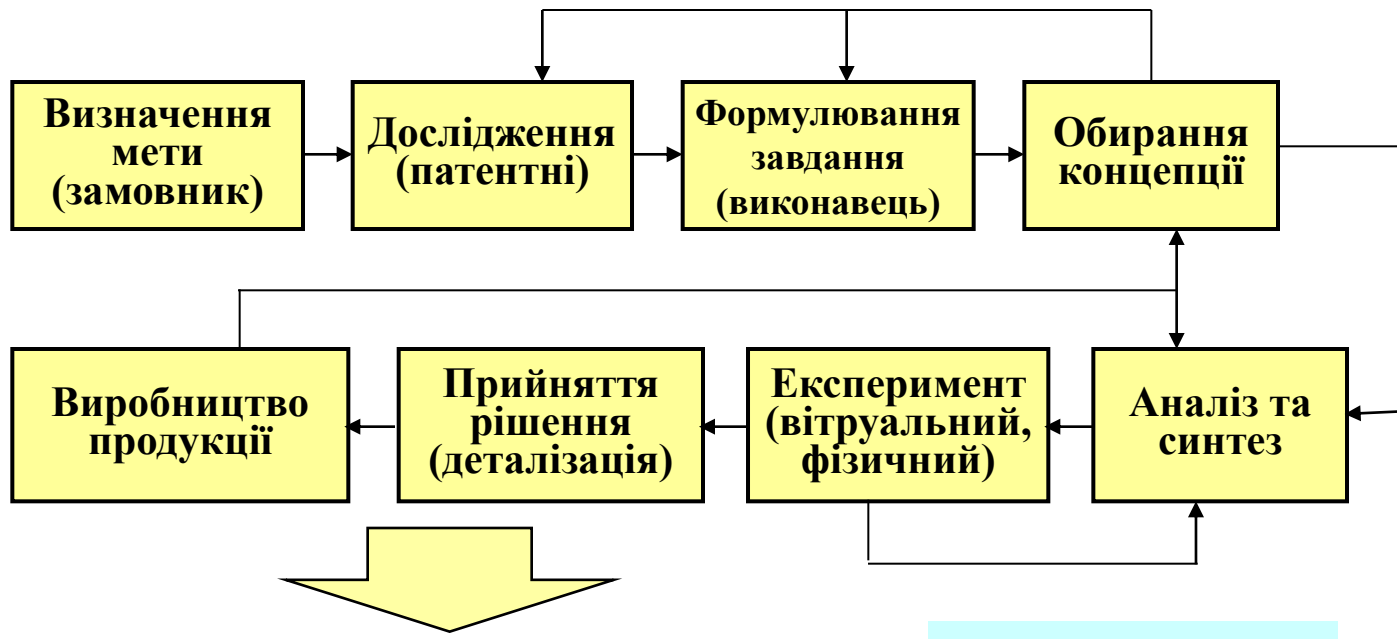
## 1.1.3. Алгоритм й етапи процесу проектування

*Алгоритм процесу проектування* являє собою послідовність творчих подій, спрямованих на отримання логічного завершення розробки.

*Патентна чистота*  
*Патентна спроможність*

### Вихідні дані:

Призна-ня виробу,  
Техніко-економічні показники якості,  
Умови експлуатації,  
Умови виробництва,  
Термін проект-ня.



Попереднє проектування

Уточнене ТЗ  
Пропозиції  
Аванпроект

Ескізне проектування

Захист  
ескізного  
проекту

Технічне проектування

Розробка  
технічної  
документації

Конструкторська  
(схеми, креслення,  
ТУ, ТО, інструкції,  
паспорти)

Технологічна  
(виготовленн,  
контролю, поставки,  
експлуатації, ремонту)



## Етапи процесу проектування

**Визначення мети** - загальний опис кінцевого вигляду виробу (постановка завдання замовником).

**Дослідження** збирання та обробка інформації з питань проектування та виробництва аналогів продукції. Порівнюються конкурентні варіанти, проводять *патентні дослідження* (патентна чистота, патентна спроможність технічного рішення). **Патентна чистота** – властивість об'єкту, яка дозволяє вільне використання його в даній країні без порушення охоронних документів виключного права. **Патентна спроможність** – придатність технічного рішення бути признаним як об'єкт правової охорони (інтелектуальна власність).

**Формулювання технічного завдання** - складання розробником основних вимог до виробу, що проектується, задоволення яких забезпечує досягнення поставленої мети.

**Формування ідеї та обрання концепції** – за результатами наукових досліджень уточнюється формулювання завдання та складаються варіанти блок-схем альтернативних рішень.

**Аналіз та синтез** - після попереднього вибору концепції перевіряється прийняте рішення на відповідність фізичним законам. За результатами аналізу характеристик окремих складових синтезується пристрій (система) в цілому та перевіряються вихідні характеристики (аналітично, віртуально). Якщо результати незадовільні, обирається нова концепція.

**Експеримент** - сукупність операцій, впливів та спостережень, спрямованих на одержання інформації про об'єкт при дослідницьких випробуваннях.

**Прийняття рішення** - детальна розробка обраної концепції у вигляді технічного звіту та графічного матеріалу (опис та принцип дії, функціональні та принципові схеми, креслення, оцінка основних технічних показників, технології виробництва, умови експлуатації, стандартні деталі).

**Виробництво** – етап процесу проектування на якому розробник враховує обмеження, що обумовлені рівнем технології і організації виробництва, здійснює авторський нагляд за постановкою продукції на виробництво.

## Етапи розробки виробу

**Попереднє проектування** - розробка принципів побудування пристрою за означеними умовами, винайдення доцільних методів моделювання, пошук можливих реалізацій, оцінка надійності.

**Аванпроект** – містить обґрунтування розробки продукції і її показників, вихідні вимоги і пропозиції щодо розробки, виробництва і експлуатації продукції. (пояснювальна записка, креслення, схеми, розрахунки, проект ТЗ).

**Ескізне проектування** - на базі аванпроекту та уточненого ТЗ подальша конкретизація схеми (конструкції). Узгодження проекту (уточненого ТЗ ) з замовником .

**Ескізний проект** – містить принципові конструктивні рішення, дає загальне уявлення про конструкцію і принцип дії виробу, а також дані, що визначають його відповідність призначенню.

**Технічне проектування** деталізується структура пристрою, розробляються окремі вузли, елементи та не уніфіковані деталі, здійснюється остаточний розрахунок надійності, оцінюється можливість використання уніфікованих елементів, оговорюються умови контролю та випробувань, обираються покриття та марки матеріалів. Визначаються техніко-економічні показники. Розробляється технологія виготовлення з урахуванням виробничих можливостей.

**Технічний проект** – містить кінцеве технічне рішення, що дає повне уявлення про конструкцію виробу, що розробляється і доповнена даними, які необхідні та достатні для розробки робочої конструкторської документації.

**Конструкторська документація** – сукупність конструкторських документів, що містять, в залежності від їх призначення, дані, необхідні для розробки, виготовлення, контролю, прийомки, поставки, експлуатації і ремонту виробу.

