

822640

Ръководство  
за лабораторни  
упражнения  
по електромеханични  
 устройства  
И. Ваклев М. Стоянов



техника

# ОБЩИ ВЪПРОСИ ОТ ИЗПИТВАНЕТО НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ УСТРОЙСТВА

## 1.1. ВИДОВЕ ИЗПИТВАНИЯ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ УСТРОЙСТВА

### 1.1.1. ПРОМИШЛЕНИ ИЗПИТВАНИЯ

Действуващите стандарти предвиждат три основни вида промишлени изпитвания: периодични, типови и приемно-предавателни.

Програмите за промишлените изпитвания се дават в стандартите на отделните видове електромеханични устройства (електрически машини и апарати).

Периодични изпитвания се правят на два броя представители от даден типоразмер от редовното производство по пълната програма за изпитване, предвидена за даденото изделие. Целта на тези изпитвания е да се контролира стабилността на качеството на продукцията. Те се провеждат периодично, но не по-рядко от един път на три години.

Типови изпитвания се правят при изменение на конструкцията, технологията или използваните материали, ако тези промени могат да се отразят на техническите и експлоатационните характеристики на изделията, а също така, когато приемно-предавателните изпитвания дават повтарящи се недопустими отклонения от резултатите на последните периодични изпитвания. При изпитването се проверяват само тези показатели, които могат да бъдат повлияни от направеното изменение.

На приемно-предавателни изпитвания се подлага всяко новопроизведено изделие в завода производител. Програмата за приемно-предавателните изпитвания е значително съкратена в сравнение с програмата за периодичните изпитвания. Целта на приемно-предавателните изпитвания е да се установи дали произведеното изделие съговаря на изискванията на стандартите.

Освен посочените основни промишлени изпитвания може да се провеждат също специални и изследователски изпитвания.

Ф 1369 | 2022

## 1.1.2. УЧЕБНИ ИЗПИТВАНИЯ

Това са изпитващията на електрически машини и апарати, които се провеждат по време на лабораторните упражнения в учебните заведения. По принцип тези изпитвания се провеждат по същия начин, както и в промишлените лаборатории. Програмата на спитните изследвания е такава, че да се постигнат целите, които се поставят пред лабораторните упражнения, а именно:

- а) запознаване на студентите с конструкцията на различните видове електрически машини и апарати;
- б) запознаване с методите за тяхното изпитване;
- в) придобиване на умение за правилен подбор на измервателни апарати, пускова и регулираща апаратура, необходими за провеждане на изследванията;
- г) придобиване на практически навици при свързване на схеми и провеждане на измерванията;
- д) създаване на умение за обработка и анализ на опитните резултати;
- е) вникване във физическата същност на явленията и процесите в електрическите машини и апарати и като краен резултат — осъществление и задълбочаване познанийта, получени в лекциите.

## 1.2. НОМИНАЛЕН РЕЖИМ И НОМИНАЛНИ ВЕЛИЧИННИ

### 1.2.1. НОМИНАЛЕН РЕЖИМ И НОМИНАЛНИ ВЕЛИЧИННИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МАШИНИ

Номинален режим на работа на електрическата машина се нарича режимът на работа при условия, за които тя е предназначена от завода производител.

Номиналният режим се характеризира с величините, означени на табелката, която се закрепва към корпуса на машината. Поважните данни, които се дават на табелката, са следните: а) номинална мощност; б) номинално напрежение; в) номинален ток; г) номинална честота; д) брой на fazите; е) номинална честота на въртене; ж) съединение на намотките; з) фактор на мощността.

При машини с много малка мощност няма възможност да бъде поставена табелка. В тези случаи на корпуса на машината се поставят само типът и фабричният номер. Номиналните данни се отразяват в паспорта на машината и в съответния стандартизиран документ.

Терминът „номинален“ може да се употреби и за величини, не посочени на табелката, но отнасящи се за номиналния режим на работа, например номинален въртящ момент, номинален коефициент на полезно действие и т. н.

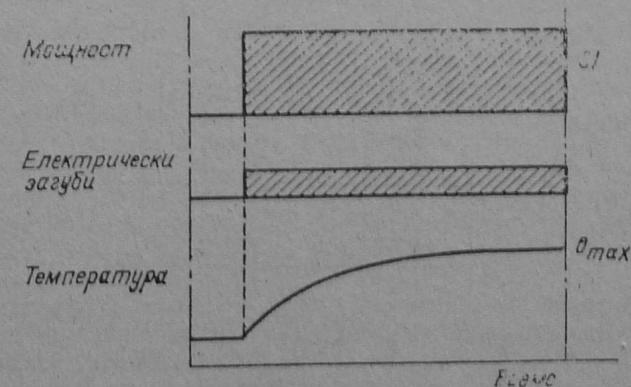
Терминът „номинална мощност“ се употребява в следния смисъл:

- а) за генератори за постоянен ток — електрическата мощност на изводите на машината, изразена във W, kW или MW;
- б) за синхронни генератори — привидната електрическа мощност на изводите на машината, изразена във VA, kVA или MVA;
- в) за електродвигатели — полезната механична мощност на вала, изразена във W, kW или MW;
- г) за синхронни компенсатори — реактивната мощност на изводите на машината, изразена във VAr, kVAr или MVAр;
- д) за пресбразуватели — спределя се по споразумение между производителя и потребителя.

При трифазни машини под номинално напрежение се разбира линейното напрежение.

Стандартът определя осем режима на работа (*S1* до *S8*). Основни са първите три от тях.

Режим на продължителна работа (*S1*) е този, при който машината работи при постепенно външно натоварване и продължителност, достатъчна за достигане на практически установена температура на машината (фиг. 1.1). При този режим машината може да работи неограничено време, без температурите на отделните ѝ части да надвишават допустимите стойности.

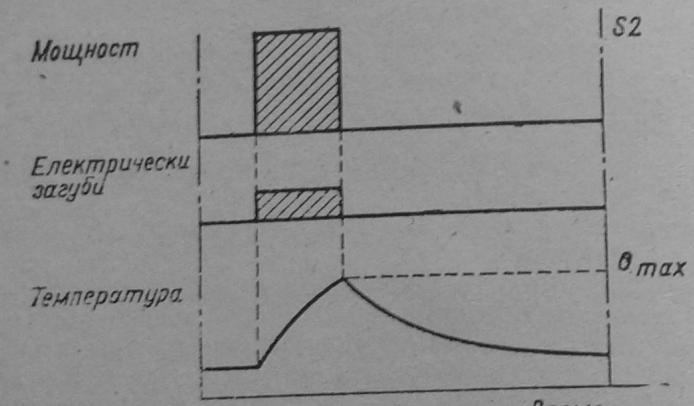


Фиг. 1.1

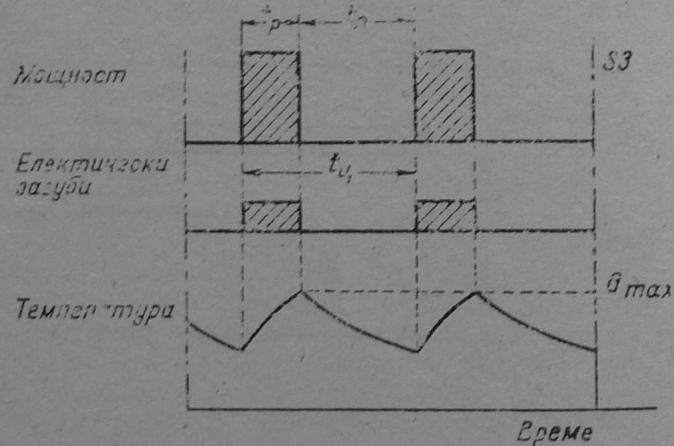
Режим на кратковремена работа (*S2*) е този, при който машината работи при постепенно външно натоварване с определена продължителност, недостатъчна за достижане на практически установена температура на машината, след което следва електрическо изключване с продължителност, достатъчна за охлаждане на машината до студено състояние (фиг. 1.2). При този режим машината може да работи в течение на времето, по-

сочено на нейната табелка, без температурите на отделните  $\lambda$  части да превишат допустимите стойности. Определени са следните стандартни продължителности на кратковременна работа: 10, 30, 60 и 90 min.

#### Режим на повторно-кратковременна работа



Фиг. 1.2



Фиг. 1.3

( $S_3$ ) е този, който се характеризира с периодично повторящи се интервали на пускане, постоянно външно натоварване и електрическо изключване (фиг. 1.3). Тези интервали не са достатъчни за достигане на практически установена температура както по време на загряването, така и по време на охлажддането. За режима  $S$

характеризираща величина е относителната продължителност на работа:

$$OPR = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100, \%$$

където  $t_p$  е времето, през което машината работи при постоянно външно натоварване;

$t_n$  — времето, през което машината е изключена;

$t_u$  — продължителността на цикъла.

Определени са следните стандартни стойности на относителната продължителност на работа: 15, 25, 40 и 60 %. Продължителността на един цикъл, ако няма други указания, се приема равна на 10 min.

#### 1.2.2. Номинален режим и номинални величини на трансформаторите

Номинален режим на работа на трансформатора се нарича режимът на работа, за който трансформаторът е предназначен от завода производител.

Номиналният режим се характеризира с величините, посочени на заводската табелка. Табелката трябва да бъде здраво закрепена на място, даваща възможност за удобно и безопасно четене на нанесените данни при включен под напрежение трансформатор.

По-важните данни, които съдържа табелката на всеки силов трансформатор, са следните: а) номинална мощност; б) номинални напрежения; в) номинални токове; г) номинална честота; д) брой на фазите; е) схема и група на свързване; ж) номинално напрежение на късо съединение; з) степен на защита; и) начин на охлажддане; к) вид на монтажа (открыт или закрит); л) вид на режима на работа.

Номиналната мощност  $S_n$  на двунамотъчен трансформатор, посочена на табелката му, представлява мощността на всяка от намотките на трансформатора и е равна на произведението от номиналното напрежение, номиналния ток и фазовия множител, който при еднофазните трансформатори е равен на 1, а при трифазните — на  $\sqrt{3}$ , т. е.

$$S_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n}; \quad S_n = \sqrt{3} U_{1n} I_{1n} = \sqrt{3} U_{2n} I_{2n}, \text{ VA.}$$

Номиналната мощност на тринамотъчен трансформатор е мощността, дадена на табелката на трансформатора и равна на най-голямата от номиналните мощности на намотките му.

Номинално напрежение на намотка е посочената на табелката

ефективна стойност на напрежението между линейните изводи на намотката при празен ход на трансформатора.

Номинален тек на намотка е посочената на табелката на трансформатора стойност на тока, която се получава чрез разделяне на номиналната мощност на намотката на номиналното ѝ напрежение и фазовия множител.

### 1.3. ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

При изпитванията на електрически машини и апарати се налага измерването на следните електрически величини: тек, напрежение, мощност, честота и съпротивление.

При свързване на схемите за изпитванията особено важен е правилният избор на измервателните апарати. При това трябва правилно да се прецени обхватът на измервателния апарат и класът на неговата точност.

Обхватът на апаратът се подбира съобразно с очакваните стойности на измерваната величина (указания са дадени в отделните улражнения). Отклонението на стрелката трябва да бъде в границите от 30 до 95% от максималното. При измерване на мощност в трифазни вериги по метода на двата ватметъра произведението от напрежението и тока във ватметрите трябва да бъде не по-малко от 20% от произведението на номиналния тек и номиналното напрежение на ватметрите.

Измервателните апарати, както е известно, се разделят на седем класа на точност: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. В повечето случаи е достатъчно да се използват апарати с клас на точност 1,5, но при точни измервания класът на точност не трябва да бъде по-нисък от 0,5.

Честотата се измерва с вибрационни, стрелкови или най-точно с цифрови честотомери.

#### 1.3.1. ИЗМЕРВАНЕ НА ТОК, НАПРЕЖЕНИЕ И МОЩНОСТ ПРИ ПОСТОЯНЕН ТОК

За измерване на тек и напрежение се използват предимно амперметри и волтметри от магнитоелектричната система (фиг. 1.4). Мощността се изчислява като произведение на напрежението и тока.

Стойностите на измерените тек  $I$ , напрежение  $U$  и мощност  $P$  са

$$I = k_A \alpha; \quad k_A = \frac{I_n}{\alpha_n};$$

$$U = k_V \alpha; \quad k_V = \frac{U_n}{\alpha_n}; \quad P = UI,$$

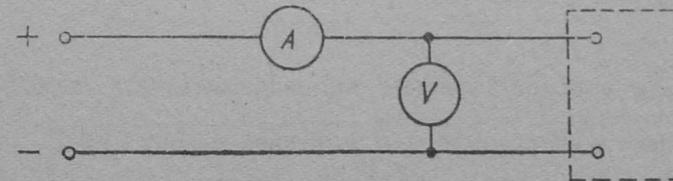
където  $\alpha$  е отклонението на стрелката на съответния апарат в скални деления;

$k_A$  и  $k_V$  са константите на амперметъра и волтметъра;

$I_n$  е номиналният тек на амперметъра;

$U_n$  — номиналното напрежение на волтметъра;

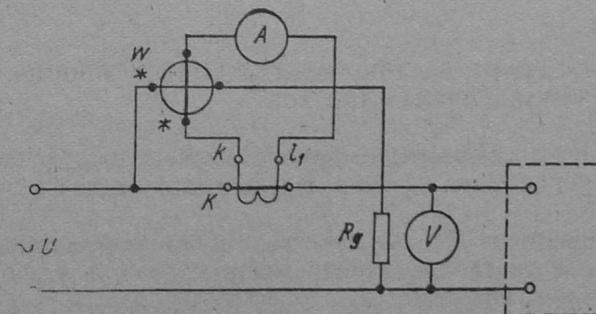
$\alpha_n$  — общият брой на скалните деления на апарата.



Фиг. 1.4

#### 1.3.2. ИЗМЕРВАНЕ НА ТОК, НАПРЕЖЕНИЕ И МОЩНОСТ ПРИ ЕДНОФАЗЕН ПРОМЕНИЛВ ТОК

В случая най-често текът и напрежението се измерват с амперетри и волтметри от електромагнитна система, а активната мощност — с ватметри от електродинамичната система (фиг. 1.5).



Фиг. 1.5

При необходимост обхватът на амперметъра и токовият обхват на ватметъра се разширяват с токов трансформатор, чийто коефициент на трансформация е

$$k_I = \frac{I_{1n}}{I_{2n}},$$

където  $I_{1n}$  и  $I_{2n}$  са номиналните първичен и вторичен ток.

Най-често номиналният вторичен ток на токовите трансформатори е 5 A и само в редки случаи той е 1 A. В никакъв случай не бива вторичната намотка на токовия трансформатор да остава отворена, тъй като в нея би се индуктирало опасно високо напрежение.

При необходимост напрежителният обхват на ватметъра се разширява с допълнителен резистор  $R_d$ . Ако е необходимо обхватът да бъде разширен  $m$  пъти, допълнителното съпротивление трябва да има стойност

$$R_d = (m-1) R_w,$$

където  $R_w$  е съпротивлението на напрежителната намотка на ватметъра.

Измерените напрежение, ток и активна мощност са

$$I = k_A \alpha; \quad k_A = \frac{I_n}{\alpha_n} \quad k_f; \quad U = k_V \alpha; \quad k_V = \frac{U_n}{\alpha_n};$$

$$P = k_W \alpha; \quad k_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_n} \quad k_f m,$$

където  $U_n$  и  $I_n$  са номиналните напрежение и ток на ватметъра;

$k_W$  е константата на ватметъра.

Естествено, когато не е включен токов трансформатор,  $k_f=1$ , а когато не е включен допълнителен резистор,  $m=1$ .

### 1.3.3. ИЗМЕРВАНЕ НА ТОК, НАПРЕЖЕНИЕ И МОЩНОСТ ПРИ ТРИФАЗЕН ПРОМЕНЛИВ ТОК

Най-често за измерване на активна мощност в предвидените лабораторни упражнения се използва методът на двата ватметъра (фиг. 1.6).

Определянето на  $R_d$ , на константите на измервателните апарати, на измерените ток и напрежение става по същия начин както в предишната точка.

Активната мощност на трифазната система се определя по формулата

$$P = k_W (\alpha_1 \pm \alpha_2),$$

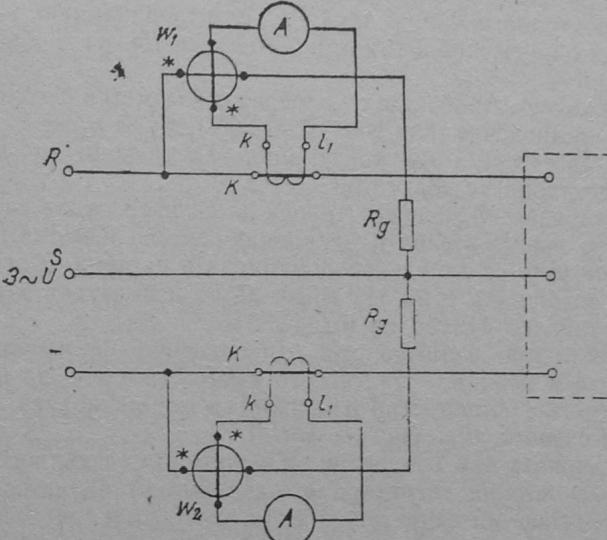
където  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  са отклоненията на стрелките на двата ватметъра в скални деления.

Характерното за тази схема (схема на Арон) е следното.

Когато факторът на мощността  $\cos \phi$  е по-голям от 0,5, т. е.

$\phi < 60^\circ$ , стрелките на двата ватметъра се отклоняват в правилна посока и двете показания се събират.

Когато  $\cos \phi < 0,5$ , т. е.  $\phi > 60^\circ$ , стрелката на единия ватметър се отклонява в обратна посока. В този случай е необходимо или



Фиг. 1.6

напрежителната, или токовата намотка на този ватметър да се превключи, а показванията на двата ватметъра трябва да се изваждат.

### 1.3.4. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНЫ ПРИ МИКРОМАШИННИТЕ

Принадлежат към електрически микромашини да се наричат машините с мощност под 600 W. При тяхното изпитване има някои особености поради това, че трябва да се измерват твърде малки токове, напрежения и мощности. При това собствената консумация на измервателните апарати става съизмерима с консумираната мощност от микромашината.

За постигане на достатъчна точност при измерванията трябва:

- а) да се направи грижлив подбор на измервателните апарати;
- б) да се избере такава схема на включване на измервателните апарати, при която влиянието на собствената им консумация е минимално;
- в) да се коригират измерените величини, като се отчете собствената консумация на измервателните апарати.

Използваните амперметри трябва да имат малко вътрешно съпротивление. При измерване на ток до 1 А се препоръчва използването на детекторни апарати, чиято собствена консумация е малка. За измерване на токове над 1 А може да се използват както електромагнитни, така и електродинамични апарати. Следът на напрежение в тях при номинален ток не трябва да надвишава 0,5 V.

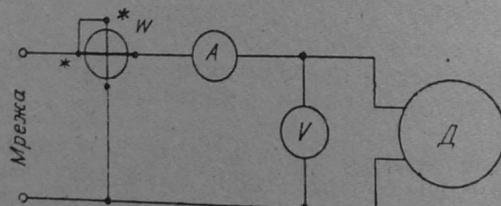
Напрежението трябва да се измерва с волтметри с голямо вътрешно съпротивление (над 500—1000  $\Omega/V$ ), за да може да се преебрегне собствената им консумация. Подходящи са детекторните и електронните волтметри.

За измерване на мощност трябва да се използват ватметри с високоомна напрежителна и нискоомна токова намотка. Обикновено ватметрите са от електродинамичната система. Когато факторът на мощността е нисък, може да се използват ватметри с нисък номинален фактор на мощността.

Най-често при изпитванията едновременно се измерват ток, напрежение и мощност. От многото възможни схеми за включване на ватметър, амперметър и волтметър се препоръчва използването на схемата, показана на фиг. 1.7.

Тук грешката при измерване на мощността се дължи на това, че напрежението на ватметъра е по-голямо от напрежението на двигателя с пада на напрежение в амперметъра и токовата намотка на ватметъра. Напрежението се измерва непосредствено на изводите на двигателя. Измерваният ток практически е равен на тока на двигателя, тъй като токът през волтметъра е незначителен.

Измерената мощност може да се коригира, като се вземе предвид собствената консумация на апаратите:



Фиг. 1.7

$$P_{an} = I^2(R_A + R_{lw}),$$

където  $R_A$  е вътрешното съпротивление на амперметъра;  
 $R_{lw}$  — съпротивлението на токовата намотка на ватметъра.

### 1.3.5. ИЗМЕРВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕТО НА НАМОТКИТЕ

Съпротивлението на намотките на машините, трансформаторите и апаратите се измерва с постоянен ток по един от следните методи:

- а) метод на амперметъра и волтметъра;
- б) метод с единичен мост;
- в) метод с двоен мост;
- г) метод с уред на логометричен принцип.

При измерване на съпротивления, по-малки от 1  $\Omega$ , използване на единичен мост и логомер не се допуска.

Измерването се провежда при практически студено състояние на машината. Practически студено състояние на машината е това състояние, при което температурата на отделните ѝ части не се различава от температурата на околната среда с повече от 3 °C.

При измерване на съпротивлението на намотките на електрическите машини стойността на постоянния ток и продължителността на неговото протичане трябва да бъдат, както следва:

- а) при мощност до 0,1 kW не повече от 10% от номиналния ток на намотката в продължение на 10 s;
- б) при мощност 0,1 до 10 kW не повече от 15% от номиналния ток на намотката в продължение на 40 s;
- в) при мощност над 10 kW не повече от 20% от номиналния ток на намотката в продължение на 60 s.

При измерване на съпротивлението на намотките на трансформаторите постоянният ток не трябва да надвишава  $\frac{1}{5}$  от номиналния ток на намотката. Ако измерването е с продължителност до 1 min, допуска се ток, по-голям от  $\frac{1}{5}$  от номиналния.

Ограниченията по отношение на големината на тока и неговата продължителност се налагат, за да не се нагрява намотката по време на измерването.

При измерване на съпротивление по метода на амперметъра и волтметъра измервателните апарати трябва да бъдат от магнето-електричната система. Използват се схемите, показани на фиг. 1.8 и 1.9. Първата се използва за измерване на малки съпротивления (от порядъка на 1  $\Omega$  и по-малки), а втората — за измерване на големи съпротивления.

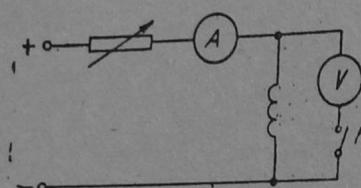
Ако грешката, която се внася от вътрешното съпротивление на апаратите, е по-голяма от 1%, действителната стойност на съпротивлението на намотката, включена съгласно фиг. 1.8, се определя по формулата,

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}.$$

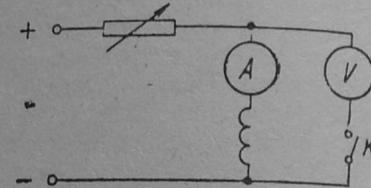
За намотката, включена съгласно фиг. 1.9, съпротивлението се определя по формулата

$$R = \frac{U}{I} - R_A.$$

Тук  $U$  и  $I$  са показанията на волтметъра и амперметъра, а  $R_V$  и  $R_A$  — техните вътрешни съпротивления.



Фиг. 1.8



Фиг. 1.9

Ако намотката има голяма индуктивност, за да се предпази волтметърът от повреда, той трябва да се включва след установяването на тока и да се изключва преди прекъсването на тока. За тази цел в схемите на фиг. 1.8 и 1.9 е предвиден ключът  $K$ .

При измерване на съпротивлението на трифазна намотка, свързана в звезда с недостъпна нулева точка (фиг. 1.10), се постъпва по следния начин.

Измерват се съпротивленията  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$  и  $R_{CA}$  между линейните изводи  $A-B$ ,  $B-C$  и  $C-A$ . В този случай

$$R_{AB} = R_A + R_B;$$

$$R_{BC} = R_B + R_C;$$

$$R_{CA} = R_C + R_A.$$

Тук  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_C$  са съпротивленията на трите фази  $A-X$ ,  $B-Y$  и  $C-Z$ .

Като се реши получената система уравнения, за съпротивлението на отделните фази се получава:

$$R_A = \frac{R_{AB} + R_{CA} - R_{BC}}{2};$$

$$R_B = \frac{R_{BC} + R_{AB} - R_{CA}}{2};$$

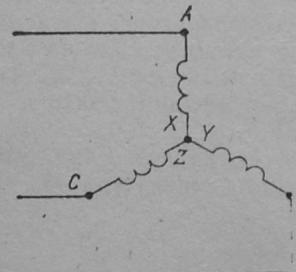
$$R_C = \frac{R_{CA} + R_{BC} - R_{AB}}{2}.$$

Обикновено  $R_{AB} \approx R_{BC} \approx R_{CA}$ . В този случай се взема тяхната средноаритметична стойност:

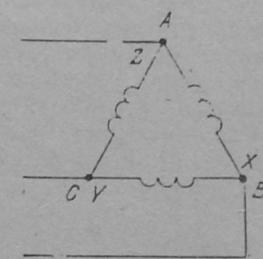
$$R_{cp, n} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{3}.$$

Средната стойност на съпротивлението на една фаза се определя по формулата

$$R_\Phi = \frac{R_{cp, n}}{2} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{6}.$$



Фиг. 1.10



Фиг. 1.11

Когато трифазната намотка е свързана в триъгълник (фиг. 1.11) и не е възможно разединяването на отделните фази, трябва да се измерят съпротивленията  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$  и  $R_{CA}$ , които в случая са равни на:

$$R_{AB} = \frac{R_A (R_B + R_C)}{R_A + R_B + R_C};$$

$$R_{BC} = \frac{R_B (R_C + R_A)}{R_A + R_B + R_C};$$

$$R_{CA} = \frac{R_C (R_A + R_B)}{R_A + R_B + R_C}.$$

Като се реши горната система уравнения, за съпротивлението на трите фази се получава:

$$R_A = \frac{1}{2} \left[ \frac{4R_{BC}R_{CA}}{-R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} - (-R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}) \right];$$

$$R_B = \frac{1}{2} \left[ \frac{4R_{CA}R_{AB}}{R_{AB} - R_{BC} + R_{CA}} - (R_{AB} - R_{BC} + R_{CA}) \right];$$

$$R_C = \frac{1}{2} \left[ \frac{4R_{AB}R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}} - (R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}) \right].$$

Когато  $R_{AB} \approx R_{BC} \approx R_{CA}$ , средната стойност на съпротивлението на една фаза е

$$R_{\phi} = \frac{3R_{cp, l}}{2} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{2}.$$

Както беше казано, съпротивлението на намотките се измерва в практически студено състояние, при което може да се счита, че температурата на намотката е равна на температурата на околната среда. Измереното съпротивление се привежда към определена температура. Обикновено съпротивлението се привежда към  $20^{\circ}\text{C}$  и към т. нар. изчислителна работна температура. Изчислителната работна температура за намотки с топлинен клас на изолацията A, E и B е  $75^{\circ}\text{C}$ , а при класове F или H тя е  $115^{\circ}\text{C}$ . Това се прави с цел да се сравняват еднотипни машини, както и за сравняване на изчислителни и опитни резултати.

Съпротивлението  $R$  на една медна намотка, измерено при температура  $\Theta$ , може да се приведе към друга температура  $\Theta_x$  по формулата

$$R_x = R \frac{235 + \Theta_x}{235 + \Theta},$$

където  $R_x$  е съпротивлението на намотката при температура  $\Theta_x$ .

При използване на намотки от други метали числото 235 трябва да се замени с reciproчната стойност на температурния коефициент на съпротивление при  $0^{\circ}\text{C}$  за съответния метал. Например при алуминиеви намотки числото 235 трябва да се замени с числото 245.

#### 1.4. ИЗМЕРВАНЕ НА НЕЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

При провеждане на изпитванията се налага измерването на следните неелектрически величини: въртящ момент и честота на въртене.

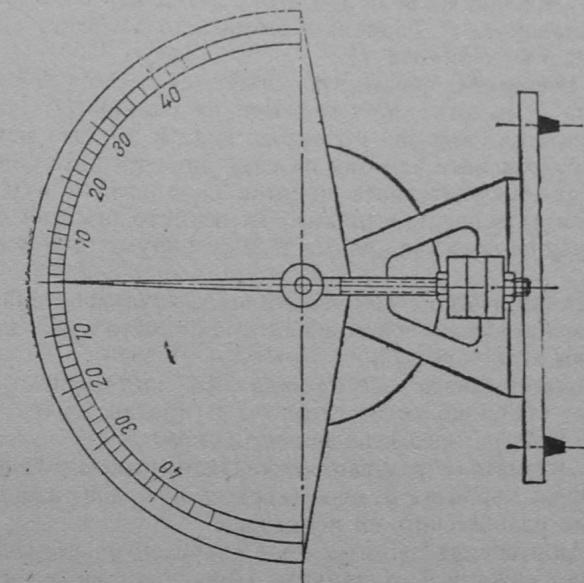
От множеството начини за натоварване и определяне на въртиращия момент на изпитваните електрически двигатели, както и за измерване на честота на въртене, тук се разглеждат само тези, които се използват в предвидените лабораторни упражнения.

##### 1.4.1. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СПИРАЧКА

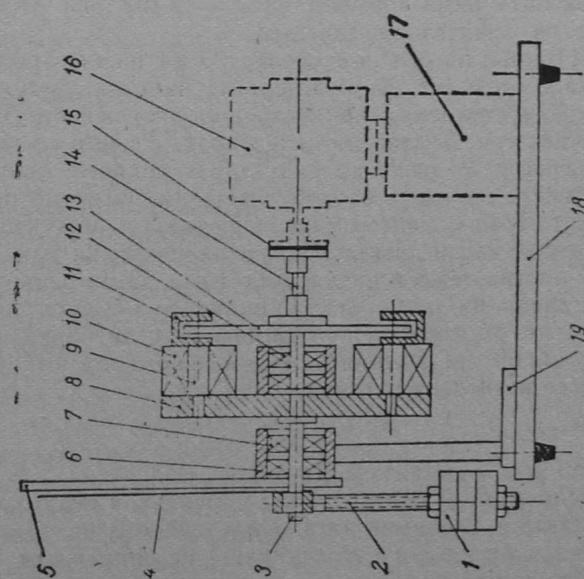
Електромагнитната спиралка се използва за натоварване и за измерване на момента на изпитвания двигател.

Едно от възможните изпълнения на електромагнитна спиралка е показано на фиг. 1.12. Нейното устройство е следното.

Спиралката има две основни части: индуктор и ротор. Индукторът възбуджа магнитно поле, в което се върти роторът (дискът) на спиралката, задвижван от изпитвания двигател.



Фиг. 1.12



Индукторът се състои от носещ стоманен диск 8 и шест или осем електромагнитни полюса, закрепени към него. Носещият диск е набит на вала 3, който е лагеруван в лагерите 7, поставени в главината 6. Главината се носи от юловата стойка 19, закрепена към основата 18.

Всеки електромагнитен полюс се състои от стоманена сърцевина 9, намотка 10 и полюсен накрайник 11. Намотките на полюсите са свързани последователно и по този начин се образува възбудителната намотка на електромагнитната спирачка. Изводите на възбудителната намотка са свързани към букси посредством гъвкави проводници. Полюсните намотки се свързват помежду си така, че полюсите да се получат с редуващ се поляритет.

Роторът 13 на спирачката представлява стоманен, меден или алуминиев диск, набит на вала 14, който може да се върти свободно в лагерите 12.

Към предната част на вала 3 са закрепени стрелката 4 и махало, състоящо се от стебло 2 и противотежест 1. Стрелката е разположена пред неподвижната скала 5.

Системата, образувана от индуктора, махалото и стрелката, закрепени към вала 3, не е твърдо фиксирана, а може да се люлее около равновесното си положение.

Изпитваният двигател 16 е закрепен на подходяща стойка 17 и чрез еластичен съединител 15 е куплиран с диска (ротора) на електромагнитната спирачка. При някои конструкции дисъкът на спирачката няма собствен вал, а се поставя непосредствено на вала на изпитвания двигател.

Принципът на действие на електромагнитната спирачка е следният. Възбудителната намотка на спирачката се заряжва от източник на постоянно напрежение. Преминаващият през нея ток създава магнитно поле, в което се върти дисъкът на спирачката. В диска се индуцират вихрови токове, от взаимодействието на които с възбудителното магнитно поле се създава момент. Този момент се стреми да завърти индуктора в посоката, в която се върти дисъкът. Поради наличието на махало със съответната противотежест индукторът няма да се завърти, а само ще се отклони на такъв ъгъл, при който моментът на двигателя и моментът, създаван от противотежестта, са равни. По скалата се отчита броят на деленията на  $\alpha$ , на които се е отклонила стрелка.

$$M = ka,$$

където  $k$  е константата на спирачката.

Ясно е, че за да се изчисли моментът, е необходимо да се знае константата на спирачката. Определянето на тази константа се нарича тарирание (градуиране) на спирачката.

Тариранието се извършва по следния начин. Към периферия-

та на носещия диск се закрепва здрав конец или тънък проводник, който се пуска надолу така, че да тангира към диска. В края на конеца се закрепва тежест с известна маса и се пуска да виси свободно надолу. При това стрелката ще се отклони на определен ъгъл. Ако стрелката се е отклонила на  $\alpha$  скални деления, константата на спирачката ще бъде

$$k = \frac{mgr}{\alpha}, \text{ N.m/дел},$$

където  $m$  е масата на тарировъчната тежест, kg;  
 $g$  — земното ускорение, 9,81 m/s<sup>2</sup>;  
 $r$  — радиусът на носещия диск, m.

Константата на спирачката може да бъде променена както с промяна на масата на противотежестта, така и с изменяването ѝ нагоре и надолу по стъблото. Колкото масата на противотежестта е по-малка и колкото по-нагоре е разположена, толкова по-малка е константата.

Тариранието трябва да се направи така, че да може да се обхване желаният диапазон на изменение на момента на изпитвания двигател, а освен това константата да бъде удобно за изчисление число.

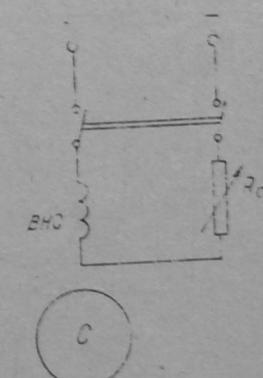
След завършване на тариранието противотежестта се закрепва здраво за стеблото на махалото с предвидените за целта гайки. Тарировъчната тежест и конеца се махат.

Скалата на разглежданата спирачка е неравномерна, тъй като моментът, създаван от противотежестта, е пропорционален на синуса от ъгъла на завъртане на стрелката спрямо нулевото ѝ положение.

Условното схематично изображение на електромагнитната спирачка е показано на фиг. 1.13. С реостата  $R_C$ , свързан последователно с възбудителната намотка на спирачката  $BNC$ , се изменя плавно токът в нея, при което ще се измени плавно и моментът, с който се натоварва изпитваният двигател.

За да се осъществи режим на прazen ход на изпитвания двигател, той трябва да бъде разкуплиран от спирачката.

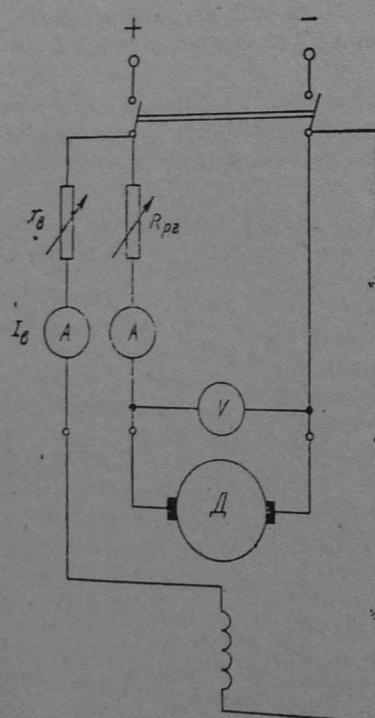
За да се осъществи режим на късо съединение на изпитвания двигател (честота на въртене, равна на нула), дисъкът на спирачката се фиксира към полюсната система с подходящ шифт. Шифтът преминава през пробития за целта отвор в диска и попада в



Фиг. 1.13

пространството между два полюса. Когато се подаде напрежение на изпитвания двигател, роторът му няма да се върти, но индукторът и съответно стрелката на спирачката се завъртат на определен ъгъл, който определя пусковия момент. При това възбудителната намотка не трябва да бъде захранена. По този начин, чрез застопоряване на диска се измерват както пусковият момент, така и пусковият ток на изпитвания двигател.

Електромагнитните спирачки, наричани още вихротекови спирачки във връзка с техния принцип на действие, се използват твърде широко, главно при изпитване на електрически микромашини. Основните им предимства са следните: а) работата с тях е лесна и удобна; б) позволяват плавно изменение на натоварването на двигателя; в) въртящият момент се отчита непосредствено; г) позволяват измерване на пусковите параметри.



Фиг. 1.14

дителен ток  $I_B$ , който се поддържа неизменен. Чрез реостата  $R_{pr}$  се установява определен възбудителен ток  $I_1$ . Резултатите се нанасят в табл. 1.1.

Недостатъци на разглежданата спирачка са невъзможността тя да се използува при ниски честоти на въртене и ограниченната ѝ точност. Грешката е от порядъка на 2,5 до 5% и се дължи на триенето в лагерите и на триенето на въртящия се диск във въздуха.

При прецизни измервания трябва да се определи допълнителният съпротивителен момент  $M_{доп}$ , дължащ се на триенето. Този момент натоварва изпитвания двигател, но не се отчита от стрелката и затова трябва да се прибави към измерения по скалата момент.

Определянето на  $M_{доп}$  става със спомагателен двигател за постоянен ток по следния начин. Най-напред спомагателният двигател се пуска да работи на празен ход по схемата, показана на фиг. 1.14. Чрез реостата  $r_B$  се установява определен възбудителен ток  $I_B$ , който се поддържа неизменен. Чрез реостата  $R_{pr}$  се установяват поредица стойности на честотата на въртене  $n$ , при всяка от които се отчитат напрежението на котвата  $U_1$  и котвеният ток  $I_1$ . Резултатите се нанасят в табл. 1.1.

Таблица 1.1

| Отчитат се        |       |       |       |       | Изчисляват се |       |           |           |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-----------|-----------|
| $n$               | $U_1$ | $I_1$ | $U_2$ | $I_2$ | $P_1$         | $P_2$ | $P_{доп}$ | $M_{доп}$ |
| $\text{min}^{-1}$ | V     | A     | V     | A     | W             | W     | W         | N·m       |
|                   |       |       |       |       |               |       |           |           |

Тъй като двигателят работи на празен ход, консумираната мощност  $U_1 I_1$  покрива загубите в него, а именно

$$P_1 = U_1 I_1 = p_{\text{мех}} + p_c + I_1^2 r_a + I_1 \Delta U_q,$$

където  $p_{\text{мех}}$  са механичните загуби на двигателя;

$p_c$  — загубите в стоманата на двигателя;

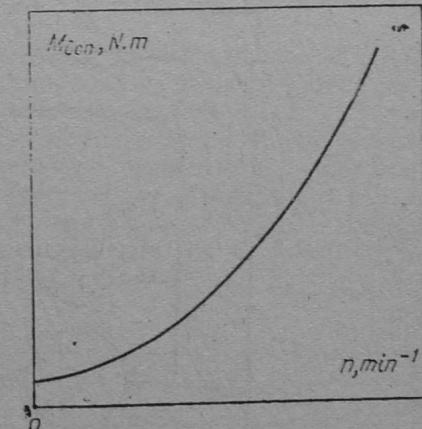
$r_a$  — съпротивлението на котвената му намотка;

$\Delta U_q$  — спадът на напрежение между четките и колектора.

След това към спомагателния двигател се куплира електромагнитната спирачка. Установява се същият възбудителен ток и се задават същите стойности на честотата на въртене, както и при първото измерване. При всяка стойност на честотата на въртене се отчитат напрежението и токът на котвата  $U_2$  и  $I_2$  и се нанасят в табл. 1.1. Консумираната сега мощност  $U_2 I_2$  е по-голяма, отколкото в първия случай, тъй като към загубите в двигателя се добавя и допълнителната мощност  $P_{доп}$ , необходима за покриване на механичните загуби на спирачката, т. е.

$$P_2 = U_2 I_2 = p_{\text{мех}} + p_c + I_2^2 r_a + I_2 \Delta U_q + P_{\text{доп}},$$

Сумарните загуби  $p_{\text{мех}} + p_c$  при първото и при второто измерване са еднакви, защото възбудителният ток  $I_B$  и честотата на въртене  $n$  в двата случая са еднакви. Тогава допълнителната мощност е



Фиг. 1.15

$$P_{\text{доп}} = P_2 - P_1 - (I_2^2 - I_1^2)r_a - (I_2 - I_1)\Delta U_a,$$

а съответният допълнителен момент ще бъде

$$M_{\text{доп}} = \frac{60P_{\text{доп}}}{2\pi n}.$$

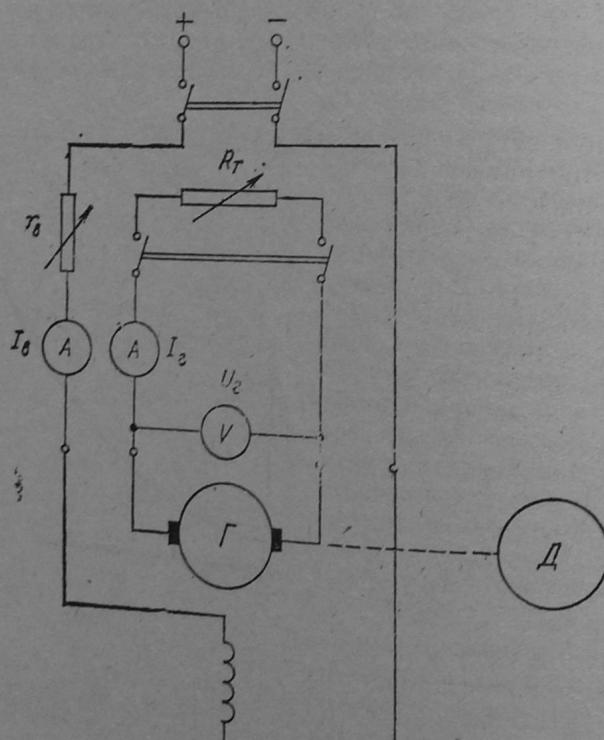
По данните от табл. 1.1 се построява зависимостта  $M_{\text{доп}} = f(n)$ , показана на фиг. 1.15.

Действителният съпротивителен момент, с който се натоварва изпитваният двигател, е

$$M = M_{\text{отч}} + M_{\text{доп}},$$

където  $M_{\text{отч}}$  е отчетеният по скалата на спирачката момент;  $M_{\text{доп}}$  — допълнителният момент, който се отчита от кривата на фиг. 1.15 при съответната честота на въртене.

С въвеждането на корекция на момента по изложенния начин грешката може да се намали до 2,5%.



Фиг. 1.16

#### 1.4.2. ТАРИРАН ГЕНЕРАТОР

Твърде разпространен и удобен начин за натоварване на изследвания двигател е този, при който се използва т. нар. тариран генератор. При това чрез изчисление се определят мощността и моментът на вала на двигателя. Най-често товарният генератор представлява генератор за постоянен ток с независимо възбудждане (фиг. 1.16).

Изпитваният двигател  $\mathcal{D}$  се куплира механически с тариращия генератор  $\Gamma$ . Чрез изменение на възбудителния ток  $I_b$  или на котвенния ток  $I_r$  на генератора се изменя развииваният от него момент, който е съпротивителен. Следователно по този начин ще се изменя натоварването на изпитвания двигател.

Товарният генератор трябва да бъде тариран. Тариран е този генератор, за който са известни зависимостите

$$P'_0 = f(n) \text{ при } I_b = \text{const}$$

или

$$P'_0 = f(I_b) \text{ при } n = \text{const}.$$

С  $P'_0$  е означена сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на генератора, т. е.

$$P'_0 = p_{\text{мех}} + p_e.$$

Опитното намиране на посочените зависимости се нарича тарирание на товарния генератор.

Механичните загуби, които включват загубите от трение в лагерите и четките, както и вентилационните загуби за дадена машина зависят единствено от честотата на въртене  $n$ .

Загубите в стоманата включват загубите от хистерезис и вихрови токове в подложния на циклично пренамагнитване роторен пакет при въртенето му в магнитното поле на индуктора. Тези загуби зависят от честотата на въртене  $n$ , която определя честотата на пренамагнитване, и от възбудителния ток  $I_b$ , който определя магнитната индукция в роторния пакет.

Таблица 1.2

| Отчитат се        |       | Изчисляват се |       |        |
|-------------------|-------|---------------|-------|--------|
| $n$               | $U_0$ | $I_b$         | $P_0$ | $P'_0$ |
| $\text{min}^{-1}$ | V     | A             | W     | W      |
|                   |       |               |       |        |
|                   |       |               |       |        |
|                   |       |               |       |        |

Следователно загубите  $P'_0$  зависят от честотата на въртене и от възбудителния ток. Затова се снемат тарировъчни зависимости или при  $I_b = \text{const}$ , или при  $n = \text{const}$ .

При изпитване на постояннотокови и асинхронни двигатели е целесъобразно да се разполага с тарировъчната крива  $P'_0 = f(n)$  при  $I_b = \text{const}$ . Опитното ѝ определяне става по следния начин.

