

Петя Димитрова
Адриан Иванов

ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ УСТРОЙСТВА

РЪКОВОДСТВО
ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ

НОВИ ЗНАНИЯ
София, 2010 г.

ПРЕДГОВОР

Ръководство за лабораторни упражнения по дисциплината "Електромеханични устройства" за студенти от Технически университет – София. Учебното пособие може да се използва и от учащи се по сродни дисциплини.

Ръководството е написано в съответствие с учебната програма по дисциплината "Електромеханични устройства" за студенти от Технически университет – София. Учебното помагало може да се използва и от студенти, изучаващи аналогични дисциплини в други висши технически училища.

В ръководството е включено опитното изследване както на електрически машини и апарати с общо предназначение, така и на специални машини и апарати.

От гл. ас. Петя Димитрова са написани упражнения № 1 и упражнения от №3 до №11, а от гл. ас. Адриан Иванов – упражнения №2 и упражнения от №12 до №14. Глава първа е написана съвместно от двамата автори.

Авторите засвидетелстват признателност към светлата памет на доц. Илия Ваклев и изказват благодарност за любезното съдействие на гл. ас. Марин Стоянов, автори на първото издание на това ръководство.

© Петя Димова Димитрова, 2010

© Адриан Петров Иванов, 2010

© Мариана Недялкова, графичен дизайн и предпечат

© Антония Благоева, автор на корицата

© Издателство НОВИ ЗНАНИЯ, София

ISBN: 978-954-2907-01-5

СЪДЪРЖАНИЕ

Първа глава	Общи въпроси от изпитването на електромеханични устройства	5
1.1.	<i>Видове изпитвания на електромеханичните устройства</i>	5
1.2.	<i>Номинален режим и номинални величини</i>	5
1.3.	<i>Особености на микромашините</i>	8
1.4.	<i>Измерване на електрически величини</i>	9
1.5.	<i>Измерване на неелектрически величини</i>	17
1.6.	<i>Спомагателни съоръжения</i>	27
1.7.	<i>Оформяне на протоколи за лабораторни упражнения</i>	29
1.8.	<i>Безопасност при работа на електрически съоръжения</i>	30
Втора глава	Изпитване на електрически апарати	37
Упражнение №1	<i>Електромагнити за постоянно и променливо напрежение</i> ..	37
Упражнение №2	<i>Автоматичен прекъсвач</i>	41
Трета глава	Изпитване на трансформатори	45
Упражнение №3	<i>Трифазен трансформатор</i>	45
Упражнение №4	<i>Еднофазен многонамотъчен трансформатор с малка мощност</i>	52
Четвърта глава	Изпитване на асинхронни машини	59
Упражнение №5	<i>Опит на празен ход и на късо съединение при трифазен асинхронен двигател</i>	59
Упражнение №6	<i>Снемане на работните характеристики на трифазен асинхронен двигател</i>	66
Упражнение №7	<i>Еднофазен асинхронен двигател с работен кондензатор</i>	71
Пета глава	Изпитване на синхронни машини	76
Упражнение №8	<i>Синхронен реактивен двигател</i>	76
Шеста глава	Изпитване на колекторни машини	80
Упражнение №9	<i>Двигател за постоянен ток с паралелно възбуждане</i>	80
Упражнение №10	<i>Универсален колекторен двигател</i>	87
Упражнение №11	<i>Изпълнителен постоянен ток двигател</i>	93
Упражнение №12	<i>Постояннотоков тахогенератор</i>	99
Седма глава	Изпитване на електрически машини с електронно управление	103
Упражнение №13	<i>Стълков двигател</i>	103
Упражнение №14	<i>Безконтактен двигател за постоянен ток</i>	108
ЛИТЕРАТУРА		112

ПЪРВА ГЛАВА

ОБЩИ ВЪПРОСИ ОТ ИЗПИТВАНЕТО НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ УСТРОЙСТВА

1.1. Видове изпитвания на електромеханичните устройства

Под термина *изпитване* се разбира експерименталното определяне на количествените и (или) качествените характеристики на свойствата на обекта на изпитване като резултат от различни въздействия върху него при функционирането му. Изпитванията биват промишлени и учебни.

Обект на *промишлените* изпитвания е продукцията (в случая става дума за електрически машини и апарати), която се подлага на изпитване, за да се установят свойствата и характеристиките ѝ. Тези изпитвания са различни видове и се провеждат в съответствие с определени методи и методики.

Учебните изпитвания са изпитвания на електрическите машини и апарати, които се провеждат по време на лабораторни упражнения в учебните заведения. По принцип те се провеждат по същия начин, както и в промишлените лаборатории. Програмата на опитните изследвания е такава, че да се постигнат целите, които се поставят пред лабораторните упражнения, а именно:

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

1.2. Номинален режим и номинални величини

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. По-важните данни, които се

тават на табелката, са следните: номинална мощност; номинално напрежение; номинален ток; номинална честота; брой на фазите; номинална скорост на въртене; съединение на намотките; фактор на мощността; степен на защита; вид на режим на работа. 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 стандартизационен документ.

При силовите трансформаторите на табелките се дават още следните номинални данни: схема и група на свързване; номинално напрежение на късо съединение; начин на охлаждане; вид на монтажа.

Терминът «номинален» може да се употреби и за величини, непосочени на табелката, но отнасящи се за номиналния режим на работа, например номинален въртящ момент, номинален коефициент на полезно действие и т.я. Изразът «номинална мощност» се употребява в следния смисъл:

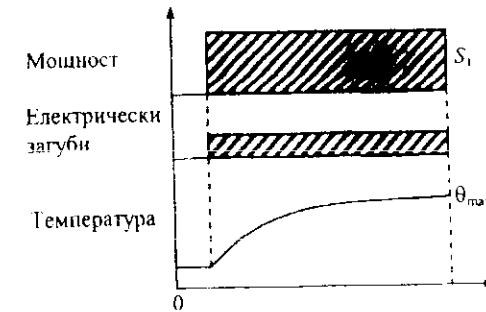
- за генератори за постоянен ток – електрическата мощност на изходите на машината, изразена във W, kW или MW;
- за синхронни генератори – привидната електрическа мощност на изходите на машината, изразена във VA, kVA или MVA;
- за електродвигатели – полезната механична мощност на вала, изразена във W, kW или MW;
- за синхронни компенсатори – реактивната мощност на изходите на машината, изразена във VAr, kVAr или MVar;
- за преобразуватели – определя се по споразумение между производителя и потребителя.
- за двунамотъчен трансформатор – мощността на всяка от намотките на трансформатора;
- за тринмотъчен трансформатор – най-голямата от номиналните мощности на намотките му.

Видът на режима на работа се отбелязва с буква S. Стандартът определя осем режима на работа (S1 до S8). Основни са първите три от тях.

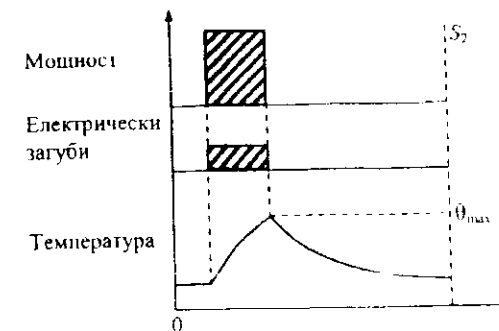
• Режим на *продължителна работа* (S1) е този, при който машината работи при постоянно външно натоварване и продължителност, достатъчна за достигане на практически установена температура на машината (фиг. 1.1). При този режим машината може да работи неограничено време, без температурите на отделните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

• Режим на *кратковременна работа* (S2) е режимът, при който машината работи при постоянно външно натоварване с определена продължителност, недостатъчна за достигане 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, посочено на нейната табелка, без

темperaturите на отделните ѝ части да превишават допустимите стойности. Уни ределени са следните стандартни продължителности на кратковременна работа: 10, 30, 60 и 90 min.



Фиг. 1.1



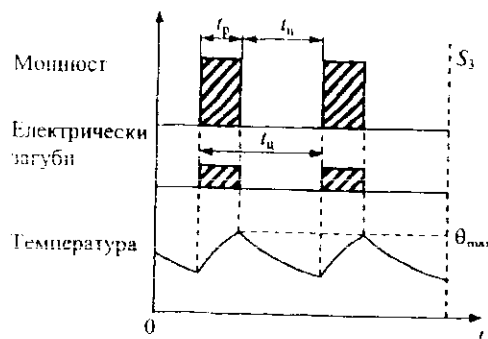
Фиг. 1.2

• Режимът на *повторно-кратковременна работа* (S3) е този, който се характеризира с периодически повтарящи 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 охлаждането. Характеризира се с величина за режим S3 е относителната продължителност на работа

$$\text{ОПР} = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_n} \cdot 100, \quad \%$$

където t_p е времето, през което машината работи при постоянно външно натоварване; t_n – времето, през което машината е изключена; t_n – продължителност 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.



Фиг. 1.3

1.3. Особенности на микромашините

За осъществяване на лабораторните упражнения, отнасящи се до изпитване на електрически машини, се предвижда използването на микромашини. За микромашини условно се считат всички електрически машини с мощност, по-малка от 1kW. Освен че са с малки мощности (и поради това с малки размери и тегло), електрическите микромашини имат и следните по-важни особености, които ги отличават от машините със средна и голяма мощност.

1.3.1. Големи активни и индуктивни съпротивления на намотките

Активните и индуктивни съпротивления на намотките нарастват силно с намаляване на мощността. Това се дължи на факта, че тъй като са с малки мощности микромашините с нормални (не много ниски) напрежения имат малки токове. Следователно при приблизително еднакви с тези на големите машини плътности на тока микромашините изискват употребата на тънки проводници за намотките.

От друга страна (пак поради малките си размери) микромашините имат малки магнитни потоци, които при приблизително същите магнитни индукции, както и на големите машини, изискват голям брой навивки в намотките.

Горните причини водят до увеличаване на активните и индуктивните съпротивления на намотките, които са по-големи от тези на другите машини както по абсолютна стойност, така и в относителни единици.

1.3.2. Относително голяма въздушна междина

От технологически съображения въздушните междини на микромаши-

ните са сравнително големи, тъй като не могат да се намаляват пропорционално на мощността. Въздушните междини на микромашините са от порядъка на тези на големите машини и следователно са относително големи за мощността им.

1.3.3. Ниски енергийни показатели

Енергийните показатели на микромашините са коефициент на полезно действие (к.п.д.) и фактор на мощността. Ниските енергийни показатели са следствие от двете гореописани особености.

Поради относително големите активни съпротивления на намотките, електрическите загуби на мощност в тях също са относително големи, което намалява к.п.д. Големите стойности на индуктивните съпротивления на намотките водят до лош фактор на мощността, а поради голямата въздушна междина микромашините за променлив ток имат относително голям ток на празен ход. Той от своя страна още повече влошава фактора на мощността и увеличавайки електрическите загуби в статорната намотка, намалява к.п.д.

1.3.4. Ниски кратности на пусковия ток при микродвигателите и на тока на късо съединение при генераторите и трансформаторите с малка мощност

Причината за ниските кратности на пусковия ток и тока на к.с. е свързана отново с големите съпротивления на намотките. Затова всички микродвигатели се пускат директно без токоограничаващи пускови съпротивления.

1.4. Измерване на електрически величини

При изпитванията на електрически машини и апарати се налага измерването на следните електрически величини: ток, 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.

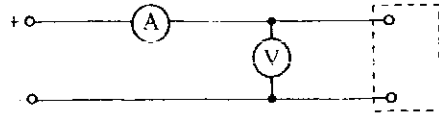
Обхватът на апарата се подбира съобразно с очакваните стойности на измерваната величина (указания са дадени в отделните упражнения). Отклонението на стрелката трябва да бъде в границите (30 ÷ 95)% от максималното. При измерване на мощност в трифазни вериги по метода на двата ватметъра производението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

1.4.1. Измерване на ток, напрежение и мощност при постоянен ток

За измерване на ток и напрежение се използват предимно: амперметри и волтметри от магнитоелектричната система (фиг. 1.4).



Фиг. 1.4

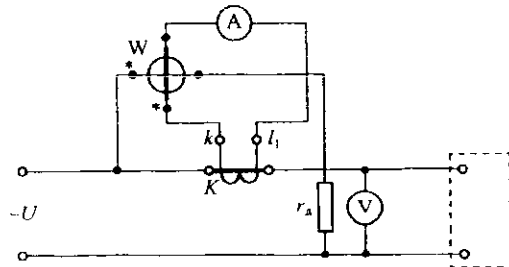
Мощността се изчислява като произведение на напрежението и тока. Стойностите на измерените ток I , напрежение U и мощност P са:

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

където α 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 ток на амперметъра; U_n – номиналното напрежение на волтметъра; α_n – общият брой на скалните деления на апарата.

1.4.2. Измерване на ток, напрежение и мощност при еднофазен променлив ток

Най-често в този случай токът и напрежението се измерват с амперметри 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, чиито 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 5А и само в редки случаи има стойност 1А. В никакъв случай не бива вторичната намотка на токовия трансформатор да остава отворена, тъй като в нея би се индуктирало опасно високо напрежение.

Когато е необходимо напрежителният обхват на ватметъра се разширява с допълнителен резистор r_a . Ако разширението, например, е m пъти, то допълнителното съпротивление трябва да има стойност

$$r_a = (m-1)r_w,$$

където r_w е съпротивлението на напрежителната намотка на ватметъра.