## 1.1.4. Термінологія в технічних документах

### Загальні поняття

*Продукція* (зразок)

*Модель виробу*

*Макет виробу*

*Якість продукції*

*Патентна чистота*

*Випробування*

*Експеримент*

*Умови експлуатації*

*Винахід*

### Продукція

*Продукція* (серійного, масового, одиничного, разового) виробництва

*Виріб* (специфікований, не специфікований)

*Деталь*

*Збиральна одиниця*

*Комплект*

*Комплекс*

*Комплектуючі вироби*

*Покупні вироби*

*Модифікація виробу*

*Модернізований виріб*

*Стандартний виріб*

*Уніфікований виріб*

### Зразки продукції

*Зразок* (експериментальний, дослідний, головний, дослідно-промисловий, зразок-модель, авторський )

### Стадії життєвого циклу продукції

*Життєвий цикл продукції*  
*Науково-дослідницька робота*

*Розробка аванпроекту*

*Розробка продукції*

*Оцінка технічного рівня продукції*

*Патентні дослідження*

*Випробування* (дослідницькі, доводочні, попередні, приймальні, кваліфікаційні, типові)

*Доробка дослідного зразка*

*Дослідна апробація*

*Постановка продукції на виробництво*

*Модернізація виробу*

*Удосконалення продукції*

*Авторський нагляд*

### Учасники робіт

*Замовник*

*Розробник*

*Головний розробник*

*Співвиконавець розробки*

*Виробник*

*Підрядник*

*Субпідрядник*

*Споживач продукції*

*Провідна організація*

*Виконавець науково-дослідної роботи*

### Види документів

*Документація*

(технічна, конструкторська, технологічна, робоча виробнича, експлуатаційна, ремонтна)

*Технічне завдання* (на науково дослідницьку роботу)

*Технічна пропозиція*

*Проект* (ескізний, технічний)

*Заявка на розробку*  
*Замовлення-наряд на створення нової продукції*

*Аванпроект*

*Звіт про науково-дослідницьку роботу*

*Технічні умови*

*Технічний опис*

*Звіт про патентні дослідження*

*Експертний висновок*

*Акт прийомки*

*дослідного зразка*

*Програма випробувань*

*Методика випробувань*

*Протокол випробувань*

*Журнал авторського нагляду*

*Акт авторського нагляду*

*Ліцензійна угода*

*Контракт*

## 1.1.5. Використання комп'ютерних технологій

### **Переваги, дозволяє:**

- передбачити поведінку пристрою у штатних та позаштатних ситуаціях;
- спостерігати форму сигналів у різних місцях електронного пристрою при впливі на нього корисних сигналів і перешкод;
- обучати майбутніх фахівців в галузі проектування електронних пристроїв;
- знизити вартість експериментальних досліджень;
- оптимізувати параметри окремих елементів пристрою за заздалегідь обраним критерієм;
- масштабувати реальний час електричних процесів;
- застосовувати спеціальні програми і моделі електронних елементів;
- ідентифікувати параметри моделей.

### **Математичні моделі**

- лінійні й нелінійні,
- статичні й динамічні,
- с зосередженими й розподіленими параметрами,
- аналогові, цифрові (дискретні) і аналого-цифрові.

### **різновиди програм:**

- універсальні програми для математичних розрахунків, такі як MathCAD, MATLAB й ін.;
- універсальні програми для моделювання електронних пристроїв такі як P-CAD,
- Micro-CAP V, P-SPICE A/D, APLAC 7.0;
- спеціалізовані програми, що використовуються при моделюванні певного класу схем, наприклад, Sistem View.

## УНІВЕРСАЛЬНІ ПРОГРАМИ

**P-CAD** – створення схем електричних принципів; компоновка елементів та трасування друкованих плат.

**Micro-CAP V** - моделювання динамічних процесів в РЕА по функціональним схемам; розрахунок параметрів математичних моделей, оптимізація електронних схем шляхом варіації параметрів елементів; розрахунок режимів по постійному струму, частотних та перехідних характеристик.

**P-SPICE** - редагування вхідних сигналів, параметрична оптимізація РЕА, автоматичне трасування друкованих плат з урахуванням паразитних ефектів.

**Electronics Workbench, Proteus** – створення схем електричних принципів та проведення віртуальних експериментів.

## СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОГРАМИ

**OrCAD, Protel, Nexar** – наскрізне проектування РЕА на базі друкованих плат.

**XFDTD, Wireless InSite, FEKO, Fidelity** - вирішення тривимірних задач поширення електромагнітних хвиль та структур електромагнітної сумісності.

**CAM350, Genesis, WSCAD, КРЕДО** - створення документації для об'ємних виробництв (оформлення конструкторської документації, складання програм для ЧПП, створення архіву конструкторсько-технологічної документації).

**Omega PLUS, Electronics Labcenter** - аналіз впливу конструкції друкованих плат на електричні характеристики монтажу (моделювання електромагнітної сумісності).

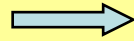
**Harness Studio** - візуалізація й контроль кабельних мереж.

**BETASoft, ТРiАНА** - аналіз теплових режимів РЕА.

**АСОНИКА** - розрахунок показників надійності РЕА.

## 1.1.6. Види та зміст навчальних проектів

**Курсове проектування**  
(визначена дисципліна)



**Дипломне проектування**  
(комплекс дисциплін)

Кваліфікаційні дипломні роботи: **дипломний проект, дипломний проект з дослідницьким ухилом, дипломна робота, магістерська робота**

Теми за обсягом завдання: **індивідуальні, комплексні, міжкафедральні, міжвузівські**

**Пояснювальна записка:** титульний лист, завдання, зміст, реферат, змістовна частина, виводи та рекомендації, література, додатки.

Змістовна частина:

**Вступ** (сучасний стан проблеми, актуальність теми, новизна розробки)

**Огляда частина** (аналіз технічних рішень аналогів та прийняття проектного)

**Дослідна частина** (дослідження, щодо вибору проектного рішення)

**Схемотехнічна розробка та програмні продукти** ( синтез та розрахунок схем)

**Конструкторська частина** (конструктивне виконання та прив'язка до борта)

**Розділ надійності** (визначення ймовірності безвідмовної роботи)

**Питання охорони праці** (небезпечні фактори заходи та засоби безпеки)

**Техніко-економічний аналіз** (собівартість виготовлення та економічний ефект)

Графічний матеріал (Презентація)

# Тема 1.2

## 1.2.1. Методи розрахунку електричних кіл

### кола постійного струму

Електричний опір  $R = \rho \frac{l}{S}$

температурний опір  $R_t = R_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)]$

**Закони Ома**

$$I = \frac{E}{R + r_0}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

**Закони Кірхгофа**  $\sum I_i = 0$

$$\sum RI = \sum E$$

Потужність джерела енергії

$$P_0 = E - U \quad I = I^2 r_0 = \frac{E - U}{r_0}$$

Потужність навантаження

$$P_R = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

баланс потужностей

$$P_{дж} = \sum_{i=1}^m E_i I_i$$

$$P_{сп} = \sum_{i=1}^m R_i I_i^2$$

Режими холостого ходу, короткого замикання та узгоджений режим.

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{R}{R + r_0} = \frac{1}{1 + \frac{r_0}{R}}$$

*Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа*

*Метод контурних струмів*

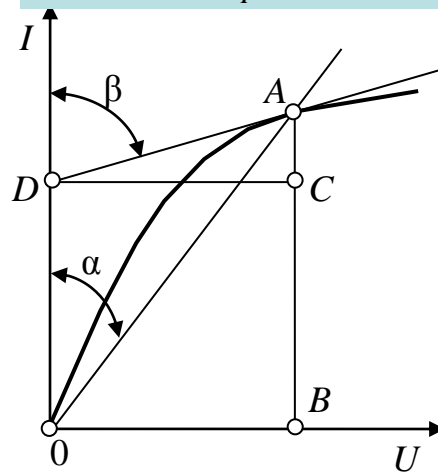
*Метод накладення (суперпозиції)*

*Метод між вузлової напруги*

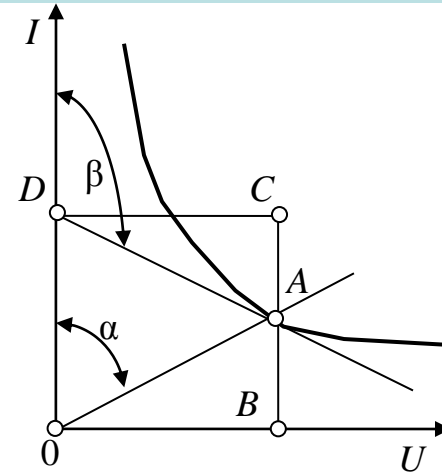
### Нелінійні електричні кола

Статичний та диференціальний опори

$$R_{ст} = \frac{U}{I} = \frac{m_U OB}{m_I BA} = m_R \operatorname{tg} \alpha$$



$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_U DC}{m_I CA} = m_R \operatorname{tg} \beta$$