Машината, която се тарира, се пуска да работи като двигател на празен ход в съответствие със схемата на фиг. 1.14. Чрез  $r_a$  се установява определен възбудителен ток, който се поддържа неизменен. Чрез  $R_{pr}$  се установяват поредица стойности на честотата на въртене и се отчитат стойностите на напрежението и тока на котвата  $U_0$  и  $I_0$ . Резултатите се нанасят в табл. 1.2.

Тъй като двигателят не отдава полезна мощност, консумираната мощност  $U_0 I_0$  покрива загубите в него, т. е.

$$P_0 = U_0 I_0 = p_{\text{мех}} + p_c + I_0^2 r_a + I_0 \Delta U_q,$$

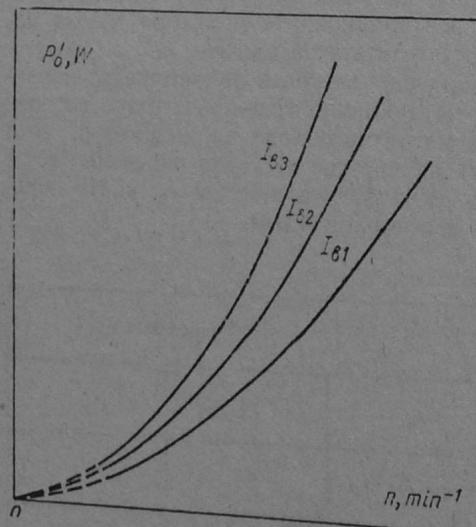
където  $r_a$  е съпротивлението на котвената намотка;  
 $\Delta U_q$  — спадът на напрежение в преходния контакт между четките и колектора.

Тогава

$$P'_0 = P_0 - I_0^2 r_a - I_0 \Delta U_q.$$

Мощността  $P'_0$  може да се изчисли и по формулата

$$P'_0 = P_0 - I_0^2 R_a,$$



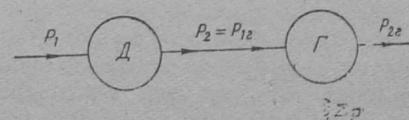
Фиг. 1.17

където  $R_a$  е сумарното съпротивление на котвената намотка и на четковия контакт.

По същия начин може да се пр сведе измерването и при други стойности на възбудителния ток и да се построи семейство тарировъчни криви  $P'_0 = f(n)$  при  $I_b = \text{const}$  (фиг. 1.17). Чрез тях по графичен път може да бъде построено семейство криви  $P'_0 = f(I_b)$  при  $n = \text{const}$ .

Натоварването на двигател  $D$  с тариран

генератор  $\Gamma$  се пояснява с фиг. 1.18. Двигателят консумира електрическа мощност  $P_1$ , която преобразува в механична на вала си  $P_2$ . Отдаваната от двигателя мощност  $P_2$  е равна на подаваната на генератора мощност  $P_{1g}$ . Генераторът преобразува получената механична мощност отново в електрическа



Фиг. 1.18

За да се намери полезната мощност на двигателя  $P_2 = P_{1g}$ , трябва към  $P_{2g}$  да се прибавят сумарните загуби в генератора  $\Gamma$ , т. е.

$$P_2 = U_g I_g + p_{\text{мех}} + p_c + I_g^2 r_a + I_g \Delta U_q = U_g I_g + P'_0 + I_g^2 r_a + I_g \Delta U_q.$$

Мощността  $P'_0$  се взема от тарировъчната крива за съответния възбудителен ток и съответната честота на въртене.

Мощността  $P_2$  може да се определи и по формулата

$$P_2 = U_g I_g + P'_0 + I_g^2 R_a.$$

Вече може да се изчисли и полезнитеят момент на двигателя

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi n}.$$

При натоварване на синхронни двигатели с тариран генератор е целесъобразно възбудителният ток на генератора да се поддържа неизменен, а натоварването да се изменя с неговия котвен ток. Тъй като в случая  $I_b = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ , не е необходима тарировъчна крива, а една единствена стойност на  $P'_0$ , съответствуваща на дадените възбудителен ток и честота на въртене.

Изложеният метод за натоварване на двигатели и за определяне на полезната мощност и полезнитеят момент е твърде удобен и затова се използва широко при изпитването на машини както с малки, така и с големи мощности. Методът позволява плавно изменение на натоварването и се характеризира с много добра точност. Грешката е от порядъка на 1 до 2%. Недостатъци на метода са невъзможността за снемане на пусковите параметри и това, че моментът не се определя непосредствено, а чрез изчисления при използване на тарировъчни криви.

#### 1.4.3. ИЗМЕРВАНЕ НА ЧЕСТОТА НА ВЪРТЕНЕ

**Механични тахометри.** Действието на механичните тахометри е основано на принципа на центробежната сила. На вала на тахометъра е поставен центробежен регулатор, който е свързан с подвижна муфа. Преместването на муфата чрез зъбна предавка се предава на стрелката на тахометъра, която се движи пред скала. Валът на тахометъра завършва с коничен гумен накрайник, който се вкарва в центровия отвор на вала на изпитвания двигател и се притиска леко към него. Благодарение на триенето между вала на двигателя и гумения накрайник валът на тахометъра се привежда във въртене. В зависимост от честотата на въртене на машината центробежният регулатор на тахометъра премества муфата на определено разстояние, стрелката на тахометъра се премества и показва по скалата честотата на въртене на вала в  $\text{min}^{-1}$ . Най-често механичните тахометри са многообхватни. Предавателното число на зъбната предавка и съответно диапазонът на измервани честоти на въртене се изменят с превключвател. Скалата на тахометъра е подходящо градуирана с цел удобно отчитане на честотата на въртене при работа на различните обхвати.

За правилното измерване на честотата на въртене трябва осите на двигателя и на тахометъра да съвпадат, а повърхностите на накрайника и на центровия отвор на вала да не са омаслени.

За да се избегнат повреди на тахометъра, той не бива да се притиска силно към вала на двигателя, а освен това измерването трябва да бъде краткотрайно. Важен е и изборът на подходящ измервателен обхват. Когато не е известен порядъкът на измерваната честота на въртене, трябва най-напред да бъде включен пий-големият обхват.

Грешката на механичните тахометри е от порядъка на 2 до 5%. Използуват се за измерване на честотата на въртене на машини с мощност, по-голяма от 50 W. При по-малки мощности тези тахометри представляват значителен товар за машината и могат да изменят нейния режим на работа.

**Тахогенератори.** Тахогенераторите са електрически микромашини, които преобразуват механично въртене в електрическо напрежение. При това изходното напрежение на тахогенератора е пропорционално на честотата на въртене.

За да се измери честотата на въртене, валът на тахогенератора се свързва механически с вала на изпитвания двигател. Към изходната намотка на тахогенератора се включва волтметър с голямо вътрешно съпротивление.

Необходимо е да се знае стръмността  $S$  на изходната характеристика или пък константата на тахогенератора  $k_{tr}$ . Те са свързани с равенството

$$k_{tr} = \frac{1}{S}, \text{ min}^{-1}/V.$$

Честотата на въртене се спределя по формулата

$$n = U_{tr} k_{tr}, \text{ min}^{-1},$$

където  $U_{tr}$  е измереното от волтметъра напрежение.

Целесъобразно е скалата на волтметъра да бъде директно градуирана в  $\text{min}^{-1}$ .

Най-често се използват постояннотокови тахогенератори с електромагнитно възбуждане или с възбуждане от постоянни магнити. Широко приложение намират и асинхронните тахогенератори с кух немагнитен ротор. За измерване на честотата на въртене може да се използват и синхронни тахогенератори. Постояннотоков тахогенератор се изследва в упражнение № 4, а асинхронен тахогенератор с кух немагнитен ротор — в упражнение № 11.

Точността на измерването на честотата на въртене с тахогенератор е голяма. Обикновено грешката не надвишава 1%.

**Строботахометър.** Строботахометърът или просто стробоскопът представлява електронен генератор с регулируема честота, който захранва осветителна лампа. Честотата може да се изменя стъпилно в няколко диапазона и плавно във всеки от тях. Осветителната лампа трябва да има голяма моментна яркост и малка инертиност. Използуват се различни газоразрядни лампи, най-често неонови или живачни.

Измерването на честотата на въртене със стробоскоп се извършва по следния начин. На вала, чиято честота на въртене се измерва, трябва да има някакъв белег, например диск с един черен сектор, или пък черта, направена с блажна боя. Може да се използува и никакъв естествен белег, например винтчето на съединители. При измерването светлината на лампата се насочва към вала на въртящия се двигател. Дискът за плавно регулиране на честотата на генератора (честотата на запалванията на лампата) се върти, докато се получи положение, при което белегът изглежда привидно неподвижен. По скалата на стробоскопа се отчита честотата на въртене в  $\text{min}^{-1}$ .

При този метод за измерване на честотата на въртене се използва стробоскопичният ефект. Същността му се състои в това, че ако честотата на въртене на вала и честотата на запалване на лампата са равни, валът при всяко светване на лампата се намира в едно и също положение и затова изглежда неподвижен.

Ако честотата на лампата е малко по-малка от честотата на въртене на вала, наблюдава се привидно бавно въртене на вала в посока, съвпадаща с действителната посока на въртене. Ако честотата на лампата е малко по-голяма от честотата на въртене на вала, наблюдава се привидно бавно въртене на вала в посока,

обратна на действителната. В двета случая честотата на врътене е равна на разликата от действителната честота на врътене на вала и честотата на запалване на лампата.

При измерване на честота на врътене със стробоскоп трябва да се внимава да не се допускат грешки, което е възможно, когато честотата на запалване на лампата е кратна на честотата на врътене на вала. Така например, ако честотата на лампата е два пъти по-малка от честотата на врътене на вала, той изглежда неподвижен, наблюдаваният белег е един (ако е в действителност) но има по-слаба яркост. Това е така, защото в случая белегът се осветява не на всеки оборот, а през един оборот. Ако честотата на лампата е два пъти по-голяма от честотата на врътене на вала, той пак изглежда неподвижен, но се наблюдават два белега, а не един, както е в действителност. Това е така, защото валът се осветява по два пъти на всеки оборот. При по-нататъшно увеличаване на честотата на лампата се наблюдава утроен белег и т. н.

За да се избегнат грешките при измерването, дължащи се на попадане на кратни честоти, се препоръчва следното: а) наблюдаваният белег трябва да бъде единствен; б) честотата на запалване на лампата се изменя, като се започне от най-високата честота и постепенно се намалява, докато се получи един неподвижен ярък белег.

При всяко измерване е необходимо стробоскопът да бъде проверен и при необходимост настроен, тъй като е възможно импулсният генератор да е разстроен. Настройката се извършва в съответствие с указанията на завода-производител.

Измерването на честотата на врътене със стробоскоп осигурява добра точност. Грешката е от порядъка на 1.5%. Особено подходящо е използването му при изпитване на микромашини, тъй като измерването не е свързано с натоварване на вала на изпитвания двигател.

**Измерване на честота на врътене с цифров честотомер.** В случая за измерване на честотата на врътене се използва датчик на честота. Честотата на импулсите  $f$ , получени от датчика, трябва да бъде пропорционална на честотата на врътене на двигателя  $n$ :

$$f = kn.$$

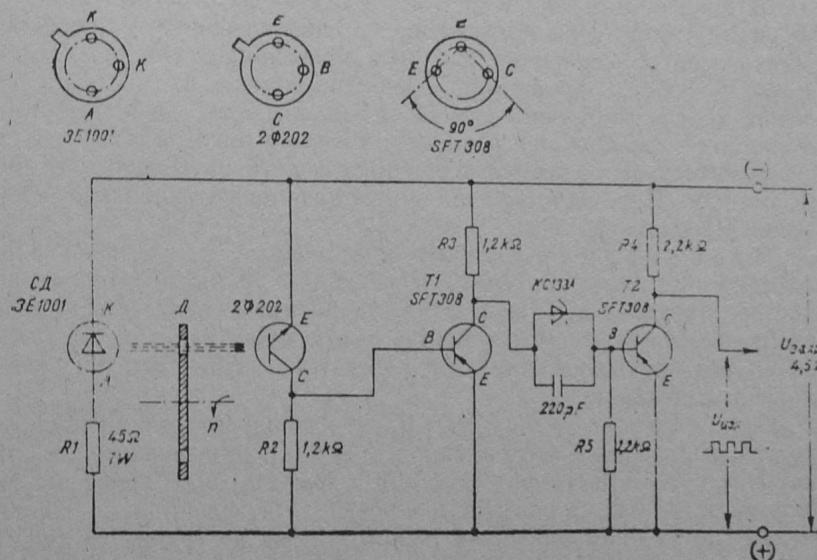
Сигналът, получен от датчика, се подава на електронен цифров честотомер, който измерва честотата на импулсите.

Най-често се използват индукционни датчици и фотодатчици. На фиг. 1.19 е показана една от възможните схеми на фотодатчик. Използвани са светодиод  $СД$  тип  $ЗЕ 1001$ , фототранзистор  $ФТ$  тип  $2\Phi 202$  и два германьеви транзистора  $T1$  и  $T2$  тип  $SFT 308$  — всички българско производство.

Измерването на честотата на врътене става по следния начин. На вала на изпитвания двигател се поставя непръзрен диск  $D$ ,

на който са направени  $N$  на брой отвори или прорези. Светодиодът и фототранзисторът са разположени на две срещулежащи платки, дистанцирани по подходящ начин. В пространството между тях е разположен дискът. При врътене на двигателя, съответно на диска, фототранзисторът периодично се отпушва и запушва, в резултат на което на изхода на фотодатчика се получават единополярни импулси с честота

$$f = \frac{Nn}{60}.$$



Фиг. 1.19

Изходното напрежение на фотодатчика се подава на входа на цифров честотомер.

Честотата на врътене на двигателя е

$$n = \frac{60f}{N}, \text{ min}^{-1}.$$

Вижда се, че е удобно броят на отворите в диска да бъде 6 или 6). Например при  $N=6$  честотата на врътене е равна на измерената честота, умножена по 10.

Този начин на измерване на честота на врътене е най-точен. Негово предимство е също, че не се натоварва валът на изпитвания двигател, което го прави особено подходящ при изпитвания микромашини.

## 1.5. СПОМОГАТЕЛНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

При изпитванията се налага използването на следните спомагателни съоръжения: съединителни проводници, прекъсвачи, реостати, регулируеми автотрансформатори и индукционни регулатори.

За свързване на електрическите схеми се използват съединителни проводници, които трябва да бъдат гъвкави и добре изолирани. Най-често се използват многоожични проводници с винилова изолация. Сечението на проводниците се подбира така, че плътността на тока в тях да не бъде по-голяма от 6 до  $10 \text{ A/mm}^2$ . При провеждане на лабораторните упражнения обикновено се използват два вида проводници: дебели, със сечение  $4\text{--}6 \text{ mm}^2$ , завършващи с кабелни обувки, и тънки, със сечение  $1\text{--}1.5 \text{ mm}^2$ , завършващи с бананови контакти. Дебелите проводници се използват в основните токови вериги, а тънките – в напрежителните вериги и вторичните вериги на токовите трансформатори. При изпитване на микромашини се използват самотънки проводници.

Прекъсвачите служат за включване и изключване на определени вериги в схемата. Използват се както обикновеностови прекъсвачи, така и автоматични прекъсвачи. Избират се съобразно напрежението и тока в съответната верига.

Според предназначението си реостатите биват пускови, регулиращи и товарни.

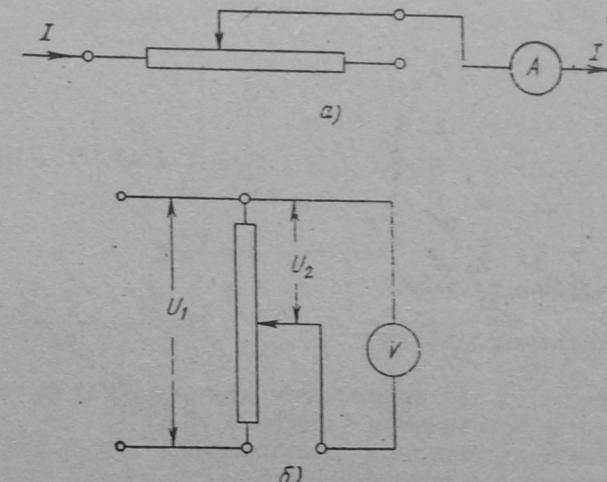
Пусковите реостати се използват при пускане в ход на двигатели за постоянен ток и асинхронни двигатели с налив ротор. Те се включват само при пускането, а по време на работа на двигателя са напълно изключени. Изчислени са за големи токове, но за кратковременна работа, затова не трябва да се използват за регулиране в процеса на изпитването.

Регулиращите реостати се използват за регулиране на ток и напрежение в електрическите схеми. Трябва да бъдат изчислени за продължителна работа. В лабораторната практика най-често се използват проводникови реостати с вълзгач. На всеки реостат са посочени номиналното съпротивление и допустимият ток. Именно тези параметри трябва да се имат предвид при избор на реостат. Обикновено реостатът има три клеми – два постоянни извода и един извод от вълзгача. В зависимост от това, дали трябва да се регулира ток или напрежение, реостатът се свързва по различни начини. За регулиране на тока реостатът се включва последователно във веригата (фиг. 1.20 а). За плавно регулиране на напрежението реостатът се включва като делител на напрежение (потенциометър), както е показано на фиг. 1.20 б.

Когато са свързани последователно няколко реостата с различен номинален ток, най-напред се изключва реостатът за най-малък ток и последен – този за най-голям ток. При включване на

реостатите редът е обратен. Неспазването на този ред може да доведе до изгаряне на реостата за най-малък ток.

Товарните реостати се използват за натоварване на генератори и трансформатори. Те служат за регулиране на ра-



Фиг. 1.20

ботните токове и се изчисляват за продължителен режим на работа. Най-често се използват различни конструкции метални реостати със стъпално регулиране на съпротивлението. В някои случаи се използват и водни реостати.

За регулиране на напрежението при еднофазен променлив ток се използват лабораторни автотрансформатори.

При трифазен променлив ток напрежението се регулира или с трифазни регулируеми автотрансформатори, или с индукционни регулатори. Индукционният регулатор по същество представлява асинхронна машина със застопорен ротор. Чрез червячна предавка се изменя взаимното положение на роторната и статорната намотка, в резултат на което напрежението на изхода се изменя плавно от една минимална стойност до удвоеното захранващо напрежение.

## ГЛАВА II ИЗПИТВАНЕ НА МАШНИИ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

### 2.1. УПРАЖНЕНИЕ № 1

#### ГЕНЕРАТОР ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

1. Снемане на характеристиката на празен ход (х. п. х.).
2. Снемане на външната характеристика.
3. Снемане на товарната характеристика.
4. Снемане на регулационната характеристика.
5. Снемане на характеристиката на късо съединение (х. к. с.).

###### B. Изчисления и построения

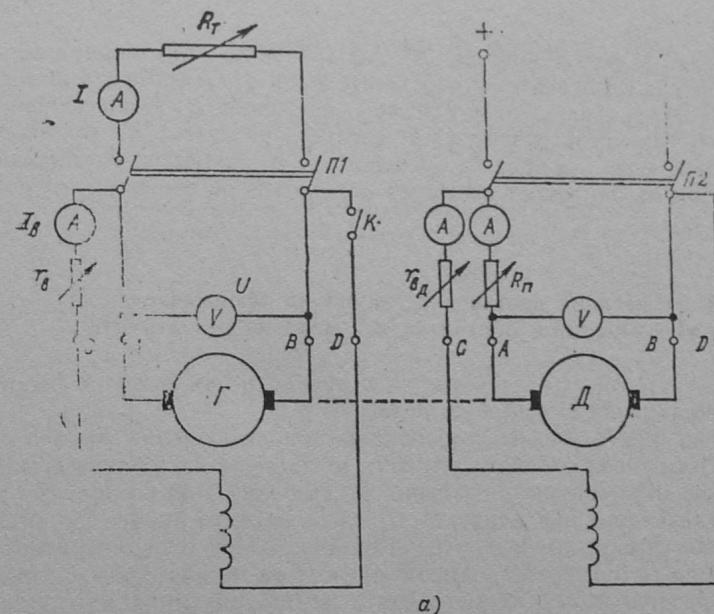
1. Построяване на опитно снетите характеристики.
2. Определяне на критичното съпротивление.
3. Построяване на триъгълника на късо съединение чрез х. п. х. и х. к. с.
4. Построяване на външната характеристика по графичен начин.

##### II. Схема на опитната постановка

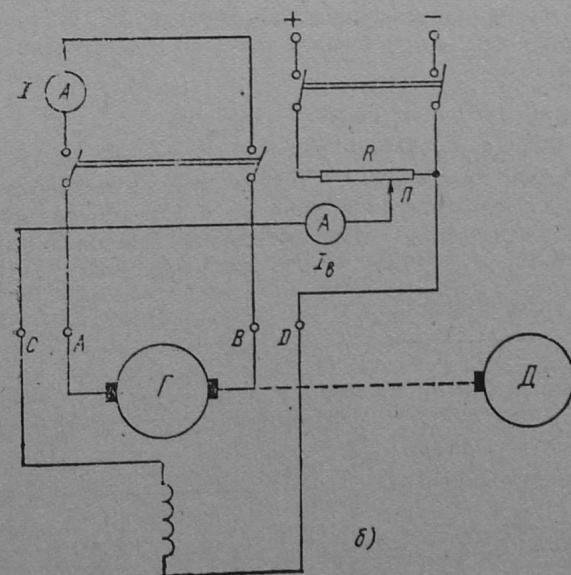
На фиг. 2.1 а е дадена схемата за снемане на х. п. х., външна, товарната и регулационната характеристика, а на фиг. 2.1 б – схемата за снемане на х. к. с.

Изследваният генератор  $\Gamma$  се задвижва от двигател за постоянен ток с паралелно възбуджение  $\mathcal{D}$ .

Волтметрите и амперметрите в котвените вериги на  $\Gamma$  и  $\mathcal{D}$  се избират съобразно номиналните им напрежения и токове. При избора на амперметрите във веригите на възбудителните им намотки трябва да се има предвид, че възбудителният ток е 2 до 5% от номиналния.



а)



б)

Фиг. 2.1

Преди всяко пускане на  $\mathcal{D}$  в ход трябва да се проверява юдженето на плъзгачите на реостатите  $R_n$  и  $r_{\text{вд}}$ . В момента на пускането  $R_n$  трябва да бъде напълно включен, а  $r_{\text{вд}}$  — напълно изключен. При развъртването на двигателеля реостатът  $R_n$  постепенно се изключва и в края на пусковия процес той е напълно изключен. При необходимост честотата на въртене се регулира посредством  $r_{\text{вд}}$ .

### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Генераторът за постоянен ток с паралелно възбудждане работи на принципа на самовъзбудждането.

За да бъде възможен процесът на самовъзбудждане, трябва да бъдат изпълнени следните условия: а) наличие на остатъчен магнетизъм; б) правилно свързване на възбудителната намотка; в) съпротивлението във веригата на възбудждането трябва да бъде по-малко от определена критична стойност. При това генераторът трябва да се върти с нормалната си честота на въртене и четките да са разположени в геометричната неутрална линия или близо до нея.

Характеристика на празен ход. Представлява зависимостта на напрежението на изводите на генератора  $U$  от възбудителния ток  $I_e$  при товарен ток  $I=0$  и постоянна честота на въртене  $n$ :

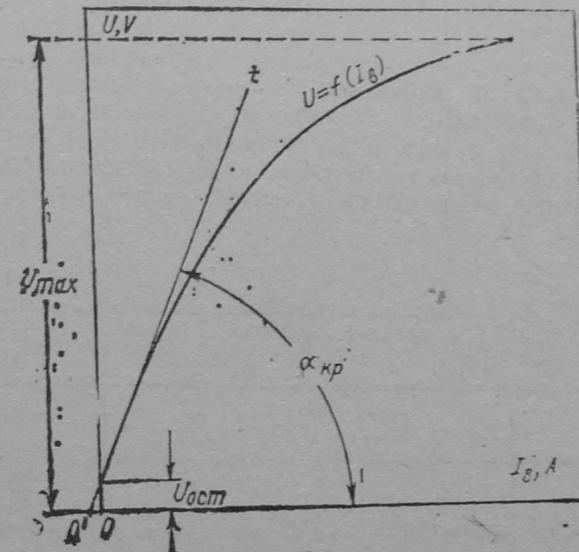
$$U=f(I_e) \text{ при } I=0 \text{ и } n=\text{const}$$

Съема се по схемата от фиг. 2.1 a. При напълно включен реостат  $r_{\text{вд}}$  и отворен прекъсвач  $P1$  генераторът се развърти чрез двигателителя  $\mathcal{D}$  до честотата на въртене  $n$ , която се поддържа по-стоянна (обикновено  $n=n_0$ ). Чрез постепенно изключване на реостата  $r_{\text{вд}}$  генераторът се възбуджа до напрежение  $U_{\text{max}}=(1,15 \div$

Таблица 2.1

| Отчитат се |       | Поддържат се |                   |
|------------|-------|--------------|-------------------|
| $U$        | $I_n$ | $I$          | $n$               |
| $V$        | $A$   | $A$          | $\text{min}^{-1}$ |
|            |       | 0            | const             |

$\div 1,20)$   $U_{\text{max}}$ . Това е първата точка от характеристиката. След това чрез увеличаване на  $r_{\text{вд}}$  се установяват последица намаляващи стойности на  $I_e$ , при които се отчитат съответните стойности на  $U$ . Накрая се пресъстава веригата на възбудждането ( $I_n=0$ ) и се получава съответното напрежение  $U_{\text{ост}}$ . Опитните резултати се насят в табл. 2.1.



Фиг. 2.2

Графът на х. п. х. е показан на фиг. 2.2. При малки стойности на възбудителния ток магнитната система на генератора не е настъпила и засега х. п. х. е линейна. При увеличаване на възбудителния ток насищането се увеличава и х. п. х. се скрива.

Ако се продължи началната линейна част на х. п. х. до пресичането ѝ с абсцисата се в точка  $O'$ , характеристиката в координатната система с начало  $O'$  представлява изчислителна х. п. х.

За да се изчисли критичното съпротивление  $R_{\text{kp}}$ , построява се тангенца  $t$  към х. п. х. през точка  $O'$  (фиг. 2.2) и се определя ъгъл  $\alpha_{\text{kp}}$ . Тогава

$$R_{\text{kp}} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha_{\text{kp}},$$

където  $m_U$  и  $m_I$  са пречупени машаби съответно за  $U$  и  $I_e$ .

Ако съпротивлението във веригата на възбудждането е по-голямо от  $R_{\text{kp}}$ , процесът на самовъзбудждане става невъзможен. Външна характеристика. Представява зависи-

мостта на напрежението на изводите на генератора  $U$  от товарния ток  $I$  при постоянно съпротивление във веригата на възбудящият  $R_t$  и постоянна честота на въртене  $n$ :

$$U=f(I) \text{ при } R_t=\text{const} \text{ и } n=\text{const}.$$

Същата схема от фиг. 2.1 а. Генераторът се развърта до честота на въртене (обикновено номиналната), която се поддържа постоянно чрез превърнат прекъсвач  $PI$  чрез регулиране на реостатите  $r_a$  и  $r_b$ . Останалите номинални стойности на товарния ток и на напрежението на генератора. Установената при това стойност на  $r_a$  не се променя време на целия опит. Първата точка от външната характеристика е тази при  $I=I_n$  и  $U=U_n$ . След това чрез увеличаване на  $R_t$  генераторът постепенно се разтоварва до празен ход ( $I=0$ ). Опитните резултати се насят в табл. 2.2.

Таблица 2.2

| Отчитат се |     | Поддържат се |                   |
|------------|-----|--------------|-------------------|
| $U$        | $I$ | $R_t$        | $n$               |
|            | A   | $\Omega$     | $\text{min}^{-1}$ |
|            |     | const        | const             |

На фиг. 2.3 а с пътна линия е показан участъкът от външната характеристика, който представлява практически интерес и който се счеса опитно.

Видът на външната характеристика може да се обясни, като се вземе предвид, че

$$U=E-IR_a; E=c_en\Phi,$$

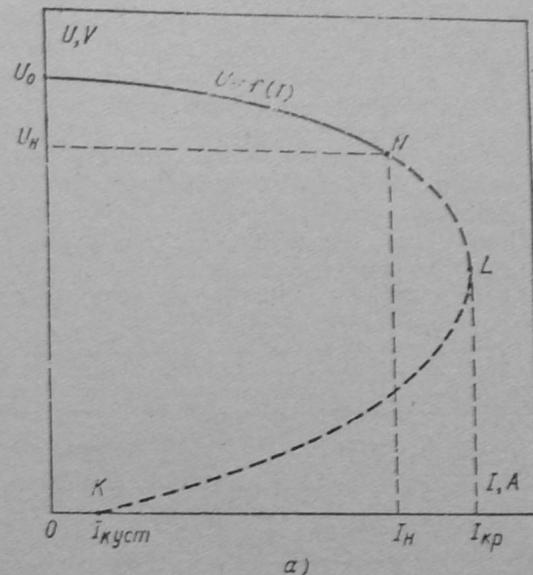
където  $E$  е е. д. н., индуцирано в котвата;

$R_a$  — съпротивлението на котвената верига;

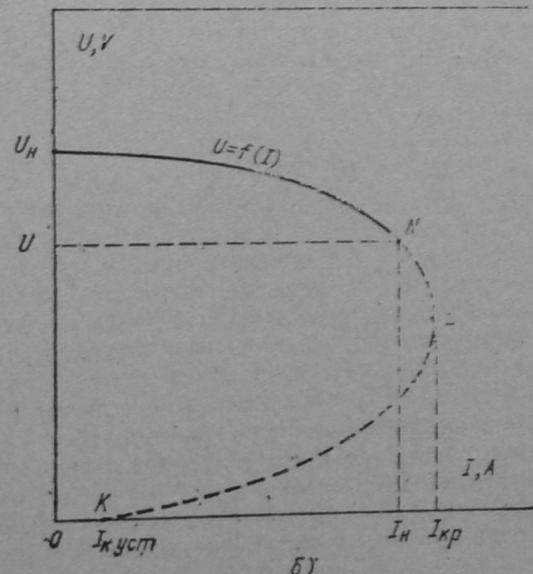
$\Phi$  — основният магнитен поток.

При увеличаване на тока  $I$  напрежението  $U$  се намалява поради следните причини: а) увеличава се вътрешният над на напрежение  $IR_a$ ; б) намалява се  $\Phi$  и съответно  $E$  поради размагнитващото действие на реакцията на котвата; в) намалява се възбудителният ток  $I_a$ , тъй като  $U$  се намалява, а  $R_t=\text{const}$ .

С прекъсвача линия на фиг. 2.3 а е показано по-нататъшното развитие на външната характеристика, косто би се получило, ако след точка  $N$  се намалява постепенно  $R_t$  до стойност  $R_t=0$ .



а)



б)

Фиг. 2.3

8.  
Вижда се, че намаляването на  $R_t$  води до увеличаване на  $I$  само до точка  $L$ , при която токът достига т. нар. критична стойност  $I_{kp}$ . При по-нататъшно намаляване на  $R_t$  машината се разчарива, токът  $I$  бързо намалява и при  $R_t = 0$  има стойност  $I_{kyp}$ , определена от остатъчното напрежение.

Догук беше описано схематично на външната характеристика при разтворяване на генератора. Характеристиката може да бъде снета и при увеличаване на натоварването. За целта генераторът се възбудява при празен ход до  $U = U_n$ , след което, без да се изменя  $r_s$ , чрез постепенно намаляване на  $R_t$  се увеличава натоварването до достигане на  $I_n$ . Видът на външната характеристика за този случай е показан на фиг. 2.3. б.

Таблица 2.3

| Опитват се |       | Поддържат се |                   |
|------------|-------|--------------|-------------------|
| $U$        | $I_n$ | $I$          | $n$               |
| V          | A     | A            | $\text{min}^{-1}$ |
|            |       | const        | const             |

Товарна характеристика. Представлява зависимостта на напрежението на изводите на генератора  $U$  от възбудителния ток  $I_b$ , при постоянен товарен ток  $I$  и постоянна честота на въртене  $n$ :

$$U=f(I_b) \text{ при } I=\text{const} \text{ и } n=\text{const}.$$

Схема се по схемата от фиг. 2.1 а. Установява се честотата на въртене  $n$ , генераторът се възбудява на празен ход до напрежение  $U=(1.15 \pm 1.25) U_n$  и се натоварва чрез  $R_t$  до тока  $I$ , който ще се установи немедлено. По този начин се получава първата част от товарната характеристика. След това се намалява  $R_t$ , при който  $I$  ще се увеличи. Затова се намалява  $I_b$  чрез  $r_s$ , докато се получи необходимата стойност на  $I$  и се отчитат съответните стойности на  $U$  и  $I_b$ . Резултатите се нанасят в табл. 2.3.

Товарната характеристика е показана на фиг. 2.4. На същата фигура е показвана и х. н. х., която представлява частен случай на товарната характеристика при  $I=0$ . Товарната характеристика е подобна на х. н. х. и лежи под нея, тъй като при натоварване напрежението се намалява поради вътрешния пад, изразен чрез  $\Phi$  и на  $I_b$ .

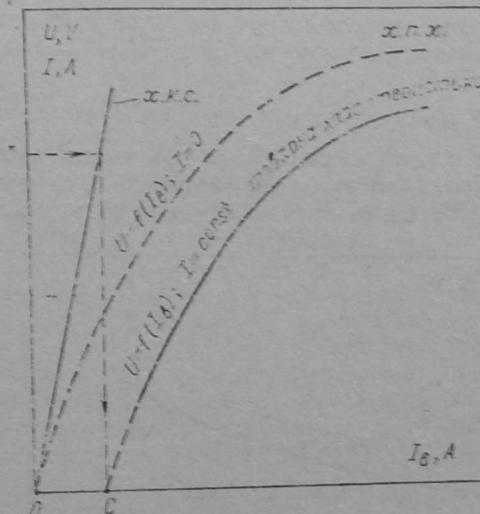
Пресечната точка С на товарната характеристика с абсцисната

ос може да бъде определена чрез х. к. с., както това е показано на фиг. 2.4.

Регулационна характеристика. Представлява зависимостта на възбудителния ток  $I_b$  от товарния ток  $I$  при постоянно напрежение  $U$  и постоянна честота на въртене  $n$ :

$$I_b=f(I) \text{ при } U=\text{const} \text{ и } n=\text{const}.$$

Схема се по схемата от фиг. 2.1 а. Установява се честотата на въртене  $n$  и при празен ход генераторът се възбуджа до напрежението  $U$ , където се поддържа неизменно при снемане на характеристиката (обикновено  $U=U_n$ ). Отчетеният възбудителен ток



Фиг. 2.4

$I_b$  при  $I=0$  определя първата точка от характеристиката. След това чрез  $R_t$  се установяват поредица стойности на  $I$  до достигане на  $I=(1.0 \div 1.25)I_n$ . При всяка стойност на  $I$  чрез  $r_s$  се регулира напрежението така, че да остава такова, каквото е било при празен ход. Опитните резултати се нанасят в табл. 2.4.

Регулационната характеристика показва как трябва да се изменя възбудителният ток при промяна на натоварването, за да се поддържа напрежението постоянно. Видът ѝ е показан на фиг. 2.5. Вижда се, че при увеличаване на натоварването е необходимо да се увеличава възбудителният ток, за да се компенсира влиянието на факторите, предизвикващи спадане на напрежението, и по този начин то да остава постоянно.

Характеристика на късо съединение. Пред-

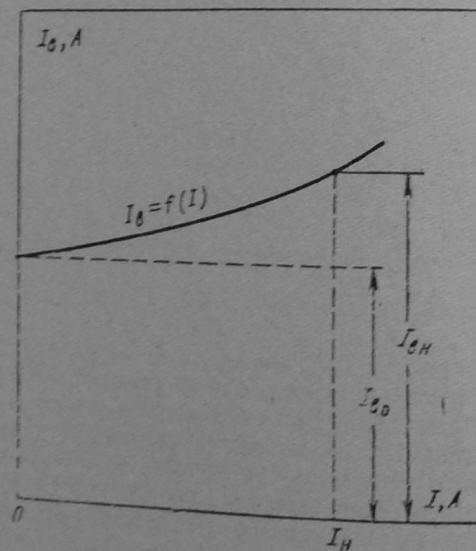
Таблица 2.4

| Отчитат се |     | Поддържат се |                   |
|------------|-----|--------------|-------------------|
| $I_B$      | $I$ | $U$          | $n$               |
| A          | A   | V            | $\text{min}^{-1}$ |
|            |     | const        | const             |

ставлява зависимостта на котвения ток  $I$  от възбудителния ток  $I_B$  при затворена накъсо котвена верига ( $U=0$ ) и постоянна честота на въртене  $n$ :

$$I = f(I_B) \text{ при } U=0 \text{ и } n=\text{const.}$$

Схема се по схемата от фиг. 2.1 б, при която възбудителната намотка се захранва от страничен източник, т. е. генераторът е с независимо възбудждане. Невъзможността да се използува схема



Фиг. 2.5

мата от фиг. 2.1 а се определя от обстоятелството, че при затворени накъсо изводи на котвата напрежението на възбудителната намотка и токът през нея ще бъдат равни на нула.

Особено важно е в началото на опита плъзгачът  $P$  на потенциометъра  $R$  да бъде поставен в това положение, при което напрежението, подавано към възбудителната намотка, да бъде равно на нула. Развърта се генераторът до честотата на въртене.

Таблица 2.5

| Отчитат се |       | Поддържат се |                   |
|------------|-------|--------------|-------------------|
| $I$        | $I_B$ | $U$          | $n$               |
| A          | A     | V            | $\text{min}^{-1}$ |
|            |       | 0            | const             |

която се поддържа неизменна по време на опита. При  $I_B=0$  се отчита токът  $I_{\text{ост}}$ , спределен от остатъчното напрежение. След това чрез  $R_1$  се установяват поредица стойности на  $I$  до достигане на  $I=(1,0 \div 1,25) I_B$ , като при всяка стойност на  $I$  се отчита съответната стойност на  $I_B$ . Плъзгачът на потенциометъра трябва да се придвижва изключително внимателно, тъй като при късо съединение малки изменения на  $I_B$  предизвикват големи изменения на  $I$ . Опитните резултати се сълагат в табл. 2.5.

Характеристиката на късо съединение е показана на фиг. 2.6. Практически х. к. с. представлява права линия. Ако се продължи до пресичането ѝ с абсцисната ос в точка  $O'$ , характеристиката в координатната система с начало в точка  $O'$  представлява изчислителната х. к. с.

Праволинейният характер на х. к. с. се обяснява по следния начин. При късо съединение  $U=0$  и следователно

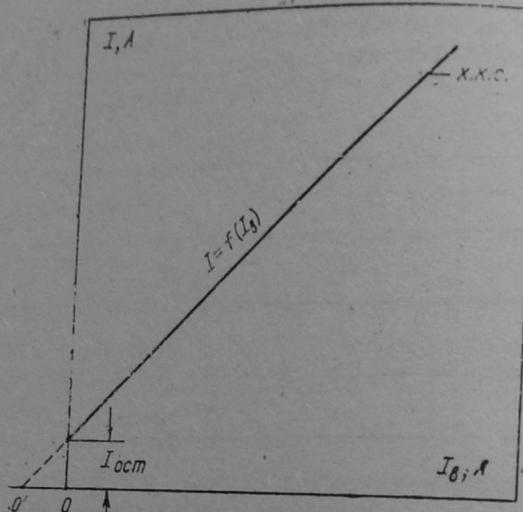
$$E = c_e n \Phi = IR_a,$$

тъй като  $R_a$  е относително малко, малки ще съдат  $E$  и съответно  $\Phi$ , т. е. магнитната система на генератора е ненасилена. Тогава  $\Phi \equiv I_B$ , откъдето следва, че  $I$  е пропорционален на  $I_B$ .

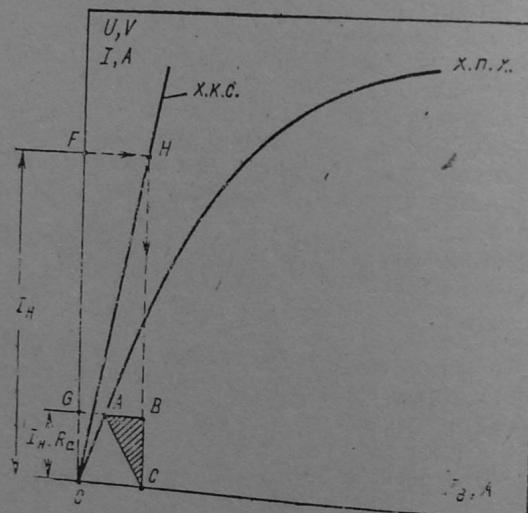
Триъгълникът на късо съединение ( $\Delta_{\text{к.с.}}$ ) може да бъде построен за произволна стойност на котвения ток. Построяването му примерно за  $I=I_B$  се извежда по следния начин.

Построяват се в съща координатна система х. п. х. и х. к. с., започващи от началото на координатната система (фиг. 2.7). Машабът за  $I_B$  трябва да бъде един и същи както за х. п. х., така и за х. к. с.

По ординатната ос се нанася в машаба за  $I$  отсека  $OF=I_B$ .



Фиг. 2.6



Фиг. 2.7

и чрез х. к. с. се определя точка С. По ординатната ос се нанася в мащаба за  $U$  отсека  $OG = E = I_a R_a$  и през точка G се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, която пресича х. п. х. и пр.

42

зата  $HC$  съответно в точките  $A$  и  $B$ . Полученият  $\triangle ABC$  е триъгълникът на късо съединение. Катетът  $BC$  на  $\triangle_{k,c}$  е пропорционален на вътрешния пад на напрежение, а катетът  $AB$  — на м. д. и. на надлъжната реакция на котвата.

Чрез  $\Delta_k$  с и  $x$ ,  $p$ ,  $x$  може да се построят по графичен начин външната, товарната и регулатионната характеристика на генератори с големи мощности, когато поради липса на подходящи товарни реостати не е възможно опитното снемане на тези характеристики.

Графично построяване на външната характеристика. Построяването на външната характеристика за случая, когато при напрежение  $U = U_n$ , токът  $I = I_n$ , се извършва по следния начин (фиг. 2.8).

В общата координатна система се построяват х. п. х. и х. к. с., като мащабът за  $I_b$  е един и същ и за двете характеристики. По показания вече начин се построява триъгълникът на късо съединение  $\triangle ABC$  за номиналния ток  $I_b$ .

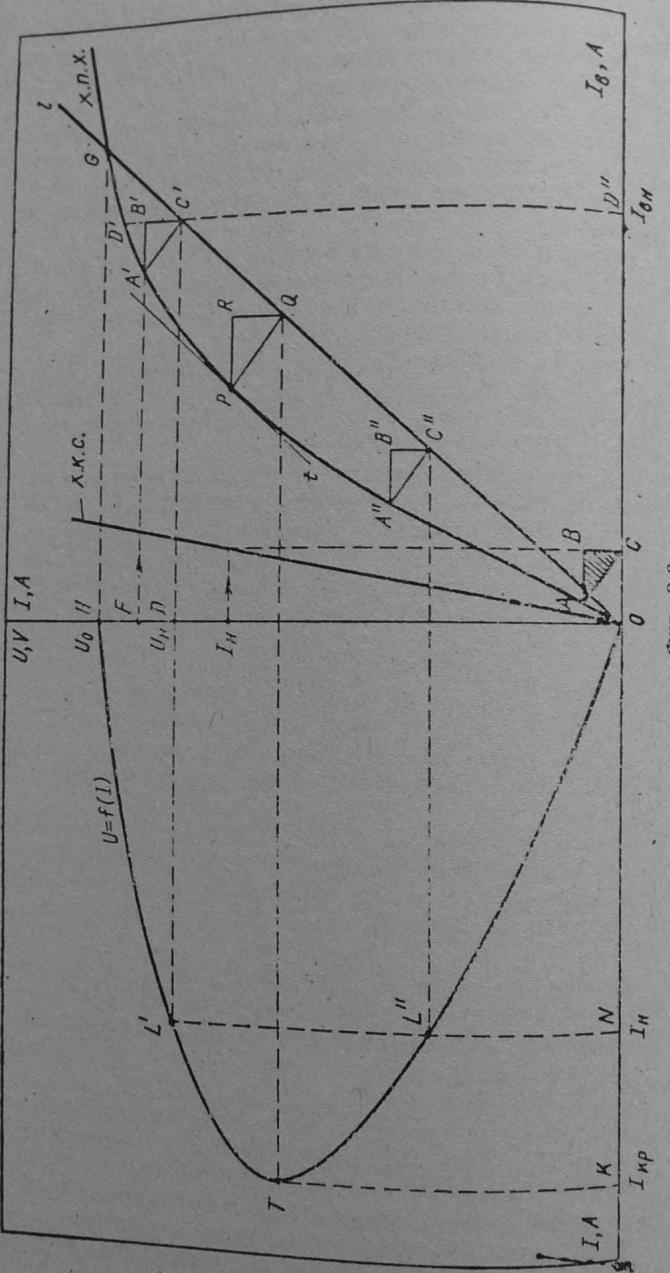
По абсцисната ос наляво от началото  $O$  се избира подходящ машаб за тока  $I$ . По ординатната ос в машаба за  $U$  се нанася  $OD = U_n$ . През точка  $D$  се прекарва права, успоредна на абсцисната ос. По ординатната ос се нанася  $DF = I_n R_a$  и през точка  $F$  надясно от ординатната ос се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, която права пресича х. п. х. в точка  $A'$ . Трансерира се паралелно на себе си  $\triangle ABC$  така, че да заеме положение  $A'B'C'$ , т. е. върхът му  $A'$  да лежи на х. п. х., а върхът  $C'$  — на правата, успоредна на абсцисната ос, минаваща през точка  $D$ . Прекарва се права  $l$ , минаваща през точките  $O$  и  $C'$ . Правата  $l$  се нарича права на постоянно съпротивление на веригата на възбуждането и фактически представлява зависимостта  $I_n R_a = f(l)$ .