Измерените напрежение, ток и активна мощност са:

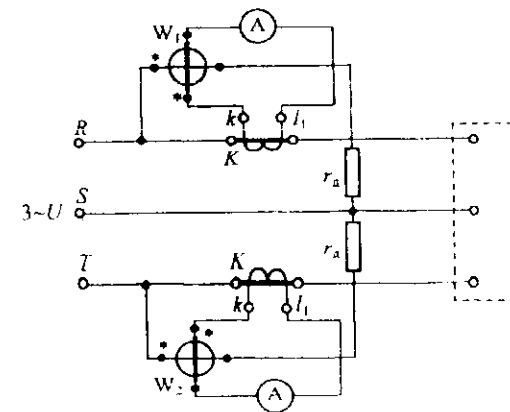
$$I = k_A \alpha; \quad k_A = \frac{I_n}{\alpha_n} k_I; \quad U = k_V \alpha; \quad k_V = \frac{U_n}{\alpha_n}; \quad P = k_W \alpha; \quad k_W = \frac{U_{wn} I_{wn}}{\alpha_n} k_I m,$$

където U_{wn} и I_{wn} са номиналните напрежение и ток на ватметъра; k_W – константата на ватметъра.

Когато не е включен токов трансформатор, то $k_I = 1$, а когато не е включен допълнителен резистор, $m = 1$.

1.4.3. 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).



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

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

където α_1 и α_2 са отклоненията на двата ватметра в скални деления.

Характерното за тази схема (схема на Арон) е следното. Когато факторът на мощността $\cos \varphi$ е по-голям от 0,5 (т.е. $\varphi < 60^\circ$), стрелките на двата ватметра се отклоняват в правилна посока и двете показания се събират. Когато $\cos \varphi < 0,5$ (т.е. $\varphi > 60^\circ$), стрелката на единия ватметър се отклонява в обратна посока. В този случай е необходимо или напрежителната, или токовата намотка на този ватметър да се превключи, а показанията на двата ватметра трябва да се извадят

1.4.4. Особенности при измерване на електрически величини при микромашините

При изпитване на електрически микромащини 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 е необходимо:

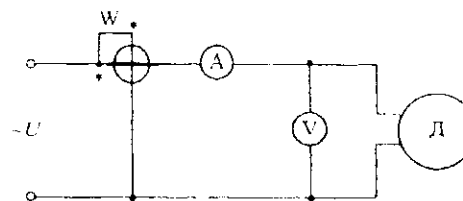
- да се направи грижлив подбор на измервателните апарати;
- да се избере такава схема на включване на измервателните апарати, при която влиянието на собствената им консумация е минимално;
- да се коригират измерените величини, като се отчете собствената консумация на измервателните апарати.

Използваните амперметри трябва да имат малко вътрешно съпротивление. При измерване на ток до 1 А се препоръчват детекторни апарати, чиято собствената консумация е малка. За измерване на токове над 1 А могат да се използват както електромагнитни, така и електродинамични апарати. Спадът 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 $500 \div 1000$) Ω/V , за да може да се пренебрегне 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, като най-често ватметрите са от електродинамичната система. Когато факторът на мощността е нисък, използваните ватметри могат да бъдат 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.



Фиг. 1.7

Грешката при измерване на мощността в този случай 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

$$P_{\text{ан}} = I^2 (r_A + r_{\text{тк}}),$$

където r_A е вътрешното съпротивление на амперметъра, а $r_{\text{тк}}$ – съпротивлението на токовата намотка на ватметъра.

1.4.5. Измерване на съпротивлението на намотките

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

- метод на амперметъра и волтметъра,
- метод с единичен мост;
- метод с двоен мост;
- метод с уред на логометричен принцип.

При измерване на съпротивления със стойности по-малки от 1 Ω , използване на единичен мост и логомер не се допуска.

Измерването се провежда при практически студено състояние на машината. Практически 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 следните:

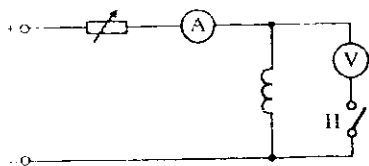
- при мощност до 0,1 kW – не повече от 10% от номиналния ток на намотката в продължение на 10s;
- при мощност (0,1 ÷ 10) kW – не повече от 15% от номиналния ток на намотката в продължение на 40s;

- при мощност над 10 kW - не повече от 20% от номиналния ток на намотката в продължение на 60s.

При измерване на съпротивления на намотките на трансформаторите постоянният ток не трябва да надвишава 1/5 от номиналния ток на намотката. Ако измерването е с продължителност до 1min, се допуска ток, по-голям от 1/5 от номиналния.

Ограниченията по отношение на големината на тока и неговата продължителност се налагат с цел недопускане намотката да се нагрява по време на измерването.

При измерване на съпротивление по метода на амперметъра и волтметъра измервателните апарати трябва да бъдат от магнитоелектричната система. Използват се схемите, показани на фиг. 1.8 и на фиг. 1.9. Първата схема се използва за измерване на малки съпротивления (от порядъка на 1Ω и по-малки), а втората – за измерване на големи съпротивления.



Фиг. 1.8

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

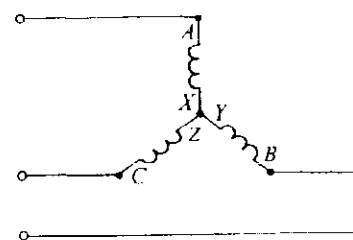
$$r = \frac{U}{I} - r_A$$

Тук U и I са показанията на волтметъра и амперметъра, а r_v и r_A – техните вътрешни съпротивления.

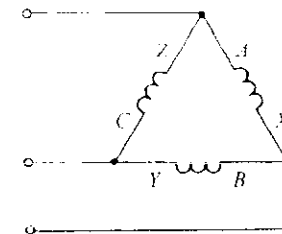
Ако намотката има голяма индуктивност, за да се предпази волтметърът от повреда, той трябва да се включва след установяването на тока и да се изключва преди прекъсването на тока. За тази цел в схемите, показани на фиг. 1.8 и фиг. 1.9, е предвиден прекъсвач II.

При измерване на съпротивленията на трифазна намотка, свързана в

звезда с недостъпна нулева точка (фиг. 1.10), се поставя по следния начин.



Фиг. 1.10



Фиг. 1.11

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

$$r_{AB} = r_A + r_B;$$

$$r_{BC} = r_B + r_C;$$

$$r_{CA} = r_C + r_A.$$

С r_A , r_B и r_C са означени съпротивленията на трите фази $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$.

При решаване на получената система уравнения за съпротивленията 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

$$r_{срл} = \frac{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}{3}.$$

Средната стойност на съпротивлението на една фаза се определя по формулата

$$r_{\phi} = \frac{r_{срл}}{2} = \frac{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}{6}.$$

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:

$$r_{AB} = \frac{r_A(r_B + r_C)}{r_A + r_B + r_C};$$

$$r_{BC} = \frac{r_B(r_C + r_A)}{r_A + r_B + r_C};$$

$$r_{CA} = \frac{r_C(r_A + r_B)}{r_A + r_B + r_C}.$$

След решаване на горната система уравнения, за съпротивления 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

$$r_{\phi} = \frac{3r_{\text{срл}}}{2} = \frac{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}{2}.$$

Както бе споменато 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°C и към т.нар. изчислителна работна температура. Изчислителната работна температура за намотки с тощилен клас на изолацията *A*, *E* и *B* е 75°C, а при класове *F* или *H* е 115°C. Това се прави с цел възможността да се сравняват едниотинни машини, а също и за сравняване на изчислителни и опитни резултати.

Съпротивлението r на една медна намотка, измерено при температура Θ , може да се приведе към друга температура Θ_x по формулата

$$r_x = r \frac{235 + \Theta_x}{235 + \Theta},$$

където r_x е съпротивлението на намотката при температура Θ_x . При използване на намотки от други метали числото 235 трябва да се замени с реципрочната стойност на температурния коефициент на съпротивление при 0°C за съответния метал. Например при алуминиеви намотки числото 235 трябва да се замени с числото 245.

1.5. Измерване на неелектрически величини

При провеждане на изпитванията се налага измерването на следните неелектрически величини:

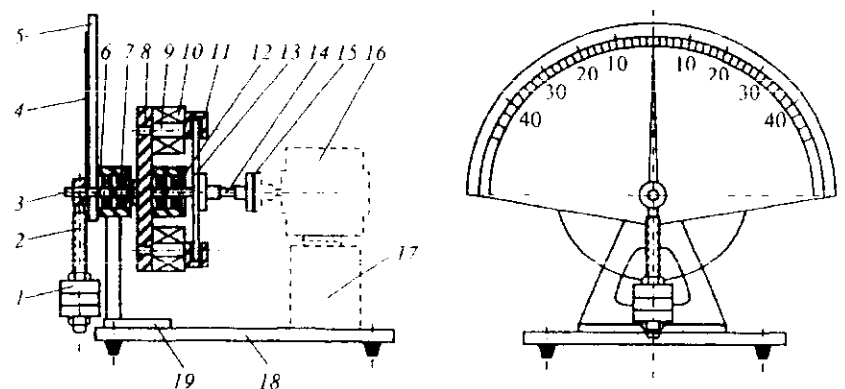
- въртящ момент;
- скорост на въртене.

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

1.5.1. Електромагнитна спирачка

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

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



Фиг. 1.12

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

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 ъгловата 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 електромагнит

ната спирачка. Изводите на възбудителната намотка са свързани към букси посредством гъвкави проводници. Полусите намотки се свързват помежду си така, че полюсите да бъдат 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 дискът 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 захранва от източник на постоянно напрежение. Преминващият през нея ток създава магнитно поле, в което се върти дискът 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 дискът. 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 които се е отклонила стрелката, и се изчислява въртящият момент

$$M = k\alpha,$$

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.

Тарирането се извършва по следния начин. Към периферията на носещия диск се закрепва здрав конец или тънък проводник, който се пуска надолу така, че да тангира към диска. В края на конца 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 α_T скални деления, константата на спирачката ще бъде

$$k = \frac{mgr}{\alpha_T}, \quad \text{Nm/дел.}$$

където m е масата на тарировъчната тежест, kg; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ – земното ускорение; r – радиусът на носещия диск, m.

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

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

След завършване на тарирането противотежестта се закрепва здраво за стеблото на махалото с предвидените за целта гайки. Тарировъчната тежест и конецът 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 релостата r_s , свързан последователно с възбудителната намотка на спирачката ВИС, се изменя плавно токът в нея, при което ще се изменя плавно и моментът, с който се натоварва изпитваният двигател.

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

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

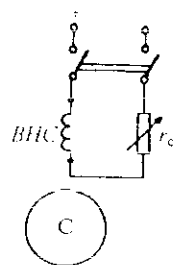
Електромагнитните спирачки, наричани още вихротокови спирачки поради техния принцип на действие, се използват твърде широко, главно при изпитване на електрически микромашини. Основните им предимства са следните:

- работата с тях е лесна и удобна;
- позволяват плавно изменение на натоварването на двигателя;
- въртящият момент се отчита непосредствено;
- позволяват измерване на пусковите параметри.

Недостатъци на разглежданата спирачка са невъзможността тя да се използва при ниски скорости на въртене и ограничената ѝ точност. Грешката е от порядъка (2,5 + 5) % и се дължи на триенето в лагерите и на въртящия се диск във въздуха.

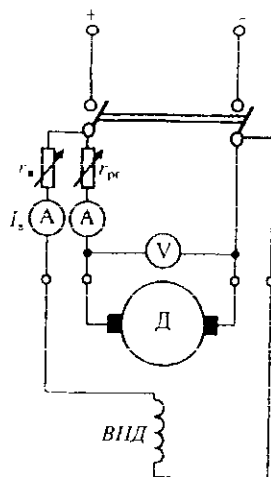
При прецизни измервания трябва да се определят допълнителния съпротивителен момент $M_{\text{доп}}$, дължащ се на триенето. Този момент натоварва изпит-

вания двигателя, но не се отчита от стрелката и затова трябва да се прибави към измерения по скалата момент



Фиг. 1.13

Определянето на $M_{доп}$ става със спомагателен двигател за постоянен ток по следния начин. В началния момент спомагателният двигател се пуска да работи на празен ход по схемата, показана на фиг. 1.14. Чрез реостата r_a се установява определен възбудителен ток I_a , който се поддържа неизменен. Чрез реостата r_m се установяват поредица стойности на скоростта 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.



Фиг. 1.14

Таблица 1.1

n min^{-1}	Отчитат се											
	U_1		I_1			U_2		I_2				
	дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	дел	V/дел	V	дел	A/дел	A

Изчисляват се			
P_1	P_2	$P_{доп}$	$M_{доп}$
W	W	W	Nm

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

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

където $p_{мех}$ са механичните загуби на двигателя; p_c - загубите в стоманата на двигателя; r_a - съпротивлението на котвената му намотка, ΔU_a - падът на напрежението между четките и колектора.

След това към спомагателния двигател се куплира електромагнитната спирачка. Установява се същият възбудителен ток и се задават същите стойности на скоростта на въртене, както и при първото измерване. При всяка стойност на скоростта на въртене се отчитат напрежението и токът на котвата (U_2 и I_2), и се нанасят в табл. 1.1. Консумираната мощност $U_2 I_2$ е по-голяма (в сравнение с 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.

$$P_2 = U_2 I_2 = p_{мех} + p_c + I_2^2 r_a + I_2 \Delta U_a + P_{доп}.$$

Сумарните загуби ($p_{мех} + p_c$) при първото и при второто измерване са еднакви, защото възбудителният ток I_a и скоростта на въртене n в двата случая са еднакви. Тогава допълнителната мощност е

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

а съответният допълнителен момент ще бъде

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

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

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

$$M = M_{отч} + M_{доп},$$

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

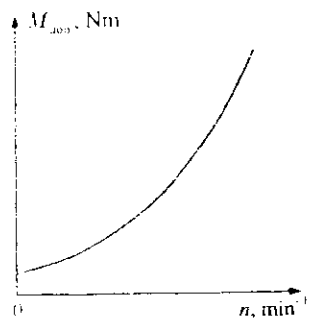
С въвеждането на корекция на момента по изложения начин грешката може да се намали до 2,5%.