а

б

# кола змінного струму

Амплітудні значення

Частота

Миттєві значення

Середньо квадратичні (діючі)

Середні значення за період

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[ \Phi_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right] = E_m \sin \omega t$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$$

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \frac{2 I_m}{\pi} \approx 0,637 I_m$$

$$I_m = I \sqrt{2} \approx 1,41 I \quad U_m = U \sqrt{2} \approx 1,41 U$$

$$I_{cp} = 0,637 I_m = 0,637 \cdot 1,41 I = 0,898 I$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_C = 1/2\pi f C$$

$$Q_L = 2\pi f L I^2$$

$$Q_C = 2\pi f C U^2$$

Активний, реактивний  
Ємнісний, індуктивний  
Повний опір та потужність  
кола змінного струму

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + X_L - X_C^2}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + Q_L - Q_C^2}$$

Падіння напруги

$$u_R = Ri$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$$

Комплексне надання електричних величин  
в алгебраїчній, тригонометричній та показовій формі

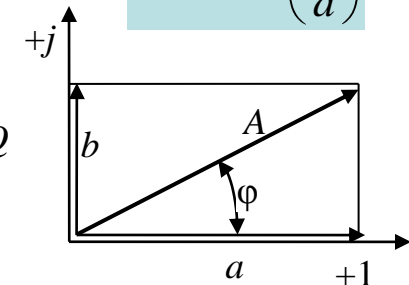
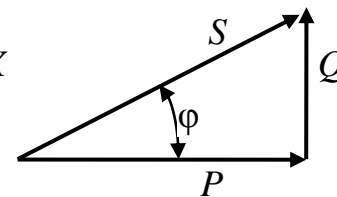
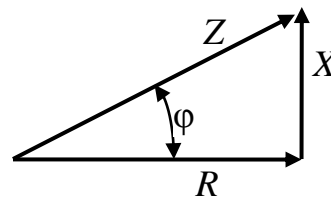
$$\bar{A} = a \pm jb$$

$$\bar{A} = A \cos \varphi \pm j \sin \varphi$$

$$\bar{A} = A e^{\pm j\varphi}$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{b}{a} \right)$$





# Трьохфазні кола

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_C = E_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta \cos \varphi$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta \sin \varphi$$

$$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Симетричне  
рівномірне  
однорідне  
Навантаження фаз

Лінійні  
Фазні

$$U_\Delta = U_\phi \sqrt{3}$$

$$U_\Delta = U_\phi$$

$$I_\Delta = I_\phi$$

$$I_\Delta = I_\phi \sqrt{3}$$

схеми «зірка» та «трикутник»

Трьохфазний випрямляч Лаврентєва  
з генератором “зірка” “трикутник”

$$I_\Phi = 0,816 I_G$$

$$U_\Phi = 0,87 U_G$$

Середні випрямлені  
Фазні  
Пульсації

$$U_\phi = 0,43 U_G$$

$$I_\Phi = 0,52 I_G$$

$$\Delta U_G = 0,139 U_G$$

# Кола з періодичними не синусоїдальними величинами

Тригонометричний ряд Ейлера – Фур'є

Метод накладення

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_{k \max} \sin k\omega t + \psi_k$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{k \max} \sin k\omega t + \psi_k - \varphi_k$$

$$\varphi_k = \arctg \left( \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{R} \right)$$

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k^2}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$Q = \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + V^2}$$

коефіцієнту викривлень

# Перехідні процеси

$$w_E = 0,5 C u_C^2$$

$$w_M = 0,5 L i_L^2$$

$$u_C t = \frac{1}{C} \int i dt + U_{0C}$$

$$i_L t = \frac{1}{L} \int u_L dt + I_{0L}$$

$$U_{RC} = Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$U_{RL} = Ri + L \frac{di}{dt}$$

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0$$

Аперіодичний

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Коливальний згасаючий

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Умова резонансу  
Послідовного кола

$$\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{4L^2}$$

$$i_{\max} \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

$$u_{C \max} \approx 2U$$

## Резонансні явища

*Резонанс напруги в послідовному контурі*

$$|X_L| = |X_C| \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

*Резонанс струму в паралельному контурі*

$$X_L / Z_1^2 = X_C / Z_2^2$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_1^2 - \frac{L}{C}}{R_2^2 - \frac{L}{C}}}$$

*Умова резонансу струму в при будь-якій частоті*

$$R_1 = R_2 = Z_x$$

$$Z_x = \sqrt{L/C}$$

## індуктивно пов'язані кола

**Взаємна та еквівалентна індуктивність  
коефіцієнту зв'язку**

$$L_e = L_1 + L_2 \pm 2M$$

$$k_L = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1$$

$$\bar{U} = R_1 + R_2 \bar{I} + j\omega L_1 + L_2 \pm 2M \bar{I}$$

## 1.2.2. Методи розрахунку електромагнітних пристроїв

Загальні визначення  
та залежності

$$\Phi = \int_S B dS \cos \alpha$$

$$\Phi = BS$$

$$B = f(H)$$

Магнітні силові лінії

Еквипотенційні лінії

Магнітна індукція

Магнітний потік

Напруженість магнітного поля

Провідність проміжків розсіювання

$$\Phi_\delta = B_\delta S_\delta$$

$$H_\delta = B_\delta / \mu_0 = 0,8 \cdot 10^6 F_\delta = \delta H_\delta$$

Провідність залізних ділянок

$$B_i = \Phi_i / S_i$$

$$H_i = f(B_i),$$

$$F_i = l_i H_i$$

$$\sigma_i = \frac{\Phi_i - \Phi_\delta}{\Phi_\delta}$$

закон повного струму

$$\sum H_i l_i = \sum F_i = \sum I_i w_i$$

МРС обмоток збудження

$$\sum H_i l_i + H_\delta \sum \delta_i = \sum F_0$$

принципу безперервності магнітного потоку коерцитивна сила постійного магніту

$$\sum \Phi_i = 0$$

$$H_M l_M + H_\delta \delta = 0$$

$$H_M = -\frac{\delta H_\delta}{l_M} = -\frac{\delta B_\delta}{\mu_0 l_M}$$

# Аналогія між величинами магнітних кіл з постійними МРС та електричних кіл постійного струму

Магнітні кола		Електричні кола	
Величина (закон)	Позначення	Позначення	Величина (закон)
Магнітна проникливість	$\mu$	$\rho$	Питомий опір
Магніторушійна сила	$F$	$E$	Електрорушійна сила
Магнітна провідність зазору	$G_{\delta} = \mu_0 S / \delta$	$R = \rho l / S$	Електричний опір
Магнітний потік	$\Phi$	$I$	Електричний струм
Напруженість магнітного поля	$H$	$E'$	Напруженість електричного поля
Магнітна індукція	$B = \Phi / S$	$J = I / S$	Щільність струму
Закон Ома	$\Phi = FG$	$I = U / R$	Закон Ома
Спадання магнітного потенціалу	$\Delta F = lH$	$\Delta U = lE'$	Спадання електричного потенціалу
Падіння МРС	$F = \Phi / G$	$U = IR$	Падіння напруги
Принцип безперервності потоку	$\sum \Phi_i = 0$	$\sum I_i = 0$	Перший закон Кірхгофа
Закон повного струму	$\sum H_i l_i = \sum F_i$	$\sum RI = \sum E$	Другий закон Кірхгофа