Правата  $l$  пресича х. и. х. в точка  $G$ , през която се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, до пресичането ѝ с ординатната ос в точка  $H$ , която определя напрежението на изразен ход  $U_0$  на генератора, т. е. това е една точка от външната характеристика.

Перпендикулярът към абцисната ос, издигнат от точка  $N$ , съответствуваща на  $I_u$ , пресича правата, минаваща през точка  $D$  и успоредна на абцисната ос в точка  $L'$ , която представлява втора точка от външната характеристика. Това е точката, за която при  $I = I_u$  се получава  $U = U_{u^*}$ .

Построява се триъгътникът на късо съединение в положението  $A'B'C'$ . Това е второто възможно положение на  $\triangle_{\text{к.с.}}$ , при което той се вмества между х. п. х. и правата  $l$  така, че върхът му  $A'$  лежи на х. п. х., а върхът  $C'$  — на правата  $l$ .

През точка  $C''$  се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, докато пресече  $N'L'$  в точка  $L''$ , която също е точка от външ-



Фиг. 2.8

ната характеристика. Следователно за всяка стойност на тока  $I$  са възможни две стойности на напрежението  $U$ .

За да се определи критичният ток  $I_{kp}$ , построява се най-големият възможен  $\triangle_{kp,c}$  ( $\triangle PQR$ ), който се вмества между х. и. х. и прегата на постоянното съпротивление  $I$ . За целта се построява тангентата  $t$  към х. и. х., успоредна на прегата  $I$ , като допирната точка е означена с  $P$ . Построява се  $\triangle PQR$ , чиито страни са успоредни на страните на  $\triangle_{kp,c}$  за номиналния ток. Критичният ток се изчислява с израза

$$I_{kp} = I_n - \frac{PQ}{AC}$$

и се нанася по абсцисната ос наляво от началото  $O$  ( $I_{kp} = OK$ ).

Перпендикулярът към абсцисната ос, издигнат от точка  $K$ , и прекараната през точка  $Q$  права, успоредна на абсцисната ос, се пресичат в точка  $T$ , която също е точка от външната характеристика.

Като се свържат точките  $H$ ,  $L'$ ,  $T$ ,  $L''$  и  $O$ , получава се външната характеристика  $U=f(I)$  при  $R_a = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ .

Броят на точките, по които се построява външната характеристика, може да се увеличи, като се построят триъгълници на късо съединение за други стойности на тока  $I$  и се работи по същия начин както при  $I=I_n$ . При това се предполага, че страните на  $\triangle_{kp,c}$  са пропорционални на тока  $I$ .

Правомерността на изложния начин за построяване се пояснява по следния начин. Нека например възбудителният ток е  $I_{nn}=OD''$  и генераторът да е наговарен с номиналния ток  $I_n$ . Индуктираното в котвата е. д. и. се определя от отсечката  $D''D'$ . Поради размагнитващото действие на реакцията на котвата, определено от катета  $A'B'$ , напрежението се намалява до стойност  $D''B'$ . От тази стойност на напрежението, като се извади вътрешният пад  $I_n R_a = B'C'$ , се получава напрежението на изводите на генератора, равно на  $D''C' = OD = U_n$ .

## 2.2. УПРАЖНЕНИЕ № 2

### ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

#### I. Програма на работа

##### A. Опитни изследвания:

1. Пускане в ход и промяна на посоката на въртене. Регулиране на честотата на въртене.

- 84
2. Тариране на товарния генератор.
  3. Снемане на работните характеристики.

#### Б. Изчисления и построения:

1. Построяване на тарировъчната крива  $P' = f(n)$  при  $I_{\text{нг}} = \text{const}$ .

2. Построяване на скоростната (електромеханичната) характеристика  $n = f(I)$  при  $U_{\text{дв}} = \text{const}$ ,  $I_{\text{в,дв}} = \text{const}$  и определяне на процентното изменение на честотата на въртене  $\Delta n$ .

3. Построяване на работните характеристики  $n$ ,  $M_2$ ,  $\eta$ ,  $P_1$ ,  $I = f(P_2)$  при  $U_{\text{дв}} = \text{const}$  и  $I_{\text{в,дв}} = \text{const}$ .

#### II. Схема на опитната постановка

На фиг. 2.9 а е показана схемата за тариране на товарния генератор, а на фиг. 2.9 б — схемата за снемане на работните характеристики.

При схемата от фиг. 2.9 а товарната машина е включена да работи като двигател на празен ход.

При схемата от фиг. 2.9 б изследваният двигател  $D$  се натоварва с тарирания генератор за постоянен ток с независимо възбудждане  $G$ .

При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че при постояннотоковите машини с независимо или с паралелно възбудждане възбудителният ток е 2 до 5% от номиналния.

#### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Пускане в ход и смяна на посоката на въртене на двигателя. Двигателите за постоянноен ток се пускат в ход по един от следните начини: а) директно пускане; б) пускане с пусков реостат в котвената верига; в) пускане с понижено напрежение на котвената верига.

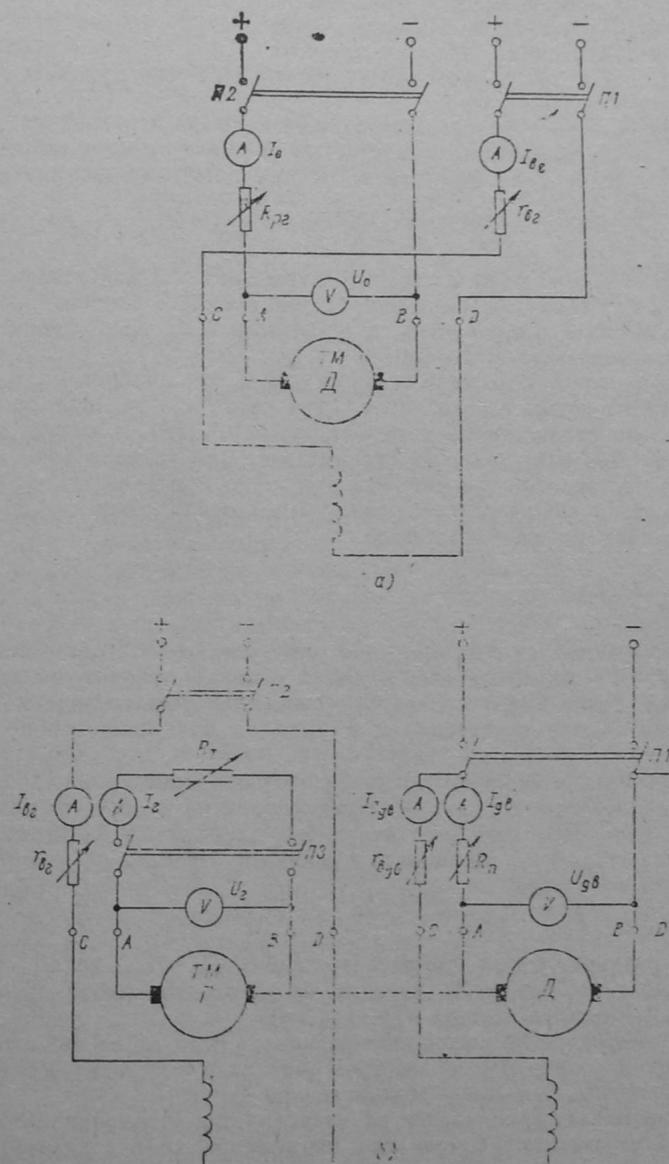
Уравнението за равновесие на напреженията на постояннотоковия двигател е

$$U_{\text{дв}} = E + I_{\text{дв}} R_a = C_e n \Phi + I_{\text{дв}} R_a,$$

където  $U_{\text{дв}}$  е захранващото напрежение;

$I_{\text{дв}}$  — котвеният ток;

$R_a$  — съпротивлението на котвената верига, включващо съпротивлението на котвената намотка и контактното съпротивление между четките и колектора;



Фиг. 2.9

$E$  — противо-е. д. н., индуктирано в котвата;  
 $n$  — честотата на въртене на ротора;  
 $\Phi$  — основният магнитен поток;  
 $C_e$  — кочетащата, зависеща от конструктивните параметри на машината.

При директното пускане двигателят се включва непосредствено към мрежата на пътното ѝ напрежение. Тъй като в момента на пускането  $n=0$  и  $E=0$ , пусковият ток при директно пускане е

$$I_{\text{пдир}} = \frac{U_{\text{дв}}}{R_a}.$$

Директното пускане може да се използува само при двигатели с малка мощност (под 300 W), тъй като при тях  $R_a$  е относително голямо и затова  $I_{\text{пдир}} \leq (4 \div 6) I_n$ , а освен това пусковият процес продължава не повече от  $1 \div 2$  с.

При двигатели с по-големи мощности  $R_a$  е относително малко и директното пускане е недопустимо, тъй като биха се получили опасно големи стойности на тока —  $I_{\text{пдир}} = (10 \div 50) I_n$ . Затова в тези случаи се вземат мерки за ограничаване на пусковия ток.

Най-разпространено е пускането, при което пусковият ток се ограничава с пусков реостат  $R_p$ , включен в котвената верига. Тогава началият пусков ток ще бъде

$$I_n = \frac{U_{\text{дв}}}{R_a + R_p}.$$

Пусковият реостат се подбира така, че  $I_n = (1,4 \div 2,5) I_n$ . След включването на двигателя към мрежата роторът му започва да се ускорява, при което  $n$  и  $E$  растат, пусковият реостат вече може да се изключи постепенно и в края на пусковия процес  $R_p = 0$ .

Обикновено във веригата на възбудителната намотка на двигателя е включен реостат  $r_{\text{вдв}}$  за регулиране на възбудителния ток. При пускането този реостат трябва да бъде напълно изключен, т. е.  $r_{\text{вдв}} = 0$ . Причината е следната. Пусковият момент се определя от израза

$$M_n = C_m \Phi I_n.$$

За да се развърти бързо двигателят, трябва  $M_n$  да е голям. А това означава, че трябва да е голям  $\Phi$ , съответно трябва да е голям  $I_{\text{дв}}$ , което се постига при  $r_{\text{вдв}} = 0$ .

Особено важно е да се създаде навикът, преди да се включи двигателят към мрежата, да се проверява дали реостатът  $R_p$  е напълно включен, а  $r_{\text{вдв}}$  — напълно изключен.

Друг начин за ограничаване на пусковия ток е захранването на котвата на двигателя с понижено напрежение, което с разтворенето на двигателя постепенно се повишава до номиналното.

При това възбудителната намотка трябва да бъде захранена с номиналното си напрежение, за да се получи достатъчно голям пусков момент.

За да се смени посоката на въртене на двигателеля, е необходимо да се смени посоката или на котвения ток, или на магнитния поток, т. е. на възбудителния ток. За целта трябва да се превключват изводите или на котвената, или на възбудителната намотка, но не и на двете едновременно.

Регулиране на честотата на въртене на двигателя. От израза за честотата на въртене

$$n = \frac{U_{\text{дв}} - I_{\text{дв}} R_a}{c_e \Phi}$$

следват непосредствено възможните начини за регулиране на честотата на въртене, а именно: а) чрез изменение на магнитния поток  $\Phi$ ; б) чрез включване във веригата на котвата на регулиращ реостат  $R_{pr}$ ; в) чрез изменение на напрежението, подавано към котвата.

Най-широко разпространение има регулирането на честотата на въртене чрез изменение на  $\Phi$ , т. е. чрез изменение на възбудителния ток. Двигателите се изчисляват за работа в номинален режим при най-голяма стойност на  $\Phi$ . Следователно съществува възможност само да се намалява  $\Phi$ , което, както се вижда от израза за  $n$ , води до увеличаване на честотата на въртене, т. е. в случая честотата на въртене се регулира над номиналната. Този начин е лесноосъществим и икономичен, тъй като мощността на възбудждането е малка. Горната граница на честотата на въртене се определя от механичната здравина на машината и условията на комутацията.

При втория начин за регулиране във веригата на котвата се включва регулиращ реостат  $R_{pr}$ , при което изразът за  $n$  добива вида

$$n = \frac{U_{\text{дв}} - I_{\text{дв}} (R_a + R_{pr})}{c_e \Phi}.$$

Реостатът  $R_{pr}$  се включва както пусковият реостат  $R_p$  — в котвената верига. Единствената разлика е само тази, че докато  $R_p$  е изчислен за краткотрайна работа  $R_{pr}$  трябва да бъде изчислен за продължителен режим на работа. При увеличаване на  $R_{pr}$  честотата на въртене се намалява, т. е. в случая честотата на въртене се регулира под номиналната. Поради значителните загуби в  $R_{pr}$  този начин на регулиране не е икономичен и затова се използва при двигатели с неголяма мощност.

При третия начин честотата на въртене се регулира чрез изменение на напрежението, подавано към котвата. Тъй като напрежението може само да се намалява под номиналното, честотата

та на въртене се регулира под номиналната. Регулирането е икономично, тъй като в схемата не се внасят елементи, в които да се получават загуби, но необходимостта от регулируем източник на напрежение осъщява уредбата.

Тарира се на товарния генератор. Тариранието се свежда до определяне на зависимостта

$$P'_0 = f(n) \text{ при } I_{\text{нр}} = \text{const}.$$

С  $P'_0$  е означена сумата от механичните загуби и загубите в стоманата, т. е.

$$P'_0 = p_{\text{мех}} + p_e.$$

Машината, която се тарира, се пуска да работи като двигател на празен ход в съответствие със схемата от фиг. 2.9 а. Включва се възбудителната намотка към тахранящата мрежа чрез прекъсвача  $\Pi$  и чрез реостата  $r_{\text{вг}}$  се установява определен възбудителен ток  $I_{\text{вг}}$ , при който ще се извърши тарирането. Двигателят се пуска в ход чрез  $\Pi_2$  при напълно включен реостат  $R_{\text{пр}}$ . Чрез  $R_{\text{пр}}$  се задават поредица стойности на честотата на въртене  $n$ , като при всяка от тях се отчитат напрежението и токът на котвата  $U_0$  и  $I_0$ . Опитните резултати се нанасят в табл. 2.6.

Тъй като двигателят работи на празен ход, мощността  $U_0 I_0$  покрива загубите в него, т. е.

Таблица 2.6

| Поддържа се     | Отчитат се        |       |       | Изчислява се |
|-----------------|-------------------|-------|-------|--------------|
| $I_{\text{вг}}$ | $n$               | $U_0$ | $I_0$ | $P'_0$       |
| A               | $\text{min}^{-1}$ | V     | A     | W            |
| const           |                   |       |       |              |

$$U_0 I_0 = p_{\text{мех}} + p_e + I_0^2 R_{\text{ар}},$$

където  $R_{\text{ар}}$  е съпротивлението на котвената намотка и на четкения контакт на тариранията машина. Следователно

$$P'_0 = U_0 I_0 - I_0^2 R_{\text{ар}}.$$

По данните от табл. 2.6 се построява тарировъчната крива  $P'_0 = f(n)$  при  $I_{\text{ар}} = \text{const}$ , показана на фиг. 2.10.

Работни характеристики. Представляват зависи-

мостите на честотата на въртене  $n$ , на полезнния момент  $M_2$ , на коефициента на полезно действие  $\eta$ , на консумираната мощност  $P_1$  и на консумирания ток  $I$  от полезната мощност  $P_2$  при постоянен напрежение  $U_{\text{дв}}$  и възбудителен ток  $I_{\text{в дв}}$ :

$$n, M_2, \eta, P_1, I = f(P_2) \text{ при } U_{\text{дв}} = \text{const} \text{ и } I_{\text{в дв}} = \text{const}.$$

Характеристиките се снемат, като се използува схемата от фиг. 2.9 б по следния начин.

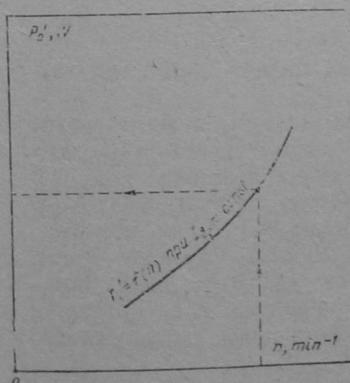
Пуска се в ход изследваният двигател  $D$  и се установяват стойностите на  $U_{\text{дв}}$  и  $I_{\text{в дв}}$ , при които ще се снемат характеристиките. Подава се напрежение на възбудителната намотка на товарния генератор  $G$  и чрез  $r_{\text{вг}}$  се установява такава стойност на възбудителния ток  $I_{\text{вг}}$ , каквато е била при тарирането. Чрез  $R_{\text{пр}}$  се изменя натоварването на генератора, следователно — и на изпитвания двигател, като при различните натоварвания се отчитат величините, отразени в табл. 2.7. Опитът започва от празен ход на изпитвания двигател и завършва при токът, при който  $I_{\text{дв}} \approx 1.1 I_n$ .

Мощността  $P'_0$  се отчита от тарировъчната крива (фиг. 2.10) при съответните стойности на честотата на въртене.

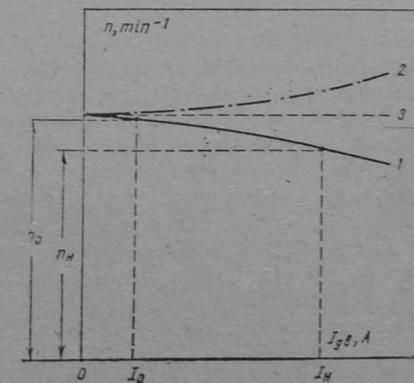
За изчисляване на отделните величини се използват следните формули:

$$P_1 = U_{\text{дв}} I_{\text{дв}} + U_{\text{дв}} I_{\text{в дв}}; P_2 = U_{\text{т}} I_{\text{т}} + P'_0 + I_{\text{т}}^2 R_{\text{ар}};$$

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi n}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \quad I = I_{\text{дв}} + I_{\text{в дв}}.$$



Фиг. 2.10



Фиг. 2.11

По данните от табл. 2.7 се построява с коростната характеристика  $n = f(I_{\text{дв}})$  при  $U_{\text{дв}} = \text{const}$  и  $I_{\text{в дв}} = \text{const}$

(фиг. 2.11). По принцип скоростната характеристика може да има вида или 1, или 2, или 3. От израза за  $n$  следва, че два фактора влияят върху честотата на въртене. Първият фактор е падът на напрежение  $I_{\text{дн}} R_a$ , като при увеличаване на  $I_{\text{дн}}$  той се увеличи.

Таблица 2.7

| Поддържат се    |                 |                   | Отчитат се      |       |       |                   |        | Изчисляват се |       |       |        |     |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------|-------|-------------------|--------|---------------|-------|-------|--------|-----|
| $I_{\text{ог}}$ | $U_{\text{дн}}$ | $I_{\text{в дн}}$ | $I_{\text{дн}}$ | $U_r$ | $I_r$ | $n$               | $P'_0$ | $P_1$         | $P_2$ | $M_2$ | $\eta$ | $I$ |
| A               | V               | A                 | A               | V     | A     | $\text{min}^{-1}$ | W      | W             | W     | N.m   | %      | A   |
| -               | -               | -                 | -               | -     | -     | -                 | -      | -             | -     | -     | -      | -   |

чава, което води до намаляване на  $n$ . Вторият фактор е размагнитващото действие на реакцията на котвата. При увеличаване на  $I_{\text{дн}}$  размагнитващото действие се увеличава, магнитният поток  $\Phi$  се намалява, което води до увеличаване на  $n$ . Вижда се, че двата фактора влияят на честотата на въртене в противоположни посоки. Във връзка с това скоростната характеристика ще има вида 1, когато преобладава влиянието на първия фактор, вида 2, когато преобладава влиянието на втория фактор, и вида 3, когато двата фактора взаимно се компенсират.

Характеристики от вида 3 са недопустими, тъй като не е възможно устойчива работа на двигателите. Затова двигателите с паралелно възбудждане се изработват с леко падаща скоростна характеристика от вида 1.

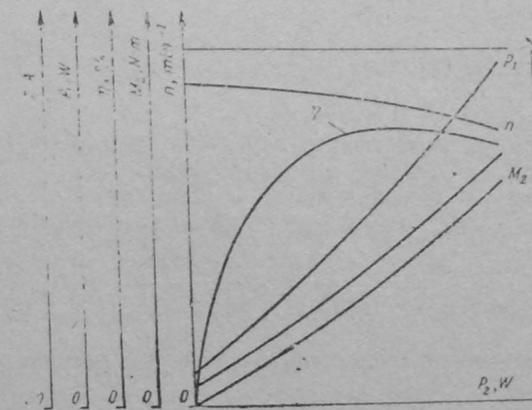
В съвременните машини, при които насищането на магнитната система е сравнително голямо, размагнитващото действие на напречната реакция на котвата е голямо и не е възможно получаването на падаща скоростна характеристика. За получаване на такава характеристика освен паралелната възбудителна намотка се поставя още и слаба серийна (стабилизираща) намотка, свързана същоочно. Стабилизиращата намотка създава м. д. н., която е около 10% от това на паралелната намотка, и се поставя, за да компенсира намалянето на магнитния поток поради реакцията на котвата.

В съответствие с означенията на фиг. 2.11 може да се определи процентното изменение на честотата на въртене при преминаване от празен ход към номинално натоварване:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100, \%$$

По данните от табл. 2.7 се построяват работните характеристики, показани на фиг. 2.12.

Както се вижда от кривата  $n=f(P_2)$ , при увеличаване на натоварването честотата на въртене слабо се намалява. Затова шун-



Фиг. 2.12

товите двигатели са подходящи в случаите, когато е необходимо при различни натоварвания честотата на въртене да остава почти постоянна.

Зависимостта  $M_2 = f(P_2)$  е почти линейна. Тъй като  $M_2 = \frac{P_2}{n}$ , тази зависимост би се изразила с права линия, ако  $n = \text{const}$ . Понеже при увеличаване на натоварването честотата на въртене се намалява малко, кривата се закрива леко нагоре.

Зависимостта  $\eta = f(P_2)$  има типичния за всички електрически машини вид. При празен ход к. п. д. е nulla, расте при увеличаване на натоварването, става максимален при определен товар, след което започва да намалява. Обикновено максимумът се получава при товар от порядъка на  $(0.75 \div 1.0)P_{2n}$ . Максимумът е притъпен, поради къто двигателът ще работи с достатъчно висок к. п. д. в един диапазон на натоварванията около номиналния товар.

С увеличаване на  $P_2$  и съответно на  $M_2$  консумираният ток  $I$  се увеличава, като пропорционално на  $I$  расте и консумиранията от мрежата мощност  $P_1$ .

81  
 2.3. УПРАЖНЕНИЕ № 3  
 ИЗПЪЛНИТЕЛЕН ПОСТОЯННОТОКОВ МИКРОДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

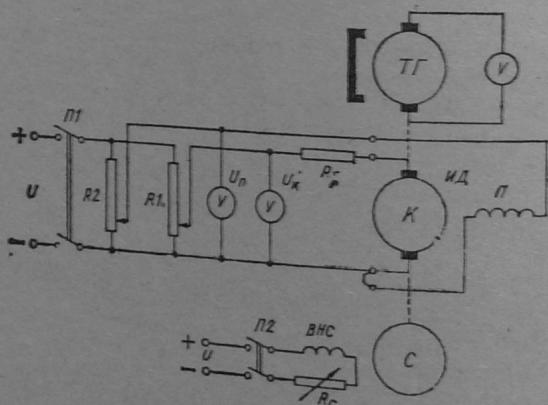
1. Определяне на момента  $M_{\text{пo}}$ .
2. Снемане на механичните характеристики  $M_2 = f(n)$  за  $\alpha = 1.0$  и  $\alpha = 0.5$  при котвено и полюсно управление.
3. Снемане на регулационните характеристики  $n = f(U_y)$  за  $M_2 = 0$  и  $M_2 = 0.5 M_{\text{пo}}$  при котвено и полюсно управление.

B. Изчисления и построения:

1. Построяване на механичните характеристики за двета вида управление.
2. Изчисляване и построяване на характеристиките на полезната мощност  $P_2 = f(n)$  за двета вида управление.
3. Построяване на регулационните характеристики за двета вида управление.

C. Схема на опитната постановка

При снемане на характеристиките се използва схемата от фиг. 2.13.



Фиг. 2.13

Напреженията  $U_k$  и  $U_n$ , които се подават на котвената  $K$  и полюсната  $P$  намотка на изпълнителния двигател  $ID$ , се регулират чрез потенциометрите  $R1$  и  $R2$ . Във веригата на котвената намотка е включено баластното съпротивление  $R_b$ . Натоварването на двигателя се осъществява с електромагнитна спирачка  $C$ , чиято възбудителна намотка  $VHS$  се захранва от постояннотоков източник, а токът през нея се регулира с реостата  $R_c$ . Честотата на въртене се измерва с тахогенератора  $TG$ .

III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Изпълнителните двигатели служат за преобразуване на електрически сигнал в механично въртене. В общ случай те имат две намотки: възбудителна и управляваща. Възбудителната намотка е включена непрекъснато към мрежата, а към управляващата намотка се подава напрежение тогава, когато трябва валът на двигателя да се приведе във въртене.

Изпълнителният постояннотоков двигател с електромагнитно възбудждане има две намотки: полюсна, разположена в статора, и котвена, разположена в ротора.

Под управление на изпълнителен двигател се разбира регулирането на честотата на въртене чрез изменение на управляващото напрежение. Възможни са два вида управление на постояннотоковите изпълнителни двигатели: котвено и полюсно. При котвено управление (КУ) котвената намотка е управляваща, а полюсната — възбудителна. При полюсно управление (ПУ) полюсната намотка е управляваща, а котвената — възбудителна.

Основните изисквания към изпълнителните двигатели са:

- а) липса на самоход, което означава, че честотата на въртене трябва да е нула при управляващо напрежение, равно на нула;
- б) линейни механични и регулировъчни характеристики;
- в) голямо бързодействие.

Под коефициент на сигнала  $\alpha$  се разбира отношението на управляващото  $U_y$  и възбудителното  $U_b$  напрежение:

$$\alpha = \frac{U_y}{U_b}.$$

Момент  $M_{\text{пo}}$ . Представлява пусковият момент при  $\alpha = 1$  ( $U_k = U_n = U_b$ ). Измерва се, като дискът на електромагнитната спирачка се фиксира с подходящ щифт към полюсната ѝ система. Ако този момент надвишава обхвата на спирачката, прави се измерване на пусковия момент  $M_p$  при номинално полюсно напрежение  $U_n = U_b$  и понижено напрежение на котвата  $U_k < U_n$ , а  $M_{\text{пo}}$  се изчислява по формулата

$$M_{\text{re}} = M_n \frac{U_n}{U_k}.$$

Механични характеристики. Представляват зависимости на полезния момент  $M_2$  от честотата на въртене  $n$  при постоянни коефициент на сигнала  $\alpha$  и възбудително напрежение  $U_b$ :

$$M_2 = f(n) \text{ при } \alpha = \text{const} \text{ и } U_b = U_n = \text{const}.$$

Таблица 2.8

| Котвено управление<br>$U_b = U_n = U_h$ |                   |                       |       |                   |       |
|---|-------------------|-----------------------|-------|-------------------|-------|
| $\alpha = 1,0$                          |                   | $\alpha = 0,5$        |       |                   |       |
| $U_y = U_h = U_n$                       |                   | $U_y = U_h = 0,5 U_n$ |       |                   |       |
| $M_2$                                   | $n$               | $P_2$                 | $M_2$ | $n$               | $P_2$ |
| N.m                                     | $\text{min}^{-1}$ | W                     | N.m   | $\text{min}^{-1}$ | W     |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |

Таблица 2.9

| Полюсно управление<br>$U_b = U_h = U_n$ |                   |                       |       |                   |       |
|---|-------------------|-----------------------|-------|-------------------|-------|
| $\alpha = 1,0$                          |                   | $\alpha = 0,5$        |       |                   |       |
| $U_y = U_h = U_n$                       |                   | $U_y = U_h = 0,5 U_n$ |       |                   |       |
| $M_2$                                   | $n$               | $P_2$                 | $M_2$ | $n$               | $P_2$ |
| N.m                                     | $\text{min}^{-1}$ | W                     | N.m   | $\text{min}^{-1}$ | W     |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |
|   |                   |                       |       |                   |       |

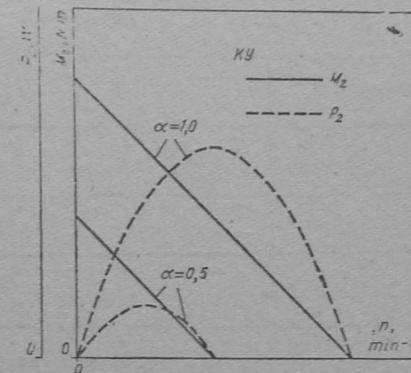
При опитното изследване се използува схемата от фиг. 2.13, като с потенциометрите  $R1$  и  $R2$  се установяват необходимите напрежения на двете намотки. Измерванията за всяка от характеристиките започват при  $M_2=0$  (празен ход) и завършват при  $n=0$  (късо съединение — застопорен ротор). При двета вида управление се снемат по две характеристики — при  $\alpha=1,0$  и  $\alpha=0,5$ . Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 2.8 и 2.9, относящи се съответно за котвено и полюсно управление.

Полезната мощност  $P_2$  се изчислява по формулата

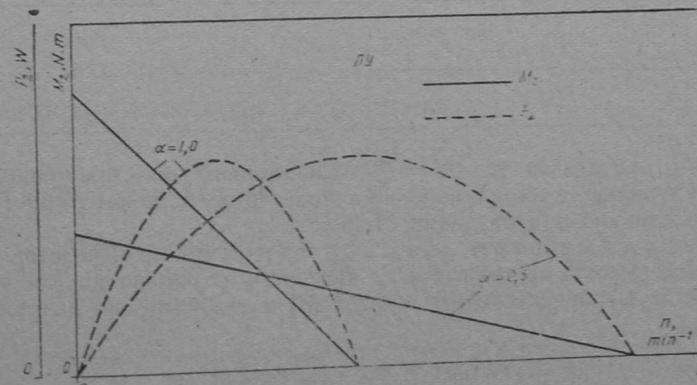
$$P_2 = M_2 \frac{2\pi n}{60}.$$

Механичните характеристики  $M_2=f(n)$  и характеристиките на полезната мощност  $P_2=f(n)$  за КУ и ПУ са показани съответно на фиг. 2.14 и фиг. 2.15.

Опитно снетите механични характеристики са близки до линейните. Характеристиките за двета начина на управление при



Фиг. 2.14



Фиг. 2.15

$\alpha=1$  съвпадат, а при други стойности на  $\alpha < 1$  характеристиките за ПУ са по-меки.

Характеристиките на полезната мощност представляват параболи, които пресичат абсцисната ос в две точки: при пускане

Таблица 2.10

| Котвено управление<br>$U_y = U_n = U_h$ |                   |                  |                   |
|---|-------------------|------------------|-------------------|
| $M_2=0$                                 |                   | $M_2=0,5 M_{no}$ |                   |
| $U_y = U_h$                             | $n$               | $U_y = U_h$      | $n$               |
| V                                       | $\text{min}^{-1}$ | V                | $\text{min}^{-1}$ |
|   |                   |                  |                   |

Таблица 2.11

| Полюсно управление<br>$U_y = U_h = U_n$ |                   |                  |                   |
|---|-------------------|------------------|-------------------|
| $M_2=0$                                 |                   | $M_2=0,5 M_{no}$ |                   |
| $U_y = U_h$                             | $n$               | $U_y = U_h$      | $n$               |
| V                                       | $\text{min}^{-1}$ | V                | $\text{min}^{-1}$ |
|   |                   |                  |                   |

( $n=0$ ) и при празен ход ( $M_2=0$ ). Максималната полезна мощност при КУ силно се намалява с намаляването на  $\alpha$ , докато при ПУ тя е постоянна при различни стойности на  $\alpha$ .

Регулатионните характеристики представляват зависимостта на честотата на въртене  $n$  от управляващото напрежение  $U_y$  при постоянен момент  $M_2$  и възбудително напрежение  $U_h$ .

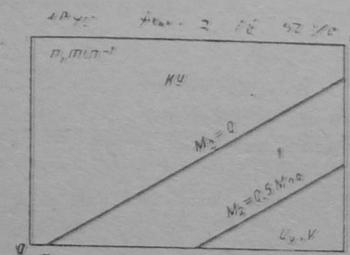
$$n=f(U_y) \text{ при } M_2=\text{const} \text{ и } U_h=U_n=\text{const}.$$

Характеристиките се снемат, като се използва схемата от фиг. 2.13. Целесъобразно е измерванията да започват с  $U_y = U_n$ , което след това постепенно се намалява. При двата вида управление се снемат по две регулатионни характеристики — при  $M_2=0$  и  $M_2=0,5 M_{no}$ . Резултатите се нанасят в табл. 2.10 и 2.11 съответно за котвено и за полюсно управление.

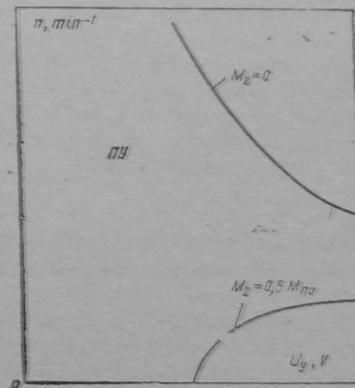
На фиг. 2.16 и 2.17 са показани регулатионните характеристики съответно при котвено и полюсно управление.

Регулатионните характеристики при КУ са линейни, а при ПУ те са нелинейни и ако  $M_2 < 0,5 M_{no}$ , се получават двузначни.

В схемата на автоматиката и изчислителната техника се използва предимно котвеното управление.



Фиг. 2.16



Фиг. 2.17

Наред с това все по-широко приложение намират изпълнителни постояннотокови двигатели с възбуджение от постоянни магнити. Ясно е, че в този случай е възможно само котвеното управление.

#### 2.4. УПРАЖНЕНИЕ № 4 ПОСТОЯННОТОКОВ САМОВЪЗБУДИТЕЛЕН ТАХОГЕНЕРАТОР

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания:

- Снемане на изходните характеристики  $U_n=f(n)$  при  $R_t=\infty$  и  $R_t=R_{th}$ .
- Снемане на зависимостта  $U_n=f(R_t)$  при  $n=n_u$ .

###### B. Изчисления и построения:

- Построяване на изходните характеристики и определяне на стръмнината им.
- Построяваче на зависимостта на изходното напрежение от товарното съпротивление.

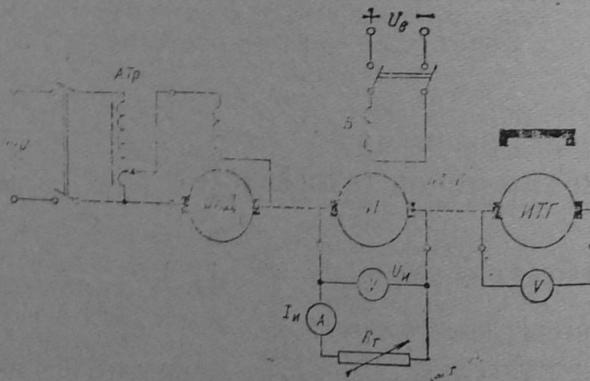
## II. Схема на опитната постановка

Използува се схемата, показана на фиг. 2.18. Роторът на изследвания постояннотоков тахогенератор ПТТГ се върти от универсален колекторен двигател УКД, захранван посредством автотрансформатор АТр. Чрез изменение на напрежението, подавано от АТр към УКД, се регулира честотата на въртене. Възбудителната намотка  $B$  на ПТТГ се захранва с постоянно напрежение, а към изходната (котвената) намотка  $H$  е включен товарен реостат  $R_t$ . Честотата на въртене се измерва с измервателния тахогенератор ИТГ.

## III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Тахогенераторите са електрически датчици, които се използват в схемите на автоматиката и служат за преобразуване на честотата на въртене в електрически сигнал (изходно напрежение).

Конструктивно постояннотоковите тахогенератори са подобни на генераторите за постоянен ток с малка мощност. Както всички постояннотокови машини с електромагнитно възбуждане те



Фиг. 2.18

имат две намотки: възбудителна и котвена. Възбудителната намотка е разположена в статора и се захранва с постоянно напрежение  $U_B$  от страничен източник. Противодействието на нея токът създава основния магнитен поток. Котвената намотка е разположена в ротора и от нея се снема изходното напрежение  $U_H$ . Целесъобразно е в случая котвената намотка да се нарича изходна намотка.

Основното изискване, което се поставя към тахогенератора:

е да съществува строга пропорционалност между изходното напрежение и честотата на въртене.

Напоследък все по-широко приложение намират тахогенератори, при които основният магнитен поток се създава от постоянни магнити и по този начин отпада необходимостта от постояннотоков източник за захранване на възбудителната намотка.

Изходни характеристики. Представляват зависимости на изходното напрежение  $U_H$  от честотата на въртене  $n$  при постоянно товарно съпротивление  $R_t$  и постоянно възбудително напрежение:

$$U_H = f(n) \text{ при } R_t = \text{const} \text{ и } U_B = U_{BH}$$

За снемане на характеристиките се свързва схемата от фиг. 2.18. Чрез изменението на напрежението от автотрансформатора се регулира честотата на въртене в диапазона  $n = (0 \div 1,25)n_n$ . Снемат се две характеристики: първата при  $R_t = \infty$ , а втората при  $R_t = R_{TH}$ . Номиналната стойност на товарното съпротивление  $R_{TH}$  се определя от отношението на номиналното изходно напрежение  $U_{BH}$  и номиналния изходен ток  $I_{BH}$ :

$$R_{TH} = \frac{U_{BH}}{I_{BH}}$$

Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 2.12.

Таблица 2.12

| $R_t = \infty$    |       | $R_t = R_{TH}$    |       |
|-------------------|-------|-------------------|-------|
| $n$               | $U_H$ | $n$               | $U_H$ |
| $\text{min}^{-1}$ | V     | $\text{min}^{-1}$ | V     |
|                   |       |                   |       |

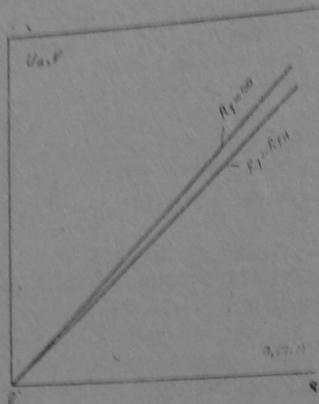
Построените по данните от табл. 2.12 изходните характеристики са показани на фиг. 2.19. От опитно снетите характеристики може да се направят изводи за тяхната линейност.

Стръмността  $S$  на изходните характеристики се определя с израза

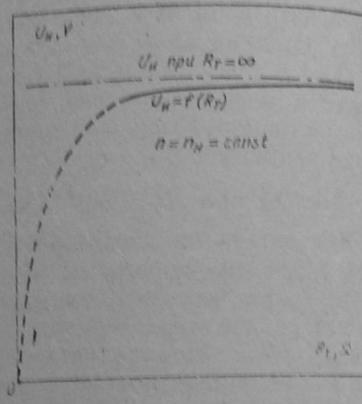
$$S = \frac{U_H}{n_n}$$

където  $U_H$  е измереното изходно напрежение при номиналната честота на въртене  $n_n$ .

Зависимост  $U_n = f(R_t)$ . За снемане на тази характеристика се свързва схемата на фиг. 2.18. През време на снемането се използва схемата на фиг. 2.19.



Фиг. 2.19



Фиг. 2.20

опит възбудителното напрежение  $U_n$  и честотата на въртене  $n$  са неизменни и равни на номиналните си стойности. Чрез  $R_t$  може да се изменя в диапазона  $I_n = (0 \div 1,25) I_{n_n}$ . Резултатите се нанасят в табл. 2.13.

Стойността на товарното съпротивление се изчислява с изразът

$$R_t = \frac{U_n}{I_n}.$$

Таблица 2.13

| $n = n_n = \text{const}$ |       |          |
|--------------------------|-------|----------|
| $U_n$                    | $I_n$ | $R_t$    |
| V                        | A     | $\Omega$ |
|                          |       |          |
|                          |       |          |

На фиг. 2.20 е показана зависимостта  $U_n = f(R_t)$ . От нея се вижда влиянието на големината на товара върху изходното напрежение при номиналната честота на въртене. Показано е и изходното напрежение при  $R_t = \infty$ . Става ясно, че е желателно товарното съпротивление да бъде колкото е възможно по-голямо.

## ГЛАВА III

### ИЗПITVANIE NA TРАNSFORMATORI

#### 3.1. УПРАЖНЕНИЕ № 5

#### ТРИФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания:

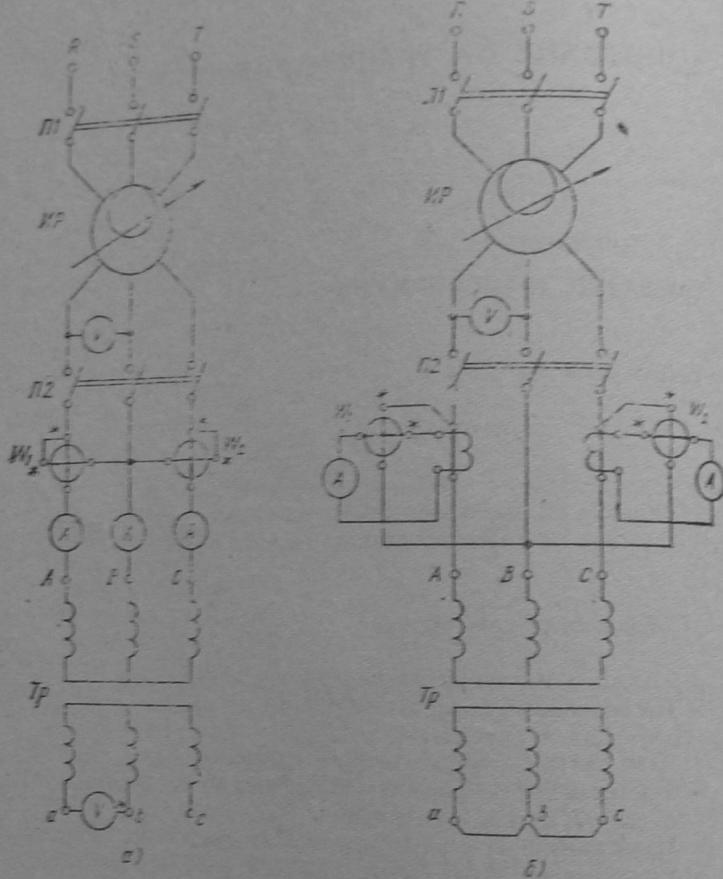
1. Определяне на коефициента на трансформация.
2. Снемане на характеристиките на празен ход.
3. Снемане на характеристиките на късо съединение.

###### B. Изчисления и построения:

1. Изчисляване на коефициента на трансформация.
2. Построяване на характеристиките на празен ход  $I_{0A}$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_{0A})$  и определяне на  $P_{0n}$ .
3. Изчисляване на параметрите на празен ход  $z_0$ ,  $r_0$  и  $x_0$ .
4. Построяване на характеристиките на късо съединение  $I_{ka}$ ,  $P_k$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{ka})$  и определяне на  $P_{kn}$ .
5. Изчисляване на параметрите на късо съединение  $z_k$ ,  $r_k$  и  $x_k$ .
6. Изчисляване на напрежението на късо съединение  $U_{ka}$  и  $U_{kn}$ .
7. Определяне на изменението на напрежението  $\Delta U_2$ , изчисляване и построяване на външната характеристика  $U_2 = f(I_2)$ .
8. Изчисляване и построяване на кривата на к. п. д.  $\eta = f(P_2)$ .

##### II. Схема на опитната постановка

Схемите за провеждане на изследването при празен ход и късо съединение са показани на фиг. 3.1. И в двата случая изследваният трансформатор  $T_p$  се захранва с регулируемо напрежение, получавано от индукционния регулатор  $IR$ .



Фиг. 3.1

III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Кофициент на трансформация. Той представлява отношението на фазовото е. д. н. на намотката за високо напрежение към фазовото е. д. н. на намотката за ниско напрежение, т. е.

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2}$$

Където  $w_1$  и  $w_2$  са броят на навивките на двете намотки.

64

Таблица 3.1

| Отчитат се   |              |              | Изчисляват се |                 |                                   |
|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_{AB}$ , V | $U_{BC}$ , V | $U_{CA}$ , V | $U_{1A}$ , V  | $U_{1\phi}$ , V | $k$                               |
| $U_{ab}$ , V | $U_{bc}$ , V | $U_{ca}$ , V | $U_{2a}$ , V  | $U_{2\phi}$ , V | $k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}$ |
|              |              |              |               |                 |                                   |

Определя се при празен ход на трансформатора по метода на двата волтметъра (фиг. 3.1 а). Тъй като при празен ход  $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$  и  $E_{2\phi} \approx U_{2\phi}$ , то

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}$$

Измерването се провежда, като на първичната намотка се подава напрежение от порядъка на  $(0,1 \div 1,0)U_n$  и едновременно се отчитат едноименните първични и вторични линейни напрежения. Резултатите се нанасят в табл. 3.1.