1.5.2. Тарирани генератор

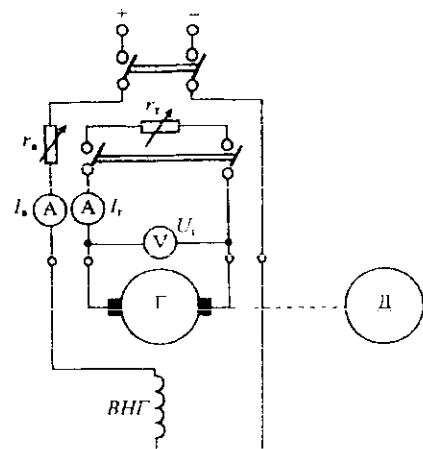
Твърде разпространен и удобен начин за натоварване на изследвания двигател е този, при който се използва т.нар. тарирани генератор. При това чрез изчисление се определят мощността и моментът на вала на двигателя. Най-често товарният генератор представлява генератор за постоянен ток с независимо възбуждане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

Изпитваният двигател Д се куплира механически с тарирания генератор Г. Чрез изменение на възбудителния ток I_a или на котвения ток I_c на генератора

се изменя развиваният от него момент, който е съпротивителен. Следователно по този начин ще се изменя натоварването на изпитвания двигател.



Фиг. 1.15



Фиг. 1.16

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

$$P'_0 = f(n) \text{ при } I_a = \text{const} \quad \text{или} \quad P'_0 = f(I_a) \text{ при } n = \text{const},$$

където с P'_0 е означена сумата от механичните и загубите в стоманата на генератора, т.е.

$$P'_0 = P_{\text{мех}} + P_c.$$

Опитното намиране на посочените зависимости се нарича *тариране* на товарния генератор.

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

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

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

При изпитване на постояннотокови и асинхронни двигатели е целесъб-

разно да се разполага с тарировъчната крива $P'_0 = f(n)$ при $I_a = \text{const}$. Опитното ѝ определяне става по следния начин.

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

Таблица 1.2

n	Отчитат се						Изчисляват се	
	U ₀		I ₀				P ₀	P' ₀
min ⁻¹	дел	V/дел	V	дел	A/дел	Λ	W	W

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

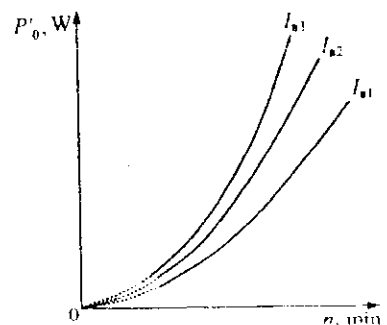
$$P_0 - U_0 I_0 = P_{\text{мех}} + P_c + I_0^2 r_a + I_0 \Delta U_a,$$

където r_a е съпротивлението на котвената намотка; ΔU_a спада на напрежението в переходния контакт между четките и колектора.

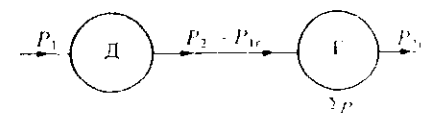
$$\text{Тогава } P'_0 = P_0 - I_0^2 r_a - I_0 \Delta U_a.$$

Мощността P'_0 може да се изчисли и по формулата $P'_0 = P_0 - I_0^2 R_a$, където R_a е сумарното съпротивление на котвената намотка и на четковия контакт.

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



Фиг. 1.17



Фиг. 1.18

Натоварването на двигателя Д с тариран генератор Г 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_3 е равна на подаваната на генератора мощност $P_{1г}$. Генераторът преобразува получената механична мощност отново в електрическа

$$P_{2г} = U_г I_г,$$

която се разсейва във вид на топлина в товарния реостат $r_г$ (фиг. 1.16). Тук $U_г$ и $I_г$ са напрежението и токът на котвата на генератора.

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

$$P_2 = U_г I_г + P_{\text{мех}} + P_r + I_г^2 r_г + I_г \Delta U_г = U_г I_г + P'_0 + I_г^2 r_г + I_г \Delta U_г.$$

Мощността P'_0 се взема от тарировъчната крива за съответния възбудителен ток и съответната скорост на въртене. Мощността P_2 може да се определи и по формулата

$$P_2 = U_г I_г + P'_0 + I_г^2 r_г.$$

Вече може да се изчисли и полезният 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 $I_в = \text{const}$ и $n = \text{const}$ не е необходима тарировъчна крива, а една единствена стойност на P'_0 , съответстваща на дадените възбудителен ток и скорост на въртене.

Изложеният метод за натоварване на двигатели и за определяне на полезната мощност и полезния 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 $(1 \div 2)\%$. Основните 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.

1.5.3 Измерване на скорост на въртене

Тахогенератори

Тахогенераторите са електрически микромашини, които преобразуват механичното въртене в електрическо напрежение. При това изходното напрежение на тахогенератора е пропорционално на скоростта на въртене.

За да се измери скоростта на въртене, валът на тахогенератора се свързва

механически с вала на изпитвания двигателя. Към изходната намотка на тахогенератора се включва волтметър с голямо вътрешно съпротивление.

Необходимо е да се знае стръмноста k на изходната характеристика или пък константата на тахогенератора k_n . Те са свързани с равенството

$$k_n = \frac{1}{s}, \quad \text{min}^{-1}.$$

Скоростта на въртене се определя по формулата

$$n = U_n k_n, \quad \text{min}^{-1},$$

където U_n е измереното от волтметъра напрежение. Целесъобразно е скалата на волтметъра да бъде директно градуирана в min^{-1} .

Най-често се използват постоянноточови тахогенератори с електромагнитно възбуждане или с възбуждане от постоянни магнити. Широко приложение намират и асинхронните тахогенератори с кух немагнитен ротор. За измерване на скоростта на въртене може да се използват и синхронни тахогенератори. Постоянноточов тахогенератор се изследва в Упражнение № 12.

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

Стробо тахометър

Стробо тахометърът или просто стробоскопът представлява електронен генератор с регулируема честота, който захранва осветителна лампа. Честотата може да се изменя стъпално в няколко диапазона и плавно във всеки от тях. Осветителната лампа трябва да има голяма моментна яркост и малка инертност. Използват се различни газоразрядни лампи, най-често неопови или живачни.

Измерването на скоростта на въртене със стробоскоп се извършва по следния начин. На вала, чиято скорост 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 използва и някакъв естествен белег, например винчето на съединителя. 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 скоростта на въртене в min^{-1} .

При този метод за измерване на скоростта на въртене се използва стробоскопичният ефект. Същността му се състои в това, че ако скоростта 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 скоростта на въртене на вала, наблюдава се привидно бавно въртене на вала в посока, съвпадаща с дей-

в действителната посока на въртене. Ако честотата на лампата е малко по-голяма от скоростта на въртене на вала, наблюдава се привидно бавно въртене на вала в посока, обратна на действителната. В двата случая скоростта на привидното въртене е равна на разликата от действителната скорост на въртене на вала и честотата на запалване на лампата.

При измерване на скоростта на въртене със стробоскоп трябва да се внимава да не се допускат грешки, което е възможно когато честотата на запалване на лампата е кратна на скоростта на въртене на вала. Така например, ако честотата на лампата е два пъти по-малка от скоростта на въртене на вала, той изглежда неподвижен, наблюдаваният белег е един (както 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 скоростта на въртене 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:

- наблюдаваният белег трябва да бъде единствен;
- 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 скоростта на въртене със стробоскоп осигурява добра точност. Грешката е от порядъка на 1,5%. Особено подходящо е използването му при изпитване на микромашины, тъй като измерването не е свързано с натоварване на вала на изпитвания двигател.

Измерване на скоростта на въртене
с цифров честотомер

На вала на изпитвания двигател се поставя специален индукционен или фотопреобразувател, който произвежда импулси с честота f , пропорционална на скоростта на въртене n

$$f = kn.$$

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

Индукционният преобразувател обикновено се прави като към вала или към съединителя на изпитвания двигател се прикрепят малък постоянен магнит,

който се върти в близост до бобина със стоманена сърцевина. При въртенето си той индуцира електродвижещо напрежение с честота

$$f = \frac{pn}{60},$$

където p е броят на двойките полюси на постоянния магнит.

Фотопреобразувателят представлява непрозрачен диск с определен брой прорези N . Светодиод и фототранзистор са разположени на две срещулежащи платки, дистанцирани по подходящ начин. В пространството между тях е разположен дискът. При въртене на двигателя, съответно на диска, фототранзисторът периодично се отпушва и запушва, в резултат на което на изхода на фотодатчика се получават еднополярни импулси с честота

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

Скоростта на въртене на двигателя е

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

Вижда се че е удобно броят на отворите в диска да бъде 6 или 60. Например, при $N = 60$ скоростта на въртене е равна на измерената честота, умножена по 10.

Този начин на измерване на скоростта на въртене е с висока точност. Негово предимство е също, че не се натоварва валът на изпитвания двигател, което го прави особено подходящ при изпитване на микромашины.

Измерване на скоростта на въртене
с фототахометър

Поставя се светоотражателна лепенка на подходящо място на вала (например на съединителя), чиято скорост на въртене ще се измерва. Насочва се светлината от фототахометъра върху белега, задържа се докато се установи измерваната скорост, след което се изключва. Апаратът запомня най-ниската, най-високата и крайната (последната) скорост. Грешката е от порядъка на $\pm (0,05\% + 1 \text{ digit})$. Тук измерването също не е свързано с натоварване на вала на изпитвания двигател.

1.6. Спомагателни съоръжения

При изпитванията се налага използването на следните спомагателни съоръжения:

- съединителни проводници;
- прекъсвачи;
- реостати;
- регулируеми автотрансформатори;

- индукционни регулатори.

За свързване на електрическите схеми се използват *съединителни проводници*, които трябва да бъдат гъвкави, и добре изолирани. Най-често се използват многожични проводници с винилитова изолация. Сечението на проводниците се подбира така, че плътността на тока в тях да не бъде по-голяма от $(6 \div 10) \text{ A/mm}^2$. При провеждане на лабораторните упражнения обикновено се използват два вида проводници: дебели, със сечение $(4 \div 6) \text{ mm}^2$, завършващи с кабелни обувки и тънки, със сечение $(1 \div 1,5) \text{ mm}^2$, завършващи с бананщекери. 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 само тънки проводници.

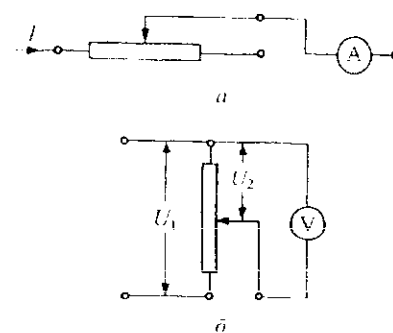
Прекъсвачите служат за включване и изключване на определени вериги в схемата. Използват се както като обикновени лостови прекъсвачи, така и автоматични прекъсвачи. Избират се съобразно напрежението и тока в съответната верига.

Според предназначението си *реостатите* биват:

- Пускови реостати – използват се при пускане в ход на двигатели за постоянен ток и асинхронни двигатели с навит 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.

- Регулиращи реостати – използват се 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 плъзгач. 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 плъзгача. 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. 1.19а). За плавно регулиране на напрежението реостатът се включва като делител на напрежение (потенциометър), както е показано на фиг. 1.19б. 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.

- Товарни реостати – използват се за натоварване на генератори и трансформатори. Те служат за регулиране на работните токове и се изчисляват за продължителен режим на работа. Най-често се използват различни конструкции метални реостати със стъпално регулиране на съпротивлението.



Фиг. 1.19

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.

1.7. Оформяне на протоколи за лабораторни упражнения

Студентските протоколи за лабораторни упражнения по електромеханични устройства се оформят по следния начин.

- *Първа (заглавна) страница* съдържа данни за учебното заведение – факултет, катедра и дисциплина; темата на упражнението; данни за студента – име, факултетен номер, специалност, курс, група; дата и име на ръководителя; програмата на работа; теоретична постановка и изчислителни формули.

- *Втора страница* – схема на опитната постановка; таблица с данни за използваните измервателни апарати (табл. 1.3) и таблица с данни за използваните и изпитвани електрически машини и апарати (табл. 1.4)

Изчертават се схемите, по които е било направено упражнението. Ако в схемите има изменение спрямо тези в ръководството, начертават се реалните схеми, по които е работено.