# Електромагнітні реле постійного струму

Тягова сила електромагніту

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S} = kB^2 S$$

МРС обмотки

$$F_o \approx k_3 F_{\delta} = \frac{k_3 \Phi_{\delta}}{G_{\delta}} = k_3 \frac{B_{\delta} S_{\delta}}{G_{\delta}}$$

Потужність, що розсіює котушка

$$P = RI^2 = \rho \frac{l_{cp} w^2}{kS_o} \cdot \frac{F^2}{w_o^2} = \rho \frac{l_{cp}}{kS_o} F^2$$

Провідність робочого зазору

$$G_{\delta} = \mu_0 S / \delta$$

Обмоткові дані котушки

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4\rho l_{cp} F_o}{\pi U_o}}$$

$$w_o = \frac{r_o F_o}{U_o} = \frac{\pi d_{\Pi}^2 r_o}{4\rho l_{cp}}$$

Температура нагріву котушки

$$\vartheta = \frac{P}{\alpha S_{ox}}$$

# Електромагнітні кола зі змінними МРС

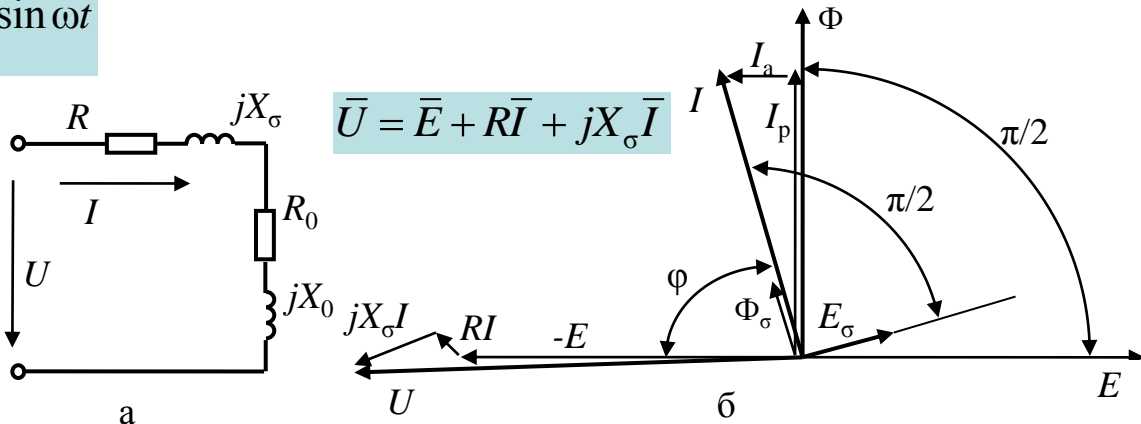
Дроселі  
Реактори

$$U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = w \frac{d\Phi}{dt} + \Delta U$$

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w\omega} = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi f w} \approx \frac{U}{4,44 f w}$$

$$\Phi = \frac{U_m}{w} \int \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) dt = \frac{U_m}{w\omega} \sin \omega t = \Phi_m \sin \omega t$$

Трансформатори живлення  
Сигнальні трансформатори  
Імпульсні трансформатори  
Котушки запалювання



$$\bar{U} = \bar{E} + R\bar{I} + jX_\sigma\bar{I}$$

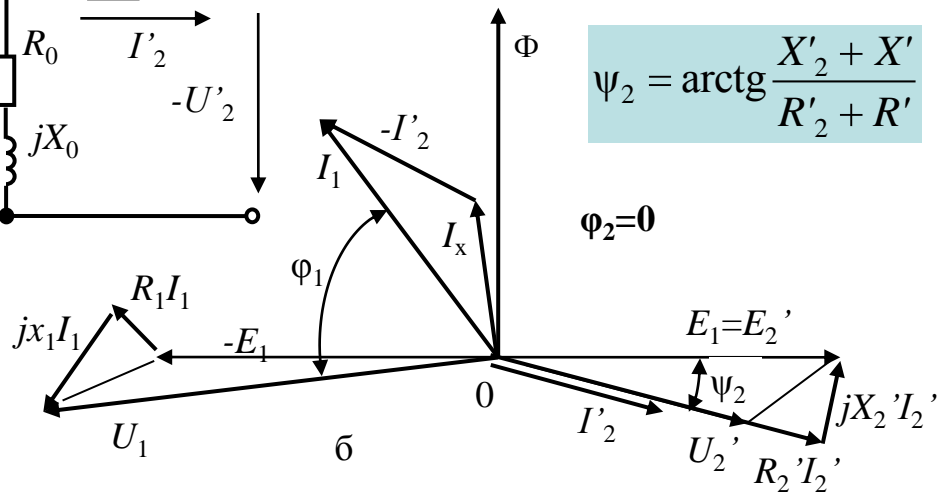
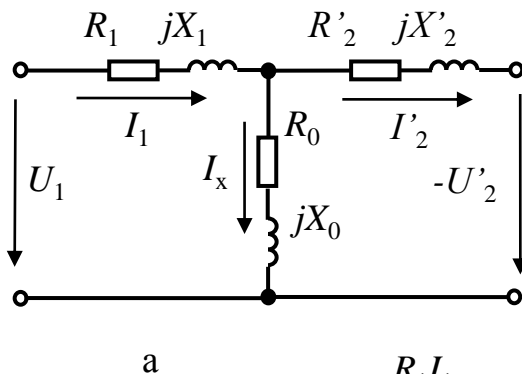
$$\bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2 - \bar{I}_x w_1 = 0$$

$$k_T = w_2 / w_1$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_x - k_T \bar{I}_2 = \bar{I}_x - \bar{I}_2^1$$

$$\bar{I}_2^1 = k_T \bar{I}_2$$

$$\begin{cases} \bar{I}_2^1 = \bar{I}_x - \bar{I}_1 \\ \bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 \\ \bar{U}_2^1 = -\bar{E}_2^1 + R_2^1 \bar{I}_2^1 + jX_2^1 \bar{I}_2^1 \end{cases}$$



$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'}{R'_2 + R'}$$

$$\phi_2 = 0$$

# 1.2.3. Характеристики електричних машин

## Двигуни постійного струму

Протидіюча ЕРС  
індукція в робочому зазорі  
Крутний момент  
Частота обертання  
Типи збудження

$$E = Blv = Bl \frac{\omega D_{\text{я}}}{2}$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi 2p}{\pi D_{\text{я}} l}$$