Средногритметичните линейни напрежения са

$$U_{1a} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \quad U_{2a} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}$$

При изчисляване на фазовите напрежения трябва да се има предвид, че

$$U_\phi = \frac{U_a}{\sqrt{3}} \text{ при свързване в звезда;}$$

$$U_\phi = U_a \text{ при свързване в триъгълник.}$$

Характеристики на празен ход. Представляват зависимостите на тока  $I_{0a}$ , на консумираната мощност  $P_0$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_0$  от напрежението на първичната намотка  $U_{0a}$  при отворена вторична намотка:

$$I_{0a}, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{0a}) \text{ при } j=j_a \text{ и } I_2=0.$$

Използува се схемата от фиг. 3.1 а. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че при опита напрежението, което се подава на трансформатора, се изменя в граничите  $(0,3 \div 1,1) U_n$ , а токът на празен ход при номинално напрежение е от порядъка на  $(0,02 \div 0,1) I_n$ .

Таблица 3.2

| Отчитат се |          |          |          |            |            | Изчисляват се |                 |       |               |
|------------|----------|----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------|---------------|
| $U_{0A}$   | $I_{0A}$ | $I_{0B}$ | $I_{0C}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k_W$         | $I_{0\text{л}}$ | $P_0$ | $\cos \Phi_0$ |
| V          | A        | A        | A        | дел.       | дел.       | W/дел         | A               | W     | -             |
|            |          |          |          |            |            |               |                 |       |               |
|            |          |          |          |            |            |               |                 |       |               |

След затваряне на прекъсвача  $P1$  се установява минималното напрежение на изхода на  $IP$  и тогава се затваря  $P2$ . Това е необходимо, тъй като, ако се подаде директно номиналното напрежение, се развива преходен процес, при който токът може да надвиши 4-7 пъти номинания и да повреди измервателните апарати. Повишава се напрежението, подавано на трансформатора, до стойност 1,1  $U_{n\text{л}}$ , при което се прави първото отчитане. Задават се поредица намаляващи стойности на напрежението и се отчитат величините, които се нанасят в табл. 3.2. Задължително се провежда измерване при номиналното напрежение.

При изчисленията се използват формулите

$$I_{0\text{л}} = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; P_0 = k_W (\alpha_1 \pm \alpha_2); \cos \Phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0\text{л}} I_{0\text{л}}}.$$

При трифазните триядрени трансформатори токът на празен ход в средната фаза е по-малък от токовете в крайните фази, тъй като пътят на магнитния поток за средната фаза е по-къс, отколкото за двете крайни фази. За ток на празен ход на трансформатора се счита средноаритметичният ток.

По данните от табл. 3.2 се построяват характеристиките на празен ход (фиг. 3.2).

При празен ход токът  $I_0$  изостава от напрежението  $U_0$  почти на  $90^\circ$ . Поради това реактивната съставка  $I_{0\text{р}}=I_0 \sin \Phi_0$  е значително по-голяма от активната  $I_{0\text{а}}=I_0 \cos \Phi_0$ . Тъй като, от друга страна,  $U_{0\phi} \approx E_{1\phi} \equiv \Phi$ , зависимостта  $I_0=f(U_0)$  е близка до кривата на намагнитване на трансформатора  $\Phi=f(I_{0\text{р}})$ . Характерът на кривата  $I_{0\text{л}}=f(U_{0\text{л}})$  зависи от степента на насищане на магнитопровода. При ниски напрежения магнитопроводът е ненасищен и токът се изменя пропорционално на напрежението. С увеличаване на напрежението се увеличава насищането, при което токът расте по-бързо от напрежението и кривата  $I_{0\text{л}}=f(U_{0\text{л}})$  се закривава нагоре.

Консумираната мощност при празен ход  $P_0$  покрива загубите

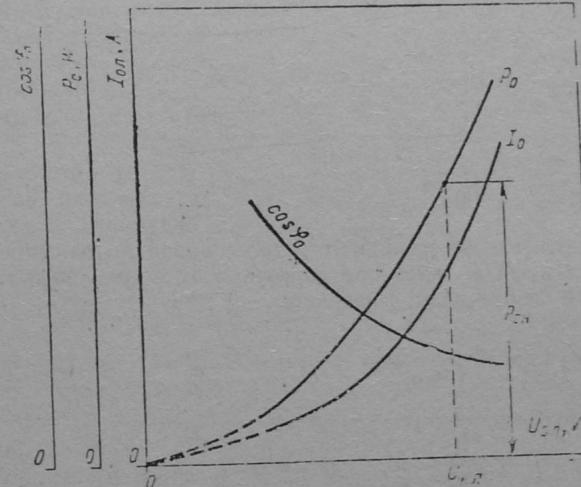
в стоманата  $P_0$  и електрическите загуби в първичната намотка  $P_{ел}$ :

$$P_0 = P_0 + P_{ел}.$$

Тъй като токът на празен ход е много малък (няколко процента от номиналния), загубите  $P_{ел}$  са пренебрежимо малки и затова

$$P_0 \approx P_0,$$

т. е. консумираната мощност при празен ход практически е равна на загубите в стоманата.



Фиг. 3.2

Загубите в стоманата са пропорционални на квадрата на магнитната индукция, а тя е пропорционална на индукираното е. д. н., което е приблизително равно на напрежението. Следователно практически  $P_0 \equiv U_{0\text{л}}^2$  и затова характеристиката  $P_0=f(U_{0\text{л}})$  представлява парабола.

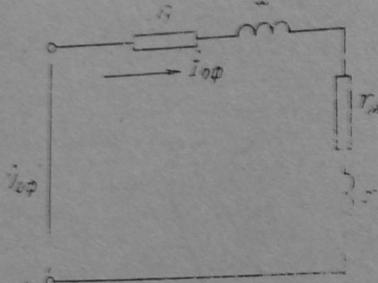
На фиг. 3.2 е показано спределянето на мощността  $P_0$ , която представлява загубите в стоманата при номиналното напрежение.

Характерът на кривата  $\cos \Phi_0=f(U_{0\text{л}})$  може да се обясни, като се вземе предвид, че

$$\cos \Phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0\text{л}} I_{0\text{л}}} = \frac{U_{0\text{л}}^2}{U_{0\text{л}} I_{0\text{л}}} = \frac{U_{0\text{л}}}{I_{0\text{л}}}.$$

При увеличаване на напрежението, степента на насищане на магнитопровода се увеличава, токът  $I_0$ , расте по-бързо от  $U_{0\alpha}$ , поради което  $\cos \varphi_0$  намалява.

Параметри на празен ход. Заместващата схема на една фаза на трансформатора при празен ход е показана на фиг. 3.3. Приети са следните означения:



Фиг. 3.3

$r_1$  — активно съпротивление на първичната намотка;

$x_1$  — индуктивно съпротивление на разсейване на първичната намотка;

$r_m$  — съпротивление, отчитащо загубите в стоманата;

$x_m$  — индуктивно съпротивление на взаимна индукция.

Изчисляването на параметрите се прави по данните от табл. 3.2 за  $U_{0\alpha} = U_{0\beta}$ , като при свързване на първичната намотка в звезда се използват формулите

$$z_0 = |Z_1 + Z_m| = \frac{U_{0\alpha}}{\sqrt{3} I_{0\alpha}};$$

$$r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_0}{3 I_{0\alpha}^2};$$

$$x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{z_0^2 - r_0^2},$$

а при свързване на намотката в триъгълник —

$$z_0 = \frac{\sqrt{3} U_{0\alpha}}{I_{0\alpha}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{0\alpha}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$$

Характеристики на късо съединение. Представляват зависимостите на тока  $I_{kL}$ , на консумираната мощност  $P_k$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_k$  от напрежението на първичната намотка  $U_{kL}$  при затворена късо вторична намотка:

$$I_{kL}, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{kL}) \text{ при } f = f_n \text{ и } U_2 = 0.$$

Опитът се провежда по схемата, дадена на фиг. 3.1 б. При избора на измервателни апарати трябва да се има предвид, че опитът се прави при такова понижено напрежение, при което токът не надвишава  $(1.0 \div 1.1) I_n$ . Това напрежение е от порядъка на  $(0.02 \div 0.1) U_n$ .

От особена важност е да се установи, че напрежението на изхода на ИР е минимално, и тогава може да се затвори прекъсвачът  $P2$ . След това се повиндава плавно напрежението, докато токът достигне стойност  $(1.0 \div 1.1) I_n$ , при която се прави пър-

Таблица 3.3

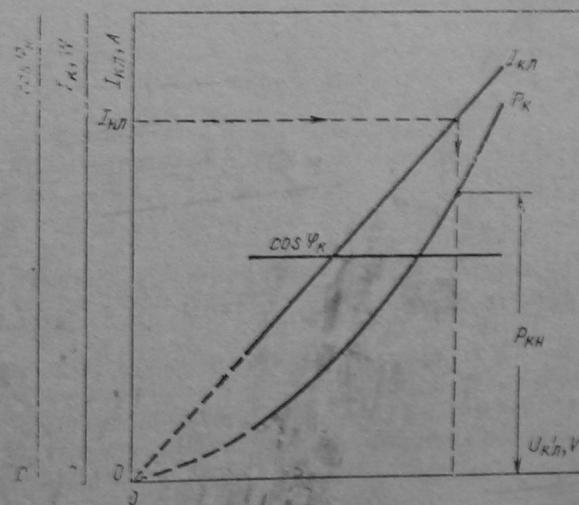
| Отчитат се |          |          |       |       |       | Изчисляват се |       |                  |
|------------|----------|----------|-------|-------|-------|---------------|-------|------------------|
| $U_{kL}$   | $I_{kA}$ | $I_{kC}$ | $z_1$ | $z_2$ | $k_w$ | $I_n$         | $P_k$ | $\cos \varphi_k$ |
| V          | A        | A        | дел   | дел   | W/дел | A             | W     | -                |
|            |          |          |       |       |       |               |       |                  |

то от този. След това се измерва при поредна намаляващи внос на ток напрежението. Резултатите се нанасят в табл. 3.3.

При изчисленията се използват формулите

$$I_{kL} = \frac{I_{kA} + I_{kC}}{2}; \quad P_k = k_w (z_1 + z_2); \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{kL} I_{kL}}.$$

По данните от табл. 3.3 се построяват характеристиките на късо съединение (фиг. 3.4).



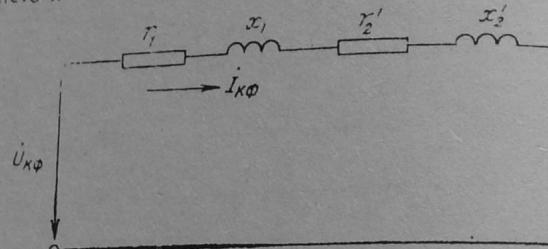
Фиг. 3.4

Тъй като опитът се прави при силно понижено напрежение, магнитопроводът на трансформатора не е насищен и затова  $I_{\text{ка}} = f(U_{\text{кл}})$  представлява права линия.

Консумираната при късо съединение мощност  $P_k$  покрива електрическите загуби в намотките и загубите в стоманата  $\rho_{\text{ск}}$ :

$$P_k = \rho_{\text{ел}1} + \rho_{\text{ел}2} + \rho_{\text{ск}},$$

Загубите в стоманата са пропорционални на квадрата на напрежението и тъй като през време на опита то е силно понижено



Фиг. 3.5

(няколко процента от номиналното), загубите  $\rho_{\text{ск}}$  са преенебрежими малки. Тогава

$$P_k \approx \rho_{\text{ел}1} + \rho_{\text{ел}2} = \rho_{\text{ел}},$$

т.е. консумираната мощност при късо съединение практически е равна на електрическите загуби в намотките.

Тъй като електрическите загуби са пропорционални на квадрата на тока, а в случая  $I_{\text{ка}} = U_{\text{кл}}$ , характеристиката  $P_k = f(U_{\text{кл}})$  представлява парабола.

На фиг. 3.4 е показано определянето на мощността  $P_{\text{ел}}$ , която представлява електрическите загуби в намотките при номиналния ток.

От израза  $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{\text{кл}} I_{\text{ка}}}$ , като се вземе предвид, че  $P_k \equiv I_{\text{ка}}^2$  и  $U_{\text{кл}} \equiv I_{\text{ка}}$ , следва, че  $\cos \varphi_k = \text{const}$ , и затова зависимостта  $\cos \varphi_k = f(U_{\text{кл}})$  се представя с права, успоредна на абсцисната ос.

**Параметри на късо съединение.** От съществуваща схема на един фаза на трансформатора при късо съединение е показана на фиг. 3.5. С  $r_1$  и  $r_2'$  са означени първичното и приведеното вторично активно съпротивление, а с  $x_1$  и  $x_2'$  — първичното и приведеното вторично индуктивно съпротивление

По данните от табл. 3.3 за номиналния ток се изчисляват параметрите при свързване на първичната намотка в звезда по формулите:

$$z_k = |Z_1 + Z_2'| = \frac{U_{\text{кл}}}{\sqrt{3} I_{\text{ка}}};$$

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3 I_{\text{ка}}^2};$$

$$x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

или при свързване на намотката в триъгълник:

$$z_k = \frac{\sqrt{3} U_{\text{кл}}}{I_{\text{ка}}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_{\text{ка}}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

**Напрежение на късо съединение.** По определение това е напрежението, което трябва да се подаде на първичната намотка при затворена накъсо вторична намотка, за да преминат в намотките токове, равни на номиналните. Обикновено се изразява в проценти от номиналното напрежение и се изчислява по формулата

$$\mu_k = \frac{I_{\text{инф}} z_k}{U_{\text{инф}}} \cdot 100, \%$$

Активната и реактивната съставка на напрежението на късо съединение са съответно

$$\mu_{k\alpha} = \frac{I_{\text{инф}} r_k}{U_{\text{инф}}} \cdot 100, \%$$

$$\mu_{kp} = \frac{I_{\text{инф}} x_k}{U_{\text{инф}}} \cdot 100, \%$$

Тук  $I_{\text{инф}}$  и  $U_{\text{инф}}$  са номиналните фазови стойности на тока и напрежението на първичната намотка.

**Изменение на напрежението.** Външна характеристика. Процентното изменение на вторичното напрежение при преминаване от празен ход към определено на товаряване е

$$\Delta u_2 = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100, \%$$

където  $U_1$  е вторичното напрежение при празен ход;

$U_2$  — вторичното напрежение при на товаряване.

С достатъчна точност  $\Delta u_2$  може да се изчисли по формулата

$$\Delta u_2 = \beta (\mu_{ka} \cos \varphi_2 + \mu_{kp} \sin \varphi_2), \%$$

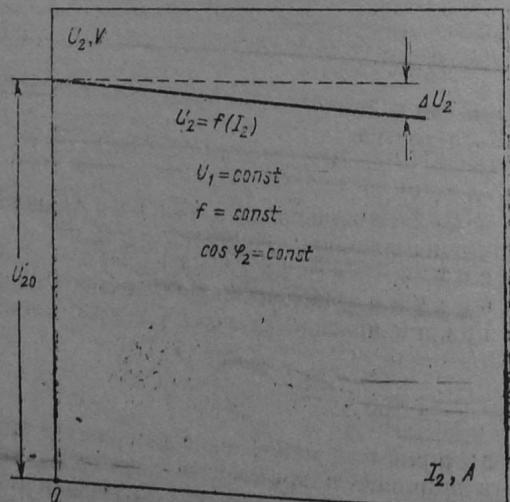
където  $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$  е коефициент на натоварване на трансформатора;  
 $\varphi_2$  — ъгълът на дефазиране между вторичният ток  
и вторичното напрежение.

Таблица 3.4

| Задават се       |         | Изчисляват се |              |       |
|------------------|---------|---------------|--------------|-------|
| $\cos \varphi_2$ | $\beta$ | $I_2$         | $\Delta U_2$ | $U_2$ |
| —                | —       | A             | %            | V     |
| const            |         |               |              |       |

Вижда се, че изменението на напрежението на даден трансформатор зависи както от големината на товара ( $I_2$ ), така и от характера на товара ( $\varphi_2$ ). Трябва да се има предвид, че  $\varphi_2 > 0$ , ако  $I_2$  изостава от  $U_2$ , и  $\varphi_2 < 0$ , ако  $I_2$  изпреварва  $U_2$ .

Външната характеристика на трансформатора представлява зависимостта на вторичното напрежение  $U_2$  от вторичния ток  $I_2$  при неизменни захранващи напрежение  $U_1$ , честота  $f$  и фактор на мощността на консуматора:



Фиг. 3.6

$U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$ ;  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ .  
За изчисляване на външната характеристика се съставя табл. 3.4.

Вторичното напрежение се изчислява по формулата

$$U_2 = U_{2n} \left( 1 - \frac{\Delta U_2}{100} \right),$$

където  $U_{2n}$  е номиналното вторично напрежение.

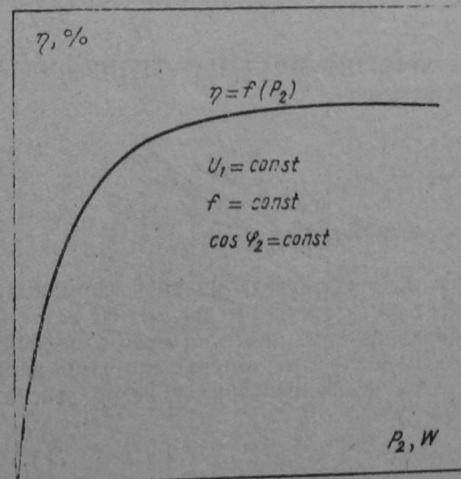
Удобно е на  $\beta$  да се зададат стойности от 0 до 1,25 през 0,25.

По данните от табл. 3.4 се построява външната характеристика, показана на фиг. 3.6.

Таблица 3.5

| Задават се       |         | Изчисляват се |        |
|------------------|---------|---------------|--------|
| $\cos \varphi_2$ | $\beta$ | $P_2$         | $\eta$ |
| —                | —       | W             | %      |
| const            |         |               |        |

Коефициент на полезно действие. Представлява отношението на отдаваната  $P_2$  и консумираната  $P_1$  активна мощност:



Фиг. 3.7

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100, \%$$

Определянето на к. п. д. по прения метод е нецелесъобразен поради ограниченията му точност.

Препоръчва се к. п. д. да се определи по непряк начин, като се използват стойностите на загубите, получени при опитите на празен ход и късо съединение. Използва се формулата

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_{0n} + \beta^2 P_{kn}}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_{0n} + \beta^2 P_{kn}} \right) \cdot 100, \%$$

където  $S_n$  е номиналната мощност на трансформатора;  $P_{0n}$  са загубите в стоманата при номинално напрежение (вж. фиг. 3.2);

$P_{kn}$  — електрическите загуби в намотките при номинален ток (вж. фиг. 3.4).

За изчисляване на зависимостта

$$\eta = f(P_2)$$

при  $U_1 = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$ ;  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  се съставя табл. 3.5.

Отдаваната мощност се изчислява по формулата

$$P_2 = 3S_n \cos \varphi_2.$$

По данните от табл. 3.5 се построява зависимостта  $\eta = f(P_2)$ , показана на фиг. 3.7.

### 3.2. УПРАЖНЕНИЕ № 6

#### ЕДНОФАЗЕН МНОГОНАМОТЪЧЕН ТРАНСФОРМАТОР С МАЛКА МОЩНОСТ

##### 1. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания:

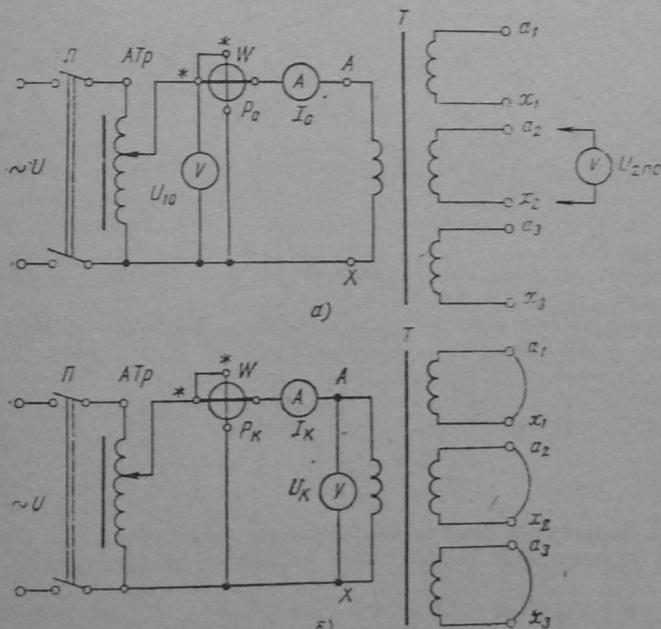
1. Определяне на коефициента на трансформация.
2. Снемане на характеристиките на празен ход.
3. Снемане на характеристиките на късо съединение.
4. Снемане на външните характеристики при активен товар.
5. Определяне на коефициента на полезно действие по пряк начин при активен товар.

##### B. Изчисления и построения:

1. Изчисляване на коефициента на трансформация.
2. Построяване на характеристиките на празен ход.
3. Изчисляване на параметрите на празен ход.
4. Построяване на характеристиките на късо съединение.
5. Изчисляване на параметрите на късо съединение.
6. Изчисляване на напреженията на късо съединение.
7. Построяване на външните характеристики и изчисляване на изменението на напрежението.
8. Изчисляване и построяване на кривата на к. п. д.

##### II. Схема на опитната постановка

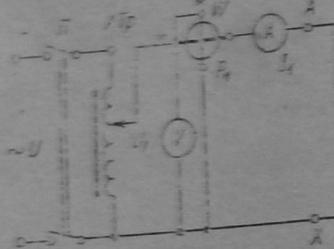
Предмет на изследване е еднофазен многонамотъчен трансформатор с малка мощност.



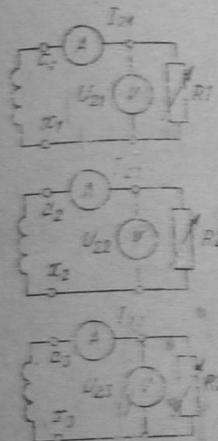
Фиг. 3.8

Тези трансформатори имат една първична намотка и няколко вторични намотки. Вторичните намотки са за различни напрежения и захранват едновременно няколко консуматора. Консуматор-

рите могат да бъдат устройства за битъ. Автоматиката или радиоелектронната обикновено пъвши от вторичните намотки за крашат и токоизправителни схеми в тези устройства, поради което тези трансформатори се наричат мрежови или токозахравни.



Фиг. 3.9



вации. Мощността им не надхвърля неколкостотин волтампера. Схемите за измерване на коефициента на трансформация и за изследването на празен ход и на късо съединение са показани на фиг. 3.8.

Схемата за снемане на външната характеристика и за определяне на к. п. д. е показвана на фиг. 3.9.

При всички схеми изследваният трансформатор се захранва от еднофазен регулируем автотрансформатор с мощност, не по-голяма от мощността на изследвания трансформатор.

Промяната на товара се осъществява с регулируеми реостати  $R1$ ,  $R2$  и  $R3$  подходящо избрани параметри по ток и съпротивление.

### III. Теоретична подготовка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

**Коефициент на трансформация.** Той е даден на отношението на индукираните от основния магнитен поток е. д. н. в намотката за високо напрежение и съответната намотка за ниско напрежение с порядък номер  $n$ , следователно в отношението на броя на навивките, т. е.

$$k_n = \frac{E_1}{E_{2n}} = \frac{w_1}{w_{2n}}$$

Определянето му става при празен ход на трансформатора, т. е. при отворени всички вторични намотки със два волтметъра (фиг. 3.8 а). Изборът на апаратите се прави по номиналните стойности на напреженията на първичната и вторичните намотки.

Измерването се осъществява, като на първичната намотка се подаде напрежение  $U_{10}=(0,1 \div 1,0) U_{1n}$  и се отчитат последователно вторичните напрежения  $U_{2n0}$ . При пренебрегване на падовете на напрежение в намотките на трансформатора и в измервателните апарати  $E_1 \approx U_{10}$ ,  $E_{2n} \approx U_{2n0}$  и следователно коефициентите на трансформация могат да се изчислят по формулата

$$k_n \approx \frac{U_{10}}{U_{2n0}}$$

Прави се сравнение с коефициентите на трансформация, изчислени чрез отношението на броя на навивките, отбелязани на табелката на трансформатора.

**Характеристики на празен ход.** Дават зависимостите на тока  $I_0$ , на мощността  $P_0$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_0$  от напрежението на първичната намотка  $U_{10}$  при постоянна честота и при отворени всички вторични намотки, т. е.

$$I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10}) \text{ при } f=f_k \text{ и } I_{2n}=0.$$

Използува се схемата на фиг. 3.8 а. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че напрежението ще се изменя от нула до 1,20  $U_{1n}$ , а токът на празен ход при номинално напрежение е от порядъка на 0,2  $I_{1n}$ .

Снемането на характеристиките започва от едно минимално напрежение, определено от обхватите на измервателните апарати. Постепенно първичното напрежение  $U_{10}$  се повишава до стойност 1,1  $U_{1n}$ , като се правят измервания, включително и за номиналното напрежение. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 3.6.

При изчисленията се използват формулите

$$P_0 = k_n \alpha_x; \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}$$

Таблица 3.6

| Отчитат се |       |            |       | Изчисляват се |                  |
|------------|-------|------------|-------|---------------|------------------|
| $U_{10}$   | $I_0$ | $\alpha_x$ | $k_n$ | $P_0$         | $\cos \varphi_0$ |
| V          | A     | дел        | W/дел | W             | -                |
|            |       |            |       |               |                  |
|            |       |            |       |               |                  |
|            |       |            |       |               |                  |

От изчисленията в табл. 3.6 величини се построяват в общ координатна система характеристиките на празен ход. Те са подобни на тези от фиг. 3.2 и обяснението на характера на кривите е аналогично с това за трифазен трансформатор (упражнение № 5).

При трансформатори с малка мощност активното съпротивление на първичната намотка  $r_1$  не може да се пренебрегне в сравнение със съпротивлението  $r_m$ , което отчита загубите в стоманата, поради което определянето за тези загуби става по формулата

$$P_t = P_0 - r_1 I_0^2.$$

Параметри на празен ход. Определянето им става от данните в табл. 3.6 за номинално първично напрежение  $U_{1n} = U_{1m}$  съобразно със замествашата схема на фиг. 3.3 по формулите:

$$z_0 = |Z_1 + Z_m| = \frac{U_{1n}}{I_0}; \quad r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_k}{I_0^2};$$

$$x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

**Характеристики на късо съединение.** Това са зависимостите на тока  $I_{1n}$ , на мощността  $P_k$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_k$  от напрежението на първичната намотка при постоянна честота и затворена накъсо една от вторичните намотки, при което намотките, които не участват в опита, остават отворени, т. е.

$$I_{1n}, \quad P_k, \quad \cos \varphi_k = f(U_n) \text{ при } j=1_m \text{ и } U_{2n}=0.$$

Използува се схемата на фиг. 3.8 б. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че на трансформатора се подава силно понижено напрежение от поръдъка на 0.1  $U_{1n}$ , така че токът да не надвиши  $(1.0 \pm 1.2) I_{1n}$ . Снемането на характеристиките започва от минимално напрежение, получено от захранващия автотрансформатор. Постепенно напрежението се повишава до достигане на стойност на тока  $I_{1n} = (1 \div 1.5) I_{1n}$ , като се правят измервания, включително и за номиналния ток на затворената накъсо вторична намотка.

Измерванията се повтарят за всички двойки намотки (първична — вторична). Резултатите се нанасят в табл. 3.7.

При изчисленията се използват формулите

$$P_k = z_m k_V; \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_n I_{1n}}.$$

От изчисленията в табл. 3.7 величини се построяват в общ координатна система характеристиките на късо съединение само за една двойка (първична — вторична) намотки. Те са подобни

на тези от фиг. 3.4, а обяснението на характера на кривите е аналогично с тези на трифазен трансформатор (упражнение № 5).

Консумираната мощност при късо съединение отива почти изцяло за покриване на загубите в медта на намотките — т. нар. електрически загуби:

$$P_k \approx p_{el}.$$

Параметри на късо съединение. Те се определят за двойки (първична — вторична) намотки при номинален ток на затворената накъсо намотка  $I_{2n} = I_{2m}$  от данните в табл. 3.7 по формулите:

$$z_{k12n} = |Z_1 + Z_{2n}| = \frac{U_n k_n}{I_{2n}}; \quad r_{k12n} = r_1 + r'_{2n} = \frac{P_k k_n^2}{I_{2n}^2};$$

$$x_{k12n} = x_1 + x'_{2n} = \sqrt{z_{k12n}^2 - r_{k12n}^2}$$

където  $r'_{2n}$  и  $x'_{2n}$  са стойностите на приведените съпротивления за вторичната намотка затворена накъсо.

Таблица 3.7

| Отчитат се |          |       |       | Изчисляват се |       |                  |
|------------|----------|-------|-------|---------------|-------|------------------|
| $I_{1n}$   | $I_{2n}$ | $U_n$ | $z_m$ | $k_V$         | $P_k$ | $\cos \varphi_k$ |
| A          | A        | V     | дел   | W/дел         | W     | —                |
|            |          |       |       |               |       |                  |

**Напрежение на късо съединение.** То също се определя за двойка намотки (първична — вторична). Това е напрежението с номинална честота, приложено към първичната намотка, при свързана накъсо една от вторичните намотки и отворени останалите, при което токът в затворената намотка е номинален. То се изразява в проценти от номиналното първично напрежение и се изчислява по формулата

$$u_{k12n} = \frac{I_{2n} z_k}{U_{1n} k_n} 100, \%$$

Активната и реактивната съставка на напрежението на късо съединение за двойка намотки са съответно

$$u_{k12n} = \frac{I_{2n} r_k}{U_{1n} k_n} 100, \%; \quad u_{k12n} = \frac{I_{2n} x_k}{U_{1n} k_n} 100, \%.$$

При трансформатори с малка мощност поради преобладаващото активно съпротивление на намотките може да се приеме, че реактивната съставка на напрежението на късо съединение  $U_{kpl2n}$  е равна на нула, вследствие на което  $U_{k12n} \approx U_{ka12n}$ .

**Външа характеристика.** Изменение на напрежението. Кофициент на полезно действие. Външната характеристика е зависимостта на вторичното напрежение  $U_{2n}$  от тока в съответната вторична намотка  $I_{2n}$  при постоянни стойности на напрежението  $U_1$ , честотата  $f$  и фактора на мощността на тогара  $\cos \varphi_2$ , т. е.

$$U_{2n} = f(I_{2n}) \text{ при } U_1 = U_{1n}; f = f_n \text{ и } \cos \varphi_{2n} = \text{const.}$$

Използува се схемата на фиг. 3.9. Обхватите на апаратите се избират съобразно номиналните стойности на токовете и напреженията на намотките.

Едновременно със снемането на външните характеристики се правят измервания и на входящата и изходящата мощност, за снемане на кривата на кофициента на полезно действие по прям начин:

$$\eta = f(P_2) \text{ при } U_1 = U_{1n}; f = f_n \text{ и } \cos \varphi_2 = \text{const.}$$

Поради слабото влияние на индуктивните съпротивления на намотките върху пада на напрежение опитът може да се проведе само при активен товар, т. е.  $\cos \varphi_{2n} = 1$ .

Трансформаторът се захранва с номинално напрежение и честота, които се поддържат постоянни. Снемането на характеристиките започва от празен ход ( $I_{2n} = 0$ ). Натоварването се регулира така, че токовете на всички вторични намотки да се изменят едновременно през равни интервали, които съответстват на определен процент от номиналните им стойности  $I_{2ni}$ . Товарните токове се изменят до достигане едновременно на стойности, равни на 1,2  $I_{2ni}$ . Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 3.8.

При изчисленията се използват формулите

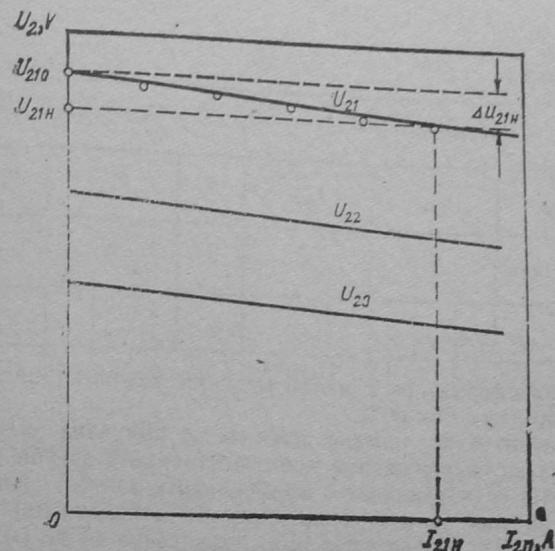
$$P_1 = k_W \alpha_W; P_{2n} = U_{2n} I_{2n}; P_2 = \sum_n P_{2n}; \eta = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

От резултатите в табл. 3.8 се построяват външните характеристики (фиг. 3.10) и кривата на к. п. д. (фиг. 3.11).

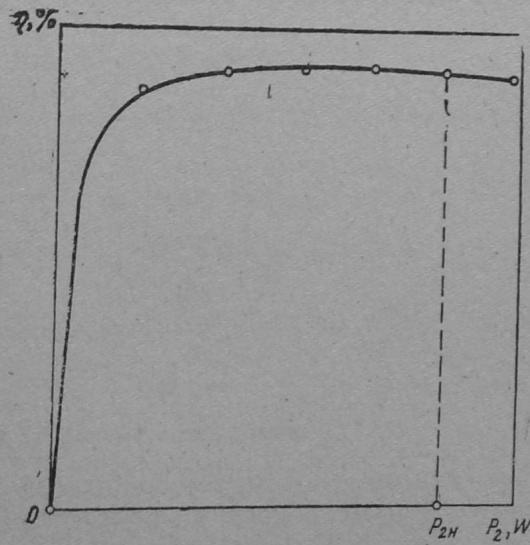
Номиналното изменение на напрежението за всяка вторична намотка се определя чрез съответната външна характеристика за номиналния ѝ вторичен ток  $I_{2ni}$  по формулата

$$\Delta u_{2ni} = \frac{U_{2n0} - U_{2ni}}{U_{2n0}} 100, \%$$

При трансформатори с малка мощност изменението на напрежението при номинален ток достига стойност 10—15%. Това из-



Фиг. 3.10



Фиг. 3.11

менение се дължи на пада на напрежение в намотките на трансформатора, и то предимно в активните съпротивления на намотките, които са преобладаващи.

Таблица 3.8

| Отчитат се |       |          | Изчисляват се |       |          |       |        |
|------------|-------|----------|---------------|-------|----------|-------|--------|
| $\alpha_w$ | $k_w$ | $U_{2n}$ | $I_{2n}$      | $P_1$ | $P_{2n}$ | $P_2$ | $\eta$ |
| дел        | W/дел | V        | A             | W     | W        | W     | %      |
|            |       |          |               |       |          |       |        |

При трансформатори с малка мощност максималният к. п. д. достига стойност 75—90%.

Коефициентът на полезно действие се получава максимален при такова натоварване, при което постоянните загуби (загубите в стоманата) се изравняват с променливите загуби, зависещи от квадрата на тока (електрическите загуби в намотките). Обикновено максимумът се получава при натоварване 40 до 50% от номиналното. Стойностите на к. п. д. в един широк обхват на натоварване (40 до 120% от номиналното) са близки до максималната.

## ГЛАВА IV

## ИЗПИТВАНЕ НА АСИНХРОННИ МАШИНИ

## 4.1. УПРАЖНЕНИЕ № 7

## ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ. ОПИТ НА ПРАЗЕН ХОД И НА КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ, КРЪГОВА ДИАГРАМА

## I. Програма на работа

## A. Опитни изследвания:

1. Снемане на характеристиките на празен ход.
2. Снемане на характеристиките на късо съединение.

## B. Изчисления и построения:

1. Построяване на характеристиките на празен ход  $I_{0n}$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_{0n})$ .
2. Разделяне на загубите на празен ход.
3. Построяване на характеристиките на късо съединение  $I_{kn}$ ,  $P_k$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{kn})$ .
4. Построяване на кръговата диаграма и на работните характеристики от нея.

$$5. \text{ Определяне на кратностите } \frac{I_n}{I_n}, \quad \frac{M_n}{M_n}, \quad \frac{M_{\max}}{M_n}.$$

## II. Схема на опитната постановка

На фиг. 4.1 е дадена схемата за провеждане на опитните изследвания. Изследваният двигател  $AD$  се захранва с регулируемо напрежение от индукционния регулатор  $IP$ .

III. Теоретична постановка, начин на провеждане  
на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Характеристиките на празен ход Представляват зависимостите на линейния ток на празен ход  $I_{0A}$  на консумираната мощност  $P_0$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_0$  от линейното захранващо напрежение  $U'$ , при неизменна честота на захранващото напрежение  $f_1$  и липса на външен съпротивителен момент:

$$I_{0A}, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{0A}) \text{ при } f_1 = \text{const} \text{ и } M_2 = 0.$$

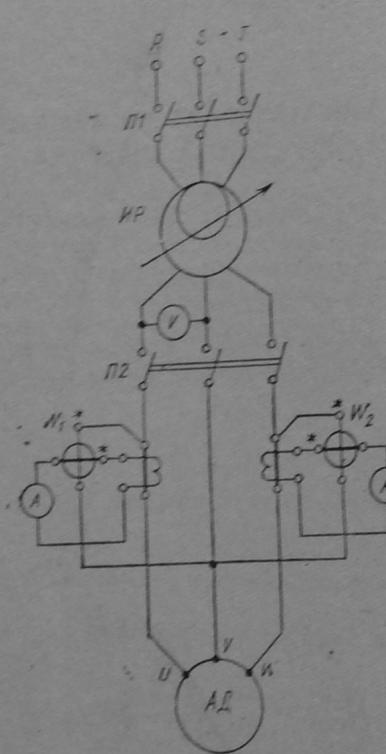
Характеристиките се снемат по схемата от фиг. 4.1, като валът на двигателя е свободен. При избора на измервателни апарати трябва да се има предвид, че напрежението ще се изменя в граници (0,3÷1,1)  $U_n$ , а токът на празен ход при номинално напрежение е от порядъка на (0,25÷0,6)  $I_n$ . Относителният ток на празен ход е толкова по-голям, колкото по-голям е броят на полюсите на машината и колкото по-малко е мощността ѝ.

За провеждане на опита най-напред се затваря прекъсвачът  $P1$ , установява се миналното напрежение на изхода на  $IP$  и тогава се затваря прекъсвачът  $P2$ . Повишава се напрежението, подавано към асинхронния двигател, додостигане на стойност

от порядъка на 1,1  $U_n$ , при което се прави първото отчитане. След това чрез  $IP$  се задават поредица намаляващи стойности на напрежението до достигане на напрежение от порядъка на 0,3  $U_n$ . Задължително трябва да бъде направено измерване при номиналното напрежение.

Долната граница, до която се намалява напрежението, се определя от обстоятелството, че по време на опита честотата на въртене на ротора трябва да остава практически постоянна  $n$ ,

Фиг. 4.1



близка до синхронната  $n_1$ . Ако се продължи намаляването на напрежението под определена стойност, механичните загуби вече представляват сравнително голям товар за двигателя, честотата на въртене намалява значително, съответно хълзгането

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

се увеличава и се оказва, че статорният ток вместо да намалява започва да расте.

Отчетените величини при снета на празен ход се нанасят в табл. 4.1.

Таблица 4.1

| Отчитат се |          |          |            |            |       | Изчисляват се |       |                  |           |        |                |
|------------|----------|----------|------------|------------|-------|---------------|-------|------------------|-----------|--------|----------------|
| $U_{0A}$   | $I_{0A}$ | $I_{0C}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k_W$ | $I_{el}$      | $P_0$ | $\cos \varphi_0$ | $P_{el0}$ | $P'_0$ | $U_{0A}^2$     |
| V          | A        | A        | дел        | дел        | W/дел | A             | W     | —                | W         | W      | V <sup>2</sup> |
|            |          |          |            |            |       |               |       |                  |           |        |                |

При изчисленията се използват следните формули:

$$I_{0A} = \frac{I_{0A} + I_{0C}}{2}; P_0 = k_W (\alpha_1 + \alpha_2); \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0A} I_{0A}}$$

$P_{el0} = 3 I_{0A}^2 r_1$  — при свързване в звезда;

$P_{el0} = I_{0A}^2 R_1$  — при свързване в триъгълник;

$$P'_0 = P_0 - P_{el0},$$

където  $P_{el0}$  представлява електрическите загуби в статорната намотка при празен ход;

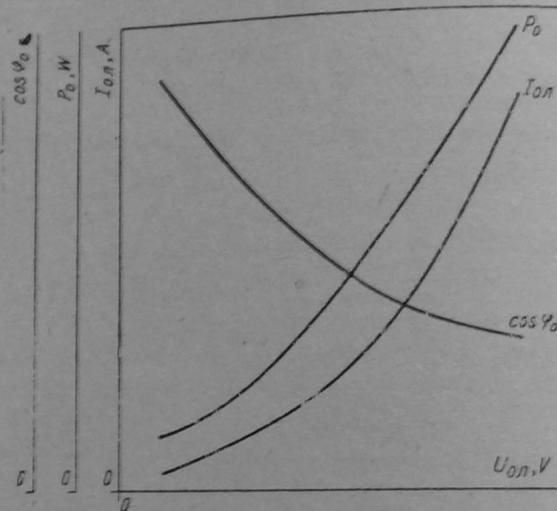
$r_1$  — активното съпротивление на една фаза на статорната намотка.

По данните от табл. 4.1 се изстрояват характеристиките на празен ход, показани на фиг. 4.2.

Кривата  $I_{0A} = f(U_{0A})$  е близка до кривата на намагнитяване на асинхронната машина  $I_{op} = f(E_1)$ . Това е тъка, защото при празен ход  $\varphi_0 \approx 90^\circ$  и реактивната съставка на тока на празен ход  $I_{op} = I_0 \sin \varphi_0 \approx I_0$ , а при пренебрегване на пада на напрежение в статорната намотка  $E_1 \approx U_0$ . Характерът на кривата  $I_{0A} = f(U_{0A})$  се определя главно от степента на насищане на магнитната система на машината. При увеличаване на  $U_{0A}$  насищането се уве-

личава, токът расте значително по-бързо от напрежението, поради което кривата се закривява нагоре.

При провеждане на опита на празен ход хълзгането  $s \approx 0$ , поради което електрическите загуби в ротора и загубите в стоманата



Фиг. 4.2

на ротора са пренебрежимо малки. Тогава може да се счита, че консумираната мощност  $P_0$  включва: електрическите загуби в статорната намотка  $p_{\text{ел}}$ , пропорционални на квадрата на тока на празен ход, механичните загуби  $p_{\text{мех}} = \text{const}$  (понеже  $n = \text{const}$ ) и загубите в стоманата на статора  $p_c$ , приблизително пропорционални на квадрата на захранващото напрежение. Затова при увеличаване на  $U_{0\text{д}}$  мощността  $P_0$  се увеличава по приблизително квадратична крива.

При увеличаване на  $U_{0\text{д}}$  факторът на мощността  $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0\text{д}} I_{0\text{д}}}$  се намалява, тъй като при увеличаване на насищашето значително нараства реактивната съставка на тока на празен ход и пълната мощност  $\sqrt{3} U_{0\text{д}} I_{0\text{д}}$  расте по-бързо от активната мощност  $P_0$ .

**Разделяне на загубите в стоманата**

Както беше казано, консумираната мощност при празен ход представлява сума от три съставки, а именно

$$P_0 = p_{\text{ел}} + p_{\text{мех}} + p_c$$

Изчислената и отразена в табл. 4.1 мощност  $P'_0$  представлява сумата от механичните загуби и загубите в стоманата, т. е.

$$P'_0 = P_0 - p_{\text{ел}} = p_{\text{мех}} + p_c$$

За разделяне на мощността  $P'_0$  на двете ѝ съставки се постъпва по следния начин. По данните от табл. 4.1 се построява кривата  $P'_0 = f(U_{0\text{д}})$  (фиг. 4.3 а) и се продължава до пресичането ѝ с ординатната ос в точка  $a$ . Отрезът  $Oa$  дава механичните загуби, тъй като при напрежение, равно на нула, загубите в стоманата също са равни на нула. Понеже  $p_{\text{мех}} \approx \text{const}$ , през точка  $a$  се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, която, както е показано на фиг. 4.3 а, разделя мощността  $P'_0$  на двете ѝ съставки  $p_{\text{мех}}$  и  $p_c$ .

Мощността  $P'_0$  може да се раздели на двете съставки с по-голяма точност, ако се построни зависимостта на  $P'_0$  не от  $U_{0\text{д}}$ , а от  $U_{0\text{д}}^2$  (фиг. 4.3 б). Продължата се кривата до пресичането ѝ с ординатната ос в точка  $a$ , прекарва се през нея успоредна на абсцисната ос права, която разделя  $P'_0$  на  $p_{\text{мех}}$  и  $p_c$ . Предимствата на този метод се изясняват, като се вземе предвид следното. Зависимостта  $P'_0 = f(U_{0\text{д}})$  представлява почти правилна квадратична парабола от вида

$$\hat{P}'_0 = k_1 + k_2 U_{0\text{д}}^2$$

тъй като  $p_{\text{мех}} \approx \text{const}$ , а  $p_c \equiv U_{0\text{д}}^2$ . Следователно зависимостта на  $P'_0$  от  $U_{0\text{д}}$  е практически линейна. Вторият метод е по-точен, защото  $P'_0 = f(U_{0\text{д}}^2)$  представлява почти права линия, а освен това най-няватата точка от кривата се получава по-близо до ординатната ос. По този начин екстраполацията на кривата с цел получаване на отреза  $Oa$  може да се направи по-прецизно.