- *Трета страница* – опитни данни и резултати от изчисленията. Във всички лабораторни упражнения, предложени в това ръководство, се снемат една или няколко характеристики. За да се осигури проверка на резултатите (от опитните изследвания) в реално време, за всяко упражнение са направени електронни таблици в среда Excel. Примерните таблици включени във всяко упражнение са еднакви с техния електронен вариант. По този начин студентите лесно могат

да нанесат в Excel сметите опитни данни, да сравнят полученото с очакваното и да направят анализ

Таблица 1.3

№	Наименование и тип	Фабр. №	Система	Клас	Обхват	Скали деления	Константа

Таблица 1.4

№	Наименование	Фабр. №	P_n	U_n	I_n	n_n
			W	V	A	min ⁻¹

- Четвърта страница – графични зависимости. Графиките могат да бъдат направени на ръка или в компютърна среда, но да са правилни технически. Това означава: по осите да се отбележат равномерни скални деления за всяка величина, както и нейната дименсия; ако величините са много, скалите могат да се комбинират – например к.п.д. η и факторът на мощността $\cos \varphi$, отдадената P_2 и консумираната мощност P_1 и т.н.; всяка измерена стойност трябва да бъде нанесена на координатната мрежа. Ако графиките са много, те се начертават разноцветно, а точките им се отбелязват с различни знаци. Кривите трябва да бъдат плавни и да минават между точките на приблизително еднакви от тях разстояния (ако не съвпадат с тях). Изключение правят само кривите на грешките, които се чертаят с прави начупени линии, по върховете на които не се поставят точки. Това е така, защото грешките са случайни величини. Ако трябва да се екстраполират криви, това се прави с прекъснати линии. Освен това всички графики и скали трябва да започват от нулата. Само в много редки случаи, когато величината се изменя в много тесен диапазон, могат да се използват скали с т. нар. погъната нула.

- Пета страница – анализ и изводи. Прави се анализ на получените резултати и изводи от упражнението.

1.8. Безопасност при работа с електрически съоръжения

1.8.1. Злополуки при работа с електрически съединения

Основната причина за електрозлополуците е протичането на електрически ток през човека (т.нар. електрически токов удар), което може да предизвика поражения върху човешкия организъм от различен характер. Поражението от електрически ток може да бъде *пряко* върху тъканите и органите във вид на рани или изгаряния от различна степен и *непряко* – дразнене на тялото или парализация на сърдечната дейност и дихателната система, което може да доведе до временна

или трайна нетрудоспособност или до фатален край. Причините за електрозлополуки могат да бъдат групирани по следния начин

а Допиране до тоководещи части или проводници под напрежение (електрически удар при директен допир). От своя страна допирането бива два вида.

- Еднофазно допиране – допиране с ръка или с части от тялото до една фаза от захранващата мрежа от човек, стъпил на земята или допрян до заземен предмет.
- Двухфазно допиране – едновременно допиране на човека до две фази от мрежата. Големината на тока през човека и в двата случая зависи от съпротивлението по пътя на тока през човешкото тяло. Двухфазното допиране във всички случаи е по-опасно от еднофазното, но е сравнително по-рядко срещан случай.

б Допиране до проводими нетоководещи части (индиректен допир). Това са метални корпуси на двигатели, генератори, трансформатори, защитни обвивки на кабели, електрически табла, ръчни електроинструменти, електронни устройства, битови електроуреди и др., които при повреда на изолацията могат да попаднат под напрежение.

в Протичане на електрически ток в земята, което се получава при попадане на мълния върху електропроводи, съпроводено с електрически разряд във въздуха или пробив на изолаторите, както и при падане на земята на проводник под напрежение. Около мястото на земното съединение се получават опасни за хората потенциални разлики, които довеждат до протичане на ток през човека, стъпил на земята в непосредствена близост до това място (т.нар. крайно напрежение).

г Електрическа дъга или искра. Те възникват при къси или земни съединения в електрическите мрежи, при неправилна манипулация с електрически апарати за високо напрежение, при допир или опасно приближаване на човек до тоководещи части под високо напрежение и др., които освен пряко поражение на човека могат да предизвикат пожар или взрив с тежки последствия.

1.8.2. Травми, получени в резултат от електрозлополуки

Електрическите травми са нарушение на функциите или целостта на живите тъкани на човешкото тяло, предизвикано от електрически ток или електрическа дъга. Електрическите травми биват следните.

а Изгаряния на кожата или на вътрешните органи на човека. Те се дължат на топлинното действие на електрическия ток, протичащ през тялото на човека, или под действието на високата температура на електрическата дъга, както и смесено от двете въздействия.

б Белези от електрически ток по кожата в мястото на контакта, дължащи се на химическото действие на тока при температура, по-ниска от тази, причиняваща изгаряне.

в. Метализация на кожата, което е проникване в кожата на метални частици при контакт с електрическа дъга или на метални соли при допир до тоководеща част под напрежение.

г. Повреда на очите от ярката светлина на електрическата дъга.

д. Механични увреждания в резултат на силни и внезапни конвулсии на мускулите на тялото като реакция на протичащия през него ток, както и при падане на пострадалия от високо при удар от електрически ток.

1.8.3. Мерки за защита срещу електрошоколуки

Контрол на състоянието на изолацията

Състоянието на изолацията на електрическите машини, трансформатори и апарати, както и на всички други електротехнически, електродомакински и електронни устройства, е основният фактор за осигуряване на електробезопасността на персонала и потребителите. Редовно се провеждат периодични прегледи, профилактични изпитвания и профилактични ремонти. Основните причини за влошаване на качеството на изолацията са действието на температурата, влажността, електрическото поле, стареенето и механичните увреждания, които водят до намаление на съпротивлението на изолацията и на нейната електрическа якост. Затова тези параметри трябва да се контролират редовно.

Измерването на съпротивлението на изолацията в практиката се извършва с мегаометър или с прецизни електронни тестови уреди. За устройства с работно напрежение до 100 V измерването се извършва с мегаометър за напрежение 500 V, за работно напрежение до 500 V – с мегаометър за 1000 V, а при напрежението над 1000 V – с мегаометър за 2500 V.

Съпротивлението на изолацията в студено и загоряло, както и в сухо и влажно състояние, е различно. Затова съответните нормативни документи стриктно фиксират условията на изпитване и минималните допустими стойности на изолационното съпротивление (обикновено не по-малко от 500 kΩ).

Проверката на електрическата якост на изолацията се извършва с изпитвателно напрежение, по-високо от работното. Например за повечето електротехнически устройства за ниско напрежение (под 500 V), изолацията се изпитва с променливо напрежение $U = 2U_n + 1000V$ с честота 50 Hz в продължение на 1 min, макар че различните стандарти предписват различни стойности.

Освен горните два параметъра, за по-прецизен контрол на изолацията може да се измерва и ъгълът на диелектричните загуби $\tan \delta$ и нивото на частичните разряди, повишението на които е сигнал за влошаване на качеството на изолацията.

Използване на двойна защита

Двойната изолация или защитното изолиране е конструктивна мярка, която се състои в поставяне освен на основната изолация и на още един слой изо-

лация, предпазваща човека от допир с металните нетоководещи части, оказващи се случайно под напрежение. Такава изолация се прилага най-често в ръчните електроинструменти, електродомакинските уреди и някои електронни устройства. Например в някои електродвигатели между роторния пакет и вала или между статорния пакет и корпуса се поставя изолационен слой с достатъчна дебелина, който да предпази попадането им под напрежение при евентуален пробив на основната изолация. Подобна мярка се прилага и при някои трансформатори, токозахранващи устройства или електромагнити.

Заземяване

Основна мярка за осигуряване на безопасността при експлоатация на електрическите уредби и електромеханичните устройства е заземяването. На заземяване подлежат всички метални части и корпусите на електрически машини, апарати и трансформатори, металните конструкции в електрическите уредби, електрическите табла, металните обвивки на силовите кабели, металните стълбове на въздушните електропроводи и др. Не се заземяват елементи от електрически устройства с двойна изолация, някои електронни устройства и битови уреди и др.

Заземяването в електроснабдителните мрежи и електромеханичните устройства трябва да гарантира безопасността на обслужващия персонал и потребителите, нормалната работа на съоръженията и тяхната защита при аварийни съединения между проводниците или пренапрежения от комутационен или атмосферен характер. За защита срещу индиректен допир се прилагат следните видове заземявания.

а. Работно заземяване. То обхваща заземяването на неутралата на трифазни трансформатори, генератори и други устройства, за да се гарантира сигурната им работа в нормален и аварийен режим.

б. Защитно заземяване. То осигурява безопасна работа на обслужващия персонал в електрическите уредби и потребителите на електромеханични устройства чрез заземяване на металните, нетоководещи части на съоръженията. Нормално тези метални части имат нулев потенциал, но при повреда или пробив на изолацията могат да попаднат под напрежение и да станат опасни за хората. Заземителите са метални елементи (електроди) или група от такива елементи електрически свързани помежду си и положени непосредствено в земята.

в. Защитно зануляване. Защитното зануляване представлява електрическо съединяване на металните нетоководещи части на съоръженията със заземения нулев проводник на захранващата мрежа.

По стандарт всички захранващи електроинсталации трябва да се изпълняват със защитно зануляване. При еднофазните инсталации трябва да се използват трипроводни линии, а при трифазните – четирипроводни или петпроводни. Това осъществява мрежите, но повишава електробезопасността и сигурността

та при експлоатация на електросъоръженията.

2. Мълниеизащитно заземяване. Представлява мълниеизащитната инсталация на сградите, състояща се от мълниеприемници, токоотводи и заземители във вид на мълниеизащитни мрежи, метални въжета, искрови междини и други.

З а щ и т н о и з к л ю ч в а н е

Защитното изключване е автоматичното изключване на участък от електрическата мрежа при поява на опасност от поразяване на човек от електрически ток. Защитното изключване се осъществява от специална защита (различна от тази срещу къси съединения), която трябва да има голяма чувствителност, селективност, сигурност и бързодействие. Тази защита заработва основно при появата на корпусно напрежение или на ток на земно съединение с определена стойност и се състои от измервателни елементи (напрежителни или токови трансформатори) и изключвателни елементи – релета и прекъсвачи, оразмерени за съответното напрежение и ток. Освен тази защита съществува и още един тип – т.нар. дефектолокова защита, която реагира на тока на утечката (тока на електропроводимостта) през изолацията, нарастването на който е показател за влошената изолация и вероятен пробив, последван от корпусно съединение.

1.8.4. Фактори, определящи степента на поражения от електрически ток

Електрическо съпротивление на човешкото тяло

В зависимост от редица фактори тялото на човека може да се разглежда като проводник, като полупроводник или като изолатор (диелектрик). Поради това *съпротивлението* на човешкото тяло се колебае в твърде широки граници. Електропроводимостта на живата тъкан обаче се различава значително от тази на техническите проводници, полупроводници и изолатори не само по физическите си свойства, но и по по-сложните биохимични и биофизични процеси, присъщи само на живата материя. Живите тъкани съдържат значително количество вода с разтворени в нея различни минерални соли, което ги прави електролити (електропроводими течности), но тъй като различните органи, костите и кожата имат различно водо- и солесъдържание, тяхното електрическо съпротивление е различно. Например съпротивлението на сухата и здрава кожа може да достигне до няколко десетки $k\Omega$, докато влажната, замърсена или увредена кожа и вътрешните органи имат средно съпротивление само няколкостотин Ω . И тук тези стойности се отнасят за мъжете, докато за жените и децата те са $(1,5 - 2)$ пъти по-малки. Тъй като тези стойности варират в твърде широки граници, като международно приетата средна стойност за съпротивлението на човека е $1 k\Omega$.

Големината на тока

Големината (силата) на тока, протичащ през човека, е основният фак-

тор, определящ степента на електропоражението. Силата на тока зависи от съпротивлението на човешкото тяло и от напрежението, приложено върху него. Но степента на поражение зависи и от редица други фактори като например честотата и вида на тока, пътя на тока през тялото, състоянието на организма на човека, възрастта и пола му. И тъй като тези фактори варират в твърде широки граници, няма единно мнение за големината на опасния и безопасния ток. Все пак от редица наблюдения и изследвания могат да се дефинират някои общоприети стойности.

За безусловно опасен променлив ток с промишлена честота се счита ток с големина над 100 mA , но смъртоносни поражения могат да се получат и от много пъти по-слаб ток. Възприети са следните осреднени граници с оглед на степента на дразнене и поражение.

- Безопасен ток – до $50 \mu\text{A}$ променлив ток, или до $100 \mu\text{A}$ постоянен ток. Това е ток, който не предизвиква усещания и не нанася поражения.

- Усещан ток – до 1 mA променлив ток, или до 5 mA постоянен ток. Това е ток, който при допир се усеща, но не представлява опасност за живота и здравето на човека.

- Отпускащ ток – до 10 mA променлив ток, или до 50 mA постоянен ток. Това е ток, който предизвиква изтръпване на кожата, поносими болки и леки конвулсии на мускулите, но човекът е в състояние да се отдели от тоководещата част.

- Неотпускащ ток – между 10 и 50 mA променлив ток, респ. 50 до 300 mA постоянен ток. Това е ток, при който човек не може самостоятелно да се отдели от електрическата верига и който предизвиква силни болки и значителни конвулсии на мускулите. При по-дълго време на действието му започва парализа и критично състояние на организма, което довежда до загуба на съзнание, спиране на дишането и сърдечната дейност.

- Фибрилационен ток – над 50 mA променлив ток или над 300 mA постоянен ток, който довежда до неравномерно свиване (фибрилация) на сърдечния мускул, спиране на кръвообращението и прекратяване на дишането.

- Смъртоносен ток – над 5 A .