$$E_{\text{я}} = EN / 2a_{\text{я}}$$

$$v = \pi D_{\text{я}} n_{\text{я}} / 60$$

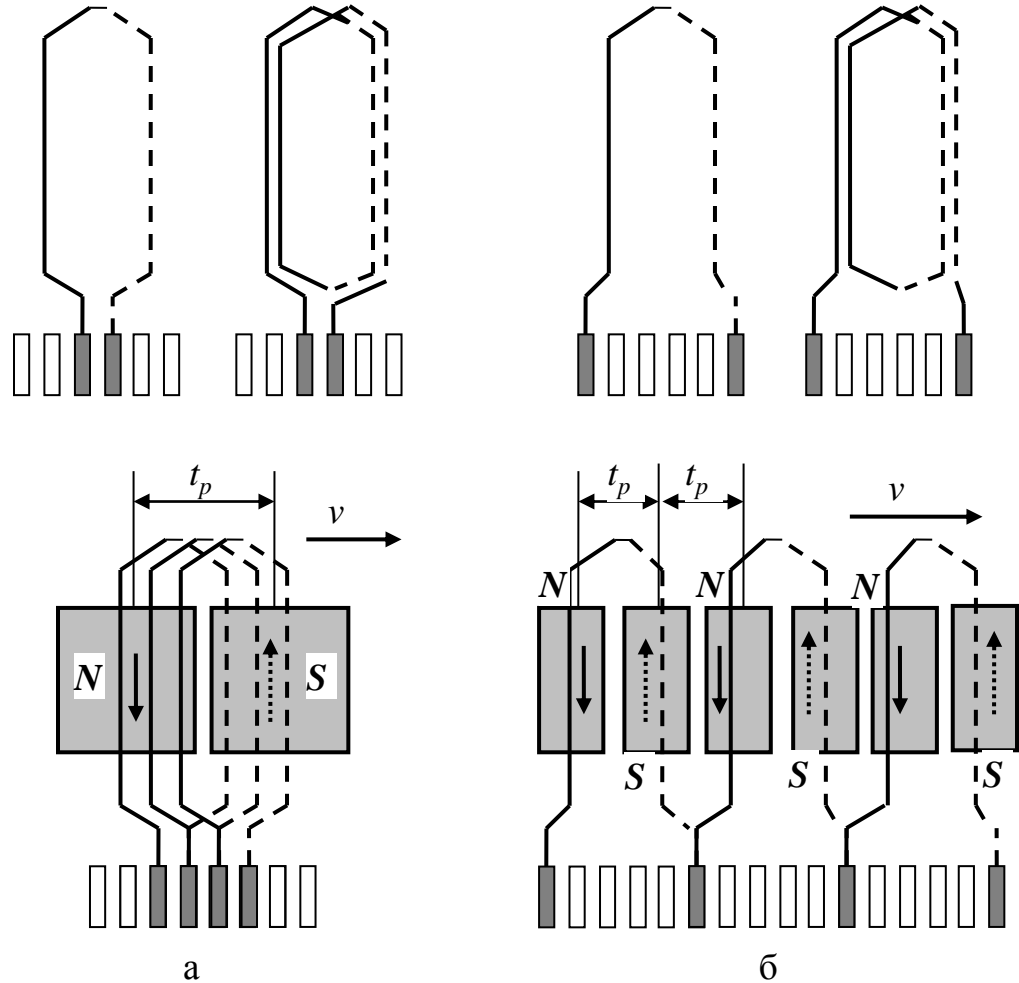
реакція якоря двигуна

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{\pi} \omega \Phi = \frac{pN}{60a_{\text{я}}} \Phi n_{\text{я}} = C_E \Phi n_{\text{я}}$$

$$F = BlI = Bl \frac{I_{\text{я}}}{2a_{\text{я}}}$$

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

Компоновка якірних обмоток  
петлі, хвилі  
Секція, паралельні гілки





# Характеристики двигуни постійного струму

$$n = \frac{60a_{\text{Я}}}{pN} \cdot \frac{U - R_{\text{Я}}I_{\text{Я}}}{\Phi} = \frac{U - R_{\text{Я}}I_{\text{Я}}}{C_{\text{Е}}\Phi}$$

$$n = \frac{U}{C_{\text{Е}}\Phi} - \frac{MR_{\text{Я}}}{C_{\text{Е}}C_{\text{М}}\Phi^2}$$

$$M = \frac{pN}{2\pi a_{\text{Я}}} \Phi I_{\text{Я}} = C_{\text{М}}\Phi I_{\text{Я}}$$

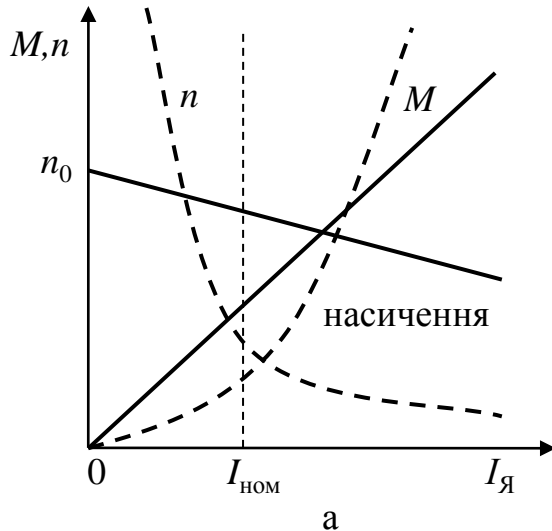
## Паралельне збудження

$\Phi - \text{const}$

$$M = C_1 I_{\text{Я}}$$

$$n = \frac{U}{C_2} - \frac{I_{\text{Я}}R_{\text{Я}}}{C_2}$$

$$n = \frac{U}{C_2} - \frac{MR_{\text{Я}}}{C_3}$$



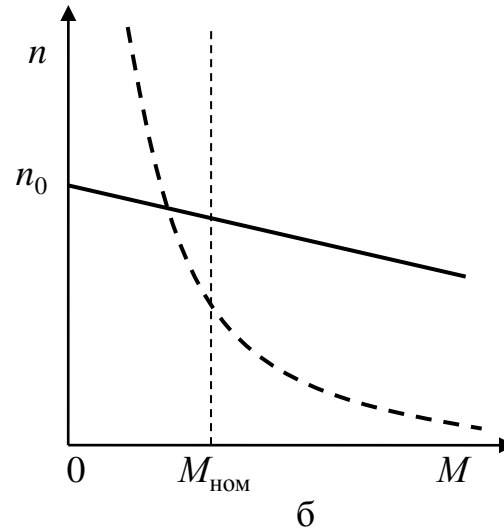
## Послідовне збудження

$\Phi = f_1(I_{\text{Я}})$ .

$$M = C_4 I_{\text{Я}}^2$$

$$n = \frac{U}{C_5 I_{\text{Я}}} - \frac{R_{\text{Я}}}{C_5}$$

$$n = \frac{U}{C_5 \sqrt{\frac{M}{C_4}}} - \frac{R_{\text{Я}}}{C_5}$$



# Трьохфазні синхронні генератори

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} - Z_0 I_{\text{я}} = C_E n \Phi - I_{\text{я}} \sqrt{R_0^2 + X_L^2}$$

$$U_{\text{я}} \quad n, I_{\text{я}} = C_E n \Phi - I_{\text{я}} \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{\pi p L_{\text{я}}}{15} n \right)^2}$$

ЕРС поздовжньої й поперечної реакції якоря;  
ЕРС розсіювання обмотки якоря  
синхронний індуктивний опір фази

Електричні характеристики вентильного генератора

$$\bar{U}_{\Phi} = \bar{E}_{\Phi} + \bar{E}_{\text{яХ}} + \bar{E}_{\text{яУ}} + \bar{E}_{\sigma} + \bar{U}_{\text{я}}$$