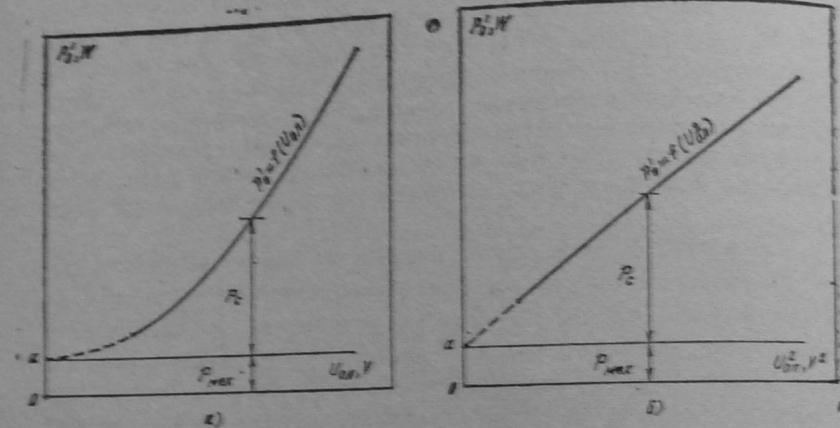
**Характеристики на късо съединение**. Представляват зависимостите на линеенния ток  $I_{\text{кл}}$ , на консумираната мощност  $P_k$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi_k$  от линееното захранващо напрежение  $U_{\text{кл}}$  при неизменна честота  $f_1$  и застопорен ротор:

$$I_{\text{кл}}, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{\text{кл}}) \text{ при } f_1 = \text{const} \text{ и } n = 0$$

Характеристиките се снемат по схемата от фиг. 4.1, като вълт на лампата се застопорява. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че при провеждане на опита на статорната намотка се подава такова понижено напрежение, че токът да не надвишава  $(1 \div 1.2) I_n$ . Това понижено напрежение е от порядък из  $(0.2 \div 0.3) U_n$ .

За провеждане на опита най-напред се затваря прекъсвачът  $PI$ , установявя се минималното възможно напрежение на изхода

на ИР и тогава се затваря прекъсвачът  $P_2$ . Постепенно чрез ИР се повишава напрежението, докато токът достигне  $1.2 I_n$ , при което се прави първото отчитане. След това се установяват последица намаляващи стойности на напрежението, при всяка от които се отчитат величините, отразени в табл. 4.2.



Фиг. 4.3

Таблица 4.2

| Отчитат се |          |          |            |            | Изчисляват се |          |       |                  |
|------------|----------|----------|------------|------------|---------------|----------|-------|------------------|
| $U_{kA}$   | $I_{kA}$ | $I_{kC}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k_W$         | $I_{kl}$ | $P_k$ | $\cos \varphi_k$ |
| V          | A        | A        | дел        | дел        | W/дел         | A        | W     | -                |
|            |          |          |            |            |               |          |       |                  |

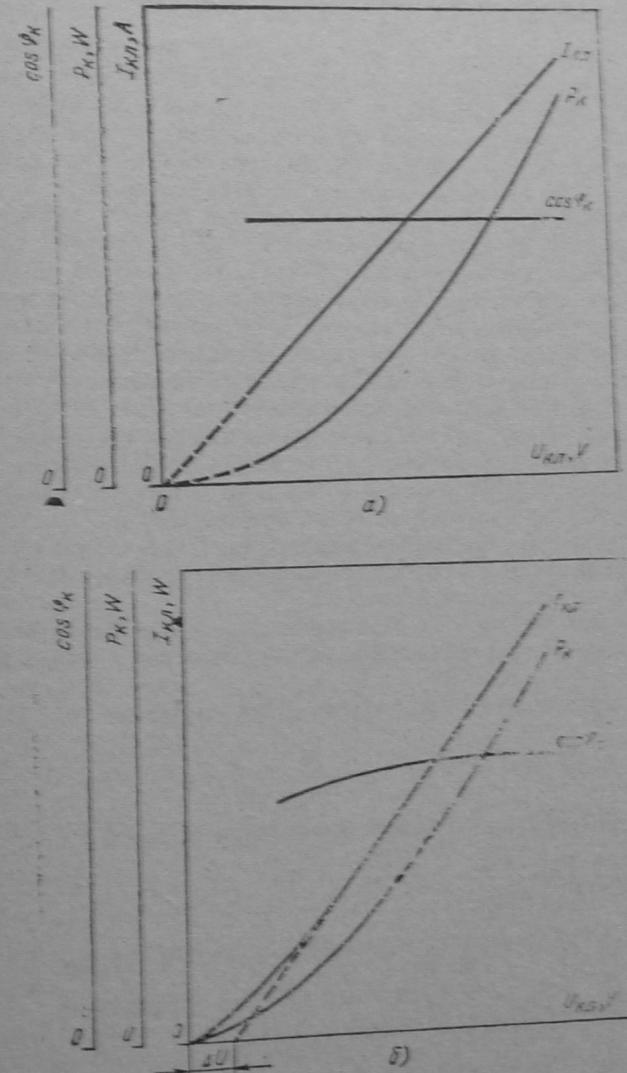
При изчисленията се използват формулите

$$I_{kl} = \frac{I_{kA} + I_{kC}}{2}; P_k = k_W(\alpha_1 + \alpha_2); \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{kA} I_{kl}}$$

По данните от табл. 4.2 се построяват характеристиките на късо съединение, показани на фиг. 4.4.

Видът на характеристиките зависи главно от формата и размерите на статорните и роторните канали. Различават се два основни случая: а) статорните и роторните канали са отворени или полуотворени; б) статорните канали са полуотворени, а роторните — затворени.

В първия случай характеристиките имат вида, показани на фиг. 4.4 а. В случаите потоците на разсейване насищат сравнително слабо зъбите и може да се счита, че тези потоци се затварят през среда с постоянна магнитна проницаемост, поради което индуктивното съпротивление на машината при късо съ-



Фиг. 4.4

днение  $x_k \approx \text{const}$ . От друга страна, при постоянна честота и установена температура активното съпротивление на машината при късо съединение  $r_k \approx \text{const}$ . Следователно и импедансът  $z_k \approx \text{const}$ . Затова характеристиката  $I_{\text{кл}} = f(U_{\text{кл}})$  е практически права линия, минаваща през началото на координатната система. Зависимостта  $\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} = f(U_{\text{кл}})$  се представя с права, успоредна на абсцисната ос ( $\cos \varphi_k \approx \text{const}$ ). Мощността  $P_k$  покрива електрическите загуби в статорната и роторната намотка, както и загубите в стоманата, които са сравнително малки. Кривата  $P_k = f(U_{\text{кл}})$  представлява практически квадратична парабола, тъй като загубите в намотки са пропорционални на квадрата на тока, а той е пропорционален на напрежението.

Във втория случай, когато роторът има закрити канали, характеристиките на късо съединение имат вида, показан на фиг. 4.4 б. В случая насищането на зъбната зона от потока на разсейване оказва забележимо влияние върху параметрите на двигателя. При увеличаване на насищането  $x_k$  намалява, а тъй като  $r_k \approx \text{const}$ , ще намалява и  $z_k$ . Отначало  $x_k$  намалява по-бързо, тъй като още при сравнително малки токове се насища мостчето над канала. При по-нататъшно увеличаване на тока намаляването на  $x_k$  става сравнително по-бавно. Затова характеристиката  $I_{\text{кл}} = f(U_{\text{кл}})$  в началната си част се закривява нагоре и може да се счита за праволинейна само в горната ѝ част. При увеличаване на напрежението се получава известно увеличаване на фактора на мощността  $\cos \varphi_k$  поради намаляването на  $z_k$ . Кривите на мощността  $P_k$ , особено в началната ѝ част, расте по-бързо, отколкото по закона на квадратната парабола.

Линиенят ток на късо съединение  $I_{\text{кл}}$ , който би се получил при напрежение, равно на номиналното, се определя чрез изчисление.

При характеристики от вида, показан на фиг. 4.4 а,

$$I_{\text{кл}} = I_{\text{кл}} \frac{U_{\text{ин}}}{U_{\text{кл}}},$$

а при характеристики от вида, показан на фиг. 4.4 б:

$$I_{\text{кл}} = I_{\text{кл}} \frac{U_{\text{ин}} - \Delta U}{U_{\text{кл}} - \Delta U},$$

където  $I_{\text{кл}}$  и  $U_{\text{кл}}$  са получените от опита линиен ток и напрежение;

$U_{\text{кл}}$  е номиналното линиено напрежение;  
 $\Delta U$  — отрезът от абсцисната ос, който се получава при продължаване на линиената част на кривата  $I_{\text{кл}} = f(U_{\text{кл}})$ .

Препоръчва се в горните формули да се поставят най-големите

стойности на  $I_{\text{кл}}$  и  $U_{\text{кл}}$ , които са достигнати при провеждане на опита.

Построяване на кръговата диаграма и на работните характеристики от нея.

Кръговата диаграма на асинхронната машина представлява геометрично място на върха на първичния фазов ток  $I_1$  при захранващо напрежение  $U_1 = \text{const}$ , честота  $f_1 = \text{const}$  и изменение на хълзгането от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Тук се разглежда построяването на уточнената кръгова диаграма (която се изяснява в теорията на електрическите машини чрез Г-образната заместваща схема).

Необходими са следните изходни данни:

1. Фазово захранващо напрежение  $U_1 = U_{1\text{н}}$ .

2. Фазовият ток при реален празен ход  $I_0$ , факторът на мощността  $\cos \varphi_0$  и съответният ъгъл  $\varphi_0$ . Стойностите им се вземат от табл. 4.1 при номиналното напрежение. При свързване в звезда  $I_0 = I_{0\text{л}}$ , а при свързване в триъгълник  $I_0 = \frac{I_{0\text{л}}}{\sqrt{3}}$ .

3. Механичните загуби  $P_{\text{мех}}$ , получени при разделяне на загубите на празен ход (фиг. 4.3).

4. Фазовият ток на късо съединение  $I_{\text{кн}}$  при номинално напрежение, факторът на мощността  $\cos \varphi_k$  и съответният ъгъл  $\varphi_k$ . При свързване в звезда  $I_{\text{кн}} = I_{\text{кн}}$ , а при свързване в триъгълник  $I_{\text{кн}} = \frac{I_{\text{кн}}}{\sqrt{3}}$ . От табл. 4.2 се взема стойността на  $\cos \varphi_k$ , получена при най-голямото напрежение.

5. Активното съпротивление на една фаза на статорната намотка  $r_1$ .

6. Синхронната честота на въртене  $n_1$ .

7. Номиналната мощност на двигателя  $P_{2\text{н}}$ .

Избира се подходящ машаб за тока  $m_I$ , A/mm. Препоръчва се да се избере такъв машаб, че

$$\frac{I_{\text{кн}}}{m_I} = 200 \div 300 \text{ mm.}$$

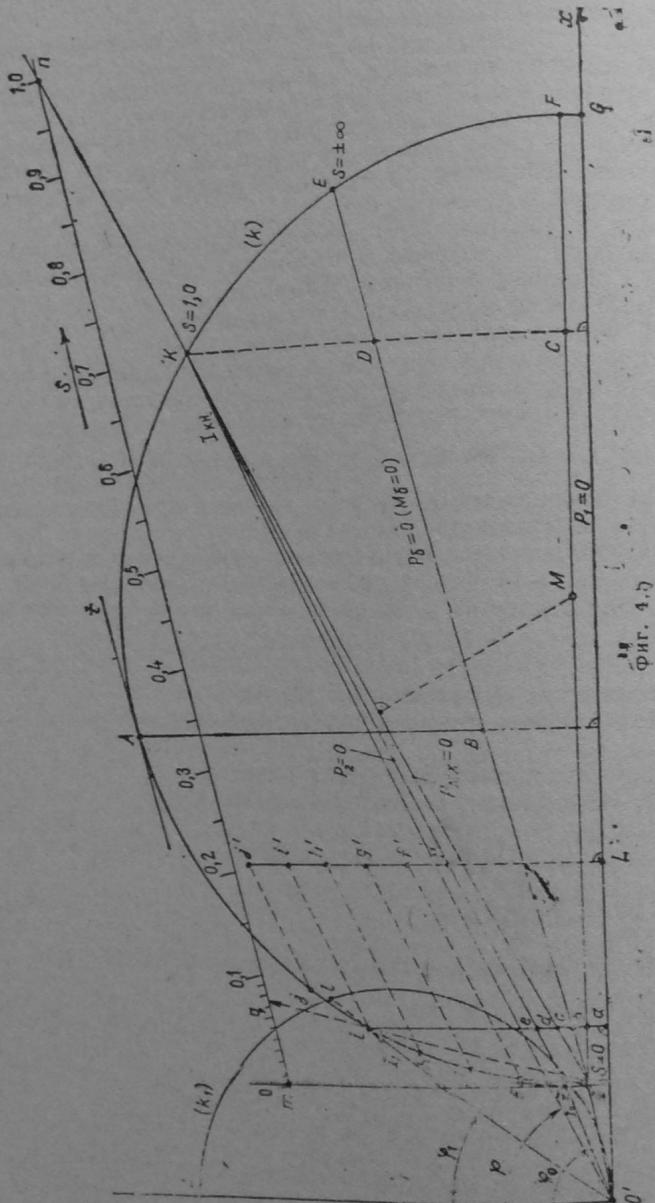
Изчисляват се машабът за мощността

$$m_p = 3U_{1\text{н}} m_I, \text{ W/mm}$$

и машабът за момента

$$m_M = \frac{100 m_p}{2\pi n_1}, \text{ N.m/mm.}$$

Начертава се координатна система  $O'xy$  (фиг. 4.5). По ординатната ос в произволен машаб се нанася напрежението  $U_{1\text{н}}$ . На ъгли  $\varphi_0$  и  $\varphi_k$  от него се построяват



Фиг. 4.7

$$O'P = \frac{I_0}{m_I} \text{ и } O'K = \frac{I_{\text{ки}}}{m_I}.$$

От точка  $P$  се спуска перпендикуляр към абцисната ос и се нанася отсечка

$$PO = \frac{P_{\text{мех}}}{m_P}.$$

Векторът  $O'P$  изобразява тока на реален празен ход, а  $O'O$  — тока на идеален празен ход. В случаите, когато отсечката  $PO$  се получи много малка, може да се приеме, че точките  $P$  и  $O$  съвпадат.

През точка  $O$  се прекарва права  $OF$ , успоредна на абцисната ос, свързват се с први линии точките  $P$  и  $K$ , както и  $O$  и  $K$ . Построява се симетралата на отсечката  $OK$ , която пресича правата  $OF$  в точка  $M$ . С център  $M$  и радиус  $MO=MK$  се описва окръжност  $(k)$ , която представлява геометричното място на върха на тока  $I_1$ , отчитан от точка  $O'$ .

От точка  $K$  се спуска перпендикуляр към абцисната ос, който пресича правата  $OF$  в точка  $C$ . На него се нанася отсечка

$$DC = \frac{3I_{\text{ки}}^2 r_1}{m_P}.$$

Свързват се точките  $O$  и  $D$  с права линия, която пресича окръжността  $k$  в точка  $E$ .

Тъй като в точка  $O$  хълзгането  $s=0$ , а в точка  $K$  то е  $s=1$ , дъгата  $OK$  съответства на работа на машината в двигателен режим.

Както е известно от теорията на електрическите машини, в кръговата диаграма са характерни следните линии:

$O'G$  — линия на подадената мощност ( $P_1=0$ );

$OE$  — линия на електромагнитната мощност ( $P_d=0$ ) и на електромагнитния момент ( $M_d=0$ );

$OK$  — линия на пълната механична мощност ( $P_m=0$ );

$PK$  — линия на полезната мощност ( $P_2=0$ ).

За отчитане на  $s$  се построява скала на хълзгането по следния начин. От точка  $O$  нагоре се построява права, успоредна на ординатната ос, продължава се линията на пълната механична мощност  $P_m=0$  и между двете прости че произволно място се прекарва права, успоредна на линията  $P_1=0$ . Получената отсечка  $m$  се разделя на 100 равни части.

За улеснение при отчитане на фактора на мощността  $\cos \Phi_1$  се построява полуокръжност  $k_1$  с диаметър  $O'z=100$  mm, лежащ върху ординатната ос.

От кръговата диаграма чрез измерване на съответни отсечки може да се определят всички интересуващи величини. Напри-

мер за точка  $i$ , съответствуваща на работа на двигателя при определено натоварване, отделните величини се определят, както следва:

$$\begin{aligned} I_1 &= O'l \cdot m_p; \quad p_{ab} = ab \cdot m_p; \quad p_{bc} = bc \cdot m_p; \\ p_{cd} &= cd \cdot m_p; \quad p_{de} = de \cdot m_p; \quad P_1 = la \cdot m_p; \\ P_d &= ic \cdot m_p; \quad M_d = lc \cdot m_p; \quad P_{xx} = id \cdot m_p; \\ P_2 &= ie \cdot m_p. \end{aligned}$$

За построяване на работните характеристики от кръговата диаграма се задават поредица стойности на полезната мощност, например  $\beta = \frac{P_2}{P_{2H}} = 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25$ . От произволна точка  $L$  се издига перпендикуляр към абсцисната ос, пресичащ линията  $P_2=0$  в точка  $e'$ . Нанасят се отсечките

$$e'f' = f'g' = g'h' = h'l' = l'i' = i'j' = \frac{0,25P_{2H}}{m_p}.$$

През точките  $f', g', h', i'$  и  $j'$  се прекарват прави, успоредни на линията  $P_2=0$ , до пресичането им с окръжността  $k$  съответно в точките  $f, g, h, i$  и  $j$ , които показват положението на върха на точка  $I_1$  върху окръжността при различните натоварвания. Ясно е, че точка  $i$  се отнася за номиналното натоварване.

Определените чрез кръговата диаграма величини се нанасят в табл. 4.3.

Определянето на отделните величини от кръговата диаграма, например за натоварването, съответстващо на точка  $i$ , става по следния начин.

Точка  $i$  се свързва с права линия с точка  $O'$ . Определя се първичният ток

$$I_1 = O'l \cdot m_p.$$

От точка  $i$  се спуска перпендикуляр към абсцисната ос. Определя се консумираната мощност

$$P_1 = la \cdot m_p.$$

От точка  $O$  през точка  $i$  се прекарва права до пресичането ѝ със скалата на хълзгането в точка  $q$ . Определя се хълзгането

$$s = \frac{mq}{m_n}.$$

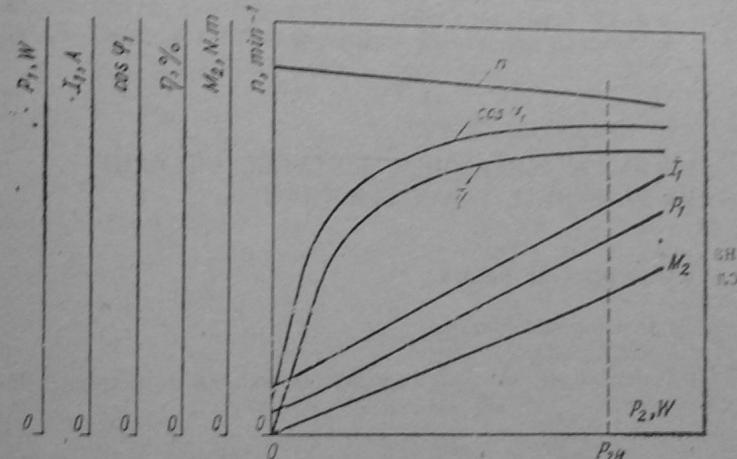
Определя се точката, в която  $I_1$  или неговото продължение пресича полуокръжността  $k_1$ . В случая това е точка  $I$ . Тогава факторът на мощността е

$$\cos \varphi_i = \frac{Q' l}{Q' z} = \frac{Q' l}{100}.$$

Таблица 4.3

| Задават се |       | Отчитат се от кръговата диаграма |       |     |                  |        | Изчислява се      |       |  |
|------------|-------|----------------------------------|-------|-----|------------------|--------|-------------------|-------|--|
| $\beta$    | $P_2$ | $I_1$                            | $P_1$ | $s$ | $\cos \varphi_i$ | $\eta$ | $n$               | $M_2$ |  |
| —          | W     | A                                | W     | —   | —                | %      | $\text{min}^{-1}$ | N.m   |  |
|            |       |                                  |       |     |                  |        |                   |       |  |

По същия начин се постъпва при определяне на посочените величини за всички останали натоварвания, на които съответствуват точките от  $P$  до  $j$  върху окръжността  $k$ .



Фиг. 4.6

За изчисляване на коефициента на полезно действие  $\eta$ , честотата на въртене на ротора  $n$  и полезната момент  $M_2$  се използват формулите

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \quad n = n_1(1-s); \quad M_2 = \frac{60P_2}{2\pi n}.$$

По данните от табл. 4.3 се построяват работните характеристики на асинхронния двигател (фиг. 4.6), които представляват

зависимостите  $n$ ,  $M_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1=f(P_2)$  при  $U_1=\text{const}$  и  $f_1=\text{const}$ . Анализ на вида на работните характеристики е изпълнен в упражнение № 8.

От кръговата диаграма се определят още и следните величини:

а) кратност на пусковия ток

$$i_n = \frac{I_n}{I_s} = \frac{O'K}{O^2};$$

б) кратност на пусковия момент

$$m_n = \frac{M_n}{M_s} = \frac{KD}{ic};$$

в) кратност на максималния момент

$$m_{max} = \frac{M_{max}}{M_s} = \frac{AB}{ic}.$$

Тук точка  $A$  е допирната точка на тангентата  $t$  към окръжността  $k$ , прекарана успоредно на линията  $P_1=0$ . Точка  $B$  е точката, в която перпендикулярът, спуснат от точка  $A$  към абсцисната ос, пресича линията на електромагнитната мощност  $P_2=0$ .

#### 4.2. УПРАЖНЕНИЕ № 8

#### ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ, СНЕМАНЕ НА РАБОТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

1. Снемане на работните характеристики на асинхронен двигател.

###### B. Изчисления и построения

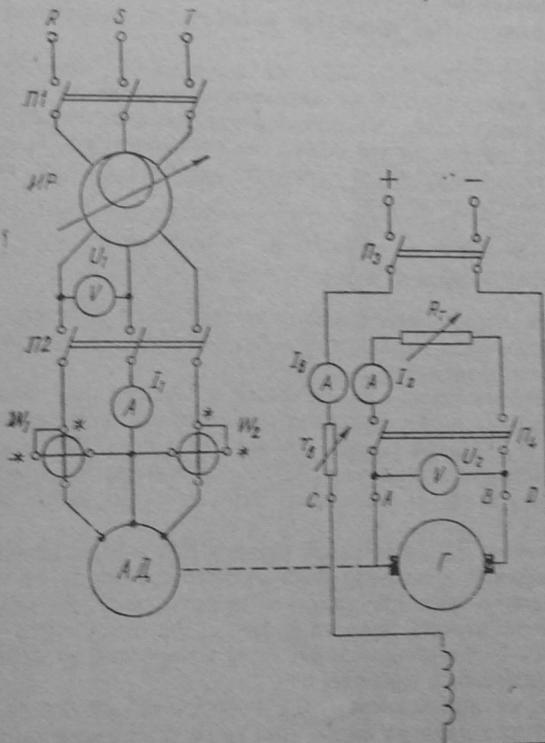
1. Построение на тарировъчната крива.

2. Обработка на опитните резултати и построение на работните характеристики  $n$ ,  $M_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1=f(P_2)$ .

##### II. Схема на опитната постаповка

На фиг. 4.7 е дадена схемата за провеждане на опитните изследвания.

Изследваният двигател  $AD$  се захранва от индукционния регулатор  $IR$ . Асинхронният двигател е куплиран механично с генератор за постоянен ток с независимо възбуджение  $G$ . Този генератор трябва да бъде тариран, т. е. в случая натоварването



Фиг. 4.7

на  $AD$  се осъществява с тариран генератор за постоянен ток. Тариран е този генератор, за който е известна зависимостта  $P'_0 = f(n)$  при  $I_s = \text{const}$ . Мощността  $P'_0$  представлява сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на товарната машина. Пояснения относно тарирането са дадени в упражнение № 2.

При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че при провеждането на опита на статорната намотка на  $AD$  се подава номиналното му напрежение. Натоварването се изменя от празен ход до такова натоварване, при което статорният ток достигне стойност от поредъка на  $1,25 I_s$ .

Реверсирането на двигателя се осъществява чрез размяна на местата на две от фазите.

### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Работните характеристики на асинхронния двигател представляват зависимостите на честотата на въртене на ротора  $n$ , на полезната момент  $M_2$ , на коефициента на полезно действие  $\eta$ , на фактора на мощността  $\cos \varphi_1$ , на статорния ток  $I_1$  и на консумираната мощност  $P_1$  от полезната мощност  $P_2$  при постоянни напрежение  $U_1$  и честота  $f_1$ :

$$n, M_2, \eta, \cos \varphi_1, I_1, P_1 = f(P_2)$$

при  $U_1 = U_{1n} = \text{const}$  и  $f_1 = f_{1n} = \text{const}$ .

Работните характеристики позволяват да се определят всички основни величини, характеризиращи работата на двигатели при различни натоварвания.

Опитното изследване се извършва в следния ред. Включва се прекъсвачът  $P1$  и се установява минималното напрежение на изхода на  $IP$ . Заваря се прекъсвачът  $P2$  и чрез  $IP$  се повишава напрежението, подавано към  $AD$ , до достигане на номиналното напрежение, което се поддържа неизменно по време на целия опит.

В случай че  $AD$  се захранва не чрез  $IP$ , а се включва директно към мрежата, в момента на пускането трябва да се шунтират амперметърът и токовите намотки на ватметрите, за да се предпазят измервателните апарати от пусковия ток, който може да надвиши  $4 \div 7$  пъти номиналния. След развъртане на двигателя се махат шунтиращите проводници.

Заваря се прекъсвачът  $P3$ , с което се подава напрежение на възбудителната намотка на  $G$ . Чрез  $r_s$  се установява такъв възбудителен ток  $I_r$ , какъвто е бил при тариранието на  $G$ , и този ток се поддържа неизменен при провеждане на опита.

При отворен прекъсвач  $P4$ , т. е. при котвен ток на генератора  $I_r = 0$ , се прави първото отчитане. След това се заваря прекъсвачът  $P4$  и чрез товарния реостат  $R_t$  се установяват норедица натоварвания, докато статорният ток на  $AD$  достигне стойност  $I_1 \approx 1,25 I_n$ . Резултатите се пакасят в табл. 4.4.

При изчисленията се използват формулите

$$P_1 = k_w (\alpha_1 \pm \alpha_2); P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_1^2 R_a;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \quad M_2 = \frac{60 P_2}{2 \pi n},$$

Таблица 4.4

| Поддържат се |       | Отчитат се |       |       |            |            |       |                   | Изчисляват се |       |                  |        |       |
|--------------|-------|------------|-------|-------|------------|------------|-------|-------------------|---------------|-------|------------------|--------|-------|
| $U_1$        | $I_r$ | $U_r$      | $I_r$ | $I_1$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k_w$ | $n$               | $P_1$         | $P_2$ | $\cos \varphi_1$ | $\eta$ | $M_2$ |
| V            | A     | V          | A     | A     | дел        | дел        | W/дел | min <sup>-1</sup> | W             | W     | —                | %      | N.m   |
|              |       |            |       |       |            |            |       |                   |               |       |                  |        |       |

където  $P'_0$  е сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на  $G$  и се отчита от тарировъчната крива  $P'_0 = f(n)$  при  $I_r = \text{const}$  (фиг. 4.8) за съответните стойности на  $n$ ;

$I_r$  и  $U_r$  са токът и напрежението на котвата на  $G$ ;  $R_a$  е съпротивлението на котвената намотка и на преходното контактно съпротивление между четките и колектора на  $G$ .

По данните от табл. 4.4 се построяват работните характеристики на асинхронния двигател, показани на фиг. 4.6.

Анализът на работните характеристики на асинхронния двигател показва следното.

Зависимост  $n = f(P_2)$ . Както е известно, честотата на въртене на ротора е

$$n = n_1(1 - s),$$

а хлъзгането

$$s = \frac{P_{el2}}{P_d},$$

където  $n_1$  е синхронната честота на въртене;

$P_{el2}$  — електрическите загуби в роторната намотка;

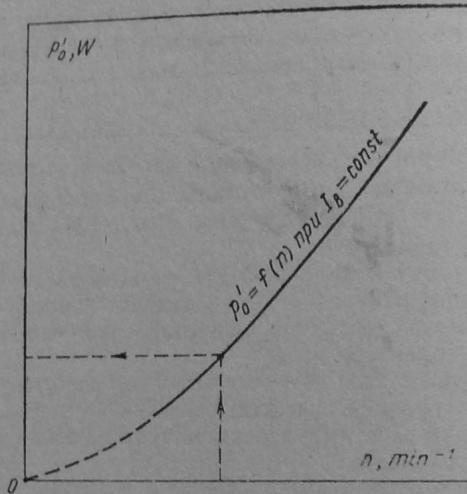
$P_d$  — електромагнитната мощност, която се предава чрез магнитното поле от статора към ротора.

При празен ход  $P_{el2} \approx 0$  и следователно  $s \approx 0$ , а  $n \approx n_1$ . С увеличаване на натоварването отношението  $\frac{P_{el2}}{P_d}$  расте, но с цел

получаване на добър к. и. д. то е ограничено в тесни граници.

Обикновено при номинално натоварване  $\frac{P_{el2}}{P_d} = 0,02 \div 0,05$ . Следователно с увеличаване на натоварването  $n$  се намалява слабо, т. е. асинхронният двигател има твърда скоростна характеристика.

Зависимост  $M_2=f(P_2)$ . Понеже  $M_2=\frac{P_2}{n}$ , а  $n \approx \text{const}$ , посочената зависимост представлява почти права линия, започваща от началото на координатната система. Като се вземе предвид, че при увеличаване на  $P_2$  честотата на въртене  $n$  слабо се намалява, кривата  $M_2=f(P_2)$  се закривява леко нагоре.



Фиг. 4.8

Зависимост  $\eta=f(P_2)$ . Тази крива има характерния за всички електрически машини вид. Ходът на кривата на к. п. д. се обяснява с това, че при изменение на натоварването се изменя съотношението между постоянните загуби (механичните загуби и загубите в стоманата на АД) и променливите загуби, зависещи от квадрата на тока (електрическите загуби в статорната и роторната намотка). При малки натоварвания електрическите загуби са относително малки и затова с увеличаване на  $P_2$  к. п. д. рязко расте. След това нарастването на к. п. д. се забавя, тъй като става все по-голямо влиянието на електрическите загуби. Кофициентът на полезно действие става максимален при този товар, при който постоянните и променливите загуби се изравняват. Максимумът на к. п. д. се получава при товар, близък до номинални, като този максимум е „притълен“ и в един диапазон на натоварването около номиналното двигателят работи с достатъчно висок к. п. д. При по-нататъшно увеличаване на натоварването к. п. д. ще започне да намалява.

Зависимост  $\cos \varphi_1=f(P_2)$ . При празен ход  $\cos \varphi_1$  е малък — има стойност, не по-голяма от 0,2. При увеличаване на

натоварването  $\cos \varphi_1$  бързо нараства и обикновено при товар, близък до номиналния, получава най-голямата си стойност. При претоварване на двигателя  $\cos \varphi_1$  ще започне да намалява. Това се обяснява с обстоятелството, че при първоначалното увеличаване на натоварването вторичният ток се увеличава главно със своята активна съставка, а при претоварване започва да се увеличава дефазирането между вторичния ток и вторичното е. д. н. Изменението на  $\cos \varphi_1$  при изменение на натоварването може да се види най-ясно от кръговата диаграма.

Зависимост  $I_1=f(P_2)$ . Моментът, разиван от асинхронния двигател, се дава с израза

$$M=c\Phi I_2 \cos \varphi_2,$$

където  $c$  е константа;

$\Phi$  — основният магнитен поток;

$I_2$  — вторичният ток;

$\varphi_2$  — угълът на дефазиране между вторичния ток и вторичното е. д. н.

При снемане на работните характеристики  $U_1=\text{const}$  и може да се счита, че при изменение на натоварването от празен ход до номинално  $\Phi \approx \text{const}$ , а освен това угълът  $\varphi_2$  е твърде малък и се изменя слабо. Следователно  $I_2 \equiv M$ , а понеже  $M \equiv P_2$ ,  $I_2 \equiv P_2$ . Тъй като статорният ток  $I_1=I_0+I_2$ , може да се направи изводът, че зависимостта  $I_1=f(P_2)$  е близка до праволинейната.

Зависимост  $P_1=f(P_2)$ . Консумираната мощност е  $P_1=\frac{P_2}{\eta}$

Тъй като отначало к. п. д. ще бързо нараства, а след това се изменя незначително, кривата  $P_1=f(P_2)$  отначало е изгъната към абцисната ос, а след това се доближава до права линия.

#### 4.3. УПРАЖНЕНИЕ № 9

#### ЕДНОФАЗЕН АСИНХРОНЕН МИКРОДВИГАТЕЛ С РАБОТЕН КОНДЕНЗАТОР

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

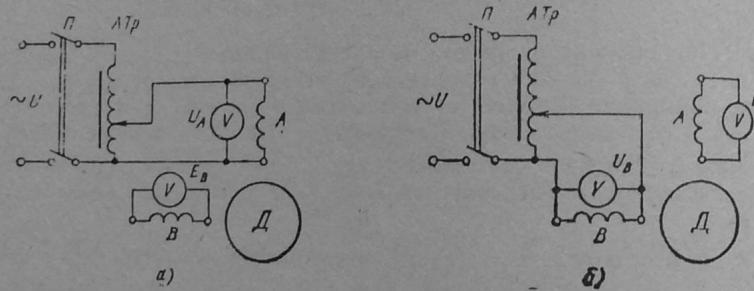
1. Определяне на коефициента на трансформация.
2. Определяне на максималния момент.
3. Определяне на пусковия момент и пусковия ток.
4. Снемане на работните характеристики.

## Б. Изчисления и построения

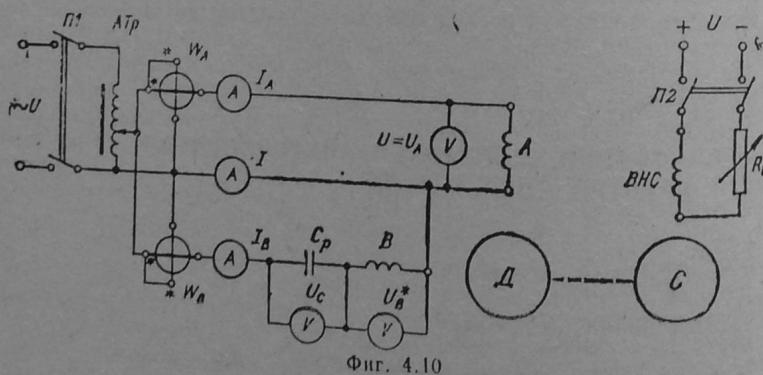
1. Изчисляване на коефициента на трансформация  $k$ .
2. Изчисляване на кратността на максималния момент  $m_{\max}$ .
3. Изчисляване на кратностите на пусковия момент  $m_n$  и пусковия ток  $i_n$ .
4. Построяване на работните характеристики  $n$ ,  $I$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi = f(M_2)$ .
5. Построяване на векторната диаграма при номинален режим.

## II. Схема на опитната постановка

За определяне на коефициента на трансформация се свързват схемите на фиг. 4.9, а за всички останали изследвания — схемата на фиг. 4.10.



Фиг. 4.9



Фиг. 4.10

Изследваният двигател  $D$  се захранва посредством автотрансформатор  $ATp$ . Натоварването на  $P$  се осъществява с електро-

магнитна спирачка  $C$ , чиято възбудителна намотка се захранва с постоянно напрежение, а токът през нея се регулира с реостата  $R_C$ . Удобно е честотата на въртене да се измерва със стробоскоп или с цифров честотомер.

## III. Теоретична постановка, начин на провеждане, на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Статорният пакет и накъсо съединеният ротор на еднофазния кондензаторен двигател не се различават от тези на трифазния асинхронен двигател. Характерното тук е, че в статора са поставени две намотки  $A$  и  $B$ , заемащи еднакъв брой канали и изместени една спрямо друга на 90 електрически градуса. Последователно на намотка  $B$  е включен работен кондензатор  $C_p$ . Захранването е еднофазно, но по принцип на работа тези двигатели са двуфазни. Проектират се така, че да имат кръгово въртящо се магнитно поле при номинално натоварване. Технико-икономическите им показатели са близки до тези на трифазните двигатели.

**Коефициент на трансформация.** Представлява отношението

$$k = \frac{w_B k_{WB}}{w_A k_{WA}},$$

където  $w_A$  и  $w_B$  са броят на навивките на фази  $A$  и  $B$ ;  
 $k_{WA}$  и  $k_{WB}$  — съответните коефициенти на намотките.

Определя се опитно при празен ход по следния начин. Свързва се схемата от фиг. 4.9a. На намотка  $A$  се подава напрежение  $U_A = U_n$  и се измерва е. д. н.  $E_B$ , индукирано в намотка  $B$ . След това се свързва схемата от фиг. 4.9b, на намотка  $B$  се подава напрежение  $U_B = 1,2 E_B$  и се измерва е. д. н.  $E_A$ . Резултатите се нанасят в табл. 4.5.

Таблица 4.5

| $U_A = U_n$ | $E_B$ | $U_B = 1,2 E_B$ | $E_A$ | $k$ |
|-------------|-------|-----------------|-------|-----|
| V           | V     | V               | V     | —   |
| —           | —     | —               | —     | —   |

Коефициентът на трансформация се изчислява по формулата

$$k = \sqrt{\frac{U_B E_B}{U_A E_A}}.$$

Трябва да се подчертая, че при първото и при второто измерване едновременно с подаването на напрежение на съответната намотка трябва да се завърти на ръка валът на двигателеля. По този начин роторът на двигателеля ще се развърти, след което се правят измерванията. Това е необходимо, тъй като захранената намотка създава пулсиращо магнитно поле и пусковият момент на двигателеля е равен на нула.

**Максимален момент.** Представлява най-големият момент, който може да развие двигателят. При опитното му определяне се свързва схемата на фиг. 4.10. На двигателя се подава номиналното му напрежение, затваря се  $P_2$  и чрез намаляване на  $R_c$  постепенно се увеличава натоварването. Следи се стойността на момента по скалата на спирачката и се отчита достигнатата най-голяма стойност  $M_{\max}$ . Когато товарният момент надвиши  $M_{\max}$ , двигателят преминава на нестабилния участък от механичната си характеристика, моментът му и честотата на въртене започват бързо да намаляват. Необходимо е двигателят да бъде своевременно разтоварен чрез отваряне на  $P_2$ .

Кратността на максималния момент е

$$m_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_n}$$

Номиналният момент  $M_n$  се изчислява по формулата:

$$M_n = \frac{60 P_{2n}}{2\pi n_n}$$

като номиналната мощност  $P_{2n}$  и номиналната честота на въртене  $n_n$  се вземат от табелката на двигателя.

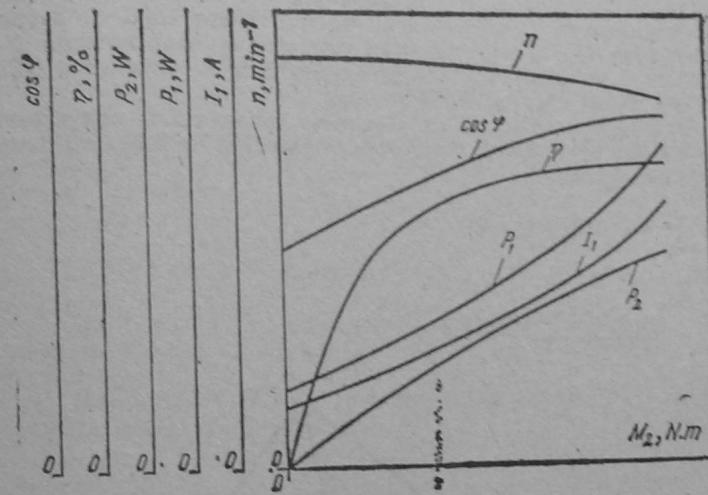
Таблица 4.6

| Отчитат се |                   |       |       |     |     |         |       |       |       | Изчисляват се |       |        |                |
|------------|-------------------|-------|-------|-----|-----|---------|-------|-------|-------|---------------|-------|--------|----------------|
| $M_2$      | $n$               | $I_A$ | $I_B$ | $I$ | $U$ | $U_B^*$ | $U_C$ | $P_A$ | $P_B$ | $P_1$         | $P_2$ | $\eta$ | $\cos \varphi$ |
| N . m      | $\text{min}^{-1}$ | A     | A     | A   | V   | V       | V     | W     | W     | W             | W     | %      | -              |
|            |                   |       |       |     |     |         |       |       |       |               |       |        |                |

**Пускови характеристики.** Интерес представляват пусковият момент  $M_p$  и пусковият ток  $I_p$ . При опитното им определяне се свързва схемата на фиг. 4.10. Дискът на електромагнитната спирачка се фиксира към полюсната ѝ система с шифт-

На двигателя се подава номиналното му напрежение и по скалата на спирачката се отчита  $M_p$ , а от амперметъра, измерващ общиния ток, се отчита  $I_p$ . Изчисляват се кратностите на пусковия момент и пусковия ток

$$m_p = \frac{M_p}{M_n}; \quad i_p = \frac{I_p}{I_n}.$$



Фиг. 4.11

Номиналният ток  $I_n$  се взема от табелката на двигателя.

Измерванията трябва да се направят достатъчно бързо, тъй като пусковият ток надвишава неколкократно номиналния.

**Работни характеристики.** Представляват зависимостите на честотата на въртене  $n$ , на консумирания ток  $I$ , на консумираната мощност  $P_1$ , на полезната мощност  $P_2$ , на коефициента на полезно действие  $\eta$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi$  от полезнния момент  $M_2$  при константно захранващо напрежение:

$$n, I, P_1, P_2, \eta, \cos \varphi = f(M_2) \text{ при } U = U_A = U_n.$$

При снемане на характеристиките се използва схемата от фиг. 4.10. На двигателя се подава номиналното напрежение и чрез електромагнитната спирачка се задават поредица стойности на момента. Измерванията започват от  $M_2=0$  (празен ход) и завършват при  $M_2=(0.8+0.9)M_{\max}$ . Задължително се прави измерване при номиналния момент. Резултатите се нанасят в табл. 4.6. При изчисленията се използват формулите

$$P_1 = P_C \pm P_B; P_2 = M_2 \frac{2\pi n}{60}; \eta = \frac{P_2}{P_{12}} \cdot 100; \cos \varphi = \frac{P_1}{U I}$$

По данните от табл. 4.6 се построяват работните характеристики, показани на фиг. 4.11.

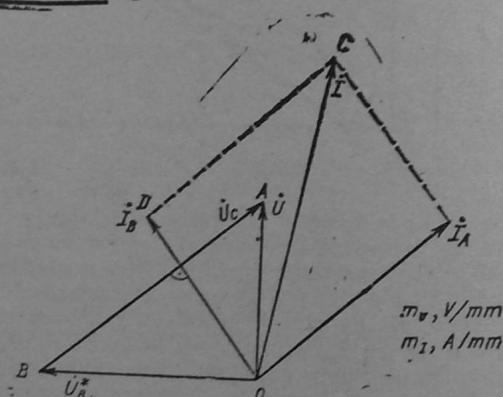
Векторната диаграмма (фиг. 4.12) се построява по данните от табл. 4.6 за номиналния режим по следния начин. Избират се подходящи машаби за напрежението  $U$  и за тока  $I$ . Построява се напрежението  $U = U_A$  и след това триъгълник  $OAB$  по дадени три страни ( $U, U_B, U_C$ ). Перпендикулярно на напрежението  $U_C$  се построява токът  $I_B$ . След това се построява триъгълник  $ODC$  по три страни ( $I_B, I_A, I$ ).

Проверява се доколко са изпълнени условията за получаване на кръгово поле. Както е известно от теорията на електрическите машини, трябва

$$\frac{I_A}{I_B} = k \text{ и } I_A^2 + I_B^2 = I^2$$

или

$$\frac{|U_B|}{|U_A|} = k \text{ и } U^2 + U_B^2 = U_C^2$$



Фиг. 4.12

#### 4.4. УПРАЖНЕНИЕ № 10

#### ИЗПЪЛНИТЕЛЕН АСИНХРОНЕН МИКРОДВИГАТЕЛ С КУХ НЕМАГНИТЕН РОТОР

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

1. Снемане на механичните характеристики  $M_2=f(n)$  при  $U_s=U_{yn}$ ,  $U_y=U_{yn}$  и  $U_y=0,5 U_{yn}$  за амплитудно и амплитудно-фазово управление.

2. Снемане на регулационните характеристики  $n=f(U_y)$  при  $U_s=U_{yn}$ ,  $M_2=0$  и  $M_2=0,5 M_{n0}$  за амплитудно и амплитудно-фазово управление.