Посочените стойности са осреднени и се отнасят за мъже и за време на действие на тока от порядъка на $(1 - 2) \text{ s}$. За жените тези стойности са около $1,5$ пъти по-малки, а за децата – двойно по-малки. Както се вижда от горните стойности при еднаква големина на тока, променливият ток с промишлена честота е значително по-опасен от постоянния ток. Това се дължи на различното действие на вида на тока върху живите клетки. При постоянен ток с опасна големина във вътрешноклетъчната течност, която може да се разглежда като електролит, възниква електролиза и разделяне на положителните и отрицателните йони. Движението на които предизвиква нарушаване на нормалното състояние на клетките. При променлив ток с промишлена честота $(50 - 60) \text{ Hz}$ този процес се извършва

периодически, което предизвиква по-тежки нарушения на естественото състояние на клетките. Обаче при ток с висока честота от порядъка над 10 kHz движението на йоните е инертно, а и поради токовото изместване (скин-ефекта) токът протича по повърхността на кожата, вследствие на което опасността от електропоражение намалява или изчезва напълно.

Големината на приложеното напрежение

Напрежението самостоятелно не е решаващ фактор за опасността от електропоражение. Определяща е големината на протичащия през човека ток, стойността на който зависи от съпротивлението на тялото и от приложеното върху него напрежение. Като се имат пред вид цитираните по-горе средни стойности за тока и за съпротивлението на човешкото тяло, за напълно безопасни напрежения се приемат напреженията под 12 V променливо и под 24 V постоянно напрежение, а за практически безопасни – до 42 V променливо или до 60 V постоянно напрежение. За сравнително малко опасни се приемат напреженията до 120 V (променливо или постоянно), а за опасни – напрежения над 250 V. Според стандартите с оглед на електробезопасността ниски напрежения са тези до 500 V, а високи – над 500 V.

ВТОРА ГЛАВА

ИЗПИТВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

УПРАЖНЕНИЕ 1

ЕЛЕКТРОМАГНИТИ ЗА ПОСТОЯННО И ПРОМЕНЛИВО НАПРЕЖЕНИЕ

I. Програма на работа

A. *Опитни изследвания:*

1. Снемане на товарни характеристики на електромагнит за постоянно напрежение.
2. Снемане на товарни характеристики на електромагнит за променливо напрежение.

B. *Изчисления и построения:*

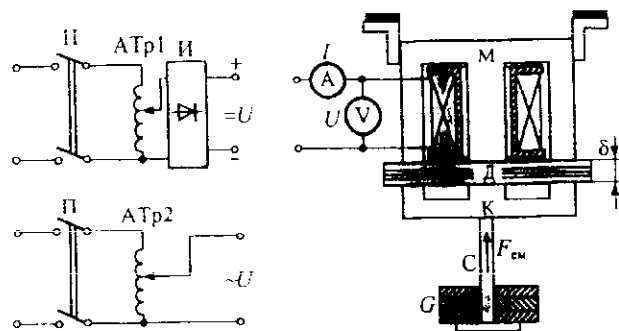
1. Построяване на семейства товарни характеристики за двата вида електромагнити.
2. Построяване на електромеханични характеристики за двата вида електромагнити.
3. Изчисляване и построяване на характеристиките на условната полезна работа за двата вида електромагнити.

II. Схема на опитната постановка

На фиг. 1.1 е показана опитната постановка за изпитване на електромагнити. На изпитване се подлагат два вида електромагнити – за постоянно и за променливо напрежение.

Захранването на възбудителната намотка на електромагнита за постоянно напрежение се осъществява от достатъчно мощен регулируем изправител И с регулиране на напрежението на входа на изправителя от автотрансформатор Атр1. Захранването на възбудителната намотка на електромагнита за променливо напрежение се осъществява от регулируем автотрансформатор Атр2 с достатъчна мощност.

За изследването се използва електромагнитна система с линейно преместване на котвата К. Определен брой дистанционни пластини Д определят необходимата въздушна междина δ между котвата и неподвижния магнитопровод М. 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 прибави и теглото на котвата. Силата се измерва при уравновесяването ѝ с теглото на тежестите и котвата в момента на *оттепяването* на котвата.



Фиг. 1.1

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

1. Товарна характеристика

Тази характеристика представлява зависимостта на електромагнитната сила F_{em} от напрежението U , приложено към електромагнита или от тока I , който тече през възбудителната намотка при постоянна въздушна междина δ , т.е.

$$F_{em} = f(U; I) \text{ при } \delta = \text{const.}$$

Снема се семейство характеристики при определено положение на котвата и при пренебрегване на преходните процеси.

Построяването на характеристиките започва при напрежение или ток, равни на нула и установена с дистанционни немагнитни пластини въздушна междина. На отлепената котва се окачва минимална тежест. Постепенно се увеличава напрежението или токът до момента на привличане на котвата. След това постепенно се намалява захранващата величина (напрежението или тока) и се отчита стойността \dot{U} , при която котвата се *отлепва*. Задават се повишаващи стойности на тежестта и за всяка от тях се прави измерване по подобен начин. Снемането на характеристиката завършва при достигане на стойности на напрежението или тока, които са допустими от постановката.

При електромагнити за променливо напрежение стойността на силата F_{em} се изменя в границите между минимума и максимума за една и съща ефективна стойност на напрежението, поради особеностите на променливия магнитен поток. Затова измерената сила за този електромагнит е средната стойност на нул-спиращата електромагнитна сила.

Характеристиките се снемат за различни въздушни междини, които се задават със стойности от нула до максимална, определени от възможностите на постановката. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 1.1. По тези данни се построява семейство товарни характеристики, показани на фиг. 1.2. При неинвертирана магнитна система характеристиките зависят почти в квадрат от стой-

ностите на напрежението или тока.

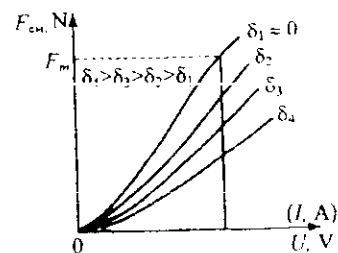
Таблица 1.1

		Отчитат се						Изчисляват се
δ	G	U		I		F_{em}		
mm	kg	дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	
							N	

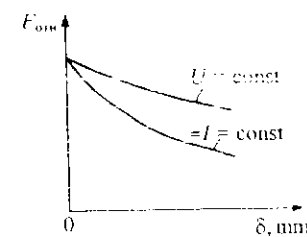
Изчисленията се правят по формулата

$$F_{em} = gG,$$

където g е земното ускорение ($9,81 \text{ m/s}^2$); G – сума от масите на тежестите и котвата (kg).



Фиг. 1.2



Фиг. 1.3

2. Електромеханична характеристика

Това е зависимостта на електромагнитната сила F_{em} от въздушната междина δ при постоянни стойности на напрежението U или тока I , т.е.

$$F_{em} = f(\delta) \text{ при } U = \text{const} \text{ или } I = \text{const.}$$

Тази характеристика може да снеемe опитно, но може да се построи и в графичен вид, като се използва семейство товарни характеристики. Получената електромагнитна характеристика също е статична. Тя се построява за номиналните стойности на напрежението, съответно на тока на електромагнитите. За целта на фиг. 1.2 се прекарва права $U = \text{const}$ (или $I = \text{const}$). Пресечните точки на тази права с товарните характеристики са точки от търсената електромеханична характеристика. Резултатите се нанасят в табл. 1.2.

За да се сравнят силите на двата електромагнита, те се пресмятат в относителни единици по отношение на максималната сила $F_{em, \text{max}}$ за въздушна междина $\delta = 0$, т.е.

$$F_{em} = \frac{F_{em}}{F_{em, \text{max}}}$$

Таблица 1.2

δ mm	F_{cm} N	$F_{отн}$	W_{yn} mJ

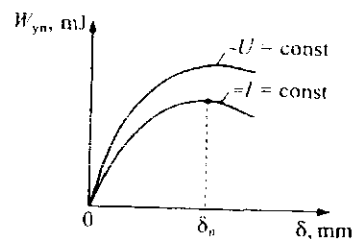
Изчислените стойности се нанасят в табл. 1.2 и се построяват характеристиките (фиг. 1.3). Сравнението показва по-силно изразена зависимост на силата от въздушната междина при електромагнита за постоянно напрежение. Електромагнитната сила зависи от квадрата на магнитната индукция във въздушната междина B_{δ} . При електромагнита за постоянно напрежение, поради постоянната стойност на тока, увеличението на въздушната междина води до по-силно намаление на индукцията B_{δ} , а следователно и на силата. При електромагнита за променливо напрежение с увеличаването на въздушната междина δ се намалява индуктивното съпротивление на електромагнита, нараства токът и индукцията остава почти постоянна, а следователно и силата.

§ Характеристика на условната полезна работа

Това е зависимостта на условната полезна работа W_{yn} от въздушната междина δ при постоянна стойност на напрежението U или тока I , т.е.

$$W_{yn} = f(\delta) \text{ при } U = \text{const или } I = \text{const},$$

където $W_{yn} = F_{cm} \delta$. Резултатите са нанасят в табл. 1.2. Видът на характеристиките е показан на фиг. 1.4. Те имат максимум при дадена въздушна междина $\delta_{оп}$, която е оптимална за дадения електромагнит.



Фиг. 1.4

УПРАЖНЕНИЕ 2 АВТОМАТИЧЕН ПРЕКЪСВАЧ

I. Програма на работа

A. Опытни изследвания:

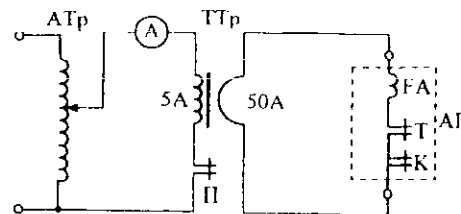
1. Запознаване с конструкцията, експлоатационните характеристики и методи за изпитване на топлинни и електромагнитни защитни устройства в автоматичните прекъсвачи.
2. Измерване времето на задействане на топлинния изключвател за поредица от зададени стойности на тока.
3. Изпитване на максималнотоковия изключвател.

B. Изчисления и построения:

1. По данните от измерванията да се построи времетоковата характеристика на автоматичния прекъсвач.

II. Схема на опитната постановка

Схемата за изпитване на топлинния изключвател Т и максималнотоковия изключвател FA на автоматичния прекъсвач АП е показана на фиг. 2.1. Използват се регулируем автотрансформатор АТр и токов трансформатор ТТр. Токовият трансформатор е включен обратно: първична е намотката за 5А, а вторична - например намотката за 50А. В този случай изпитвателният ток $I = 10 I_1$, където I_1 е измереният от амперметъра ток.



Фиг. 2.1

АТр - автотрансформатор; ТТр - токов трансформатор;
 АП - автоматичен прекъсвач; Т - топлинен изключвател;
 FA - максималнотоков изключвател; К - минималнонапрежениев изключвател; П - контакт на автоматичния прекъсвач

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Автоматичните прекъсвачи (АП) имат голяма комутационна възможност и са предназначени за провеждане на ток при номинален режим на работа, за оперативно включване и изключване на електрически вериги. Също така те служат за защита на електрически съоръжения, като автоматично (самостоятелно) изключват електрическата верига при къси съединения, при недопустими по продължителност претоварвания, при спадане на напрежението под допустими граници и т.н. АП са едно-, дву-, три- или четириполюсни апарати. Те могат да бъдат с токоограничаване (бързодействащи) или без токоограничение (обикновени). Основните характеристики на АП са времетокови характеристики на неговите изключватели, които отразяват зависимостта на времето за изключване от протичащия ток.

Основните елементи на АП са задвижващата система (ръчна или електромагнитна), междинното кинематично устройство, главната и помощната контактна система, дъгочислелната система, защитните изключватели и изолационните части.

Основните конструктивни елементи на автоматичния прекъсвач са следните:

- главна контактна система;
- помощна контактна система;
- задвижваща система, която може да бъде ръчна, чрез електромагнитен или електродвигател и пружина. С нея се осъществява оперативното включване и изключване на прекъсвача;

междинно кинематично устройство, което се състои от няколко шарнирно свързани лоста, които свързват подвижните части на контактните системи и задвижващата система. То задържа прекъсвача във включено положение, когато се прекрати действието на задвижващата система и изключва прекъсвача, когато се задейства един от изключвателите. Изключвателите са механизми, които реагират на изменението на физичните величини ток, напрежение или топлина;

- топлинен изключвател, който се задейства при недопустими по продължителност претоварвания. Представлява биметална пластина, която се нагрява от тока в главната верига. Чрез промяна във формата на пластината се задейства механизм, който прекъсва тока. АП не може да бъде включен докато пластината не се охлади. Топлинният изключвател се задейства при ток $I > (1,05 \div 7) I_{\text{рег}}$, където $I_{\text{рег}}$ е токът на настройка на изключвателя. Токът $I_{\text{рег}}$ може да се променя в известни граници чрез регулатора на топлинния изключвател, който обикновено е разположен на лицевата страна на прекъсвача;

- максималнотоков изключвател, представляващ електромагнитен механизъм, който се задейства, когато токът в главната верига надвиши определена стойност. Изключва веригата при къси съединения;

- минималнонапрежителен изключвател, представляващ електромагнитен механизъм, който изключва включения прекъсвач, когато напрежението се понижи под определена стойност - в границите от $(0,7 \div 0,35) U_n$ и възпрепятства включването на прекъсвача при напрежение по-ниско от $0,35 U_n$;

- нулев изключвател, който изключва АП при напрежение в границите от $(0,35 \div 0,1) U_n$ и възпрепятства неговото включване при напрежение по-ниско от $0,1 U_n$;

- независим изключвател, представляващ електромагнитен механизъм, който изключва АП при напрежение от $(0,7 \div 1,1) U_n$ по желание на оператора, независимо от параметрите в главната електрическа верига.