Електромагнітний гальмівний момент

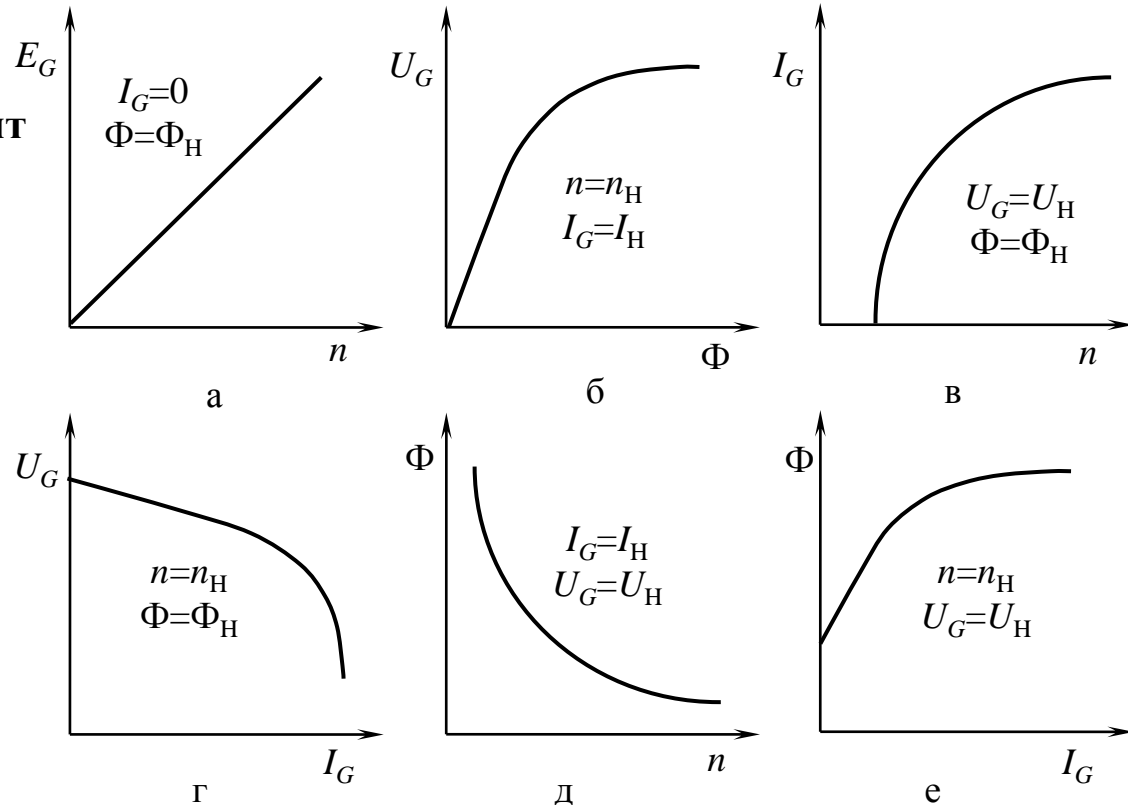
$$M_{\text{ЕМ}} = \frac{p P_{\text{ЕМ}}}{\pi f} = \frac{30 P_{\text{ЕМ}}}{\pi n}$$

Потужність

$$P_{\text{ЕМ}} = P_2 + \Delta P \approx 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi = \frac{3 E_{\Phi}}{X_L} U_{\Phi} \sin \theta$$

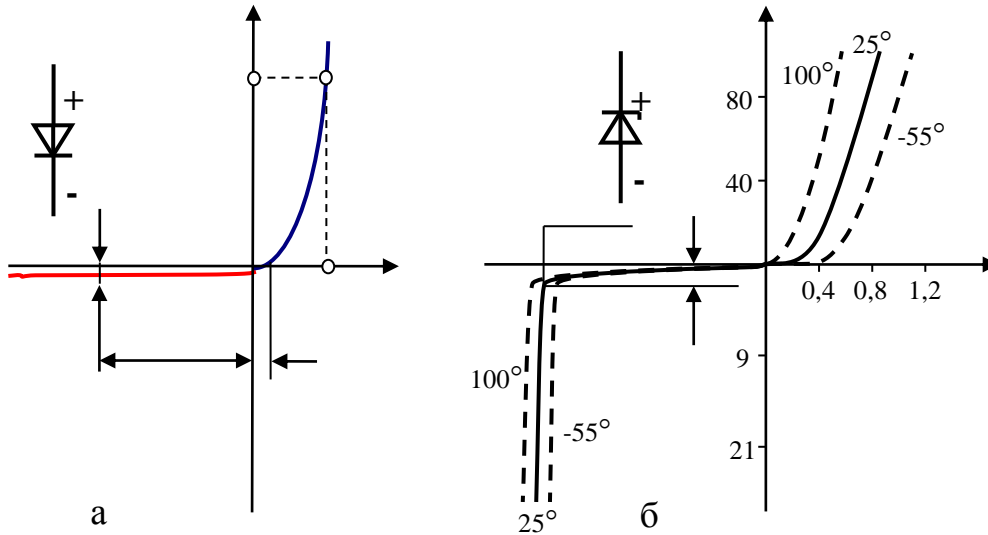
Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi}{\sqrt{3} U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi + \Delta P}$$



# 1.2.4. Моделі та параметри напівпровідникових приладів

## Діоди, стабілітрони



$$I_{\text{пр}} = I_s \left( e^{\frac{U_{\text{пр}} - \Delta U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_{\text{зв}} T \approx I_s \cdot 2^{0,13 T - T_0}$$

$$U_{\text{пр}} = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{\text{пр}}}{I_s} + 1 \right) + I_{\text{пр}} R_0$$

$$r_d = \frac{\varphi_T}{I_{\text{пр}} + I_s}$$

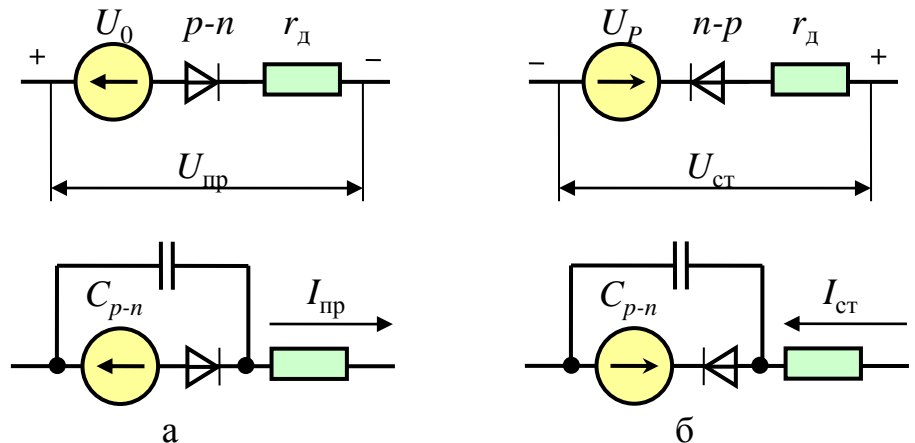
$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{dU_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{dT} \cdot 100\%$$

### Схеми заміщення (моделі)

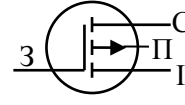
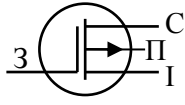
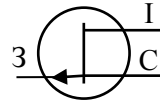
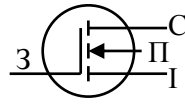
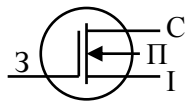
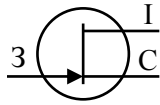
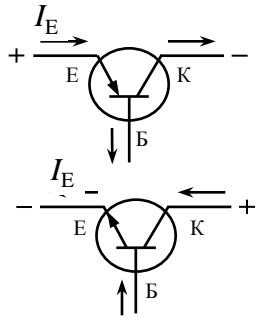
### Параметри діодів та стабілітронів

$U_{\text{зв.max}}$ ;  
 $I_{\text{пр.max}}$ ;  
 $I_{\text{ср.max}}$ ;  
 $I_{\text{пр.и}}$ ;  
 $I_{\text{зв.ср}}$ ;  
 $U_{\text{пр.ср}}$ ;  
 $R_{\text{ср}}$

$U_P$ ;  
 $U_{\text{ст}}$   
 $(I_{\text{ст}})$ ;  
 $I_{\text{ст.max}}$ ;  
 $I_{\text{ст.min}}$ ;  
 $r_{\text{ст}}$ ;  
 $\alpha_{\text{ст}}$ .