###### B. Изчисления и построения

1. Построяване на механичните характеристики  $M_2=f(n)$  и характеристиките на полезната мощност  $P_2=f(n)$  за двата вида управление.

2. Построяване на регулационните характеристики  $n=f(U_y)$  за двата вида управление.

##### II. Схема на опитната постановка

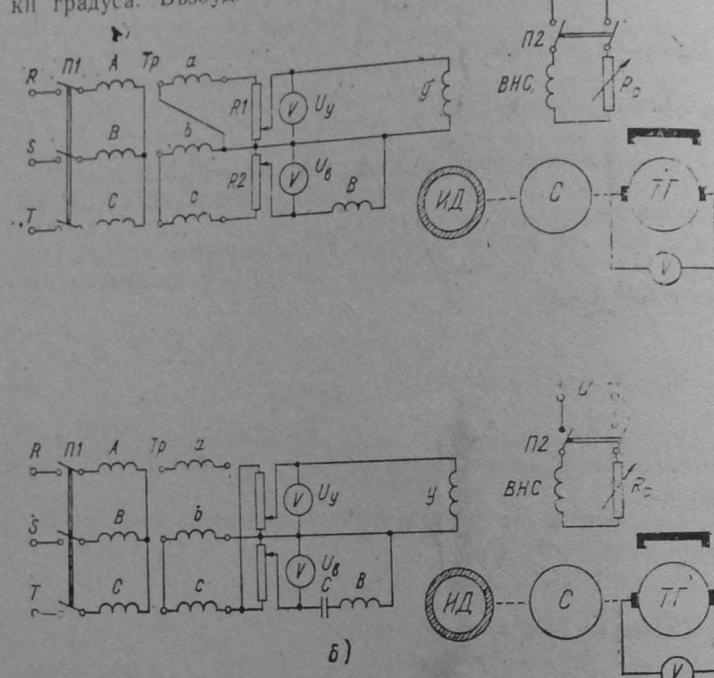
За снемане на характеристиките се свързват схемите на фиг. 4.13.

При амплитудно управление се използва схемата от фиг. 4.13 а, а при амплитудно-фазово управление — схемата от фиг. 4.13 б. Изследваният изпълнителен двигател ИД се захранва от трансформатора  $T_p$ . Напреженията, които се подават на управляващата намотка  $Y$  и на възбудителната намотка  $B$ , се регулират посредством потенциометрите  $R1$  и  $R2$ . Натоварването на двигателя се осъществява с електромагнитна спирачка  $C$ , като токът във възбудителната ѝ намотка  $BNC$  се регулира с реостата  $R_c$ . Честотата на въртене се измерва с тахогенератора  $TG$ .

##### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Изпълнителните асинхронни двигатели служат за преобразуване на електрически сигнал (управляващото напрежение или не-

говата фаза) в механично преместване (въртене на вала). В статора на двигателя са положени възбудителната и управляващата намотка, които са разместени в пространството на 90 електрически градуса. Възбудителната намотка е включена непрекъснато



Фиг. 4.13

към захранващата мрежа, а на управляващата се подава напрежение тогава, когато роторът трябва да се приведе във въртене. Основните изисквания към тези двигатели са следните:

- липса на самоход, т. е. когато управляващият сигнал е нула, роторът трябва да бъде неподвижен;
- устойчива работа в целия обхват на регулиране на честотата на въртене;
- линейни механични и регулационни характеристики;
- голямо бързодействие.

Първите три изисквания се постигат, като роторът се изработва с голямо активно съпротивление, при което критичното хълзгане  $s_m > 1$ . Обикновено  $s_m = 2 \div 4$ .

Голямото бързодействие се постига чрез подходяща конструкция на ротора. Най-целесъобразен в това отношение е кухият немагнитен ротор, представляващ тънкостенна чаша, изработена от алюминиева сплав.

Принципът на действие на изпълнителния асинхронен двигател с кух немагнитен ротор е следният. Протичащите токове в статорните намотки създават въртящо се магнитно поле, което индуктира в ротора вихрови токове. От взаимодействието на роторните токове с въртящото се поле се създава момент, който завърта ротора по посока на полето.

Управление на изпълнителния двигател наричаме регулирането на неговата честота на въртене чрез изменение на големината или фазата на управляващото напрежение. При това в крайна сметка се изменя елиптичността на въртящото се магнитно поле. При пулсиращо магнитно поле роторът е неподвижен, а когато полето е кръгово въртящо се, честотата на въртене е най-голяма.

Основните видове управление са: амплитудно управление (АУ), фазово управление (ФУ) и амплитудно-фазово управление (АФУ).

При АУ възбудителното и управляващото напрежение са дефазирани на  $90^\circ$ . Две такива напрежения може да се получат, като от вторичната намотка на трифазен трансформатор се вземат едно линейно и едно фазово напрежение (фиг. 4.13 a). Възбудителното напрежение е неизменно, а регулирането на честотата на въртене (управлението) се осъществява чрез изменение на големината (амплитудата) на управляващото напрежение.

При ФУ управлението се осъществява, като чрез фазорегулатор се изменя ъгълът на дефазиране между възбудителното и управляващото напрежение.

При АФУ във веригата на възбудителната намотка се включва кондензатор  $C$  (фиг. 4.13 b). Напрежението, което се подава на последователно свързаните  $C$  и  $B$ , е неизменно, а управлението се осъществява чрез изменение на големината на управляващото напрежение. При това поради наличието на кондензатор се изменят както съотношението на напреженията на възбудителната и на управляващата намотка, така и ъгълът на дефазиране между тях.

Механични характеристики. Представляват зависимостта на полезната момент  $M_2$  от честотата на въртене  $n$  при неизменни напрежения на възбудителната и управляващата намотка:

$$M_2 = f(n) \text{ при } U_B = U_{BII} = \text{const} \text{ и } U_Y = \text{const}.$$

При снемането им се използват схемите от фиг. 4.13 a и 4.13 b съответно за АУ и АФУ.

За двата вида управление се снемат по две характеристики — едната при  $U_Y = U_{YII}$ , а другата — при  $U_Y = 0,5 U_{YII}$ . Снемането на всяка характеристика започва от празен ход ( $M_2 = 0$ ) и завършва

Таблица 4.7

| AY                           |       |       |                                 |       |       |
|------------------------------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|
| $U_B = U_{BH}; U_y = U_{yH}$ |       |       | $U_B = U_{BH}; U_y = 0,5U_{yH}$ |       |       |
| $n$                          | $M_2$ | $P_2$ | $n$                             | $M_2$ | $P_2$ |
| $\text{min}^{-1}$            | N . m | W     | $\text{min}^{-1}$               | N . m | W     |
|                              |       |       |                                 |       |       |

Таблица 4.8

| AΦY                          |       |       |                                 |       |       |
|------------------------------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|
| $U_B = U_{BH}; U_y = U_{yH}$ |       |       | $U_B = U_{BH}; U_y = 0,5U_{yH}$ |       |       |
| $n$                          | $M_2$ | $P_2$ | $n$                             | $M_2$ | $P_2$ |
| $\text{min}^{-1}$            | N . m | W     | $\text{min}^{-1}$               | N . m | W     |
|                              |       |       |                                 |       |       |

ва при късо съединение ( $n=0; M_2=M_n$ ). За измерване на пусковия момент  $M_n$  дискът на спирачката се фиксира с щифт към полюсната ѝ система. Различни натоварвания се осъществяват чрез изменение на тока във възбудителната намотка на електромагнитната спирачка. Резултатите от измерването се нанасят в табл. 4.7 и 4.8 съответно за АУ и АФУ.

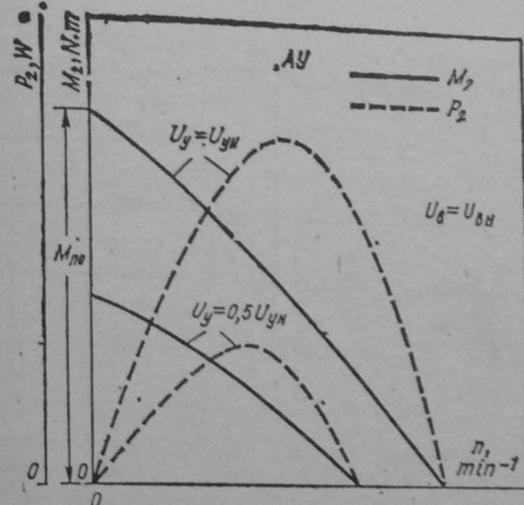
Трябва да се има предвид, че номиналните възбудителни напрежения при АУ и АФУ не са еднакви.

Полезната мощност се изчислява по формулата

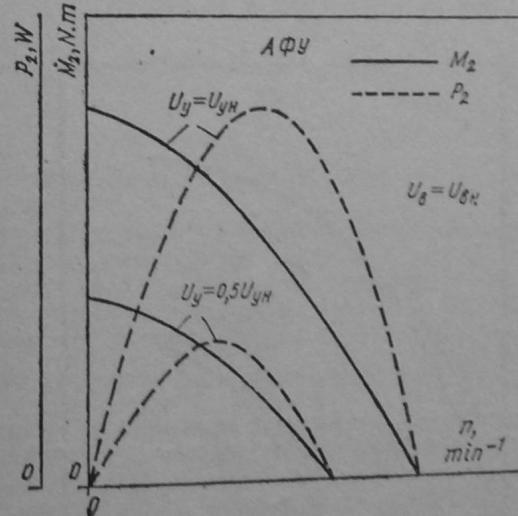
$$P_2 = M_2 \frac{2\pi n}{60}.$$

Механичните характеристики и характеристиките на полезната мощност имат вида, показан на фиг. 4.14 и 4.15, съответно за АУ и АФУ.

При реалните изпълнителни асинхронни двигатели механич-



Фиг. 4.14



Фиг. 4.15

ните характеристики не са линейни, като нелинейността е по-силно изразена при АФУ.

Характеристиките на полезната мощност са параболи, които пресичат абсцисната ос в две точки — при празен ход ( $M_2=0$ ) и при късо съединение ( $n=0$ ).

Таблица 4.9

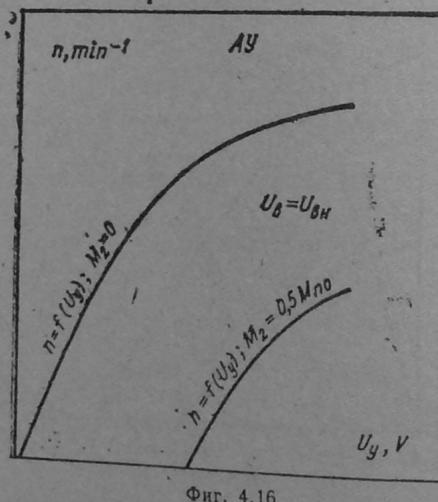
| $AU; U_b = U_{bh}$ |                   |
|--------------------|-------------------|
| $M_2=0$            | $M_2=0,5 M_{po}$  |
| $U_y$              | $n$               |
| $V$                | $\text{min}^{-1}$ |

Таблица 4.10

| $A\Phi U; U_b = U_{bh}$ |                   |                  |                   |
|-------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| $M_2=0$                 |                   | $M_2=0,5 M_{po}$ |                   |
| $U_y$                   | $n$               | $U_y$            | $n$               |
| $V$                     | $\text{min}^{-1}$ | $V$              | $\text{min}^{-1}$ |

Регулационни характеристики. Представляват зависимостта на честотата на въртене  $n$  от управляващото напрежение  $U_y$  при неизменни възбудително напрежение и момент на вала:

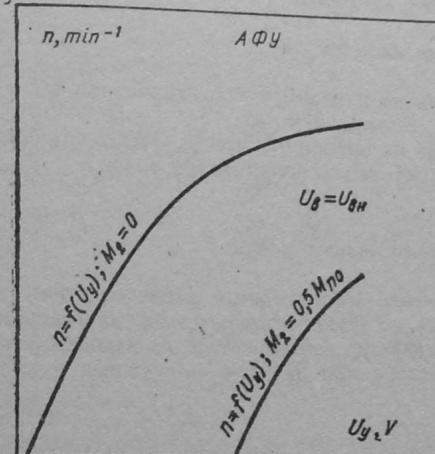
$$n=f(U_y) \text{ при } U_b = U_{bh} = \text{const} \text{ и } M_2 = \text{const}.$$



Фиг. 4.16

При снемането им се използват схемите от фиг. 4.13 а и 4.13 б съответно за AU и AФУ. За двета вида управление се снемат по две характеристики — едната при  $M_2=0$  (празен ход), а

другата — при  $M_2=M_{po}$ . Тук  $M_{po}$  е пусковият момент, който се получава при  $U_b=U_{bh}$  и  $U_y=U_{yh}$  (вж. фиг. 4.14). Управляващото напрежение се изменя от номиналната му стойност до определена минимална стойност (напрежението на тръгване). Резул-



Фиг. 4.17

татите от измерването се нанасят в табл. 4.9 и 4.10 съответно за AU и AФУ.

По данните от табл. 4.9 и 4.10 са построени регулационните характеристики, показани на фиг. 4.16 и 4.17.

При двета вида управление регулационните характеристики са близки по вид и са нелинейни. Те може да се считат за линейни само при малки стойности на относителната честота на въртене  $\frac{n}{n_s}$ . Тъй като синхронната честота на въртене е  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ , става ясно защо често пъти изпълнителните асинхронни двигатели се захранват с напрежение с повишена честота (200, 400, 500, 1000 Hz).

Целесъобразно е при провеждане на упражнението да се снемат ид-напред характеристики при AU и след това при AФУ.

## 4.5. УПРАЖНЕНИЕ № 11 АСИНХРОНЕН ТАХОГЕНЕРАТОР

### I. Програма на работа

#### A. Опитни изследвания

1. Снемане на изходните характеристики  $U_n = f(n)$  при  $z_r = \infty$ ,  $z_t = x_n$ ,  $z_r = x_{L_n}$ ,  $z_r = x_{C_n}$ .
2. Снемане на зависимостите  $U_n = f(z_r)$  при  $n = n_n = \text{const}$  за активен, индуктивен и капацитивен товар.

#### B. Изчисления и построения

1. Построяване на изходните характеристики и определяне на стръмността им (чувствителността на тахогенератора).
2. Построяване на зависимостите на изходното напрежение от товарния импеданс при активен, индуктивен и капацитивен товар.

### II. Схема на опитната постановка

За провеждане на опитните изследвания се свързва схемата на фиг. 4.18.

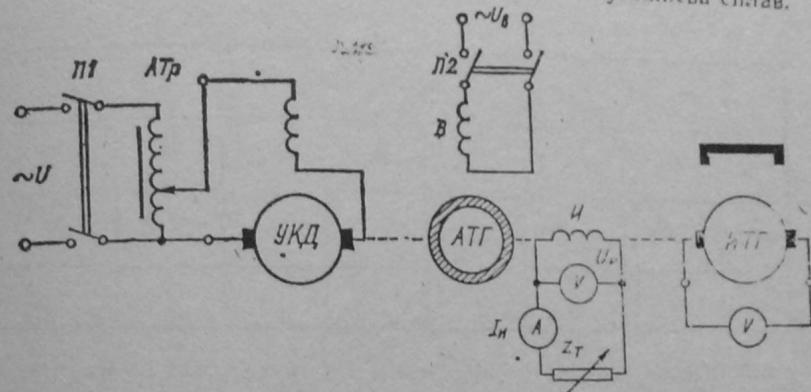
Роторът на изследвания асинхронен тахогенератор  $ATG$  се върти от универсален колекторен двигател  $УКД$ , захранван посредством автотрансформатор  $ATr$ . Чрез изменение на напрежението, подавано от  $ATr$  на  $УКД$ , се регулира плавно честотата на въртене. Възбудителната намотка  $B$  на  $ATG$  се захранва с променливо напрежение, а към изходната намотка  $H$  е включен товарът  $z_r$ . Честотата на въртене се измерва с измервателния тахогенератор  $ITG$ .

### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Тахогенераторите са електрически микромашини, които служат за преобразуване на честотата на въртене в електрически сигнал (изходно напрежение).

Конструктивно асинхронните тахогенератори са подобни на асинхронните изпълнителни двигатели с кух немагнитен ротор. В статора са поставени възбудителна и изходна намотка, разместе-

ни в пространството и в 90 електрически градуса. Възбудителната намотка се захранва с променливо напрежение, а от изходната намотка се получава изходното напрежение. Роторът представлява тънкостенна чаша, изработена най-често от алуминиева сплав.



Фиг. 4.18

Основно изискване към тахогенераторите е да съществува пропорционалност между изходното напрежение и честотата на въртене.

Принципът на действие на асинхронния тахогенератор е следният. Протичащият през възбудителната намотка ток създава пулсиращ магнитен поток, насочен по оста на тази намотка. При неподвижен ротор възбудителният поток не индуцира е. д. н. в изходната намотка, тъй като нейната ос е на 90 електрически градуса спрямо оста на възбудителната намотка. При въртене на ротора в него освен трансформаторно е. д. н. се индуцира и е. д. н. на въртене. То предизвиква противане на ток в ротора, който създава магнитен поток, насочен по оста на изходната намотка и следователно индуциращ в нея е. д. н. (изходното напрежение).

Важно предимство на асинхронния тахогенератор е това, че честотата на изходното напрежение не зависи от честотата на въртене и е равна на честотата на възбудителното напрежение.

В „идеалния“ тахогенератор зависимостта на изходното напрежение от честотата на въртене представлява праля линия. В реалните тахогенератори се получава известно отклонение на изходната характеристика от линейната поради следните причини:

- а) реакцията на тока в ротора;
- б) изменението на параметрите на статорните намотки и на ротора под влияние на температурата, насищането и други причини;

в) пада на напрежение в изходната намотка при натоварване;  
г) технологичните неточности.  
Изходни характеристики. Представляват завъртаването на изходното напрежение  $U_H$  в зависимост от честотата на въртене  $n$ .

Таблица 4.11

| $z_T = \infty$    | $z_T = r_H$ | $z_T = x_{LH}$    | $z_T = x_{CH}$ |
|-------------------|-------------|-------------------|----------------|
| $n$               | $U_H$       | $n$               | $U_H$          |
| min <sup>-1</sup> | V           | min <sup>-1</sup> | V              |
|                   |             |                   |                |
|                   |             |                   |                |
|                   |             |                   |                |
|                   |             |                   |                |
|                   |             |                   |                |

симостите на изходното напрежение  $U_H$  от честотата на въртене  $n$  при постоянен товарен импеданс  $z_T$  и неизменно възбудително напрежение:

$$U_H = f(n) \text{ при } z_T = \text{const} \text{ и } U_B = U_{BH} = \text{const}.$$

За снемане на изходните характеристики се свързва схемата на фиг. 4.18. На възбудителната намотка се подава номиналното напрежение, което се поддържа неизменно. Чрез регулиране на напрежението, подавано на УКД, се задават поредица стойности на честотата на въртене в диапазона  $n = (0 \div 1,25) n_H$ . Снемат се следните четири изходни характеристики:

- а) при празен ход  $z_T = \infty$ ;
- б) при активен товар  $z_T = r_H$ ;
- в) при индуктивен товар  $z_T = x_{LH}$ ;
- г) при капацитивен товар  $z_T = x_{CH}$ .

При това

$$r_H = x_{LH} = x_{CH} = -\frac{U_{BH}}{I_{BH}},$$

където  $U_{BH}$  и  $I_{BH}$  са номиналните стойности на изходното напрежение и изходния ток.

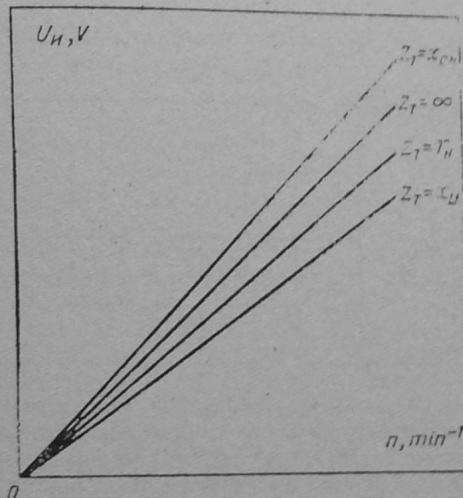
Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 4.11.

Построените по данните от табл. 4.11 изходни характеристики са показани на фиг. 4.19. От опитно снетите характеристики може да се направят изводи за тяхната линейност, както и за влиянието на характера на товара върху изходното напрежение.

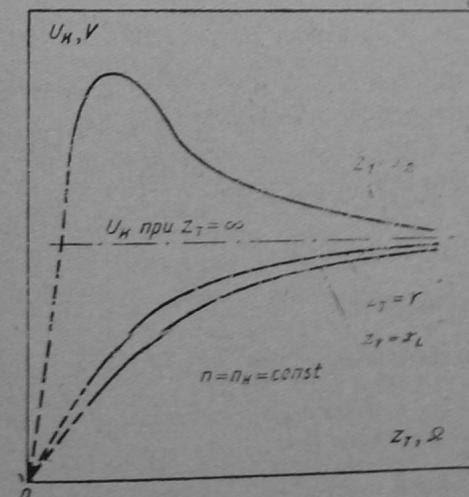
Стръмността на изходните характеристики се определя с израза

$$S = \frac{U_H}{n_H},$$

където  $U_H$  е измереното изходно напрежение при номиналната честота на въртене  $n_H$ .



Фиг. 4.19



Фиг. 4.20

Зависимости  $U_n = f(z_t)$ . Тези характеристики се снемат също, като се използва схемата от фиг. 4.18. През време на целия опит възбудителното напрежение  $U_n$  и честотата на въртене  $n$  са неизменни и равни на номиналните си стойности. Чрез тези  $n = n_n = \text{const}$

Таблица 4.12

| $n = n_n = \text{const}$ |       |          |             |       |          |             |       |          |
|--------------------------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|
| $z_t = r$                |       |          | $z_t = x_L$ |       |          | $z_t = x_C$ |       |          |
| $U_n$                    | $I_n$ | $r$      | $U_n$       | $I_n$ | $x_L$    | $U_n$       | $I_n$ | $x_C$    |
| V                        | A     | $\Omega$ | V           | A     | $\Omega$ | V           | A     | $\Omega$ |
| —                        | —     | —        | —           | —     | —        | —           | —     | —        |
| —                        | —     | —        | —           | —     | —        | —           | —     | —        |

изменение на  $z_t$  се установяват поредица стойности на изходния ток  $I_n$ . Зависимостите се снемат за три случая: активен, индуктивен и емитативен товар. Резултатите се нанасят в табл. 4.12.

Стойностите на товарния импеданс се изчисляват от

$$z_t = \frac{U_n}{I_n}.$$

На фиг. 4.20 са показани зависимости  $U_n = f(z_t)$ . От тях се вижда влиянието на големината и характера на товара върху изходното напрежение. Става ясно, че е желателно товарният импеданс да бъде колкото е възможно по-голям.

#### 4.6. УПРАЖНЕНИЕ № 12 СЕЛСИНИ

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

- Снемане на кривата на грешките  $\Delta x = f(x_d)$  за  $U_n = U_{nn}$  при работа в индикаторен режим.
- Снемане на зависимостите  $I_1, I_2, I_3, I_{ad}, I_{an} = f(x)$  за  $U_n = U_{nn}$  при работа в индикаторен режим.

- Снемане на зависимостта  $M_c = f(\alpha)$  за  $U_n = U_{nn}$  при работа в индикаторен режим.
- Снемане на кривата на грешките  $\Delta x = f(x_d)$  за  $U_n = U_{nn}$  и  $z_t = \infty$  при работа в трансформаторен режим.
- Снемане на зависимостите  $U_{n2x}, I_1, I_2, I_3, I_{ad} = f(\alpha)$  за  $U_n = U_{nn}$  при работа в трансформаторен режим.
- Наблюдаване на работата на затворена следяща система в трансформаторен режим.

##### B. Изчисления и построения

- Построяване на кривата на грешките при работа в индикаторен режим.
- Построяване на зависимостите на токовете в синхронизиращите и възбудителните намотки от ъгъла на разсъгласуване при работа в индикаторен режим.
- Построяване на зависимостта на синхронизиращия момент от ъгъла на разсъгласуване при работа в индикаторен режим. Определяне на специфичния синхронизиращ момент.
- Построяване на кривата на грешките и на зависимостите на изходното напрежение и на токовете в синхронизиращите намотки и възбудителната намотка на датчика от ъгъла на разсъгласуване при работа в трансформаторен режим. Определяне на специфичното изходно напрежение.

##### II. Схема на опитната постановка

За провеждане на опитните изследвания се свързват схемите от фиг. 4.21.

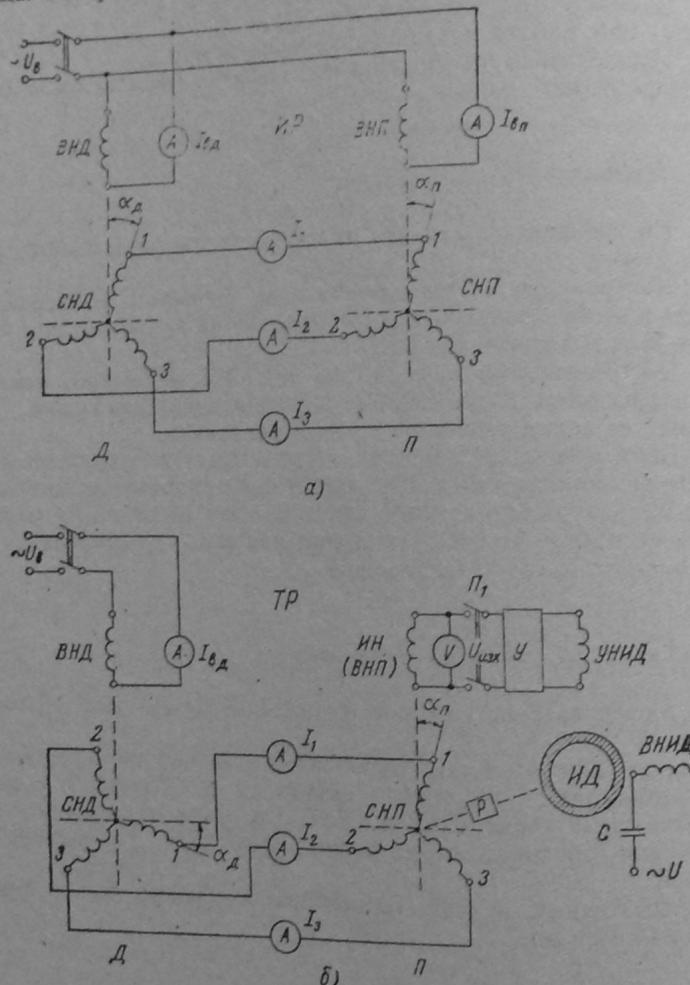
С  $D$  и  $P$  са означени селсин-датчикът и селсин-приемникът. Възбудителните им намотки са означени с  $ВНД$  и  $ВНП$ , а синхронизиращите — със  $СНД$  и  $СНП$ . На осите на селсините са прикрепени стрелки, които се движат пред скали, разграфени от 0 до  $360^\circ$ .

Измервателните апарати се подбират съобразно номиналните данни на селсините.

##### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Селсините са електрически микромашини, които се използват в индукционните системи за синхронна връзка. Индукционната система за синхронна връзка представлява такава система, която

осигурява синхронно завъртане или синхронно въртене на две или няколко оси, които не са свързани механически помежду си. Селсните имат две намотки — възбудителна и синхронизираща. Възбудителната намотка е трифазна или еднофазна, според



Фиг. 4.21

което селсните биват трифазни или еднофазни. Най-голямо приложение имат еднофазните селсни, които именно се изследват в настоящото упражнение. Синхронизиращата намотка е винаги трифазна.

Най-типично изпълнение на селсните е това, при което възбудителната намотка е разположена в статора, а синхронизиращата намотка — в ротора, като е свързана с три контактни пръстена. Чрез четки, които се трят върху пръстените, се осъществява връзката на синхронизиращата намотка с външната верига. Възможно е и обратното изпълнение — възбудителна намотка в ротора и синхронизираща — в статора. Според изпълнението на възбудителните полюси селсните биват явнополюсни и неявнополюсни. Освен това те се делят на контактни и безконтактни. При всички изпълнения магнитното поле в селсните е променливо и за да се намалят загубите от вихрови токове, статорният и роторният пакет се набира от листова електротехническа стомана.

В най-прости случаи системата за синхронно предаване на ъгъл се осъществява с два еднакви селсина, електрически свързани помежду си. Единият селсин е свързан с водещата (входната) ос и се нарича датчик ( $D$ ), а другият — с водената (изходната) ос и се нарича приемник ( $P$ ).

Различават се два основни режима на работа на селсните: индикаторен и трансформаторен.

Индикаторният режим (ИР) се използва тогава, когато съпротивителният момент на вала на  $P$  (на изходната ос) е незначителен. Най-често трябва да се завърти уравновесена стрелка, прикрепена непосредствено на оста на приемника. В този случай приемникът отработва самостоятелно ъгъла, който се задава от датчика, без да са необходими допълнителни усилвателни изпълнителни устройства. Изходно положение на селсните е това, при което  $\alpha_D = 0$  и  $\alpha_P = 0$ , т. е. осите на фазите  $I$  съвпадат с осите на съответните възбудителни намотки (вж. фиг. 4.21 a). Ако роторите на  $D$  и  $P$  са завъртени на ъгли  $\alpha_D$  и  $\alpha_P$  спрямо изходното положение, тяхната разлика представлява ъгълът на разсъгласуване  $\alpha$ , т. е.

$$\alpha = \alpha_D - \alpha_P$$

Действието на индикаторната схема е следното. При  $\alpha_D = \alpha_P$ , т. е. при  $\alpha = 0$ , в синхронизиращите намотки не протичат токове, върху валовете на селсните не действуват въртящи моменти и системата е в покой. Това състояние се нарича съгласувано състояние. При разсъгласуваност на двата ротора ( $\alpha \neq 0$ ) протичат токове в синхронизиращите намотки, които, като си взаимодействуват с пулсиращите магнитни потоци, създават въртящи моменти. Тези синхронизиращи моменти се стремят да завъртят роторите в съгласувано състояние. Ако роторът на  $D$  се завърти на определен ъгъл и се застопори, синхронизиращият момент, който действува на вала на  $P$ , ще го завърти в идеалния случай на същия ъгъл, при което токовете в синхронизиращите вериги стават равни на нула. По този начин приемникът отработва зададения от датчика ъгъл.

Трансформаторният режим (TP) се използва тогава, когато на изходната ос трябва да се преодолее значителен съпротивителен момент. В този случай приемникът отработва зададения ъгъл не самостоятелно, а с помощта на електрически и механически свързан с него изпълнителен двигател ИД (фиг. 4.21 б). И тук изходно е положението, при което  $\alpha_d = 0$  и  $\alpha_n = 0$ , но както се вижда от фиг. 4.21, има разлика в сравнение с изходното положение при индикаторен режим. Тук при изходното положение оста на фазата I на СНД сключва ъгъл  $90^\circ$  с оста на ВНД. Затова при преминаване от индикаторен към трансформаторен режим стрелката на Д трябва да се измести на  $90^\circ$  или роторът му да се завърти на  $90^\circ$  и да се работи с изместена нула. Следователно при съгласувано положение ( $\alpha_d = \alpha_n$ ) осите на едноименният фази на СНД и СНП сключват ъгъл  $90^\circ$ .

Действието на трансформаторната схема е следното. При съгласувано положение ( $\alpha=0$ ) токът в СНП създава магнитен поток, перпендикулярен на оста на ВНП, която тук е по-правилно да бъде наречена изходна намотка ИН. Следователно индуктираното напрежение в ИН е нула и системата е в покой. При наличие на разсъгласуване ( $\alpha \neq 0$ ) токът в СНП създава поток, който индуктира в ИН изходно напрежение  $U_{изх}$ , пропорционално на  $\sin \alpha$ . Изходното напрежение се усилва от усилвателя У и се подава на управляващата намотка УНИД на изпълнителния двигател, чиято възбудителна намотка ВНИД е непрекъснато под напрежение. Валът на ИД е свързан механически с вала на П посредством редуктора Р. Тъй като  $U_{изх} \neq 0$ , ИД започва да се върти, като ще върти и вала на П дотогава, докато изходното напрежение стане нула, т. е. докато се дойде отново в съгласувано положение. По този начин ще бъде отработен зададеният от датчика ъгъл.

#### Изследвания при работа в индикаторен режим

За провеждане на изследванията се свързва схемата от фиг. 4.21 а. Възбудителните намотки на селсините са захранени с  $U_b = U_{ви}$ , а едноименните изводи на синхронизиращите намотки са свързани помежду си.

Кривата на грешките представлява зависимостта  $\Delta\alpha = f(\alpha_d)$  при  $U_b = U_{ви}$ , където  $\Delta\alpha$  представлява разсъгласуването след отработване на зададен ъгъл. Схема се по следния начин. Селсините се установяват в изходно положение. Роторът на Д се завърта на ръка на определен ъгъл  $\alpha_d$ . Под действие на синхронизиращия момент роторът на П се завърта на ъгъл  $\alpha_n$ , който в идеалния случай е равен на  $\alpha_d$ . В действителност поради наличие на триене  $\alpha_n \neq \alpha_d$ . Грешката в случая е

$$\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_n.$$

Грешката се определя, като се задават стойности на  $\alpha_d$  от 0 до  $360^\circ$  през  $30^\circ$ . Резултатите се нанасят в табл. 4.13.

По данните от табл. 4.13 се построява кривата на грешките, показана на фиг. 4.22. Опитните точки се свързват с прости линии.

Таблица 4.13

| ИР         |            |                |
|------------|------------|----------------|
| $\alpha_d$ | $\alpha_n$ | $\Delta\alpha$ |
| 0          | 0          | 0              |
| 30         | 27         | -3             |
| 60         | 45         | -15            |
| 90         | 75         | -15            |
| 120        | 90         | -10            |
| 150        | 105        | -15            |
| 180        | 120        | -15            |
| 210        | 145        | -25            |
| 240        | 165        | -25            |
| 270        | 180        | -15            |
| 300        | 195        | -15            |
| 330        | 210        | -15            |
| 360        | 225        | -15            |

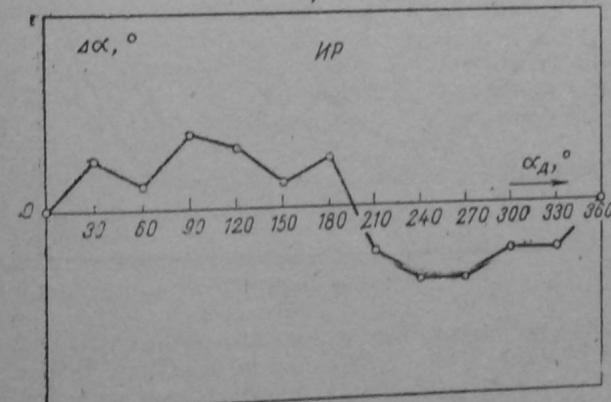
и, тъй като грешките са случаи величини. Максималната грешка определя класа на точност на селсина. При прецизни изследвания кривата на грешките се снема при обхождане на скалата както по часовниковата стрелка, така и срещу нея.

Зависимости на токовете в синхронизиращите и възбудителните намотки. Снемат се зависимостите на токовете в синхронизиращите намотки  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и на токовете във възбудителните намотки на датчика и приемника  $I_{вд}$  и  $I_{вп}$  от ъгъла на разсъгласуване  $\alpha$  при  $U_b = U_{ви}$ :

$$I_1, I_2, I_3, I_{вд}, I_{вп} = f(\alpha) \text{ при } U_b = U_{ви} = \text{const.}$$

Опитът се провежда по следния начин. Роторът на приемника се застопорява в изходно положение ( $\alpha_n = 0$ ). Роторът на датчика се завърта на ръка през  $30^\circ$  от 0 до  $360^\circ$ . При всяка стойност на  $\alpha_d$  се отчитат величините, отразени в табл. 4.14.

Тъй като в случая  $\alpha_n = 0$ , то  $\alpha = \alpha_d$ .

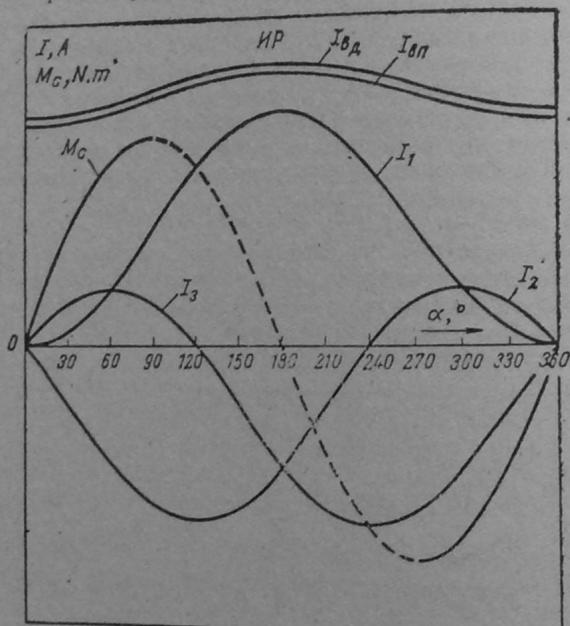


Фиг. 4.22

Таблица 4.14

| $\alpha$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_{\text{вд}}$ | $I_{\text{вп}}$ |
|----------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| °        | A     | A     | A     | A               | A               |

По данните от табл. 4.14 се построяват кривите на токовете, показани на фиг. 4.23. При построяване на кривите на токовете в синхронизиращите намотки трябва да се има предвид, че алгебричният сбор от трите тока е равен на нула при всяка стойност на  $\alpha$ , тъй като линията няма нулев проводник. Полезно е да се имат предвид формулите на тези токове, а именно:



Фиг. 4.23

$$I_1 = I_m \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

$$I_2 = I_m \sin \left( \frac{\alpha}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\alpha}{2};$$

$$I_3 = I_m \sin \left( \frac{\alpha}{2} + 120^\circ \right) \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Трябва да се подчертава, че е. д. н. и токовете в трите фази на синхронизиращата намотка са във фаза във времето, тъй като се индуцират от пулсиращия магнитен поток на възбудителната намотка.

Таблица 4.15

| $\alpha$ | $m$ | $M_c$ |
|----------|-----|-------|
| °        | kg  | N·m   |

Синхронизиращ момент. Схема се зависимостта на синхронизиращия момент  $M_c$  от ъгъла на разсъгласуване  $\alpha$  при възбудително напрежение, равно на номиналното:

$$M_c = f(\alpha) \text{ при } U_b = U_{\text{нн}} = \text{const.}$$

Опитът се провежда по следния начин. Роторът на приемника се застопорява в изходно положение ( $\alpha_n = 0$ ). На вала на датчика е поставена шайба, на която се завързва здрав конец. Конецът се прехвърля през жлеба на шайбата и се пуска да виси надолу, като тангира към шайбата. На края на конеца се закрепват тежести, броят на които постепенно се увеличава. Увеличаването на броя на тежестите продължава дотогава, докато се достигне максималната стойност на синхронизиращия момент. При всяка тежест се отчита ъгълът на разсъгласуване  $\alpha$ , който в случая е равен на  $\alpha_d$  по скалата на датчика. Резултатите от измерването се нанасят в табл. 4.15. При неявнополюсните селскини максималният момент се получава при  $\alpha \approx 90^\circ$ , а при явнополюсните — при  $\alpha \approx 75^\circ$ .

Синхронизиращият момент се изчислява по формулата

$$M_c = m g r,$$

където  $m$  е масата на тежестта, kg;

$g$  — земното ускорение,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;

$r$  — радиусът на шайбата, m.

По данните от табл. 4.15 е построена кривата на синхронизиращия момент, показана на фиг. 4.23.

Специфичният синхронизиращ момент, който представлява стръмността на началната част на характеристиката  $M_c = f(\alpha)$ , се определя по формулата

$M'_e = \left( \frac{dM_e}{d\alpha} \right)_{\alpha=0}$ .  
Колкото по-голям е  $M'_e$ , толкова по-малка е грешката на селсина.

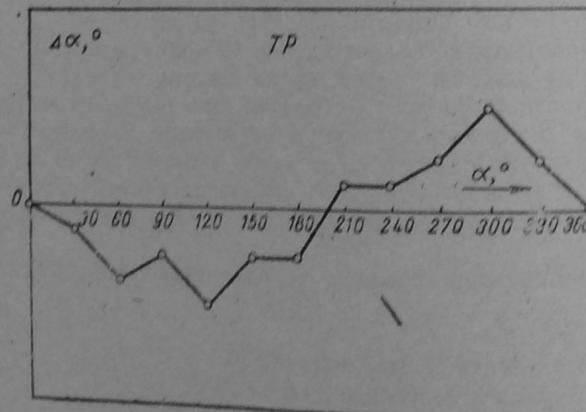
#### Изследвания при работа в трансформаторен режим

За провеждане на изследванията се свързва схемата от фиг. 4.21 б. Само възбудителната намотка на датчика е захранена с  $U_b = U_{bN}$ . Едноименните изводи на синхронизиращите намотки са свързани помежду си.

Таблица 4.16

| TP         |            |                 |
|------------|------------|-----------------|
| $\alpha_d$ | $\alpha_n$ | $\alpha_\Delta$ |
| 0          | 0          | 0               |
|            |            |                 |
|            |            |                 |

Кривата на грешките  $\Delta\alpha = f(\alpha_d)$  при  $U_b = U_{bN}$  се снема по следния начин. Прекъсвачът  $PI$  е отворен. Селсините се установяват в изходно положение ( $\alpha_d = 0$ ;  $\alpha_n = 0$ ), при което из-



Фиг. 4.24

ходното напрежение  $U_{nax} = 0$ . Завърта се на ръка роторът на датчика на ъгъл  $\alpha_d$ . Тогава волтметърът, свързан към  $IN$ , показва напрежение. Завърта се също на ръка роторът на приемника, докато изходящото напрежение стане отново нула. Отчита се ъгъл

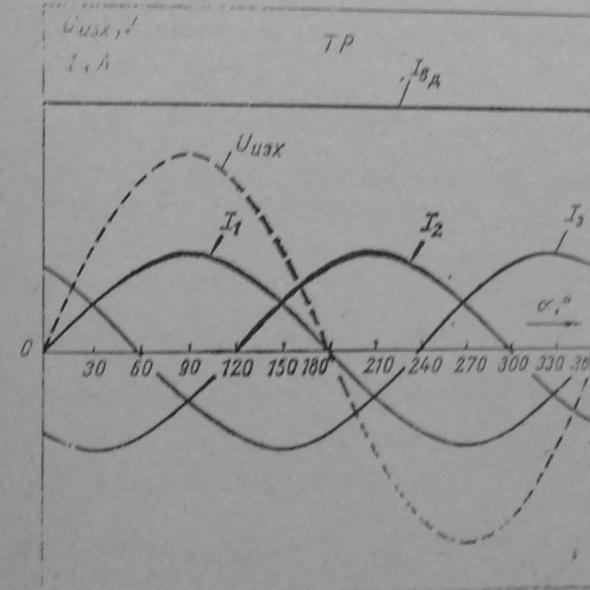
лът  $\alpha_n$ , на който е завъртан роторът на приемника. Грешката е  $\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_n$ . По този начин се обхожда цялата скала от 0 до  $360^\circ$  през  $30^\circ$ . Резултатите се нанасят в табл. 4.16.

Таблица 4.17

| $\alpha$ | $U_{nax}$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_{bd}$ |
|----------|-----------|-------|-------|-------|----------|
| 0        | V         | A     | A     | A     | A        |
|          |           |       |       |       |          |
|          |           |       |       |       |          |
|          |           |       |       |       |          |

По данните от табл. 4.16 се построява кривата на грешките, показана на фиг. 4.24. Максималната грешка определя класа на точност на селсина.

Зависимости на изходното напрежение и на токовете. Снемат се зависимостите на изходното на-



Фиг. 4.25

прежение  $U_{nax}$ , на токовете в синхронизиращите намотки  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и на тока във възбудителната намотка на датчика  $I_{bd}$  от ъгъла на разсъгласуване  $\alpha$  при неизменно възбудително напрежение:

$U_{\text{изх}}, I_1, I_2, I_3, I_{\text{вд}}=f(\alpha)$  при  $U_{\text{в}}=U_{\text{вн}}=\text{const.}$

Опитът се провежда по следния начин. Прекъсвачът  $P1$  е отворен ( $Z_r=\infty$ ). Селсините се установяват в изходно положение и се прави първото отчитане. След това роторът на приемника се застопорява в изходно положение, а роторът на датчика се върта на ръка от  $0$  до  $360^\circ$  през  $30^\circ$ , като при всяка стойност на  $\alpha_d = \alpha$  се отчитат величините в табл. 4.17.

По данните от табл. 4.17 се построяват кривите на изходното напрежение и на токовете, показани на фиг. 4.25. Изходното напрежение практически е пропорционално на  $\sin \alpha$ . При построяване на токовете в синхронизиращите намотки трябва да се отчита обстоятелството, че алгебричната им сума е равна на нула при всяка стойност на  $\alpha$ .

Специфичното изходно напрежение се изчислява по формулата

$$U'_{\text{изх}} = \left( \frac{dU_{\text{изх}}}{dx} \right)_{x=0}.$$

Накрая при затваряне на прекъсвача  $P1$  се наблюдава качество работата за затворена следяща система в трансформаторен режим.