Основните критерии за избора и експлоатацията на прекъсвачите са техните обявени характеристични величини: брой на полюсите на контактната система; вид на тока (променлив или постоянен); работно напрежение; честота на тока; работен ток; работен режим; включвателна и изключвателна (комутационна) възможност; степен на защита; експлоатационни условия.

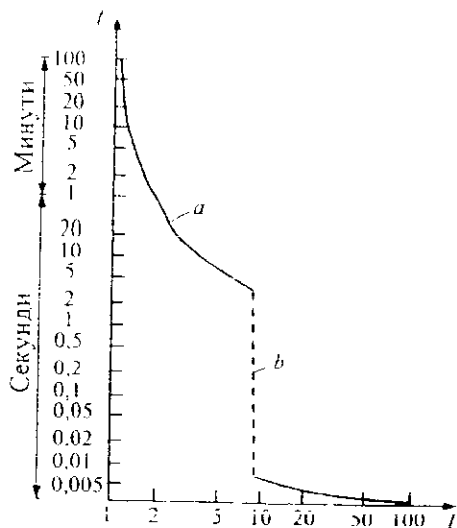
1. Времетокова характеристика

За опитно снемане на времетоковата характеристика се свързва схемата, показана на фиг. 2.1. Задават се поредица стойности на тока I и за всяка от тях се отчита времето за изключване t . Работи се по следния начин. Автотрансформаторът се поставя в нулево положение. Включва се автоматичният прекъсвач, като плавно, но достатъчно бързо (за не по-малко от 2-3 s), токът се увеличава до достигането на зададената стойност. Времето, за което прекъсвачът изключва, се измерва с механичен или електронен секундомер. След изключване на автоматичния прекъсвач автотрансформаторът се връща в нулево положение, изчаква се известно време за да се охлади биметалната пластина, включва се отново АП и се задава нова стойност на тока I . Препоръчва се на отношението $I/I_{\text{рег}}$ да се задават стойности 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 до 6, според възможностите на опитната постановка. Резултатите се нанасят в табл. 2.1.

Таблица 2.1

I	t
A	s

Видът на времетоковата характеристика на топлинния изключвател е показана с пълтна линия на фиг. 2.2. Характеристиката е зависима от тока I , като с неговото увеличение времето за изключване се намалява, защото по-бързо се нагрява биметалната пластина и по-бързо се задейства топлинния изключвател.



Фиг. 2.2

2. Изпитване на максималнотоков изключвател

Целта на изпитването е да се провери задействането на максималнотоков изключвател. Използва се схемата от фиг. 2.1, като се правят най-малко три опита за такава проверка. Изключвателят трябва да заработи при ток $I = (8 \div 14) I_{per}$, където I_{per} е токът на настройка на топлинния изключвател. Това е независима от тока характеристика, тъй като изключвателят се задейства практически веднага, когато токът надвиши определена стойност.

Работи се по следния начин. Автотрансформаторът се поставя в нулево положение. Включва се АП. Плавно, но достатъчно бързо (за не по-малко от $(2 \div 3)s$), токът се увеличава до достигането на зададената му стойност.

ТРЕТА ГЛАВА

ИЗПИТВАНЕ НА ТРАНСФОРМАТОРИ

УПРАЖНЕНИЕ 3

ТРИФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

1. Програма на работа

А. Опитни изследвания:

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

Б. 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.

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 Тр се захранва с регулируемо напрежение, получавано от индукционен регулатор ИР.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

1. Коефициент на трансформация

Този коефициент представлява отношението на фазовото е.д.н. на първичната намотка към фазовото е.д.н. на вторичната намотка, т.е.

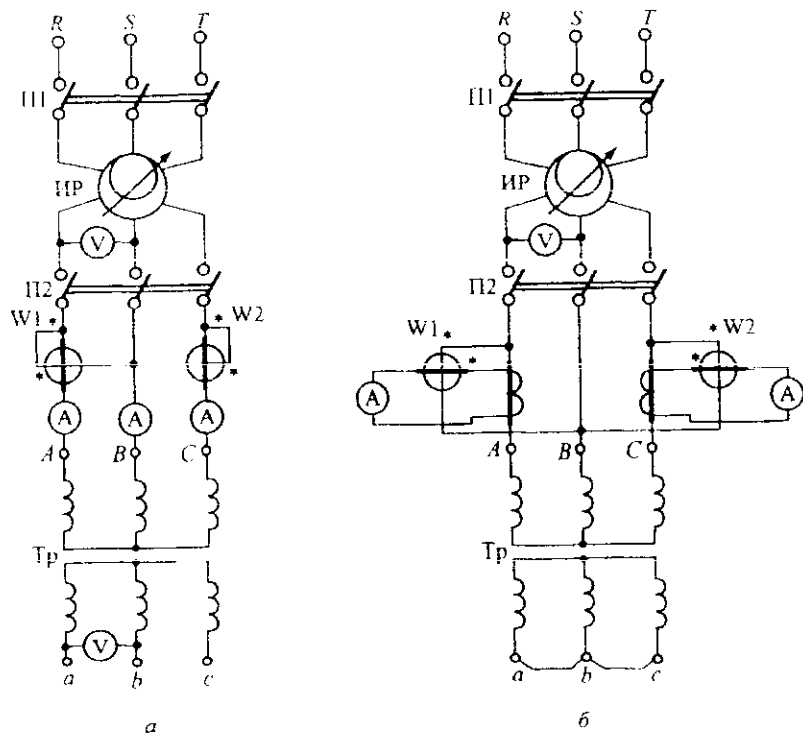
$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2},$$

където w_1 и w_2 са броят на навивките на двете намотки.

Определя се при празен ход на трансформатора по метода на двата вола

метра (фиг. 3.1а). Ако се пренебрегнат падовете на напрежения в намотките на трансформатора и в измервателните апарати $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$, $E_{2\phi} \approx U_{2\phi}$ и следователно коефициентите на трансформация могат да се изчислят по формулата

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



Фиг. 3.1

Измерването се осъществява като на първичната намотка се подаде напрежение $(0,1 \div 1,0)U_{1н}$ и едновременно се отчитат едноименните първични и вторични линейни напрежения. Получените резултати се нанасят в табл. 3.1.

Таблица 3.1

U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	k_{11}	$U_{1\phi}$	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	k_{12}	$U_{2\phi}$	k
дел	дел	дел	V/дел	V	дел	дел	дел	V/дел	V	-

Средноаритметичните линейни напрежения са:

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

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

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} - \text{при свързване на намотките в звезда};$$

$$U_{\phi} = U_{л} - \text{при свързване на намотките в триъгълник}.$$

2. Характеристики на празен ход

Снемат се зависимостите на: тока $I_{0л}$, мощността P_0 и фактора на мощността $\cos \varphi_0$ във функция от напрежението на първичната намотка $U_{0л}$, при постоянна честота и при отворена вторична намотка, т.е.

$$I_{0л}, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{0л}) \quad \text{при } f = f_{н} \text{ и } I_2 = 0.$$

Използва се схемата, показана на фиг. 3.1а. При избора на измервателни апарати трябва да се вземе предвид, че напрежението ще се изменя в границите $(0,3 \div 1,1)U_{1н}$, а токът при празен ход и номинално напрежение е от порядъка на $(0,02 \div 0,1)I_{1н}$.

След затваряне на прекъсвача П1 се установява минималното напрежение на изхода на ИР и едва тогава се затваря П2. Това е необходимо, тъй като, ако се подаде директно номиналното напрежение, се развива преходен процес, при който токът може да надвиши $(4 \div 7)$ пъти номиналния и да повреди измервателните апарати. Захранващото напрежение се повишава до стойност $1,1U_{1н}$, при която се прави първото отчитане. Подават се поредица намаляващи стойности на напрежението (включително и номиналната) и се отчитат величините, които се нанасят в табл. 3.2. При изчисленията се използват формулите:

$$I_{0л} = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; \quad P_0 = k_{\alpha}(\alpha_1 \pm \alpha_2); \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{0л}I_{0л}}$$

Таблица 3.2

Отчитат се									Изчисляват се		
$U_{0л}$		I_{0A}	I_{0B}	I_{0C}	k_{α}	α_1	α_2	k_{α}	$I_{0л}$	P_0	$\cos \varphi_0$
дел	V/дел	V	дел	дел	дел	дел	дел	W/дел	A	W	-

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

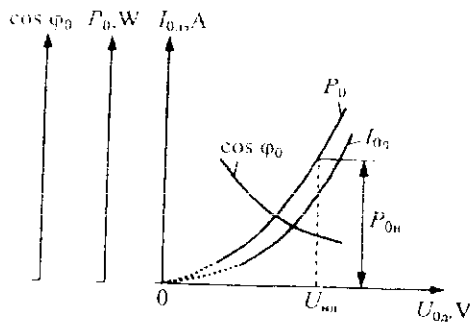
ход на трансформатора се счита средноаритметичният ток. По данни от табл. 3.2 се построяват характеристиките на празен ход (фиг. 3.2).

При празен ход токът I_0 изостава от напрежението $U_{0\phi}$ почти на 90° . Поради това реактивната съставка $I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0$ е значително по-голяма от активната $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$. Тъй като от друга страна напрежението $U_{0\phi} \approx E_{1\phi} \approx \Phi$, то зависимостта $I_0 = f(U_{0\phi})$ е близка до кривата на намагнитване на трансформатора $\Phi = f(I_{0p})$. Характерът на кривата $I_0 = f(U_{0\phi})$ зависи от степента на насищане на магнитопровода. При ниски напрежения магнитопроводът е ненаситен и токът се изменя пропорционално на напрежението. С увеличаване на напрежението се увеличава насищането, при което токът расте по-бързо от напрежението и кривата $I_0 = f(U_{0\phi})$ се закривява нагоре. Консумираната мощност при празен ход P_0 покрива загубите в стоманата p_c и електрическите загуби в първичната намотка p_{e10} , т.е.

$$P_0 = p_c + p_{e10}.$$

Тъй като токът на празен ход е много малък (няколко процента от номиналния), загубите p_{e10} са пренебрежимо малки и затова $P_0 \approx p_c$, т.е. консумираната мощност при празен ход практически е равна на загубите в стоманата.

Загубите в стоманата са пропорционални на квадрата на магнитната индукция, а тя е пропорционална на индуктираното е.д.н., което е приблизително равно на напрежението. Или $p_c \approx U_{0n}^2$, поради което зависимостта $P_0 = f(U_{0n})$ представлява парабола.



Фиг. 3.2

Характерът на кривата $\cos \varphi_0 = f(U_{0n})$ може да се обясни като се вземе предвид, че

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0n} I_{0n}} \approx \frac{U_{0n}^2}{U_{0n} I_{0n}} = \frac{U_{0n}}{I_{0n}}$$

При увеличаване на напрежението степента на насищане на магнитопровода се увеличава, токът I_0 нараства (предимно за сметка на неговата реактивна съставка), поради което факторът на мощността $\cos \varphi_0$ намалява по хиперболически закон и при номинално напрежение има ниски стойности.

3. Параметри на празен ход

Заместващата схема на една фаза на трансформатора при празен ход е показана на фиг. 3.3.

Приети са следните означения:

- 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 данни от табл. 3.2 за $U_{0n} = U_{1n}$, като при свързване на първичната намотка в звезда се използват формулите:

$$z_0 = |z_1 + z_m| = \frac{U_{0n}}{\sqrt{3} I_{0n}}; \quad r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_0}{3 I_{0n}^2}; \quad x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{z_0^2 - r_0^2},$$

а при свързване на намотката в триъгълник:

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

4. Характеристики на късо съединение

Снемат се зависимостите на: тока $I_{кн}$, мощността P_k и фактора на мощността $\cos \varphi_k$ във функция от напрежението на първичната намотка U_{1n} при постоянна честота и при затворена на късо вторична намотка

$$I_{кн}, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{1n}) \quad \text{при} \quad f = f_n \quad \text{и} \quad U_2 = 0.$$

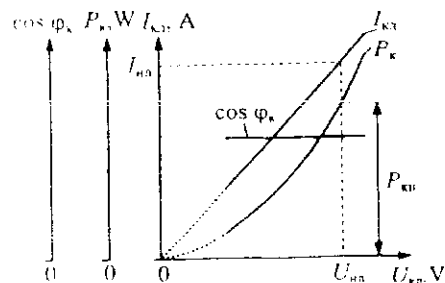
Измерването се извършва по схемата, показана на фиг. 3.16. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че на трансформатора се подава едно силно понижено напрежение, така че токът да не надвишава $(1,0 \div 1,1) I_{1n}$. Това напрежение е от порядъка на $(0,02 \div 0,1) U_{1n}$. Измерването започва от минимално напрежение, подавано от захранващия ИР. Затваря се прекъсвача П2. Постепенно напрежението се повишава до достигане на стойност на тока $(1,0 \div 1,1) I_{1n}$, при която се прави първото отчитане. Следват измервания при постепенно намаляване на напрежението, включително и при номинален ток. Резултатите се нанасят в табл. 3.3. При изчисленията се използват формулите:

$$I_{0.1} = \frac{I_{kA} + I_{kC}}{2}; \quad P_k = k_n (\alpha_1 \pm \alpha_2); \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{k1} I_{k1}}$$

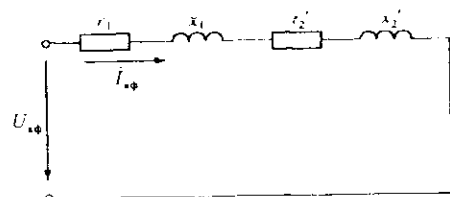
Таблица 3.3

Отчитат се								Изчисляват се			
U_{k1}			I_{kA}	I_{kC}	k_A	α_1	α_2	k_n	I_{k1}	P_k	$\cos \varphi_k$
дел	V/дел	V	дел	дел	A/дел	дел	дел	W/дел	A	W	-

По данните, представени в табл. 3.3, се построяват характеристиките на късо съединение (фиг. 3.4).