# Транзистори в лінійному режимі

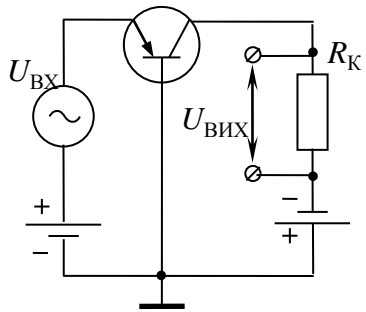


$$I_E = I_B + I_C$$

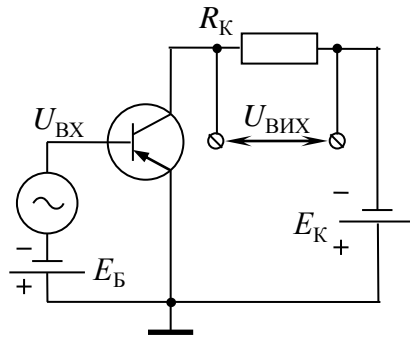
$$E_K = U_{KE} + I_C R_K$$

коефіцієнт передачі струму бази

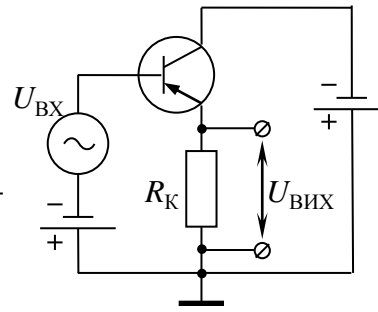
$$\beta = \left. \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\Delta I_{\text{БХ}}} \right|_{\text{OE}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$



а  
Спільна база



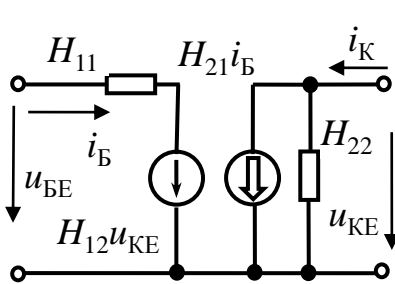
б  
Спільний емітер



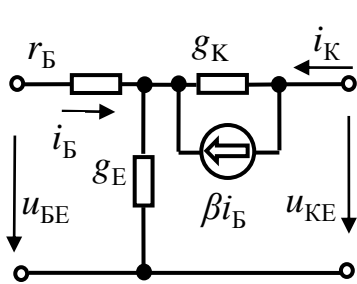
в  
Спільний колектор

$$\begin{cases} u_{BE} = H_{11}i_B + H_{12}u_{KE} \\ i_C = H_{21}i_B + H_{22}u_{KE} \end{cases}$$

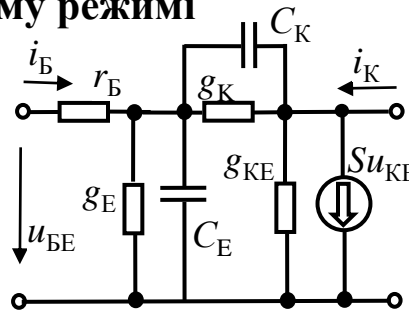
## Схеми заміщення в лінійному режимі



а



б



в

## H – параметри

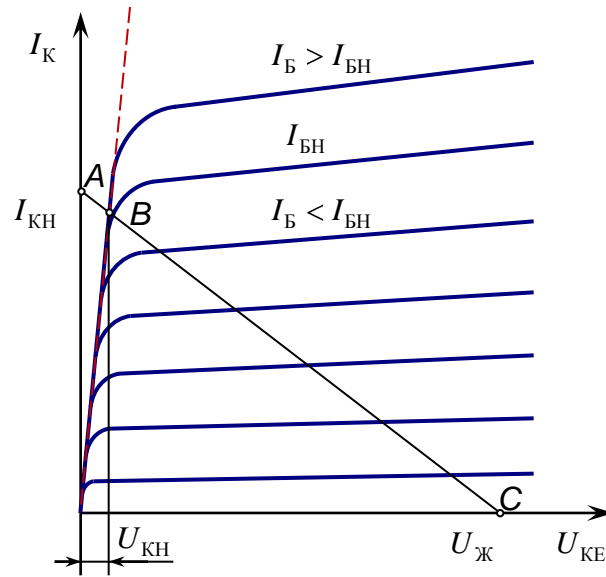
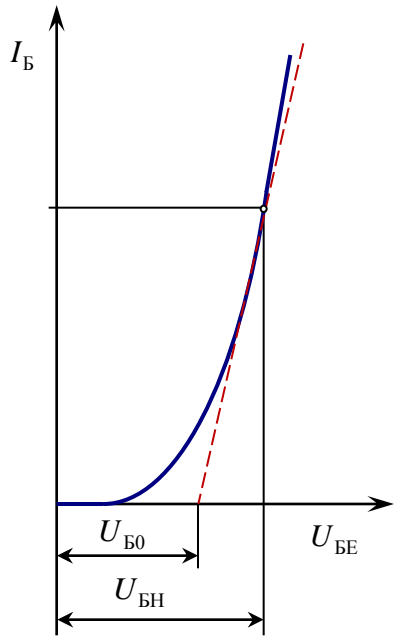
$$H_{11} = \left. \frac{u_{BE}}{i_B} \right|_{u_{KE}=0}$$

$$H_{12} = \left. \frac{u_{BE}}{u_{KE}} \right|_{i_B=0}$$

$$H_{21} = \left. \frac{i_C}{i_B} \right|_{u_{KE}=0}$$

$$H_{22} = \left. \frac{i_C}{u_{KE}} \right|_{i_B=0}$$

# Транзистори в ключовому режимі

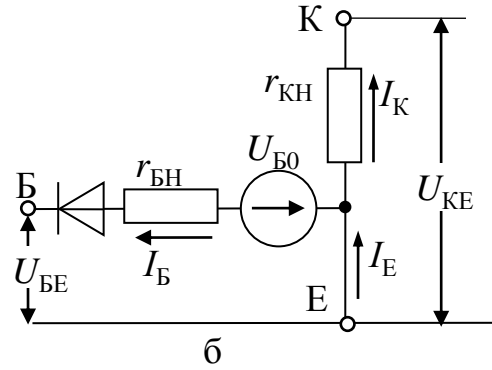
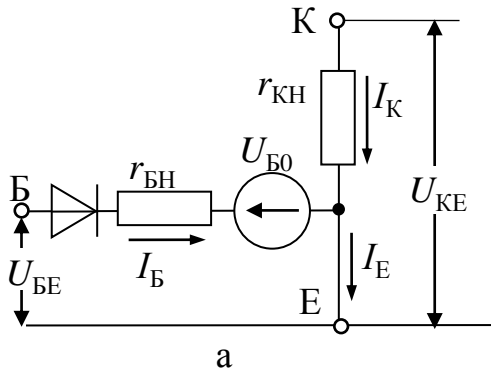


Робочі характеристики

## параметрами постійного струму та великого сигналу

- зворотний струм колектора  $I_{К0}$ ;
- зворотний струм емітера  $I_{Е0}$ ;
- струм колектора насичення  $I_{КН}$ ;
- напруга насичення на виході  $U_{КЕН}$ ;
- струм бази насичення  $I_{БН}$ ;
- напруга насичення на вході  $U_{БЕН}$ ;