## ГЛАВА V

### ИЗПИТВАНЕ НА КОЛЕКТОРНИ ДВИГАТЕЛИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

#### 5.1. УПРАЖНЕНИЕ № 13

##### ТРИФАЗЕН ШУНТОВ КОЛЕКТОРЕН ДВИГАТЕЛ, ЗАХРАНВАН ЧРЕЗ РОТОРА

(ДВИГАТЕЛ ШРАГЕ-РИХТЕР)

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

1. Определяне на правилното свързване на четките и статорните намотки.
2. Снемане на работните характеристики на двигателя  $n$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta=f(M_2)$  при  $U_1=\text{const}$  и  $f_1=\text{const}$ .

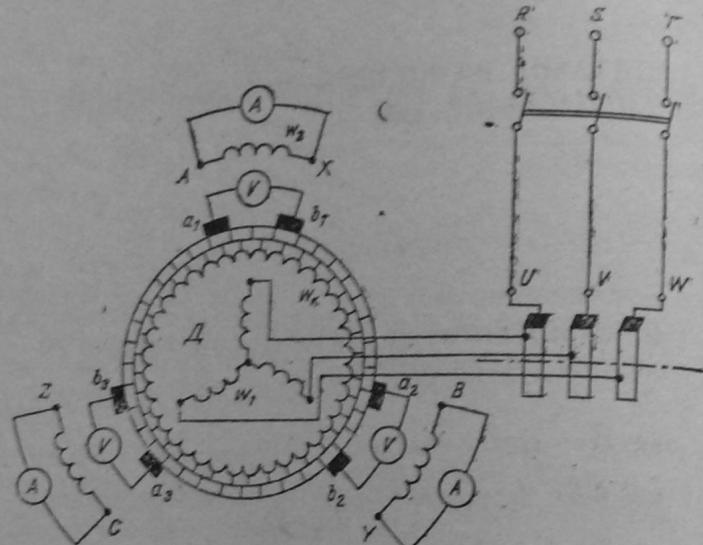
###### B. Изчисления и построения

1. Построяване на тарировъчната крива  $P'_0=f(n)$  при  $I_s=\text{const}$ .
2. Построяване на работните характеристики на двигателя.

##### II. Схема на опитната постановка

На фиг. 5.1 е показана схемата за определяне на правилното свързване на четките и статорните намотки.

За снемане на работните характеристики се свързва схемата на фиг. 5.2. Изследваният двигател  $D$  се натоварва с тарирани генератор за постоянен ток с независимо възбудждане  $I'$ , за който е известна тарировъчната крива  $P'_0=f(n)$  при  $I_s=\text{const}$ . Тук  $P'_0$  представлява сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на генератора. Пояснения относно тариранието на товарния генератор са дадени в упражнение № 2.



Фиг. 5.1

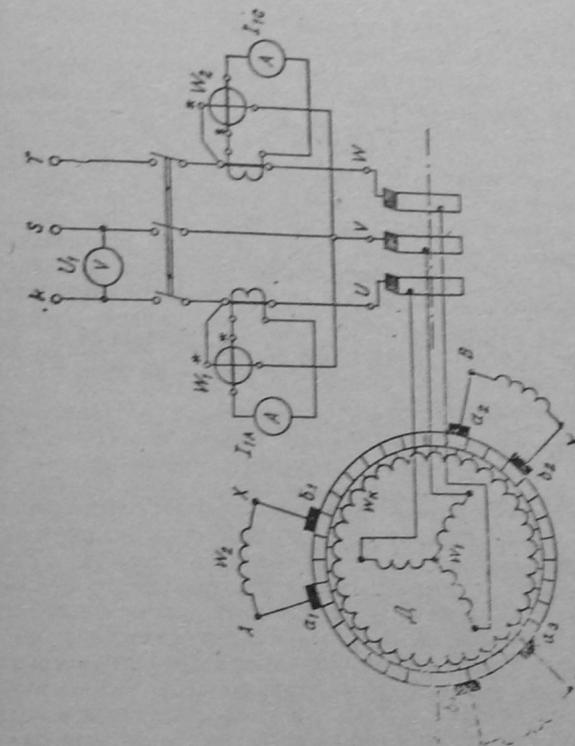
### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Принципното устройство на трифазния шунтов комутаторен двигател, захранван чрез ротора, може да се поясни чрез фиг. 5.2.

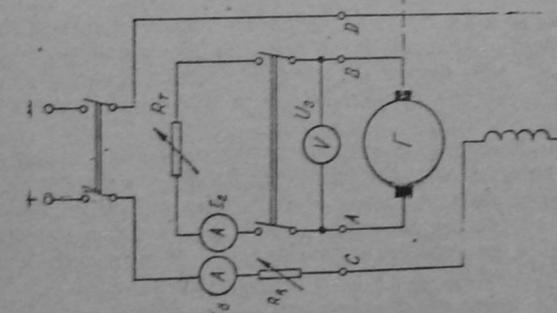
В ротора на двигателя са поставени две намотки. Едната от тях е първичната намотка  $w_1$ . Това е трифазна намотка, свързана в звезда, началата на която са свързани с три контактни пръстена. Чрез четките, които се прият върху пръстените, се осъществява захранването на двигателя от мрежата. Втората намотка, разположена в ротора, е комутаторната намотка  $w_2$ . Това е намотка от типа на постояннотоковите, която е свързана към комутатор.

В статора е разположена вторичната намотка  $w_3$ . Също както първичната намотка и тя е трифазна.

Върху комутатора се прият три двойки четки  $a_1-b_1$ ,  $a_2-b_2$  и  $a_3-b_3$ . Четките  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  се носят от една траверса, а четките  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  — от втора траверса. Чрез подходящ механизъм, за движван ръчно с лост, двете траверси може да се завъртат една спрямо друга. Благодарение на това четките от всяка двойка може да се доближават и раздалечават, да се кръстосват и отново да се раздалечават.



Фиг. 5.2



С гъвкави проводници всяка фаза на вторичната намотка се свързва със съответна двойка четки.

По своя принцип на действие трифазният шунтов колекторен двигател представлява асинхронен двигател. Наистина, ако четките от всяка двойка  $a_1-b_1$ ,  $a_2-b_2$  и  $a_3-b_3$  са разположени на една линия (една зад друга), всяка фаза на вторичната намотка е затворена накъсо. При захранване на първичната намотка протичащият през нея ток създава магнитно поле, което се върти със синхронната честота на въртене  $n_1$ . Това поле индуцира във вторичната намотка е.д.н., което обуславя протичането на вторичен ток. От взаимодействието на въртящото се магнитно поле и вторичния ток се създава въртящ момент, който завърта ротора съгласно закона на Ленц в посока, обратна на посоката на въртене на полето. Роторът ще се върти с честота на въртене  $n$ , която зависи от съпротивителния момент на вала на двигателя. Съответното хълзгане е

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

Следователно в случая трифазният шунтов колекторен двигател работи точно така както обикновеният асинхронен двигател. Единствената разлика е, че тук първичната намотка е разположена в ротора, а вторичната — в статора, докато при най-често трещаното изпълнение на асинхронния двигател е обратното.

Ако от положението, при което двойките четки са на една линия, те се раздалечават в едната или в другата посока на определен ъгъл, във веригата на вторичната намотка се въвежда допълнително е.д.н.  $E_k$ . Това е.д.н. се индуцира в колекторната намотка  $s_k$  от въртящото се магнитно поле и се снема от колектора чрез четките. Колкото по-голям е ъгълът на разтваряне на четките, толкова по-голямо е е.д.н.  $E_k$ , което се въвежда във вторичната верига. В зависимост от посоката на разтваряне на четките е.д.н.  $E_k$  може да бъде във фаза или в противофаза с основното е.д.н.  $sE_2$ , индукирано във вторичната намотка. Задължително условие за работата на двигателя е честотата на  $E_k$  да бъде равна на честотата на  $sE_2$ , а тя е  $f_2=sf_1$ . Това се постига благодарение на колектора, който изпълнява ролята на честото преобразувател.

При неизменен съпротивителен момент, ако въведеното допълнително е.д.н.  $E_k$  е в противофаза с  $sE_2$ , честотата на въртене на ротора се намалява. Ако се увеличава плавно големината на  $E_k$ , чрез увеличаване на ъгъла между четките плавно ще се намалява честотата на въртене — двигателът работи в режим на подсинхронна скорост.

При същия съпротивителен момент, ако  $E_k$  е във фаза с  $sE_2$ , честотата на въртене на ротора се увеличава. При плавно увели-

чаване на големината на  $E_k$  плавно ще се увеличава честотата на въртене — двигателът работи в режим на надсинхронна скорост.

И така трифазният шунтов колекторен двигател, захранван чрез ротора, представлява асинхронен двигател, във вторичната верига на който се въвежда допълнително е.д.н. Чрез изменение на големината и фазата на това е.д.н. честотата на въртене на двигателя може да се изменя плавно и в широк диапазон.

#### *Определяне на правилното свързване на четките и статорните намотки*

При липса на маркировка на изводите за правилното свързване на шестте извода от трите статорни фази и шестте извода от четките се постъпва по следния начин:

1. Установява се кои шест извода са изводи от четките и кои са изводите от статорните фази. Използува се веригопроверител. Тези шест извода, които дават свързана верига помежду си, са изводи от четките. Изводи от статорните фази са тези, които дават свързана верига по двойки.

2. Определят се двойките четки  $a_1-b_1$ ,  $a_2-b_2$  и  $a_3-b_3$ . За целта се свързва схемата от фиг. 5.1. Всяка статорна фаза се свързва накъсо с амперметър. Към три двойки изводи от четките се свързват три волтметъра. Двигателят се пуска да се върти на празен ход. Чрез придвижване на лоста за изместване на четките се проверява дали съществува положение, при което и трите волтметъра едновременно показват нула. Ако това е така, верните двойки четки са намерени. В противен случай се правят нови комбинации, докато бъдат установени верните двойки четки.

3. Определя се коя двойка четки към коя статорна фаза трябва да се свърже. Използува се схемата от фиг. 5.1. Волтметрите и амперметрите са от магнитоелектричната система с нула в средата. Лостът за изместване на четките се поставя в изходно положение (подсинхронна скорост). Пуска се двигателът да работи на празен ход. При това стрелките на волтметрите и амперметрите започват да се колебаят с честота  $f_2=sf_1$ . При празен ход на двигателя хълзгането  $s$  е малко, поради което вторичната честота  $f_2$  е малка ( $2-3$  Hz). Малко ще бъде и индуктивното съпротивление на разсейване на вторичната намотка  $sX_2$ . Ето защо вторичният ток  $I_2$  и вторичното е.д.н.  $sE_2$  практически са във фаза. Наблюдават се стрелките на амперметрите и волтметрите. Амперметърът и волтметърът, стрелките на които се колебаят в такт, показват статорната фаза и двойката четки, които трябва да се свържат помежду си. При това изводът от четка, свързан с плюса на волтметъра, трябва да се свърже с извода на статорна фаза, свързан с плюса на амперметъра.

### *Работни характеристики*

Представляват зависимостите на честотата на въртене  $n$ , па фактора на мощността  $\cos \varphi$  и на кофициента на полезно действие  $\eta$  от полезнния момент  $M_3$ , при неизменни напрежение  $U_1$ , честота  $f_1$  и положение на чекът:

$\mu = \cos \varphi$ ,  $\eta = f(M_2)$  при  $U_i = \text{const}$ ;  $f_1 = \text{const}$ ;  $2\gamma = \text{const}$ .

За създаване на работните характеристики се свързва схемата на фиг. 5.2.

Преди пускането на двигателя в ход съединяващите мостчета на токовите трансформатори трябва да се затворят накъсо, за да се предпазят измервателните апарати от пусковия ток. Освен това лостът за изместване на четките трябва да бъде поставен в изходно положение (подсинхронна скорост), при което пусковият ток е най-малък.

Пуска се двигателят в ход. Установява се такъв ток във възбудителната намотка на товарния генератор  $G$ , какъто е бил при тариранието му. Изменението на натоварването на генератора, а следователно и на изпитвания двигател се осъществява чрез товарния реостат  $R_t$ .

Характеристиките се снемат за три случая: I — режим на подсинхронна скорост; II — режим на синхронна скорост; III — режим на надсинхронна скорост. За всеки от случаите лостът за изместване на четките се поставя в съответното положение, което остава непроменено при изменение на натоварването от празен ход до номиналното. Опитните резултати се нанасят в табл. 5.1.

Таблица 5.1

| Отчитат се |       |          |          |            | Изчисляват се |       |                   |        |       |       |       |        |                |       |
|------------|-------|----------|----------|------------|---------------|-------|-------------------|--------|-------|-------|-------|--------|----------------|-------|
| $I_r$      | $U_r$ | $I_{1A}$ | $I_{1G}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$    | $k_W$ | $n$               | $P'_0$ | $I_1$ | $P_1$ | $P_2$ | $\eta$ | $\cos \varphi$ | $M_2$ |
| A          | V     | A        | A        | дел        | дел           | W/дел | min <sup>-1</sup> | W      | A     | W     | W     | %      | —              | N·m   |

Мощността  $P_0$  се отчита от кривата  $P_0 = f(n)$  за съответните честоти на въртене. Тя се построява по даниите от табулирането и има вида, показан на фиг. 2.10.

При изчисленията се използват формулите

$$I_1 = \frac{I_{1A} + I_{1C}}{2}; \quad P_1 = k_W(\alpha_1 \pm \alpha_2);$$

$$P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_r^2 r_a + I_r \Delta U_q ;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{1I_1}}; \quad M_2 = -\frac{60 P_2}{2\pi n}$$

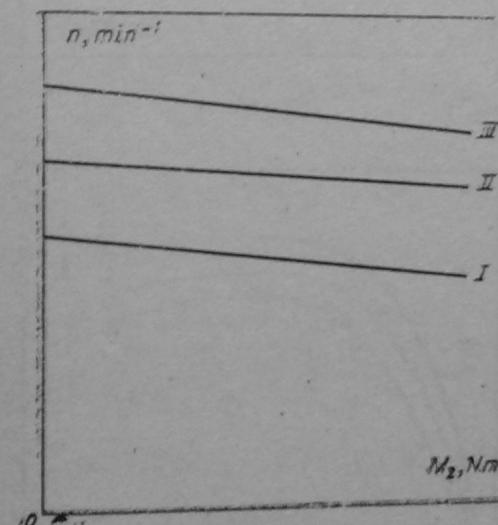
Приети са следните означения:

$U_1$  и  $I_1$  са първични напрежение и ток на двигателя  $D$ .

$P_1$  е консумирана мощност от  $D$ ,  
 $P_2$  — полезна мощност на  $H$ .

$r_2$  — полезна мощност на  $\Delta$ ;

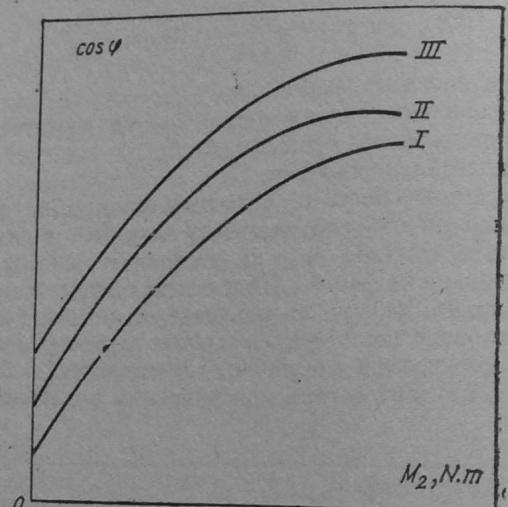
По данните от табл. 5.1 се построяват зависимостите  $n = f(M_2)$ , показани на фиг. 5.3. Те представляват практически прави линии. Вижда се, че при преминаване от празен ход към номинално натоварване честотата на въртене слабо се намалява, т. е. двигателят има търди механични характеристики. Намалението на честотата на въртене при подсинхронна и надсинхронна скоч



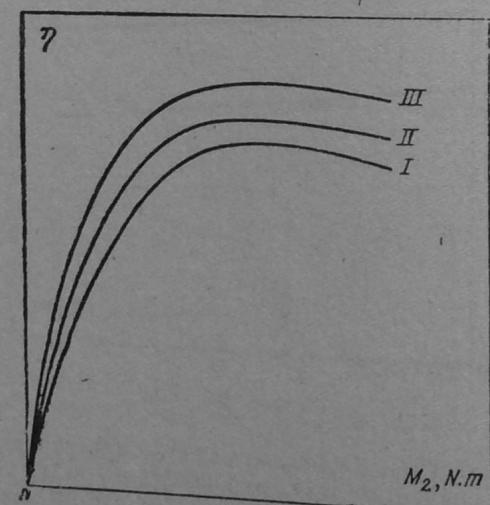
Фиг. 5.3

Рост (криви I и III) е по-голямо от това при синхронна скорост (крива II). Причината е тази, че в случаите I и III активното съпротивление и съответно електрическите загуби във вторичния контур са по-големи отколкото в случая II.

На фиг. 5.4 са показани зависимостите  $\cos \varphi = f(M_2)$ . При един и същи момент факторът на мощността е най-нисък при подсинхронна скорост (крива I) и най-висок при надсинхронна скорост (крива III). Ниският  $\cos \varphi$  в първия случай се дължи на обръст (крива III).



Фиг. 5.4



Фиг. 5.5

стоятелството, че поради голямото хлъзгане вторичният ток изостава на голям ъгъл от е.д.н. във вторичната верига, а освен това магнитодвижещите напрежения, създадени от вторичния ток при пропичането му през вторичната и през колекторната намотка, имат противоположни посоки, което води до увеличаване на разсейните магнитни потоци.

Кривите на кофициента на полезно действие  $\eta = f(M_2)$  са показани на фиг. 5.5. Кривите имат типичния за всички електрически машини вид. При един и същи момент кофициентът на полезно действие е най-висок при най-високата честота на въртене (крива III).

## 5.2. УПРАЖНЕНИЕ № 14

### УНИВЕРАСАЛЕН КОЛЕКТОРЕН ДВИГАТЕЛ

#### I. Програма на работа

##### A. Опитни изследвания

1. Снемане на работните характеристики на двигателя при захранване с постоянно напрежение.
2. Снемане на работните характеристики на двигателя при захранване с променливо напрежение.

##### B. Изчисления и построения

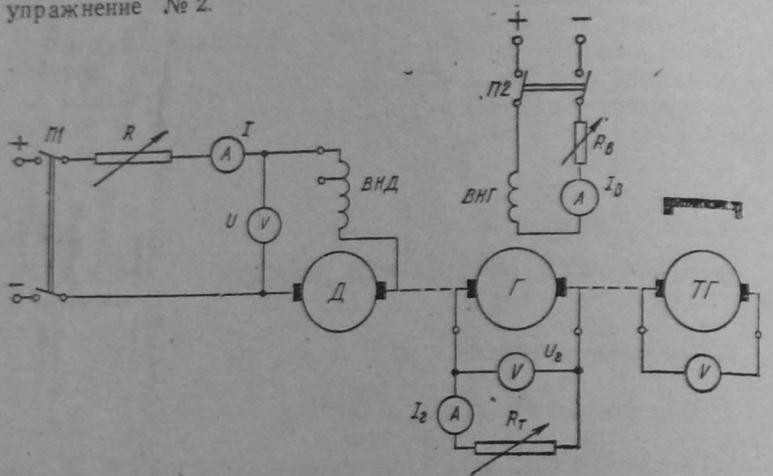
1. Построяване на тарировъчната крива  $P'_0=f(n)$  при  $I_b=const$ .
2. Построяване на работните характеристики  $n, I, P_2, \eta = f(M_2)$  за  $U=const$  при постояннотоково захранване.
3. Построяване на работните характеристики  $n, I, P_2, \eta, \cos \varphi = f(M_2)$  за  $U=const; f=const$  при променливотоково захранване.

#### II. Схема на опитната постановка

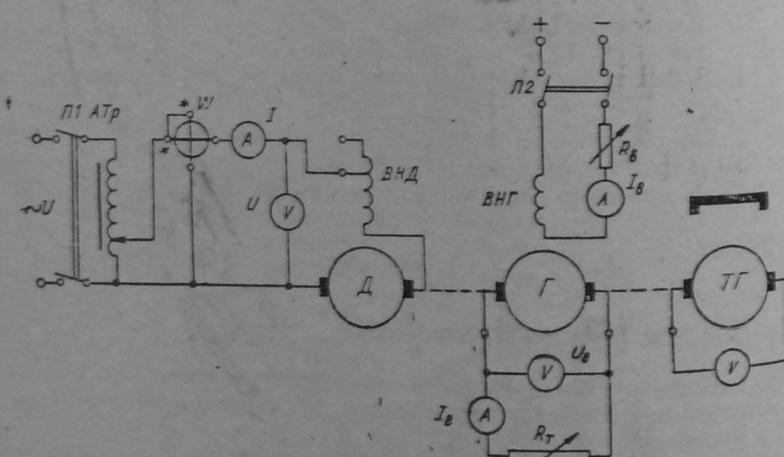
Схемата за снемане на работните характеристики при постояннотоково захранване е дадена на фиг. 5.6, а при променливотоково захранване — на фиг. 5.7.

При двата вида захранване изследваният универсален колекторен двигател  $D$  се натоварва с тариран генератор за постоянно

ток с независимо възбуждане  $\Gamma$ , за който е известна тарировъчната крива  $P'_0 = f(n)$  при  $I_b = \text{const}$ . Тук  $P'_0$  представлява сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на генератора. Пояснения относно тариранието на товарния генератор са дадени в упражнение № 2.



Фиг. 5.6



Фиг. 5.7

### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Универсалните колекторни двигатели работят както при захранване с постоянно напрежение, така и при захранване с еднофазно променливо напрежение. Произвеждат се със сравнително малки мощности ( $5 \div 600 \text{ W}$ ) и за различни честоти на въртене.

Конструктивно универсалните колекторни двигатели са подобни на двигателите за постоянен ток. Характерно е това, че при универсалния колекторен двигател не само роторният пакет, но и магнитната система на статора се набира от листова електротехническа стомана. Това е необходимо при захранване с променливо напрежение, при което възбудителният магнитен поток е променлив, за да се намалят загубите от вихрови токове.

Възбудителната намотка  $WHD$  е свързана винаги последователно с котвената, т. е. това са двигатели с последователно възбудждане (серийни). От възбудителната намотка са направени отклонения. Когато двигателят се захранва с променливо напрежение, броят на включените навивки от възбудителната намотка е по-малък отколкото в случая, когато двигателят се захранва с постоянно напрежение. Това се прави с цел честотите на въртење да бъдат приблизително еднакви при номинално натоварване за двата вида захранване.

И при двата вида захранване въртящият момент се създава от взаимодействието на възбудителния магнитен поток и тока в котвата. При захранване с променливо напрежение и потокът, и токът в котвата са променливи, но те са почти във фаза, т. е. единновременно сменят знаците си. Поради това въртящият момент, който е пропорционален на произведението на магнитния поток и тока в котвата, е едноосочен.

Смяната на посоката на въртене (реверсирането) на универсалния колекторен двигател се осъществява чрез превключване или на котвената, или на възбудителната намотка.

Важно предимство на универсалния колекторен двигател е то, че може да развива високи честоти на въртене, които могат плавно да се регулират.

Регулирането на честотата на въртене на двигателя може да стане по следните начини:

1. Чрез шунтиране на възбудителната намотка (включване на активно съпротивление паралелно на възбудителната намотка).
2. Чрез шунтиране на котвата (включване на активно съпротивление паралелно на котвата).
3. Чрез включване на допълнително съпротивление последователно на котвата.
4. Чрез изменение на захранващото напрежение.

При шунтиране на възбудителната намотка честотата на вър-

тено се регулира над номиналната. Начинът е лесноосъществим и твърде икономичен.

При шунтиране на котвата и при включване на съпротивление, последователно на котвата, честотата на въртене се регулира под номиналната. Тези начини за регулиране не са икономични поради значителните загуби в допълнителните съпротивления.

Много икономично и удобно е регулирането на честотата на въртене при захранване на двигателя от регулируем автотрансформатор. В този случай чрез изменение на напрежението, подавано на двигателя от автотрансформатора, честотата на въртене може да се регулира както под, така и над номиналната.

#### Работни характеристики при постояннонотоково захранване

Представляват зависимостите на честотата на въртене  $\pi$ , на тока на двигателя  $I$ , на полезната мощност  $P_2$  и на коефициента на полезно действие  $\eta$  от полезнния момент  $M_2$  при неизменно захранващо напрежение  $U$ :

$$\pi, I, P_2, \eta = f(M_2) \text{ при } U = \text{const.}$$

За снемане на характеристиките се свързва схемата на фиг. 5.6. Двигателите с последователно възбудждане не бива да остават на празен ход, тъй като честотата на въртене би достигнала недопустимо високи стойности. Затова най-напред се затваря прекъсвачът  $P2$  и чрез  $R_s$  се установява такъв ток във възбудителната намотка на генератора  $BHG$ , каквото е бил при тариранието му. Този ток се поддържа неизменен по време на опита. След това се затваря прекъсвачът  $P1$  и на излитаният двигател се подава номиналното напрежение.

Измерванията започват от определен минимален ток, например  $M_{min} = 0,25 M_n$ . Номиналният момент се изчислява по формулата

$$M_n = \frac{60 P_{2n}}{2\pi\pi_n},$$

където номиналната мощност  $P_{2n}$  и номиналната честота на въртене  $\pi_n$  се вземат от табелката на двигателя.

Измерванията завършват при определен максимален ток, например  $M_{max} = 2M_n$ .

Диапазонът на изменението на натоварването може да се контролира и по тока на двигателя. Измерванията трябва да започнат от натоварване, при което токът е от порядъка на  $0,5 I_n$ , и да завършват при  $I \approx 1,4 I_n$ .

Натоварването се изменя с реостата  $R_t$ , включен към котвата

на товарния генератор. Резултатите от измерването се нанасят в табл. 5.2.

Мощността  $P'_0$  се отчита от кривата  $P'_0 = f(\pi)$  за съответните честоти на въртене. Тя се построява по данните от тариранието и има вида, показан на фиг. 2.10.

Таблица 5.2

| $U = \text{const.}$ |       |       |                   |        | $I_B = \text{const.}$ |       |        |       |  |
|---------------------|-------|-------|-------------------|--------|-----------------------|-------|--------|-------|--|
| Отчитат се          |       |       |                   |        | Изчисляват се         |       |        |       |  |
| $I$                 | $I_r$ | $U_r$ | $\pi$             | $P'_0$ | $P_1$                 | $P_2$ | $\eta$ | $M_2$ |  |
| A                   | A     | V     | $\text{min}^{-1}$ | W      | W                     | W     | %      | N.m   |  |
|                     |       |       |                   |        |                       |       |        |       |  |

При изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = UI; \quad P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_r^2 r_a + I_r \Delta U_q;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \quad M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi\pi}.$$

Приети са следните означения:

$U_r$  и  $I_r$  — напрежение и ток на котвата на товарния генератор  $G$ ;

$r_a$  — съпротивление на котвената намотка на  $G$ ;

$\Delta U_q$  — спад на напрежение между четките и колектора на  $G$ .

По данните от табл. 5.2 се построяват работните характеристики на универсалния колекторен двигател при постояннонотоково захранване, показани на фиг. 5.8.

Механичната характеристика  $\pi = f(M_2)$  представлява хипербола. С увеличаване на натоварването честотата на въртене силно се намалява, т. е. изследваният двигател има мека механична характеристика.

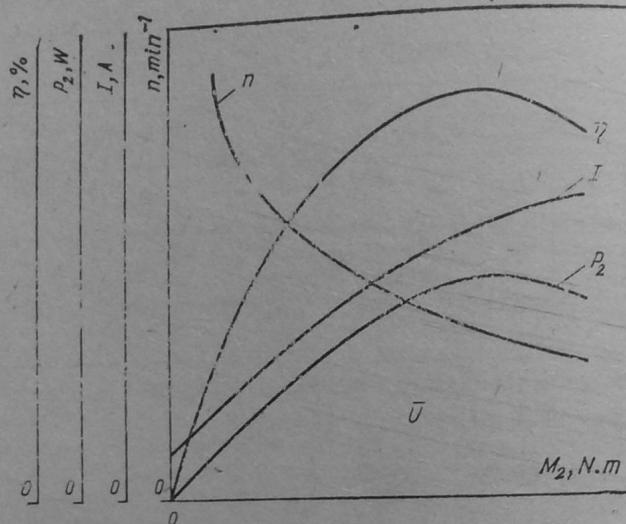
#### Работни характеристики при променливото токово захранване

Представляват зависимостите на честотата на въртене  $\pi$ , на тока на двигателя  $I$ , на полезната мощност  $P_2$ , на коефициента

на полезно действие  $\eta$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi$  от полезния момент  $M_2$  при неизменни захранващо напрежение  $U$  и честота  $f$ :

$$n, I, P_2, \eta, \cos \varphi = f(M_2) \text{ при } U=\text{const} \text{ и } f=\text{const}.$$

За снемане на характеристиките се свързва схемата на фиг. 5.7. Опитът се провежда посъщия начин както при постояннотоково захранване.



Фиг. 5.8

нотоково захранване. На изследвания двигател се подава номиналното напрежение чрез автотрансформатора  $ATr$ . Опитните резултати се нанасят в табл. 5.3.

При изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = k_W \alpha_W; P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_r^2 r_a + I_r \Delta U_u;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \cos \varphi = \frac{P_1}{U I}; M_2 = \frac{60 P_2}{2 \pi n}.$$

По данните от табл. 5.3 се построяват работните характеристики на универсалния колекторен двигател при променливотоково захранване, показани на фиг. 5.9.

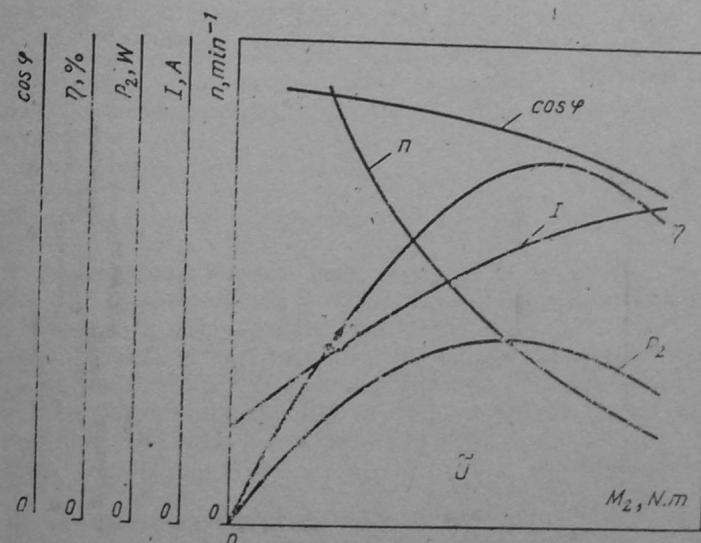
От сравнението на работата на универсалния колекторен двигател при постояннотоково и променливотоково захранване се установява следното:

1. При постояннотоково захранване електромагнитният момент е  $M = c_M \Phi I$ , а при променливотоково захранване  $M_\sim = c_M \Phi / \cos \varphi$ .

където  $\gamma$  е ъгълът на дефазиране между магнитния поток  $\Phi$  и котвения ток  $I$ . Потокът изостава от тока на ъгъл  $\gamma$  поради загубите в стоманата и реакцията на тока в комутиращата секция. Става ясно защо не се произвеждат еднофазни колекторни дви-

гица 5.3

| $U=\text{const}; f=\text{const}; I_b=\text{const}$ |            |       |       |       |                   |        |               |       |        |                |       |
|--|------------|-------|-------|-------|-------------------|--------|---------------|-------|--------|----------------|-------|
| Отчитат се   |            |       |       |       |                   |        | Изчисляват се |       |        |                |       |
| $I$  | $\alpha_W$ | $k_W$ | $I_r$ | $U_r$ | $n$               | $P'_0$ | $P_1$         | $P_2$ | $\eta$ | $\cos \varphi$ | $M_2$ |
| A  | дел        | W/дел | A     | V     | min <sup>-1</sup> | W      | W             | W     | %      | —              | N.m   |
|  |            |       |       |       |                   |        |               |       |        |                |       |



Фиг. 5.9

гатели за променлив ток с паралелно възбудждане. При такъв двигател ъгълът на дефазиране между възбудителния поток и тока в котвата ще бъде голям и следователно въртящият момент ще бъде много малък.

2. Броят на включените навивки на възбудителната намотка при променливотоково захранване е по-малък отколкото при захранване с постоянно напрежение. При това за номиналното захранване честотата на въртене при двата вида захранване е приблизително еднаква.

3. При един и същи момент  $M_2$  токът на двигателя при захранване с променливо напрежение е по-голям отколкото при захранване с постоянно напрежение. Това е така, защото при променливотоково захранване броят на навивките на възбудителната намотка е по-малък.

4. При един и същи момент  $M_2$  коефициентът на полезно действие при захранване с променливо напрежение е по-нисък от този при захранване с постоянно напрежение. Това е така, защото при променливотоково захранване загубите са по-големи. Още една страна, по-големи са електрическите загуби в намотките поради по-големия ток. От друга страна, по-големи са и загубите в стоманата поради това, че се добавят загубите в магнитната система на статора.

5. Условията на комутация при променливотоково захранване са по-тежки. Причина за това е индуктирането на трансформаторно е.д.н. в комутиращата секция от променливия възбудителен магнитен поток.

## ГЛАВА VI

# ИЗПИТВАНЕ НА СИНХРОННИ МАШИНИ

## 6.1. УПРАЖНЕНИЕ № 15

### СИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР. СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

#### I. Програма на работа

##### A. Опитни изследвания

1. Условия за синхронизиране и включване на синхронен генератор в паралел с мрежата.
2. Регулиране на активната и реактивната мощност на синхронен генератор при паралелна работа с мрежа с безкрайно голема мощност. Снемане на семейство V-образни характеристики.
3. Пускане в ход на синхронен двигател.
4. Снемане на работните характеристики на синхронен двигател.

##### B. Изчисления и построения

1. Изчисляване на активната мощност  $P$  и фактора на мощността  $\cos \phi$  за семейство V-образни характеристики при работа на синхронната машина като генератор.
2. Построяване на семейство V-образни характеристики  $I = f(I_b)$  при  $P = \text{const}$ ;  $U = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ .
3. Построяване на кривите на фактора на мощността  $\cos \phi = f(I_b)$  при  $P = \text{const}$ ;  $U = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ .

#### II. Схема на опитната постановка

На фиг. 6.1 е показана схемата на опитната постановка за изпитване на синхронна машина  $CM$ . Синхронната машина е куплирана механически с постояннотокова машина  $PTM$ . Възбудителната намотка на  $CM$  се захранва с постоянно напрежение  $U_b$  от регулируем изправител  $I_b$ , с който може да се регулира възбудителният ток  $I_s$ . Котвената намотка е свързана в звезда с

изведена нула. Контролирането на условията за паралелна работа се осъществява от синхронизация колонка *CK*, която включва три волтметра и два честотомера.

Постояннотоковата машина е с мощност, по-голяма от тази

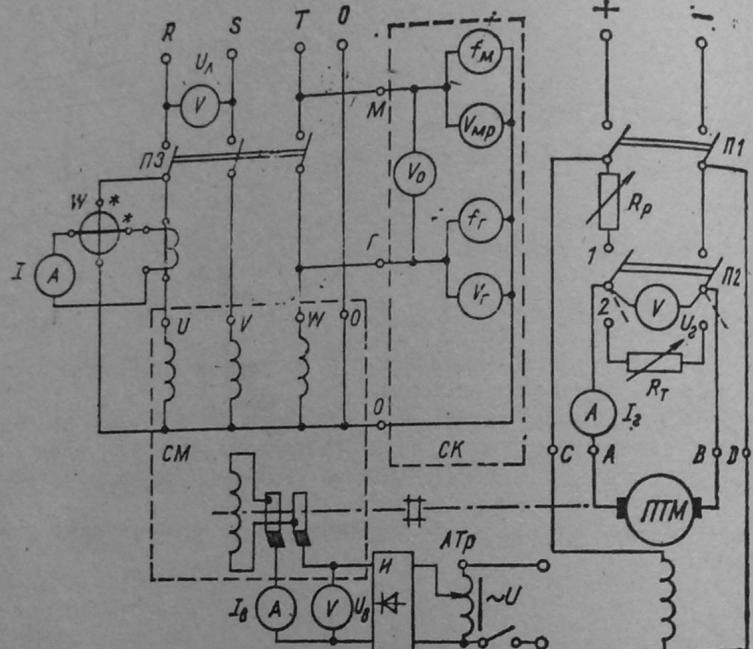


FIG. 6.1

на синхронната машина. Възбудителната ѝ намотка е свързана към напрежение с постоянна стойност. По този начин се осигурява постоянна стойност на възбудителния ток на  $PTM$ , при който предварително е извършено тариране на  $PTM$ , т. е. определяне на загубите в стоманата и на механичните загуби на  $PTM$  при постоянна честота на въртене  $n$ , равна на номиналната честота на въртене на синхронната машина, отбелязана на табелката. Котвата на  $PTM$  е свързана към превключвател  $P2$ . При положение 1 на този превключвател и включен прекъсвач  $P1$  котвата се захранва от постоянно напрежение и  $PTM$  работи като двигател. Към котвата е включен реостат  $R_p$ , който се използва за пускане и за регулиране на момента на  $PTM$ . При положение 2 на превключвател  $P2$  котвената намотка на  $PTM$  се включва към товарен реостат  $R_t$  и  $PTM$  работи като генератор с независимо възбуждане.

III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Синхронната машина е въртяща се електрическа машина, при която честотата на въртене на ротора  $n$  и честотата на въртящото се магнитно поле  $n_1$  са равни, т. е.

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{\rho}, \text{ min}^{-1},$$

където  $f_1$  е честотата на индуктираното в котвата е. д. н.;  
 $p$  — броят на двойките полюси.

Синхронната машина се състои от две основни части — статор (котва) с еднофазна или трифазна котвена намотка и ротор (индуктор) с възбудителна намотка. Тя е обратима машина, т. е. може да работи и като генератор, и като двигател.

Синхронният генератор може да работи самостоятелно или в паралел с други синхронни генератори.

Синхронизиране и включване на синхронен генератор в паралел с мрежата. За да се включи един синхронен генератор в паралел с мрежата, трябва да бъдат изпълнени следните условия:

- Напреженията на генератора и на мрежата да са равни, т. е.  $U_g = U_{mp}$ .
  - Честотата на генератора да бъде равна на честотата на мрежата, т. е.  $f_g = f_{mp}$ .
  - Генераторът и мрежата да имат еднаква поредност на фазите.
  - Напреженията на генератора и на мрежата да бъдат във фаза.

5. Формите на кривите на напреженията да са еднакви.  
Изпълнението на горните условия се нарича синхронизиране на генератора.

Последното условие събикновено не се проверява, защото напреженията са практическа синусоидални.

Синхронизирането и включването на генератора в паралел с мрежата става в следния ред:

Постоянноокрист, заместял со пуска в ход с гидравлическим

1. Постояннотоковият двигател се пуска в ход с включване на прекъсвача  $P1$ , при което превключвателят  $P2$  е в положение 1, а реостатът  $R_p$  — на максимална стойност по съпротивление. Постепенно синхронният генератор се развърта с намаляване на стойността на  $R_p$ . Включва се изправителят  $H$  и се подава възбудителен ток  $I_b$  на генератора.

2. Условието за равенство на напреженията се проверява с волтметрите  $V_r$  и  $V_{mp}$ . Изпълнението на условието се осъществява чрез регулиране на възбудителния ток на синхронния генератор.

3. Условието за еднаквост на честотите се проверява чрез честотомерите  $f_r$  и  $f_{mp}$ , а изпълнението му се осъществява посредством регулиране на честотата на въртене с реостата  $R_p$ .

4. Еднаквата поредност на фазите се проверява с уред, наречен фазоуказател, който работи на принципа на трифазния аシンхронен двигател. Включението към генератора и мрежата фазоуказател при една и съща поредност на фазите трябва да се върти в една и съща посока. Ако условието не е изпълнено, се разменят две от фазите.

5. Условието двете напрежения да бъдат във фаза се проверява с нулев волтметър  $V_0$ , включен към една фаза от двете страни на прекъсвача  $P3$ . Показанията на  $V_0$  се изменят периодично от нула до удвоената стойност на фазовото напрежение. Честотата на това изменение е равна на разликата от честотите на мрежата и на генератора. Необходимо е тази разлика да бъде сведена до минимум, за да се осъществи сигурно и спокойно включване в паралел.

При изпълнени и проверени всички условия включването се осъществява с прекъсвача  $P3$  в момент, когато показанието на нулевия волтметър преминава през нулата.

След включването в паралел синхронният генератор работи на празен ход и консумира минимална активна енергия за покриване на собствените си загуби, поради което токът в котвената намотка има минимална стойност.

Регулиране на активната и реактивната мощност. V-образни характеристики. При работа на синхронен генератор в паралел с мрежа с безкрайна мощност може да се приеме, че напрежението и честотата остават постоянни.

Регулирането на активната мощност може да се осъществи само с промяна на момента на задвижващия двигател, което в случая се извършва с промяна на стойността на съпротивлението на реостата  $R_p$ .

Регулирането на реактивната мощност може да се осъществи само с промяна на възбудителния ток  $I_b$  на синхронния генератор посредством регулиране на възбудителното напрежение  $U_b$  от регулируемия изправител  $I$ .

V-образната характеристика представлява зависимостта  $I = f(I_b)$  при  $U = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$  и  $M = \text{const}$ . При различни по стойност постоянни моменти могат да се снемат семейство характеристики. Наименоването на характеристиките се дава от вид им, който е подобен на латинската буква  $V$ .

Характеристиките се снемат по схемата на фиг. 6.1. Възбудителният ток на синхронния генератор се изменя в такива граници, че котвеният ток да не надвиши  $1,2 I_n$ . Задължително трябва да бъде направено измерване за минималния котвен ток  $I_{min}$ . Резултатите се нанасят в табл. 6.1.

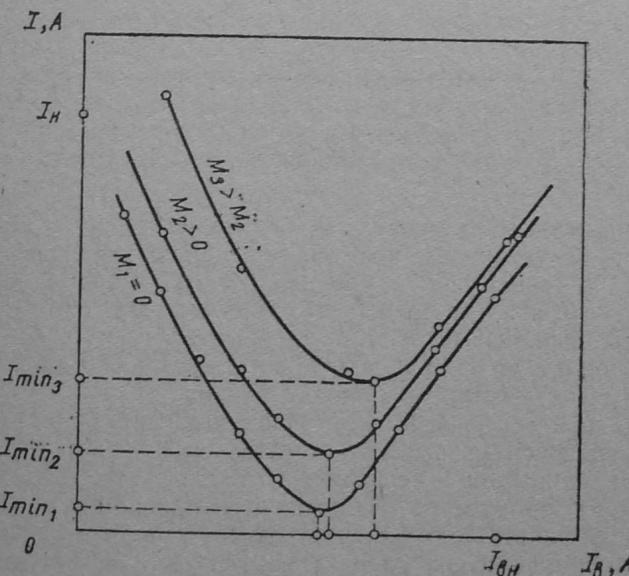
Таблица 6.1

| Отчитат се |     |       |     | Изчисляват се |                |
|------------|-----|-------|-----|---------------|----------------|
| $U_a$      | $f$ | $I_b$ | $I$ | $P$           | $\cos \varphi$ |
| V          | Hz  | A     | A   | W             | —              |

При изчисленията се използват формулите

$$P = \sqrt{3} U_a I_{min}; \cos \varphi = \frac{I_{min}}{I}.$$

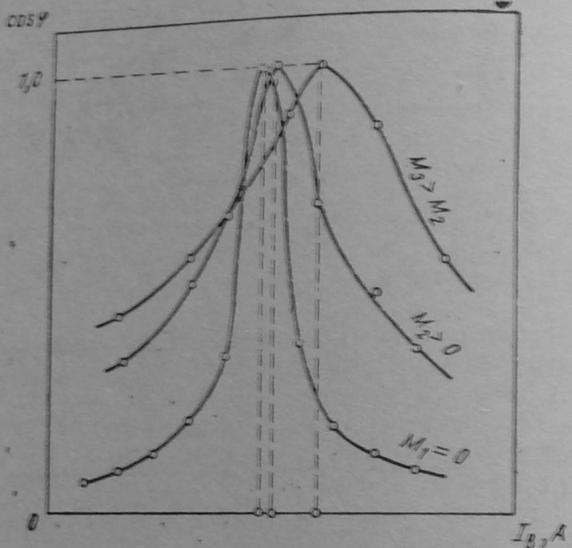
От резултатите в табл. 6.1 се построяват семейство V-образни характеристики (фиг. 6.2) и кривите на фактора на мощността  $\cos \varphi = f(I_b)$  (фиг. 6.3).



Фиг. 6.2

При снемане на дадена V-образна характеристика изменението на котвения ток  $I$  е засчета само на неговата реактивна съставка, докато активната съставка е постоянна и равна на минималния

котвен ток  $I_{\min}$ , за която точка факторът на мощността  $\cos \varphi$  е равен на единица. Надясно от тази точка при недовъзбуден генератор той се натоварва с капацитетен ток, а надясно при превъзбуден генератор реактивната съставка има индуктивен характер.



Фиг. 6.3

При нарастване на момента възбудителният ток, за който  $\cos \varphi$  е единица, се увеличава, което се обяснява с увеличаване на общия пад в генератора. С увеличаване на момента нараства и активната съставка на тока, което се обяснява с нарастването на отдаданата активна мощност от генератора.