Фиг. 3.4



Фиг. 3.5

Магнитната система на трансформатора е ненаситена поради понижено напрежение и малкия основен поток, вследствие на което зависимостта $I_{k1} = f(U_{k1})$ представлява права линия. По същата причина загубите в стоманата са пренебрежимо малки и консумираната активна мощност P_k практически е равна на електрическите загуби в намотките

$$P_k = P_{c1} + P_{c2} + P_{ст} \approx P_{c1}$$

Тъй като електрическите загуби са пропорционални на квадрата на тока, зависимостта $P_k = f(I_{k1})$ (респ. $P_k = f(U_{k1})$) представлява парабола. Зависимостта на фактора на мощността $\cos \varphi_k = f(U_{k1})$ е права линия, успоредна на абсцисната ос. Това се вижда от $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{k1} I_{k1}} = \frac{c I_{k1}^2}{I_{k1} I_{k1}} = c = \text{const}$, където c е кое-

фициент на пропорционалност.

5. Параметри на късо съединение

Опростената заместваща схема на една фаза на трансформатора при късо съединение е показана на фиг. 3.5.

Приети са следните означения:

- r_1 – активно съпротивление на първичната намотка;
- x_1 – индуктивно съпротивление на разсейване на първичната намотка;
- r_2' – активно съпротивление на приведената вторична намотка;
- x_2' – индуктивно съпротивление на разсейване на приведената вторична намотка.

По данните от табл. 3.3 за номинален ток се изчисляват параметрите на късо съединение. При свързване на първичната намотка в звезда се използват формулите:

$$z_k = |z_1 + z_2'| = \frac{U_{k1n}}{\sqrt{3} I_{k1n}}; \quad r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3 I_{k1n}^2}; \quad x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

а при свързване на намотката в триъгълник –

$$z_k = \frac{\sqrt{3} U_{k1n}}{I_{k1n}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_{k1n}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

6. Напрежение на късо съединение

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

$$u_k = \frac{I_{1\text{нф}}^2 z_k}{U_{1\text{нф}}} 100\%$$

Активната и реактивната съставка на напрежението на късо съединение са съответно:

$$u_{ка} = \frac{I_{1\text{нф}} r_k}{U_{1\text{нф}}} 100\%; \quad u_{кр} = \frac{I_{1\text{нф}} x_k}{U_{1\text{нф}}} 100\%.$$

В последните изрази $I_{1\text{нф}}$ и $U_{1\text{нф}}$ са номиналните фазови стойности на тока и напрежението на първичната намотка.

УПРАЖНЕНИЕ 4

ЕДНОФАЗЕН МНОГОНАМОТЪЧЕН ТРАНСФОРМАТОР С МАЛКА МОЩНОСТ

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.
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.

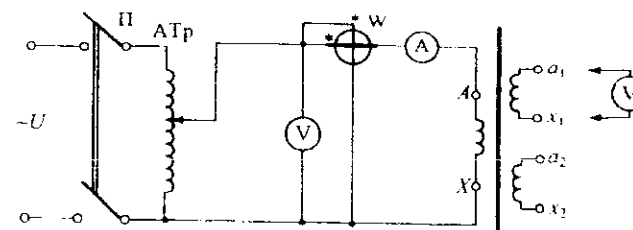
II. Схема на опитната постановка

Еднофазният многонамотъчен трансформатор има една първична и няколко вторични намотки. Вторичните намотки са за различни напрежения и служат за захранване на няколко консуматора (устройства за бита, автоматиката, електрониката). Тези трансформатори се наричат още мрежови или токозахранващи, тъй като почти винаги някоя от вторичните намотки захранва токоизправител. Мощността им не надхвърля няколкостотин волтампера.

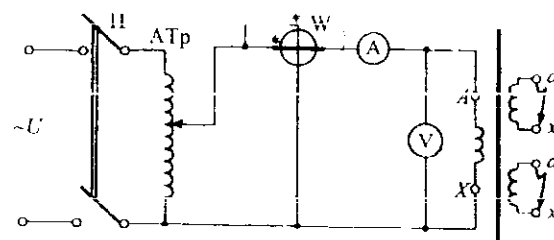
Схемите за измерване на коефициента на трансформация, за изследванията на празен ход, късо съединение и външната характеристика са показани съответно на фиг. 4.1, фиг. 4.2 и фиг. 4.3.

Изследваният трансформатор при всички схеми се захранва от еднофазен регулируем автотрансформатор с мощност не по-ниска от мощността на из-

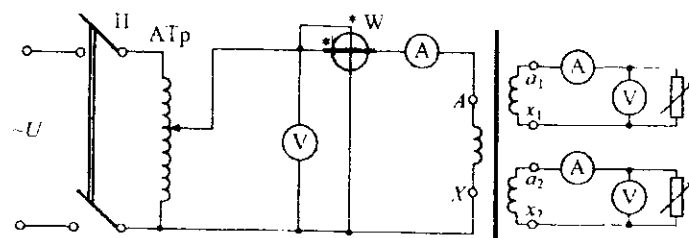
следвания трансформатор. Промяната на товара се осъществява с регулируемите реостати r_1 и r_2 с подходящо избрани параметри по ток и съпротивление



Фиг. 4.1



Фиг. 4.2



Фиг. 4.3

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

1. Коефициент на трансформация

Коефициентът на трансформация е равен на отношението на индуктираните от основния магнитен поток е.д.н. в намотката за високо напрежение и съответната намотка за ниско напрежение с пореден номер n , следователно и на 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 с два волтметра (фиг. 4.1). Изборът на апаратите се прави по номиналните стойности на напреженията на първичната и вторичните намотки. Измерването се осъществява като на първичната намотка се подава напрежение $U_{10} = (0,1 \div 1,0) U_{1n}$ и се отчитат последователно вторичните напрежения U_{2n0} . Ако се пренебрегнат напреженията 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.

2. Характеристики на празен ход

Снема се зависимостите на: тока I_0 , мощността P_0 и фактора на мощността $\cos \varphi_0$ от напрежението на първичната намотка U_{10} при постоянна честота и при отворени всички вторични намотки, т.е.

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

Използва се схемата на фиг. 4.1. При избора на измервателни апарати трябва да се има предвид, че напрежението ще се изменя от нула до $1,2U_{1n}$, а токът на празен ход при номинално напрежение е от порядъка на $0,2I_{1n}$.

Снемането на характеристиките започва от едно минимално напрежение, определено от обхватите на измервателните апарати. Първичното напрежение U_{10} постепенно се повишава до стойност $1,1U_{1n}$ като се правят измервания, включително и за номиналното напрежение. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Отчитат се								Изчислява се
U_{10}			I_0			P_0		$\cos \varphi_0$
дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	дел	W/дел	W
								-

Факторът на мощността се изчислява по формулата

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

В обща координатна система по данни от табл. 4.1 се построяват характеристиките на празен ход. Те са подобни на тези от фиг. 3.2 и обяснението на характера

на кривите е аналогично с това при трифазен трансформатор (упражнение № 3)

Консумираната мощност при празен ход P_0 покрива загубите в стоманата p_c и електрическите загуби в първичната намотка $p_{e10} = r_1 I_0^2$. При трансформаторите 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 на тези загуби става по формулата

$$p_c = P_0 - p_{e10}$$

3. Параметри на празен ход

Определянето на тези параметри става чрез използване на данните от табл. 4.1 за номиналното първично напрежение $U_{10} = U_{1n}$, съобразно заместващата схема от фиг. 3.3, по формулите:

$$z_0 = |z_1 + z_m| = \frac{U_{1n}}{I_0}; \quad r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$$

4. Характеристики на късо съединение

Построяват се зависимостите на: тока I_k , мощността P_k и фактора на мощността $\cos \varphi_k$ от напрежението на първичната намотка U_k при постоянна честота и затворена накъсо една от вторичните намотки, като не участващите в опита намотки остават отворени, т.е.

$$I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k) \quad \text{при} \quad f = f_n \quad \text{и} \quad U_{2n} = 0.$$

Измерването се извършва по схемата, показана на фиг. 4.2. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че на трансформатора се подава едно силно понижено напрежение от порядъка на $0,1U_{1n}$, така че токът да не надвишава $(1,0 \div 1,2) I_n$. Измерването започва от минимално напрежение, подавано от захранващия автотрансформатор. Постепенно напрежението се повишава до достигане на стойност на тока $I_k = (1 \div 1,1) I_n$ като се правят измервания включително и за номиналния ток на затворената накъсо вторична намотка. За целта съответната вторична намотка се затваря накъсо през амперметър.

Измерванията се повтарят за всички двойки намотки (първична - вторична). Резултатите се нанасят в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Отчитат се								Изчислява се
U_k			I_k			P_k		$\cos \varphi_k$
дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	дел	W/дел	W

Факторът на мощността се изчислява по формулата

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_{1k}}$$

По данни от табл. 4.2 се построяват в обща координатна система характеристиките на късо съединение само за една двойка (първична – вторична). Те са подобни на тези от фиг. 3.4, а обяснението на характера на кривите е аналогично с това при трифазен трансформатор (упражнение № 3). Консумираната активна мощност P_k практически е равна на електрическите загуби в намотките

$$P_k = P_{en1} + P_{en2} + P_{ct} \approx P_{ca}$$

5. Параметри на късо съединение

Те се определят за двойки (първична – вторична) намотки при номинален ток $I_{2nk} = I_{2nn}$ от данните в табл. 4.2 по формулите:

$$z_{k12n} = |z_1 + z'_{2n}| = \frac{U_k k_n}{I_{2nn}}; \quad r_{k12n} = r_1 + r'_{2n} = \frac{P_k k_n^2}{I_{2nn}^2};$$

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

6. Напрежение на късо съединение

Напрежението на късо съединение също се определя за двойки намотки (първична – вторична). То е напрежението с номинална честота, приложено към първичната намотка, при свързана накъсо една от вторичните намотки и отворени останалите, при което токът в затворената накъсо намотка е номинален $I_{2nk} = I_{2nn}$. Напрежението на късо съединение се изразява в проценти от номиналното първично напрежение и се изчислява по израза

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

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

$$u_{ka12n} = \frac{I_{2nn} r_{k12n}}{U_{1n} k_n} 100\%; \quad u_{kr12n} = \frac{I_{2nn} x_{k12n}}{U_{1n} k_n} 100\%$$

Поради преобладаващото активно съпротивление на намотките при трансформаторите с малка мощност може да се приеме, че реактивната съставка на напрежението на късо съединение u_{kr} е равна на нула, вследствие на което

$$u_{k12n} \approx u_{ka12n}$$

7. Външна характеристика. Изменение на напрежението Коефициент на полезно действие

Външната характеристика представлява 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 товара $\cos \varphi_2$, т.е.

$$U_{2n} = f(I_{2n}) \quad \text{при} \quad U_1 = U_{1n}, \quad f = f_n \quad \text{и} \quad \cos \varphi_2 = \text{const.}$$

Използва се схемата от фиг. 4.3. Обхватите на апаратите се избират съобразно номиналните стойности на токовете и напреженията на намотките. Едновременно със снемането на външните характеристики се правят измервания на входящата и изходящата мощност за снемане на кривата на коефициента на полезно действие по пряк начин

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

Поради слабото влияние на индуктивните съпротивления на намотките върху пада на напрежение опитът може да се проведе само при активен товар т.е. $\cos \varphi_2 = 1$. Трансформаторът се захранва с номинално напрежение и честота които се поддържат постоянни. Построяването 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 от време които съответстват на определен процент от номиналните им стойности I_{2nn} . Товарните токове се изменят до достигане едновременно на стойности, равни на $1,2I_{2nn}$. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 4.3.

Таблица 4.3

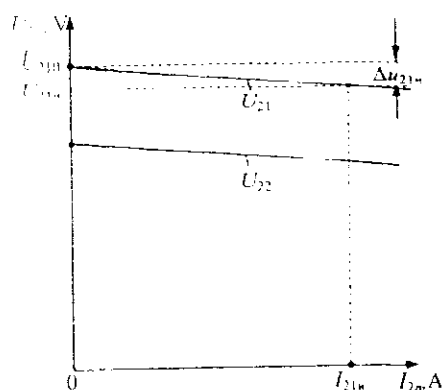
Отчитат се										
P_1		I_1			I_{21}			U_{21}		
дел	W/дел	дел	A/дел	A	дел	A/дел	A	дел	V/дел	V

Отчитат се						Изчисляват се		
I_{22}			U_{22}			P_1	P_2	η
дел	A/дел	A	дел	V/дел	V	W	W	%

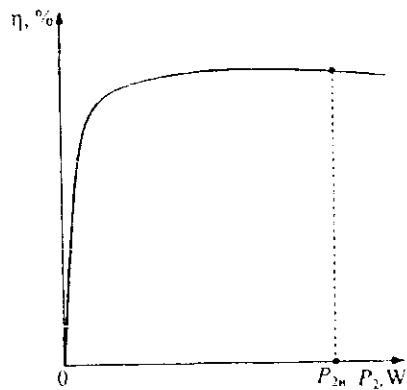
При изчисленията се използват формулите:

$$P_{2n} = U_{2n} I_{2n}; \quad P_2 = \sum_n P_{2n}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

От резултатите в табл. 4.3 се построяват външните характеристики (фиг. 4.4) и кривата на к.п.д. (фиг. 4.5).