## Інваріантні параметрами в стані насичення



Схеми заміщення в режимі насичення

$$r_{БН} = \frac{U_{БЕН} - U_{Б0}}{I_{БН}}$$

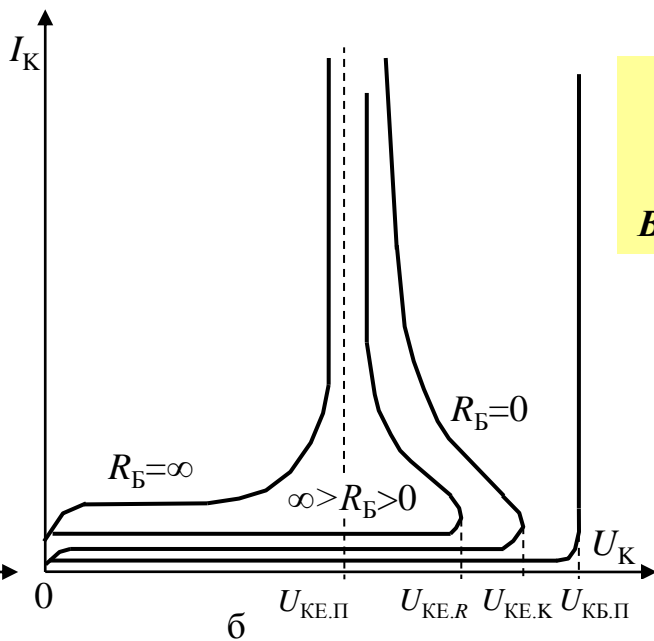
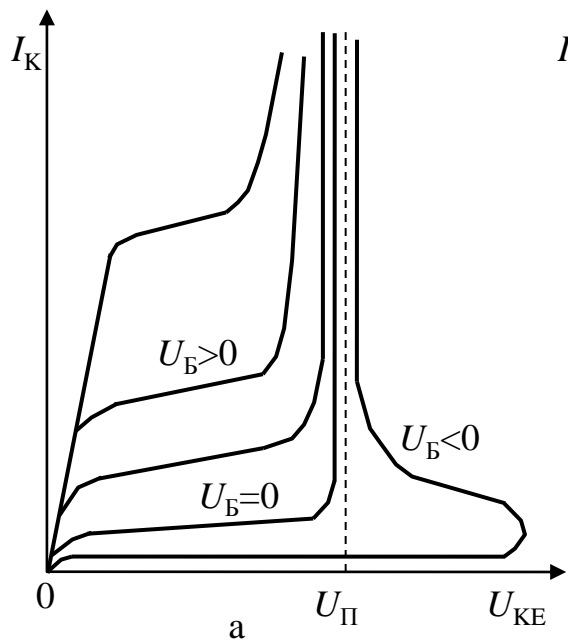
$$r_{КН} = \frac{U_{КЕН}}{I_{КН}}$$

$$\beta_c = \frac{I_{КН}}{I_{БН}}$$

## ступінь насичення

$$s = \frac{I_{Б}}{I_{БН}}$$

$$I_{Б} > I_{БН}$$



**Первинний пробій**  
**Лавинний (електричний) пробій**  
 коефіцієнт лавинного розмноження  
**Вольт-амперні характеристики пробою**

$$\xi = \left[ 1 - \left( \frac{U_{3B}}{U_{\Pi}} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$I_K = \beta I_E + I_{K0} \xi$$

$$I_B = I_E - \beta I_E + I_{K0} \xi$$

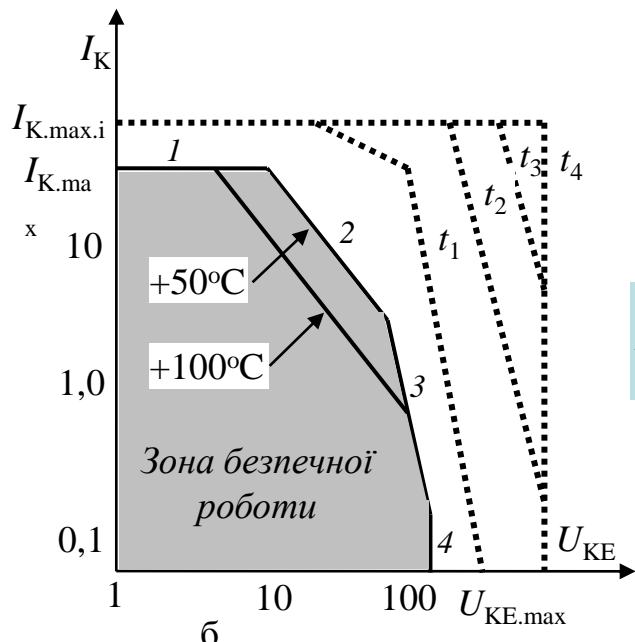
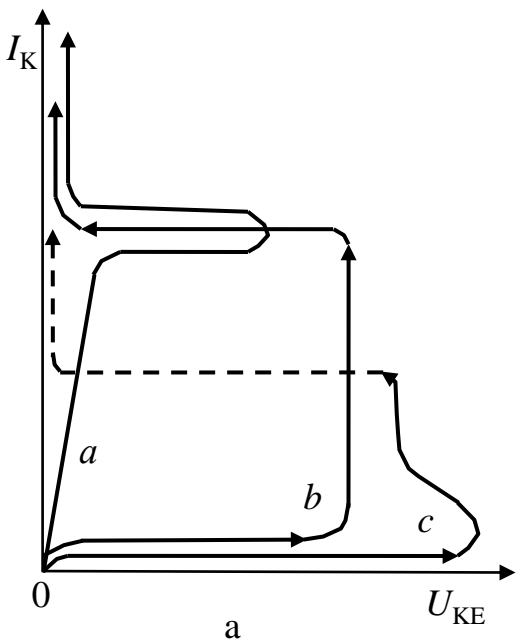
$$I_K = \frac{I_{K0} \xi}{1 - \beta \xi}$$

**Тепловий пробій**  
**тепловий опір**

$$U_{KE.R} = U_{КБ.П} \sqrt{1 - \frac{R_B \beta}{R_E + R_B}}$$

$$R_{TV} = \frac{T_V - T_C}{P_V}$$

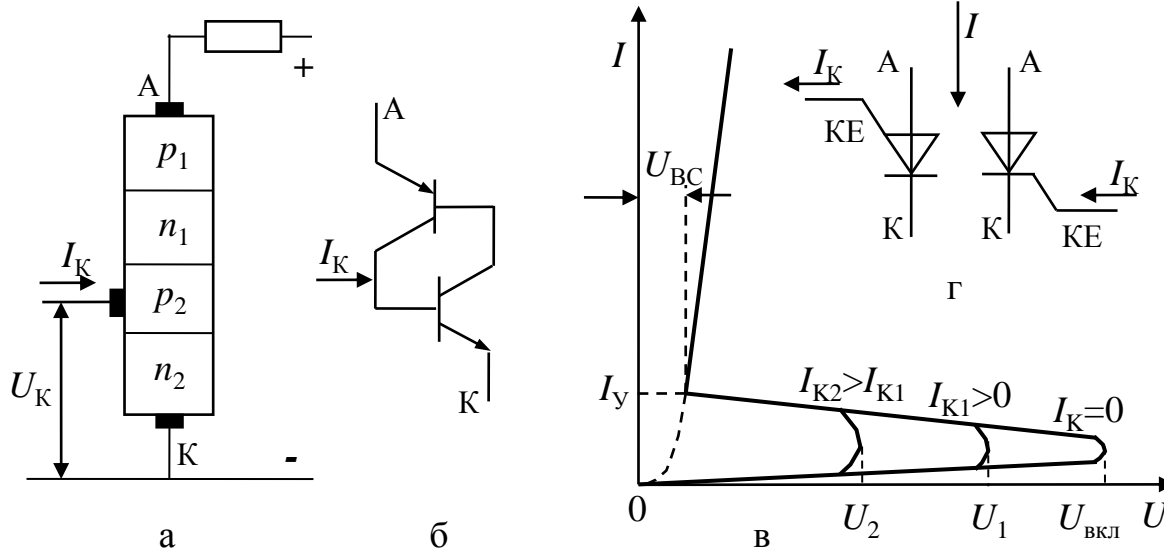
$$P_{V.max} = \frac{T_{V.max} - T_C}{R_{TV}}$$



**Пробій струмом**  
**Вторинний пробій**

$$I_{K.max} = C_K E_{\Pi} V_S$$

# Керований тиристор



Структура,  
схема заміщення

Вольт-амперна характеристика

параметри

- напруга включення (пробою)  $U_{вкл}$ ;
- падіння напруги у відчиненому стані  $U_{BC}$ ;
- максимальна напруга в зворотному напрямку  $U_{зв.мах}$ ;
- максимальний струм в прямому напрямку  $I_{пр.мах}$ ;
- струми керування, що зачиняють та відчиняють  $I_K$ ;
- струм утримання  $I_Y$ ;
- диференційний опір у відчиненому стані  $r_D$ ;
- потужність, що розсіюється при заданому режимі  $P$ ;
- часові параметри динамічного режиму.