**Пускане в ход на синхронен двигател.** Може да се осъществи по няколко начина.

1. **Пускане със спомагателен двигател.** Синхронната машина се развърта от спомагателния двигател, изпълняват се условията за паралелна работа и се включва към мрежата. След това спомагателният двигател се изключва и синхронната машина продължава да работи като двигател. Именно по този начин се осъществява пускането на схемата на фиг. 6.1. Изключването на спомагателния двигател става с превключвателя  $P2$ .

2. **Честотно пускане.** За целта е необходим източник с регулируемо напрежение и честота, така че отношението  $\frac{U}{f}$  да се запазва постоянно. Процесът на пускането започва с ниско

напрежение и честота, които с развъртането на двигателя постепенно се повишават до номиналните си стойности.

3. **Асинхронно пускане.** Развъртането на двигателя се осъществява от асинхронен момент, който се създава от взаимодействие

Таблица 6.2

| Отчитат се |       |       |     |                   |       |       | Изчисляват се |       |       |       |        |       |                |
|------------|-------|-------|-----|-------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|----------------|
| $U_a$      | $I_b$ | $U_b$ | $I$ | $n$               | $I_r$ | $U_r$ | $\alpha_w$    | $k_w$ | $P_1$ | $P_2$ | $\eta$ | $M_2$ | $\cos \varphi$ |
| V          | A     | V     | A   | min <sup>-1</sup> | A     | V     | дел           | W/дел | W     | W     | %      | N·m   | —              |
| —          | —     | —     | —   | —                 | —     | —     | —             | —     | —     | —     | —      | —     | —              |

ствието на въртящото се магнитно поле, възбудено от котвата, и токове в ротора, възбудени от същото поле. Този момент довежда ротора до честота, близка до честотата на въртящото се магнитно поле (около 95 %). Тогава се подава номинално възбуждане и двигателят влиза в синхронизъм.

**Работни характеристики на синхронен двигател.** Това са зависимостите на консумираната мощност  $P_1$ , статорният ток  $I$ , честотата на въртене  $n$ , к. п. д.  $\eta$ , полезния момент  $M_2$  и фактора на мощността  $\cos \varphi$  от полезната мощност  $P_2$  при постоянни стойности на напрежението  $U_a$ , честотата  $f$  и възбудителният ток  $I_b$  на синхронния двигател:

$$P_1, I, n, \eta, \cos \varphi, M_2 = f(P_2) \text{ при } U_a = \text{const}; f = \text{const} \text{ и } I_b = \text{const}.$$

Стойността на постоянното възбудителен ток се избира такава, че при празен ход статорният ток да бъде минимален, т. е. опитът да започне при  $\cos \varphi$ , равен на единица (при двигател също могат да се снемат V-образни характеристики).

Снемането на характеристиките се осъществява по схемата на фиг. 6.1 за положение 2 на превключвателя  $P2$ . Синхронният двигател се натоварва с тарираната  $PTM$ , която работи като генератор, и отдава мощността си в товарния реостат  $R_t$ .

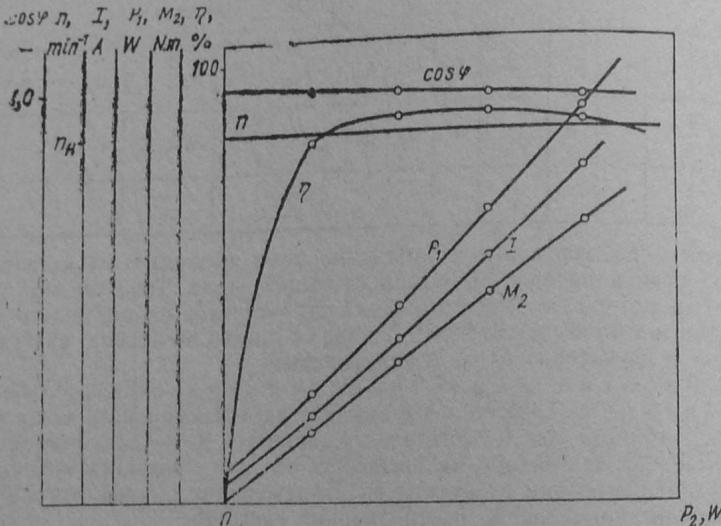
Опитът започва от празен ход и завършва до стойност на статорния ток 1,2  $I_b$ . Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 6.2.

При изчисленията се използват формулите

$$P_1 = 3\alpha_w k_w + U_b I_b; P_2 = U_r I_r + I_r^2 r_2 + P_0 + I_r \Delta U_r;$$

$$M_2 = \frac{50 P_2}{2\pi n}; \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100; \cos \varphi = \frac{3\alpha_w k_w}{\sqrt{3} U_a I}.$$

Приети са следните означения:  
 $U_r$  е напрежението на котвата на товарния генератор;  
 $I_r$  — котвеният ток на товарния генератор;  
 $r_a$  — съпротивлението на котвата на генератора;  
 $P_0$  са механичните загуби и загубите в стоманата на генератора;  
 $\Delta U$  е падът на напрежение в четките на генератора.



Фиг. 6.4

От получените резултати в табл. 6.2 се построяват работните характеристики на синхронния двигател (фиг. 6.4).

Честотата на въртене  $n$  е постоянна и определена от честотата на захранващата мрежа и броя на двойките полюси.

Тъй като полезният момент  $M_2$  е пропорционален на полезната мощност  $P_2$  при постоянна честота на въртене, зависимостта  $M_2 = f(P_2)$  представлява права линия, която започва от началото на координатната система.

Кофициентът на полезно действие  $\eta$  има типичния за всички електрически машини вид. Той достига максимална стойност при това натоварване, при което променливите загуби (електрическите) са равни на постоянните загуби (загубите в стоманата и механичните загуби). След максимума к. п. д. намалява поради бързо нарастване на електрическите загуби, които зависят от квадрата на статорния ток.

Консумираната мощност  $P_1$  започва от минимална стойност при празен ход и нараства в почти линейна зависимост със за кривяване нагоре поради увеличаване на електрическите загуби.

Кривата на фактора на мощността  $\cos \phi$  се изменя съвсем слабо с натоварването, като постепенно намалява, което се дължи на увеличаване на общия пад в машината.

## 6.2. УПРАЖНЕНИЕ № 16

### СИНХРОННИ МИКРОДВИГАТЕЛИ

#### I. Програма на работа

##### A. Опитни изследвания

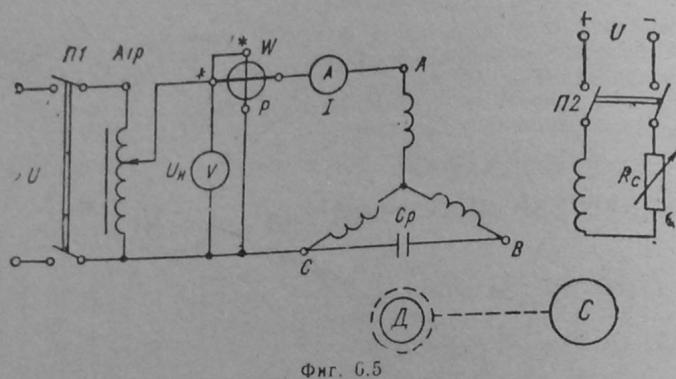
1. Определяне на пусковите параметри.
2. Определяне на изходящия момент.
3. Определяне на входящия момент.
4. Снемане на работните характеристики.

##### B. Изчисления и построения

1. Изчисляване на номиналния момент.
2. Изчисляване на кратностите на пусковите параметри.
3. Изчисляване на кратността на изходящия момент.
4. Изчисляване на кратността на входящия момент.
5. Построяване на работните характеристики.

#### II. Схема на опитната постановка

Обект на изпитване са два типа синхронни микродвигатели — реактивен и хистерезисен. Изпитването и на двата двигателя се провежда по схемата на фиг. 6.5. Двигателите се захранват с номинално напрежение  $U_n$  от регулируем автотрансформатор  $ATr$ . Изпитваните двигатели са с трифазна статорна намотка, свързана в звезда, и включването им към еднофазно променливо напрежение се осъществява с дефазиращ елемент — кондензатор  $C_p$ . Съпротивителният момент се създава от електромагнитна спирачка  $C$ , която е тарирана предварително и има определена константа на скалата. За контрол на честотата на въртене  $n$  при излизане и влизане в синхронизъм може да се използува стробоскопичен тахометър или показанието на амперметъра. При излизане от синхронизъм токът  $I$  нараства рязко със скок и обратно — при влизане в синхронизъм намалява по същия начин.



Фиг. 6.5

### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Синхронните микродвигатели са двигатели с малка мощност, които обикновено нямат възбудителна намотка. Моментът при синхронна честота на въртене се създава от взаимодействието на въртящото се магнитно поле, възбудено от статорната намотка, с ротора. Роторът има няколко разновидности, които определят и наименованието на отделните типове синхронни микродвигатели: двигател с постоянни магнити — в ротора има постоянни магнити; реактивен двигател — роторът е с различни магнитни проводимости по надлъжната и напречната ос; хистерезисен двигател — роторът е изработен от магнитностърд материал и се използва явлението хистерезис.

При всички разгледани типове двигатели пусковият момент е асинхронен и се създава от въртящото се магнитно поле и възбудените от него токове в кафезна роторна намотка или в стоманата на ротора.

Основните елементи в конструкцията на двигателите са два — статор и ротор. Статорът се състои от статорен пакет с щанцовани канали и двуфазна или трифазна намотка. Роторът има различно изпълнение според различията в начина на създаване на момента при синхронна честота на въртене.

Опитните изследвания, изчисленията и построенията се повтарят и за двета типа изследвани двигатели.

**Пускови параметри.** Това са стойностите на пусковия момент  $M_n$ , на пусковия ток  $I_n$  и на кратностите им по отношение на номиналните стойности на момента и тока  $M_h$  и  $I_h$ .

Определянето на пусковите параметри става по схемата на фиг. 6.5. Роторът на двигателя се застопорява към електромаг-

нитната спирачка  $C$ . На двигателя се подава номинално напрежение и се отчитат стойностите на момента и тока, които се записват в табл. 6.3.

За изчисленията се използват формулите:

$$M_n = \frac{60 P_{2n}}{2\pi n_h}; \quad m_n = \frac{M_n}{M_h}; \quad i_n = \frac{I_n}{I_h},$$

където  $P_{2n}$  е номиналната полезна мощност;  
 $I_n$  — номиналният ток;

$n_h$  — номиналната честота на въртене.

**Изходящ момент.** Това е най-големият съпротивителен момент, приложен на вала на двигателя, при който той все още е в синхронизъм. Ако се надвиши изходящият момент  $M_{изх}$ , двигателят излиза от синхронизъм и продължава да работи в асинхронен режим.

Определянето на  $M_{изх}$  става по схемата на фиг. 6.5 за номинално напрежение. Включва се електромагнитната спирачка  $C$  и с намаляване на съпротивлението  $R_c$  двигателят се натоварва до излизане от синхронизъм. Измерената стойност на  $M_{изх}$  се записва в табл. 6.3, а кратността на изходящия момент се изчислява по формулата

$$m_{изх} = \frac{M_{изх}}{M_h}$$

и също се записва в табл. 6.3.

**Натоварването.** Това е моментът при намаляване на натоварването, при който двигателят отново влиза в синхронизъм.

Използува се схемата на фиг. 6.5. След като двигателят е излязъл от синхронизъм, натоварването постепенно се намалява с увеличаване на съпротивлението  $R_c$  до влизането му в синхронизъм. Измерената стойност на  $M_{вх}$  и изчислената стойност на

Таблица 6.3

| Отчитат се |       |           |          |       | Изчисляват се |       |           |          |       |
|------------|-------|-----------|----------|-------|---------------|-------|-----------|----------|-------|
| $M_n$      | $I_n$ | $M_{изх}$ | $M_{вх}$ | $I_h$ | $M_h$         | $m_n$ | $m_{изх}$ | $m_{вх}$ | $i_h$ |
| N.m        | A     | N.m       | N.m      | A     | N.m           | —     | —         | —        | —     |
|            |       |           |          |       |               |       |           |          |       |
|            |       |           |          |       |               |       |           |          |       |
|            |       |           |          |       |               |       |           |          |       |

кратността  $m_{\max}$  се записват в табл. 6.3. Изчислението на  $m_{\max}$  става по формулата

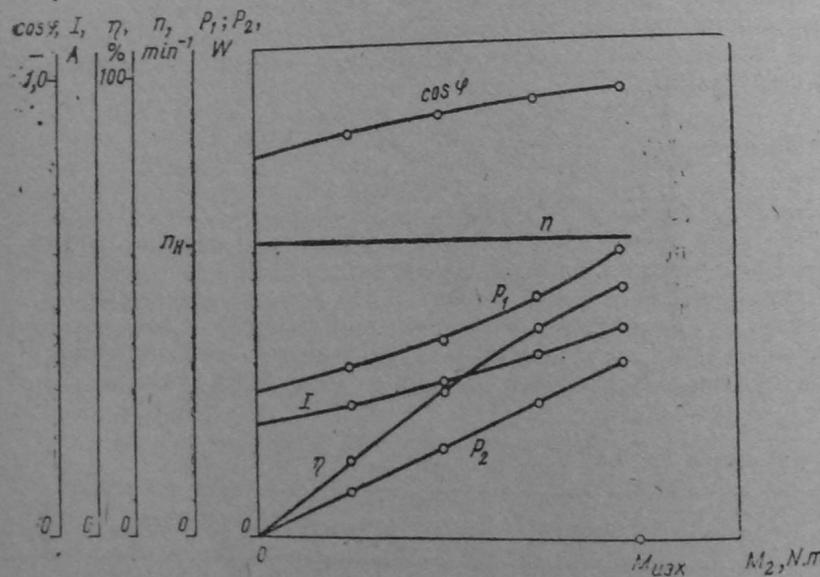
$$m_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_n}.$$

Работни характеристики. Това са зависимости от тока  $I$ , на консумираната мощност  $P_1$ , на полезната мощност  $P_2$ , на коефициента на полезно действие  $\eta$  и на фактора на мощността  $\cos \varphi$  от полезнния момент  $M_2$  при постоянни стойности на напрежението  $U$  и честотата  $f$ :

$$I, P_1, P_2, \eta, \cos \varphi = f(M_2)$$

при  $U = U_n = \text{const}$  и  $f = f_n = \text{const}$ .

Използува се опитната постановка на фиг. 6.5. Двигателят се захранва с номинално напрежение и номинална честота. Снемането на характеристиките започва от празен ход при  $M_2 = 0$ , т. е. при изключена спирачка  $C$ . Включва се спирачката и с регулира-



Фиг. 6.6

не на реостата  $R_c$  моментът се увеличава до достигане на стойност  $0,95 M_{\max}$ . Резултатите се записват в табл. 6.4.

За изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = \alpha_W k_W; \quad P_2 = \frac{2\pi n M_2}{60};$$

Таблица 6.4

| Отчитат се |       |                   |            |       | Изчисляват се |       |       |        |                |
|------------|-------|-------------------|------------|-------|---------------|-------|-------|--------|----------------|
| $U$        | $M_2$ | $n$               | $\alpha_W$ | $k_W$ | $I$           | $P_1$ | $P_2$ | $\eta$ | $\cos \varphi$ |
| V          | N . m | min <sup>-1</sup> | дел        | W/дел | A             | W     | W     | %      | —              |
|            |       |                   |            |       |               |       |       |        |                |

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100; \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{UI}.$$

От резултатите в табл. 6.4 се построяват на отделни координатни системи работните характеристики (фиг. 6.6) на двата изследвани двигателя.

Анализът на вида на работните характеристики е подобен на този при синхронен двигател (упражнение № 15). Значително по-нисък е максималният к. п. д. — от порядъка на 30÷60%. При такива стойности на натоварването тези двигатели имат много нисък к. п. д. и  $\cos \varphi$ , тъй като токът се изменя незначително в широк диапазон на натоварване от празен ход до излизане от синхронизъм.

Сравнително големите стойности на  $\cos \varphi$  на изпитваните двигатели се дължат на включения дефазиращ кондензатор.

## ГЛАВА VII ИЗПИТВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

### 7.1. УПРАЖНЕНИЕ № 17

#### ЕЛЕКТРОМАГНИТИ ЗА ПОСТОЯННО И ЗА ПРОМЕНЛИВ О НАПРЕЖЕНИЕ

##### I. Програма на работа

###### A. Опитни изследвания

1. Товарни характеристики на електромагнит за постоянно напрежение.

2. Товарни характеристики на електромагнит за променливо напрежение.

###### B. Изчисления и построения

1. Построяване на семейства товарни характеристики за двата типа електромагнити.

2. Построяване на електромеханични характеристики за двата типа електромагнити.

3. Изчисляване и построяване на характеристиките на условната полезна работа за двата типа електромагнити.

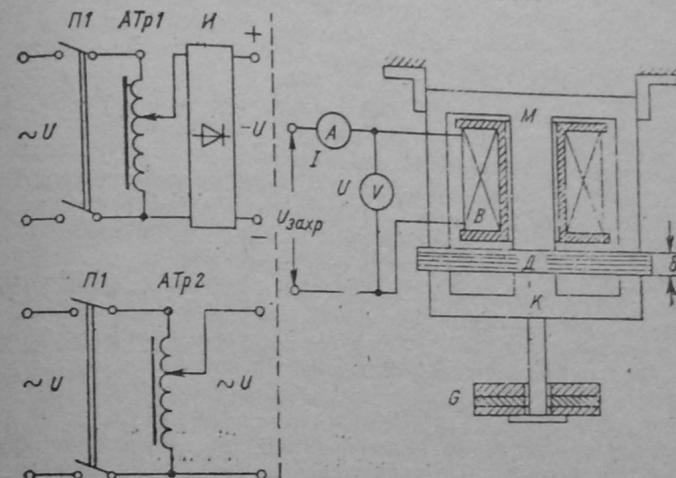
##### II. Схема на опитната постановка

На фиг. 7.1 е показана опитната постановка за изпитване на електромагнити. На изпитване се подлагат два типа електромагнити — за постоянно и за променливо напрежение.

Захранването на възбудителната намотка *B* на електромагнита за постоянно напрежение се осъществява от достатъчно мощен регулируем изправител *I* с регулиране на напрежението на входа на изправителя от автотрансформатор *ATp1*.

Захранването на електромагнита за променливо напрежение се осъществява от регулируем автотрансформатор *ATp2* с достатъчна мощност.

За изследване може да се използува електромагнитна система с линейно преместване на котвата *K*. Определен брой дистанционни пластини *D* определят необходимата въздушна дължина *d* между котвата и неподвижния магнитопровод *M*.



Фиг. 7.1

Електромагнитната сила  $F_{em}$  може да се измери с тежести *G* с определено тегло, които се закрепват към котвата. Към теглото на тежестите трябва да се добави и теглото на котвата. Силата се измерва при уравновесяването ѝ с тегло на тежестите и котвата в момента на отлепването на котвата.

##### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Електромагнитът е устройство, при което се използува енергията на възбудено от намотка магнитно поле за въздействие върху подвижен елемент вследствие на възникващата електромагнитна сила, т. е. налице е електромеханичен преобразувател на електрически сигнал в механично преместване.

Електромагнитите имат няколко основни елемента: неподвижен магнитопровод; възбудителна намотка, която е закрепена на неподвижния магнитопровод, и подвижен елемент (котва), изработен от феромагнитен материал, който осъществява преместването, т. е. хода на електромагнита.

Захранването на възбудителната намотка може да се осъщест-

ен от постояннотоков или променливотоков източник, а включването ѝ може да стане в последователна или паралелна верига. Начинът на включване и захранване определя свойствата на електромагнита и неговите характеристики. Електромагнитите се делят на две основни групи: електромагнити с постоянен магнитоизбудителен ток, при който токът през намотката не зависи от положението на катвата, и електромагнити с постоянно потокосцепление.

Към първия тип спадат електромагнитите за постоянно изпражнение и за постоянно променлив ток, а към втория — електромагнитите за променливо изпражнение.

Характерни показатели при изпитването на електромагнитите са изпражнението  $U$ , токът  $I$ , въздушната междина  $\delta$  и електромагнитната сила  $F_{em}$ . Зависимостите между тези показатели дават основните характеристики на електромагнита.

I. Товарна характеристика. Това е зависимостта на електромагнитната сила  $F_{em}$  от изпражнението  $U$ , приложено към електромагнита, или от тока  $I$ , който тече през възбудителната намотка при постоянна въздушна междина  $\delta$ , т. е.

$$F_{em} = f(U; I) \text{ при } \delta = \text{const.}$$

Снемат се статичните характеристики при определено положение на катвата и при пренебрегване на преходните процеси.

Снемането на характеристиките започва при изпражнение или ток, равни на нула, и установена с вложки въздушна междина. На отлепената катва се очаква минимална тежест. Постепенно се увеличава изпражнението или токът до момента на привличане на катвата, когато се прави и измерването. Задават се повишаващи се стойности на тежестта и за всяка от тях се прави измерване по подобен начин. Снемането на характеристиката завършва при достигане на стойности на изпражнението или тока, които са допустими от постановката.

При електромагнити за променливо изпражнение силата  $F_{em}$  се изменя между минимум и максимум за една и съща ефективна стойност на изпражнението поради особеностите на променливия магнитен поток. По изложените причини измерената сила за този електромагнит е средната стойност на пулсиращата електромагнитна сила.

Характеристиките се снемат за различни въздушни междини, които се задават от нула до максималната въздушна междина, определена от възможностите на постановката.

Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 7.1.

От резултатите в табл. 7.1 се построява семейство товарни характеристики (фиг. 7.2).

При ненасилена магнитна система характеристиките зависят почти в квадрат от стойностите на изпражнението или тока.

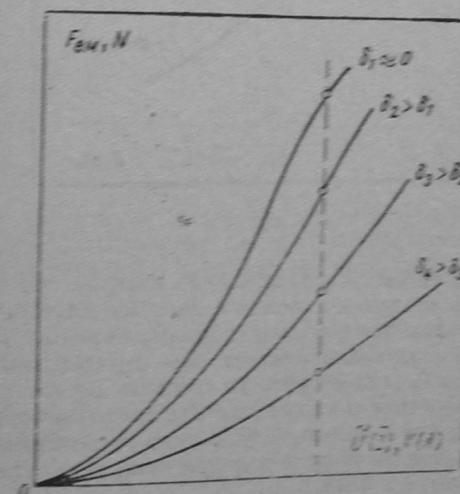
2. Електромеханична характеристика. Тя дава зависимостта на електромагнитната сила  $F_{em}$  от въздушната междина  $\delta$  при постоянна стойност на изпражнението  $U$ , респ.

$$F_{em} = f(\delta) \text{ при } U = \text{const} \text{ или } I = \text{const.}$$

Таблица 7.1

| $\delta = x$ | Отчитат се |     |          |          | Изчисляват се         |  |
|--------------|------------|-----|----------|----------|-----------------------|--|
|              | $U$        | $I$ | $F_{em}$ | $F_{em}$ | $\delta_{\text{ном}}$ |  |
| mm           | V          | A   | N        | —        | mJ                    |  |
|              |            |     |          |          |                       |  |

Тази характеристика може да се смене опитно, но може да се построи и по графичен начин, като се използва семейство товарни характеристики.



Фиг. 7.2

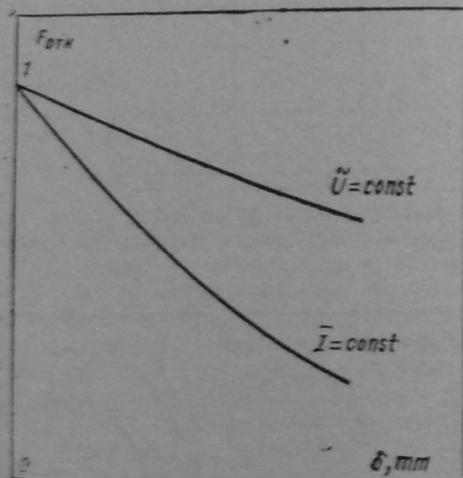
Получената електромагнитна характеристика е също статична. Тя се построява за номиналните стойности на изпражнението, съответно на тока на електромагнитите.

За сразиване на силите на двета електромагнита те се пресмятат в относителни единици по отношение на максималната сила  $F_{em\ max}$  за въздушна междина  $\delta$ , равна на nulla, т. е.

$$F_{em} = \frac{F_{em}}{F_{em\ max}}$$

Изчислените стойности  $F_{em}$  се нанасят в табл. 7.1 и по резултатите се построяват характеристиките (фиг. 7.3).

Сравнението показва по-силно изразена зависимост на силата от въздушната междина при електромагнита за постоянно напрежение.



Фиг. 7.3

Електромагнитната сила зависи от квадрата на магнитната индукция във въздушната междина  $B_\delta$ . При електромагнита за постоянно напрежение поради постоянната стойност на тока увеличението на въздушната междина води до по-силно намаление на индукцията  $B_\delta$ , а следователно и на силата, докато при електромагнита за променливо напрежение при увеличаване на въздушната междина  $\delta$  се намалява индуктивното съпротивление на електромагнита, нараства токът и индукцията остава почти постоянна, а следователно — и силата.

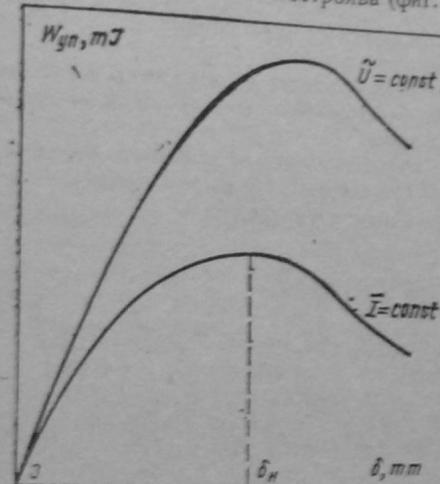
3. Характеристика на условната полезна работа. Това е зависимостта на условната полезна работа  $W_{yn}$  от въздушната междина  $\delta$  при постоянна стойност на напрежението  $U$  или на тока  $I$ , т. е.

$W_{yn}=f(\delta)$  при  $U=\text{const}$  или  $I=\text{const}$ .

Условната полезна работа се определя като произведение на електромагнитната сила, която съответствува на началната въздушна междина, по хода на котвата  $x$ , т. е.

$$W_{yn}=F_{em}x$$

При изчислението се използват стойностите на  $F_{em}$  и на  $x$ , които се отчитат от табл. 7.1. Изчислените стойности се нанасят в същата таблица, а зависимостта се построява (фиг. 7.4).



Фиг. 7.4

Кривата има максимум при определена стойност на въздушната междина  $\delta_H$ . Електромагнитите се оразмеряват да работят с максимална ефективност, т. е. при ход на котвата, равен на  $\delta_H$ .

## 7.2. УПРАЖНЕНИЕ № 18

### ФЕРОРЕЗОНАНСЕН СТАБИЛИЗАТОР

#### I. Програма на работа

##### A. Опитни изследвания

1. Снемане на зависимостта на изходното напрежение  $U_{\text{изх}}$  от входното напрежение  $U_{\text{вх}}$  при номинални стойности на всички останали променливи величини.

2. Снемане на зависимостта на изходното напрежение от мощността на товара  $S_t$  при номинални стойности на всички останали променливи величини.

3. Снемане на зависимостта на изходното напрежение от фактора на мощността на товара  $\cos \varphi_t$  при номинални стойности на всички останали променливи величини.

##### B. Изчисления и построения

1. Построяване на зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(U_{\text{вх}})$ .
2. Построяване на зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(S_t)$ .
3. Построяване на зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(\cos \varphi_t)$ .
4. Определяне на точността на стабилизация на изходното напрежение за опитно снетите зависимости.

#### II. Схема на опитната постановка

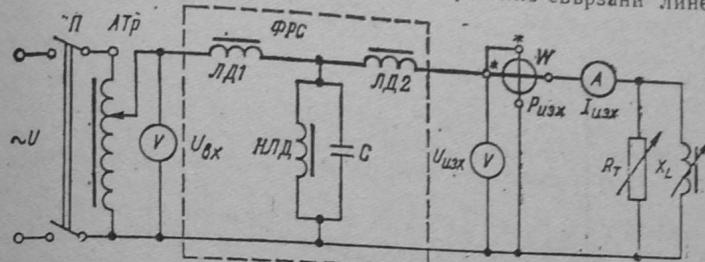
Схемата на опитната постановка е показана на фиг. 7.5. Изтвърденият ферорезонансен стабилизатор  $\Phi PC$  се захранва от автотрансформатор  $ATr$  с регулируемо напрежение  $U_{\text{вх}}$ , което може да се изменя в граници от nulla до  $1,25 U_{\text{n}}$  при честота на мрежата  $50 \text{ Hz}$ . Мощността на автотрансформатора трябва да бъде неколкократно по-голяма от мощността на стабилизатора, за да дава стабилно входно напрежение при изменение на товара. Номиналните стойности на входното и изходното напрежение са равни.

За товар на стабилизатора се използва комбинация от регулируемо активно  $R_t$  и индуктивно  $X_L$  съпротивления. Товарните празен ход до номинална мощност  $S_n$  при изменение и на фактора на мощността  $\cos \varphi_t$ .

За измерване на входните и изходните величини се използу-

ват измервателни апарати от електромагнитната или електроди намичната система.

В изпитвания ферорезонансен стабилизатор се използва явлението ферорезонанс на тока между паралелно свързани линеен



Фиг. 7.5

елемент — кондензатор  $C$ , и нелинейен елемент — наситен дросел  $НЛД$  в съчетание с ненаситени (линейни) дросели  $LД1$  и  $LД2$ . Изходното напрежение  $U_{\text{изх}}$  се стабилизира върху нелинейния дросел в съчетание с пада на напрежение в линейния дросел  $LД2$  при широк диапазон на изменение на входното напрежение.

#### III. Теоретична постановка, начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Предназначенето на стабилизатора е да поддържа постоянно изходното напрежение при изменение на напрежението или честотата на входа или на стойностите на параметрите на товара в определени граници.

За стабилизиране на променливо напрежение се използват магнитни стабилизатори. Те работят на принципа на нелинейно изменение на параметрите на някои от съставните елементи при изменение на коефициента на насищане на стоманата. На този принцип са разработени феромагнитните и ферорезонансните стабилизатори.

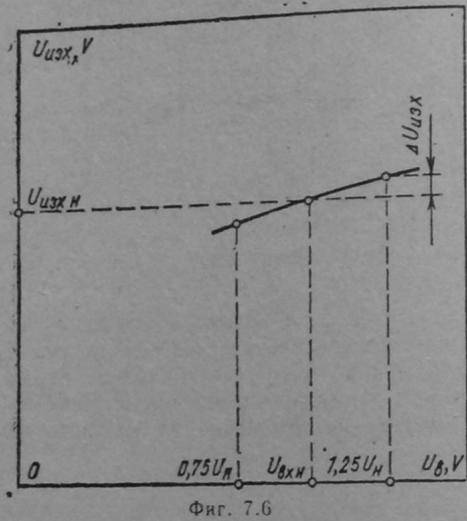
Поради добрите си качества — висок к. п. д., малък клирфактор (коффициент на нелинейни изкривявания) и малък обем, ферорезонансният стабилизатор има по-голямо приложение.

За мрежови стабилизатори с промишлена честота  $50 \text{ Hz}$  не е необходимо снемането на честотна характеристика, тъй като честотата на захранващата мрежа се колебае в граници  $\pm 1\%$  и почти не оказва влияние върху изходното напрежение.

1. Зависимост на изходното напрежение. Това е зависимостта на

$U_{\text{изх}}$  от  $U_{\text{вх}}$  при номинални стойности на честотата  $f_n$ , мощността на товара  $S_n$  и фактора на мощността на товара  $\cos \varphi_n$ , т. е.

$$U_{\text{изх}} = f(U_{\text{вх}}) \text{ при } f = f_n = \text{const}; S_{\text{т}} = S_n = \text{const} \text{ и } \cos \varphi_{\text{т}} = \cos \varphi_n = \text{const}.$$



Фиг. 7.6

Зависимостта се схема по схемата на фиг. 7.5. Входното напрежение се изменя посредством автотрансформатор  $ATr$  в граници от  $0,75 U_n$  до  $1,25 U_n$  и за всяка стойност се прави измерване на изходното напрежение. Товарът се регулира така, че мощността и факторът на мощността да остават постоянни и равни на номиналните си стойности, а контролът им се осъществява от включените в схемата измервателни апарати.

Таблица 7.2

| Отчитат се      |                  |                  |                  | Изчисляват се  |                           |                        |                         |                       |                                  |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| $U_{\text{вх}}$ | $U_{\text{изх}}$ | $P_{\text{изх}}$ | $I_{\text{изх}}$ | $S_{\text{т}}$ | $\cos \varphi_{\text{т}}$ | $\Delta U_{\text{вх}}$ | $\Delta U_{\text{изх}}$ | $\Delta S_{\text{т}}$ | $\Delta \cos \varphi_{\text{т}}$ |
| V               | V                | W                | A                | VA             | —                         | %                      | %                       | %                     | %                                |
|                 |                  |                  |                  |                |                           |                        |                         |                       |                                  |

Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 7.2. При изчисленията се използват формулите

$$S_{\text{т}} = U_{\text{изх}} I_{\text{изх}}; \cos \varphi_{\text{т}} = \frac{P_{\text{изх}}}{S_{\text{т}}}.$$

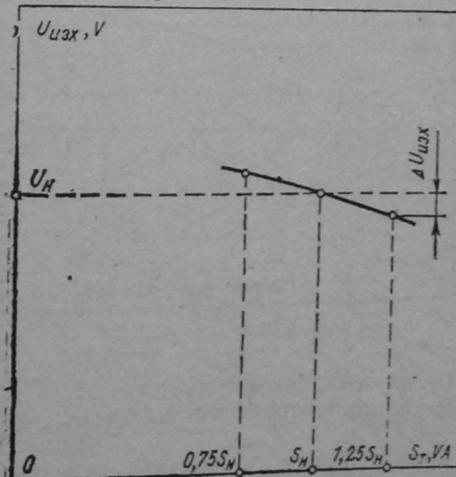
От резултатите в табл. 7.2 се построява зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(U_{\text{вх}})$  (фиг. 7.6).

С изменение на входното напрежение  $U_{\text{вх}}$  с  $\pm 25\%$  от номиналната стойност в значително по-малка степен се изменя и изходното напрежение  $U_{\text{изх}}$  и неговото изменение определя класа на стабилизатора.

2. Зависимост на изходното напрежение от мощността на товара. Това е зависимостта на  $U_{\text{изх}}$  от  $S_{\text{т}}$  при номинални стойности на честотата  $f_n$ , входното напрежение  $U_n$  и фактора на мощността на товара  $\cos \varphi_n$ , т. е.

$$U_{\text{изх}} = f(S_{\text{т}}) \text{ при } f = f_n = \text{const}; U_{\text{вх}} = U_n = \text{const} \text{ и } \cos \varphi_{\text{т}} = \cos \varphi_n = \text{const}.$$

Снемането на зависимостта се извършва по схемата на фиг. 7.5. Поддържат се номинални стойности на входното напрежение и честотата, а с регулируемите съпротивления  $R_{\text{т}}$  и  $X_L$  се изменя товарът, като се задават стойности на мощността от  $0,75 S_n$  до  $1,25 S_n$ . Поддържането и контролирането на постоянната фак-



Фиг. 7.7

тот на мощността  $\cos \varphi_h$  се осъществява от измервателните апарати и регулируемите съпротивления на товара.

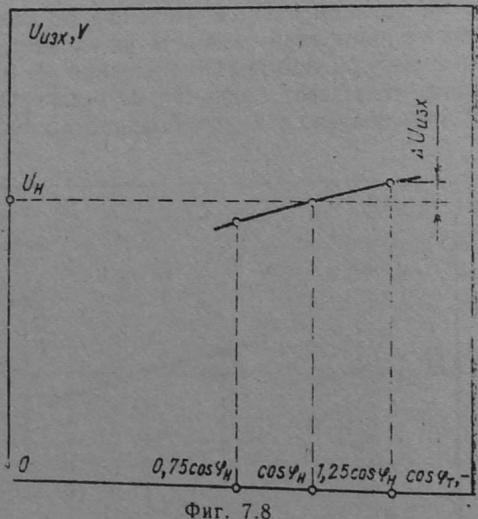
Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 7.2 и по тях се построява зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(S_r)$  (фиг. 7.7).

Изходното напрежение намалява при увеличаване на мощността на товара, респ. на тока, поради увеличение на общия пад в стабилизатора.

3. Зависимост на изходното напрежение от фактора на мощността на товара. Това е зависимостта на  $U_{\text{изх}}$  от  $\cos \varphi_t$  при номинални стойности на входното напрежение  $U_h$ , честотата  $f_h$  и мощността на товара  $S_h$ , т. е.

$$U_{\text{изх}} = f(\cos \varphi_t) \text{ при } f = f_h = \text{const}; U_{\text{вх}} = U_h = \text{const} \text{ и } S_t = S_h = \text{const}.$$

Използува се схемата на фиг. 7.5 и опитът се провежда по подобен на описания в т. 2 начин с тази разлика, че мощността се поддържа постоянна, а се променя факторът на мощността на товара  $\cos \varphi_t$  в граници  $\pm 25\%$  от номиналната стойност  $\cos \varphi_h$  (максималната стойност е до  $\cos \varphi_t = 1$ ).



Фиг. 7.8

Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 7.2 и по дадните от нея се построява зависимостта  $U_{\text{изх}} = f(\cos \varphi_t)$  (фиг. 7.8).

Изходното напрежение  $U_{\text{изх}}$  намалява с намаляване на  $\cos \varphi_t$ , тъй като се увеличава индуктивната съставка на тока, а оттам — и падът на напрежение в дроселите на схемата на стабилизатора.

4. Точност на стабилизация. Това е процентно-

то изменение на изходното напрежение  $\Delta U_{\text{изх}}$  за всяка от горните зависимости при изменение на една от променливите величини им стойности, т. е. в обхвата на стабилизация.

За изчисляване на точността на стабилизация се използува формулата

$$\Delta U_{\text{изх}} = \frac{U_{\text{изх}} - U_{\text{изх} \text{ н}}}{U_{\text{изх} \text{ н}}} \cdot 100,$$

а за определяне на обхвата на стабилизация — формулите

$$\Delta U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вх} \text{ н}}}{U_{\text{вх} \text{ н}}} \cdot 100; \Delta S_r = \frac{S_r - S_h}{S_h} \cdot 100; \Delta \cos \varphi_t = \frac{\cos \varphi_t - \cos \varphi_h}{\cos \varphi_h} \cdot 100.$$

Резултатите от изчисленията се нанасят в табл. 7.2.

От получените стойности на  $\Delta U_{\text{изх}}$  може да се прецени дали стабилизаторът удовлетворява изискванията на стандарта и към кой клас може да се причисли.

Според точността и обхвата на стабилизация по отношение на една от променливите величини — стойност на входното напрежение, стойност на товара или стойност на фактора на мощността, стабилизаторите се разделят на 9 класа (табл. 7.3).

Таблица 7.3

| Клас | Точност на стабилизация |   | Обхват на стабилизация |
|------|-------------------------|---|------------------------|
|      | %                       | % |                        |
| A1   | $\pm 0,5$               |   |                        |
| A2   | $\pm 2,5$               |   | $\pm 10$               |
| A3   | $\pm 5,0$               |   |                        |
| B1   | $\pm 0,5$               |   | $\pm 15$               |
| B2   | $\pm 2,5$               |   |                        |
| B3   | $\pm 5,0$               |   |                        |
| C1   | $\pm 0,5$               |   | $\pm 25$               |
| C2   | $\pm 2,5$               |   |                        |
| C3   | $\pm 5,0$               |   |                        |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелов, А., Д. Димитров. Електрически машини. С., Техника, ч. I—1976, ч. II — 1988.
2. Ангелов, А., С. Попадин, В. Динов. Електрически машини с малка мощност. С., Техника, 1962.
3. Астахов, Н. и др. Изпитване на електрически микромашини. С., Техника, 1966.
4. Балтаджиев, А. Електрически измервания. С., Техника, 1959.
5. Балтаджиев, А., И. Панамски. Лаборатории електрически и магнитни измервания. С., Техника, 1959.
6. Божилов, Г. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически микромашини. С., Техника, 1977.
7. Динов, В. Електрически машини. С., Техника, 1977.
8. Митеv, Е., Г. Божилов. Електрически машини и апарати. С., Техника, 1980.
9. Пенчев, П. Електрически апарати. С., Техника, 1976.
10. Писарев, А. и др. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически апарати. С., Техника, 1976.
11. Попадин, С. Електрически микромашини. С., Техника, ч. I—1970, ч. II—1970, ч. III — 1975.
12. Попов, И. Електрически машини. С., Наука и изкуство, ч. I — 1954, ч. II — 1955, ч. III — 1957, ч. IV — 1958.
13. Соколов, Е. Изследване и изпитване на електрически машини. С., Техника, 1977.
14. Трифонов, Н. Електромагнитни апарати за управление. С., Техника, 1982.
15. Трифонов, Н., М. Минчев, И. Бочева. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически апарати в автоматиката. С., Техника, 1976.
16. Цанков, Й. Изпитване на електрически машини. С., Техника, 1972.
17. Андрианов, В. и др. Практикум по електрическим машинам и аппаратам. М., Колос, 1969.
18. Арменский, Е., Г. Фалк. Электрические микромашины. М., Высшая школа, 1975.
19. Брускин, Д. и др. Электрические машины и микромашины. М., Высшая школа, 1971.
20. Важнов, А. Электрические машины. Л., Энергия, 1969.
21. Вольдек. А. Электрические машины. Л., Энергия, 1974.
22. Жерве, Г. Промышленные испытания электрических машин. Л., Энергия, 1968.
23. Иланов — Смоленский, А. Электрические машины. М., Энергия, 1980.
24. Каляева, А., А. Мазур. Электрические машины. Минск, Высшая школа, 1971.
25. Костенко, М., Л. Пиотровский. Электрические машины. М.—Л., Энергия, ч. I—1964, ч. II—1965.
26. Нюриберг, В. Испытание электрических машин. М.—Л., Энергия, 1959.
27. Пиотровский, Л. и др. Испытание электрических машин. М.—Л., Энергия, ч. II—1960.
28. Хрушев, В. Электрические микромашины. Л., Энергия, 1969.
29. Юферов, Ф. Электрические машины автоматических устройств. М., Высшая школа, 1976.

## СЪДЪРЖАНИЕ

### Глава I

|   |    |
|---|----|
| <b>Общи въпроси от изпитването на електромеханични устройства</b> |    |
| 1.1. Видове изпитвания на електромеханичните устройства . . . . . | 31 |
| 1.2. Номинален режим и номинални величини . . . . .               | 4  |
| 1.3. Измерване на електрически величини . . . . .                 | 8  |
| 1.4. Измерване на неелектрически величини . . . . .               | 16 |
| 1.5. Сломагателни съоръжения . . . . .                            | 30 |

### Глава II

#### Изпитване на машини за постоянен ток

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Упражнение № 1. Генератор за постоянен ток с паралелно възбудждане . . . . . | 32 |
| 2.2. Упражнение № 2. Двигател за постоянен ток с паралелно възбудждане . . . . .  | 32 |
| 2.3. Упражнение № 3. Изпълнителен постояннотоков микродвигател . . . . .          | 45 |
| 2.4. Упражнение № 4. Постояннотоков тахогенератор . . . . .                       | 54 |

### Глава III

#### Изпитване на трансформатори

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Упражнение № 5. Трифазен трансформатор . . . . .                                 | 68 |
| 3.2. Упражнение № 6. Еднофазен многонамотъчен трансформатор с малка мощност . . . . . | 74 |

### Глава IV

#### Изпитване на асинхронни машини

|  |     |
|--|-----|
| 4.1. Упражнение № 7. Трифазен асинхронен двигател. Опит на празен ход на късо съединение, кръгова диаграма . . . . . | 83  |
| 4.2. Упражнение № 8. Трифазен асинхронен двигател. Снемане на рабочите характеристики . . . . .                      | 96  |
| 4.3. Упражнение № 9. Еднофазен асинхронен микродвигател с работен кондензатор . . . . .                              | 101 |
| 4.4. Упражнение № 10. Изпълнителен асинхронен микродвигател с кух немагнитен ротор . . . . .                         | 107 |
| 4.5. Упражнение № 11. Асинхронен тахогенератор . . . . .   | 114 |
| 4.6. Упражнение № 12. Селсни . . . . .   | 118 |

### Глава V

#### Изпитване на колекторни двигатели за променлив ток

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Упражнение № 13. Трифазен шунтов колекторен двигател, захранван чрез ротора (двигател Шраге Рихтер). . . . . | 129 |
| 5.2. Упражнение № 14. Универсален колекторен двигател . . . . .   | 137 |

### Глава VI

#### Изпитване на синхронни машини

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Упражнение № 15. Синхронен генератор. Синхронен двигател . . . . . | 145 |
| 6.2. Упражнение № 16. Синхронни микродвигатели . . . . .                | 153 |

*Глава VII*

*Изпитване на електрически апарати*

|   |     |
|---|-----|
| \ 7.1. Упражнение № 17. Електромагнити за постоянно и за променливо<br>напрежение . . . . . | 158 |
| 7.2. Упражнение № 18. Ферорезонансен стабилизатор . . . . .                                 | 164 |
| Литература . . . . .  | 170 |