Фиг. 4.4



Фиг. 4.5

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

$$\Delta U_{2n} = \frac{U_{2n0} - U_{2n}}{U_{2n}} 100 \%$$

При трансформатори с малка мощност изменението на напрежението при номинален ток достига стойности (10 ÷ 15) %. Това изменение се дължи на пада на напрежението в намотките на трансформатора и то предимно в активните съпротивления на намотките, които са преобладаващи.

При трансформатори с малка мощност максималният к.п.д. достига стойност (75 ÷ 90) %. Максимална стойност на к.п.д. се получава при такова натоварване, при което постоянните загуби (загубите в стоманата) се изравняват с променливите загуби (електрическите загуби в намотките, зависещи от квадрата на тока). Обикновено максимумът се получава при натоварване (40 ÷ 50) % от номиналното. Стойностите на к.п.д. в един широк обхват на натоварване – (10 – 120) % от номиналното – са близки до максималната стойност.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ИЗПИТВАНЕ НА АСИНХРОННИ МАШИНИ

УПРАЖНЕНИЕ 5

ОПИТ НА ПРАЗЕН ХОД И КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ ПРИ ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. Опытни изследвания:

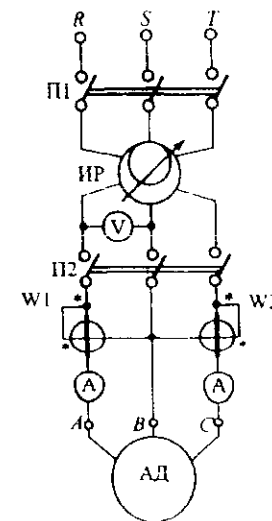
1. Снемане на характеристиките на празен ход.
2. Снемане на характеристиките на късо съединение.

B. Изчисления и построения:

1. Построяване на характеристиките на празен ход.
2. Разделяне на загубите на празен ход.
3. Построяване на характеристиките на късо съединение.

II. Схема на опитната постановка

На фиг. 5.1 е показана схемата за провеждане на опитните изследвания



Фиг. 5.1

Изпитваният трифазен асинхронен двигател с накъсо съединен ротор АД се захранва с регулируемо трифазно напрежение от индукционен регулатор ИР.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработката и анализ на резултатите

1. Характеристика на празен ход

Снемат се зависимостите на: тока I_{0n} , мощността P_0 и фактора на мощността $\cos \varphi_0$ от напрежението на първичната намотка U_{0n} при постоянна честота и липса на външен съпротивителен момент, т.е.

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

Характеристиките се снемат по схемата от фиг. 5.1, като валът на двигателя е свободен. При избора на измервателни апарати трябва да се има предвид, че напрежението ще се изменя в границите $(0,3 \div 1,1) U_n$, а токът на празен ход при номинално напрежение е от порядъка на $(0,25 \div 0,6) I_n$. Относителният ток на празен ход е толкова по-голям, колкото по-голям е броят на полюсите на машината и колкото по-малка е мощността ѝ.

За провеждане на опита първоначално се затваря прекъсвача П1, установява се минималното напрежение на изхода на ИР, след което се затваря прекъсвачът П2. Повишава се напрежението, подавано към АД, до достигане на стойност от порядъка на $1,1 U_n$, при която се прави първото отчитане. След това чрез ИР 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 номинално напрежение. Ако се продължи намаляването на напрежението под определена стойност, механичните загуби представляват вече сравнително голям товар за двигателя, скоростта на въртене чувствително се намалява, съответно хлъзгането се увеличава и статорният ток вместо да намалява започва да расте. Поради тази причина измерванията трябва да завършат с възможно най-ниското напрежение, при което все още не се наблюдава нарастване на тока в статора. Отчетените стойности на величините при празен ход се нанасят в табл. 5.1.

При изчисленията се използват следните формули:

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

$$P_{cп0} = 3 I_{0n}^2 r_1 \text{ - при свързване в звезда};$$

$$P_{cп0} = I_{0n}^2 r_1 \text{ - при свързване в триъгълник};$$

$$P'_0 = P_0 - P_{cп0}.$$

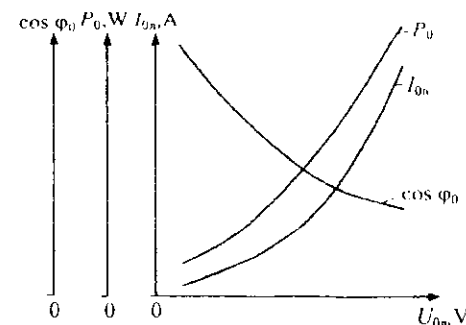
където $P_{cп0}$ са електрическите загуби в статорната намотка при празен ход; r_1 - активното съпротивление на една фаза на статорната намотка

Таблица 5.1

Отчитат се								
	U_{0n}		I_{0A}	I_{0C}	k_A	α_1	α_2	k_w
дел	V/дел	V	дел	дел	A/дел	дел	дел	W/дел

Изчисляват се					
I_{0n}	P_0	$\cos \varphi_0$	$P_{cп0}$	P'_0	U_{0n}^2
A	W		W	W	V

По данните от табл. 5.1 се построяват характеристиките на празен ход, показани на фиг. 5.2.



Фиг. 5.2

Кривата $I_{0n} = f(U_{0n})$ е близка до кривата на намагнитване на асинхронната машина $I_{оп} = f(E_1)$. Това е така, защото при празен ход $\varphi_0 \approx 90^\circ$ и реактивната съставка на тока на празен ход е $I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0 \approx I_0$, а при пренебрегване на пада на напрежение в статорната намотка $U_0 \approx E_1 \approx \Phi$. Характерът на кривата $I_{0n} = f(U_{0n})$ се определя главно от степента на насищане на магнитната система на машината. При увеличаване на U_{0n} насищането се увеличава, токът расте значително по-бързо от напрежението, поради което характеристиката се закривява нагоре.

При режим на празен ход хлъзгането $s \approx 0$, поради което електрическите

загуби в ротора и загубите в стотаната на ротора са пренебрежимо малки. Тогава може да се счита, че консумираната мощност P_0 включва:

- $p_{сг0}$ – електрическите загуби в статорната намотка, пропорционални на квадрата на тока на празен ход;
- механичните загуби – $p_{мех} \approx \text{const}$ (понеже $n \approx \text{const}$);
- p_c – загубите в стотаната на статора, приблизително пропорционални на квадрата на захранващото напрежение.

Затова при увеличаване на U_{0n} , мощността P_0 се увеличава приблизително по парабола.

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

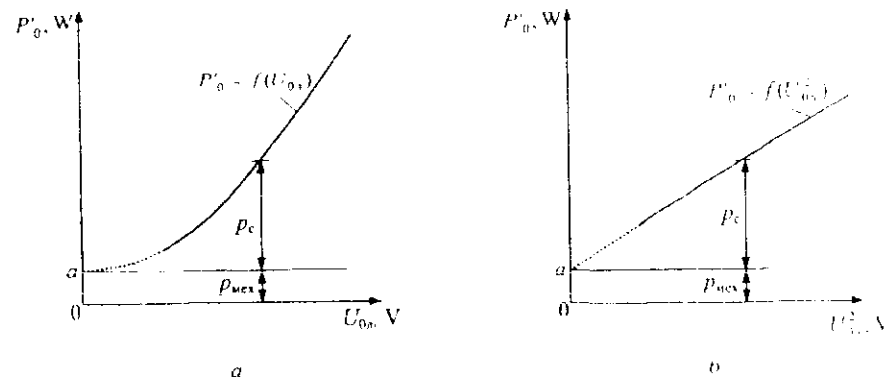
2. Разделяне на загубите в стотаната

Огразената в табл. 5.1 мощност P'_0 представлява сумата от механичните загуби и загубите в стотаната

$$P'_0 = P_0 - p_{ел1} = p_{мех} + p_c.$$

За разделяне на мощността P'_0 на двете ѝ съставки се постъпва по следния начин. По данни от табл. 5.1 се построява кривата $P'_0 = f(U_{0n})$ – фиг. 5.3а, която се продължава до пресичането ѝ с ординатната ос в точка a . Отрезът $0a$ чва механичните загуби, тъй като при напрежение равно на нула загубите в стотаната са равни на нула. Понеже $p_{мех} \approx \text{const}$, през точка a се прекарва права, успоредна на абсцисната ос, която разделя мощността P'_0 на двете ѝ съставки $p_{мех}$ и p_c (както е показано на фиг. 5.3а).

Мощността P'_0 може да се раздели на двете ѝ съставки с по-голяма точност, ако се построи зависимостта на P'_0 не от напрежението U_{0n} , а от стойността на квадрата му U_{0n}^2 – фиг. 5.3б. Предимствата на този метод се изясняват, като се вземе предвид, че зависимостта $P'_0 = f(U_{0n})$ представлява почти правилна парабола от вида $P'_0 = k_1 + k_2 U_{0n}^2$, тъй като $p_{мех} = \text{const}$, а $p_c \approx U_{0n}^2$. Следователно зависимостта на P'_0 от U_{0n}^2 е практически линейна. Вторият метод е по-точен, защото $P'_0 = f(U_{0n}^2)$ е почти права линия, а освен това най-лявата точка от кривата се получава по-близо до ординатната ос. По този начин екстраполацията на кривата с цел получаване на отреза $0a$ може да се направи по-прецизно.



Фиг. 5.3

3. Характеристики на късо съединение

Представяват зависимостите на: линейния ток $I_{кз}$, мощността P_k и фактора на мощността $\cos \varphi_k$ от напрежението на първичната намотка $U_{кз}$ при постоянна честота и при застопорен ротор

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

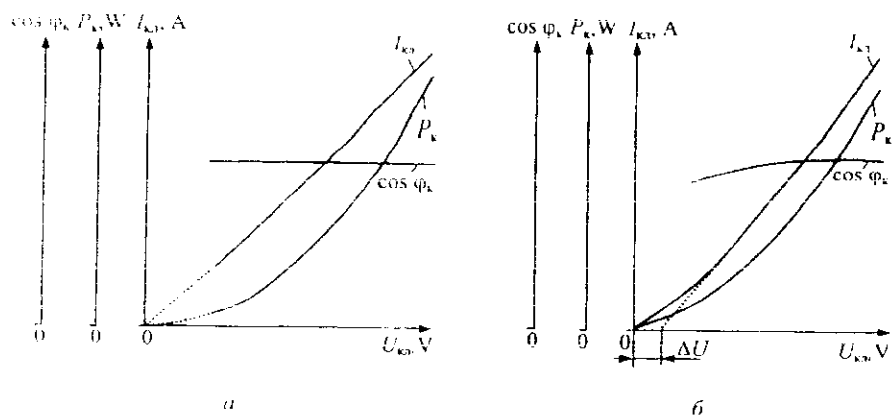
Измерването се извършва по схемата на фиг. 5.1 като валът на двигателя се застопорява. При избора на измервателните апарати трябва да се има предвид, че на статорната намотка се подава едно силно понижено напрежение, така че токът да не надвишава $(1,0 \div 1,2) I_n$. Това напрежение е от порядъка на $(0,2 \div 0,3) U_n$. Измерването започва от минимално напрежение, подавано от захранващия ИР. Затваря се прекъсвача П2. Постепенно напрежението се повишава до достигане на стойност на тока $1,2 I_n$, при която се прави първото отчитане. Следват измервания при постепенно намаляване на напрежението, включително и при номинален ток. Резултатите се нанасят в табл. 5.2. При изчисленията се използват формулите:

$$I_{0n} = \frac{I_{кз1} + I_{кз2}}{2}; \quad P_k = k_n (\alpha_1 + \alpha_2); \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{кз} I_{кз}}$$

Таблица 5.2

Отчитат се								Изчисляват се		
	$U_{кз}$	$I_{кз}$	$I_{кз}$	k_n	α_1	α_2	k_n	$I_{кз}$	P_k	$\cos \varphi_k$
дел	V/дел	V	дел	A/дел	дел	дел	W/дел	A	W	...

По данни от табл. 5.2 се построяват характеристиките на късо съединение, показани на фиг. 5.4.



Фиг. 5.4

Видът на характеристиките зависи главно от формата и размерите на статорните и роторните канали. Различават се два основни случая:

- статорните и роторните канали са отворени или полузатворени;
- статорните канали са полузатворени, а роторните са затворени.

В първия случай характеристиките имат вида, показан на фиг. 5.4а. В този случай потоците на разсейване насищат сравнително слабо зъбите и може да се счита, че те се затварят през среда с постоянна магнитна проницаемост, поради което индуктивното съпротивление на късо съединение $x_k \approx \text{const}$ при различни стойности на тока. От друга страна при постоянна честота и температура активното съпротивление на късо съединение е $r_k = \text{const}$, следователно и импедансът е $z_k = \text{const}$. Затова $I_k = f(U_{кл})$ е практически права линия, минаваща през началото на координатната система. Зависимостта $\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} = f(U_{кл})$ 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 $P_k = f(U_{кл})$ представлява практически парабола, тъй като загубите в намотките са пропорционални на квадрата на тока, а той е пропорционален на напрежението.

Във втория случай, когато роторът има затворени канали, характеристиките на късо съединение имат вида, показан на фиг. 5.4б. 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 $I_{кл} = f(U_{кл})$ в началната си част се закривява нагоре и може да се счита праволинейна само в горната си част. При увеличаване на напрежението се получава известно увеличаване на фактора на мощността $\cos \varphi_k$, поради намаляване на z_k . Кривата на мощността P_k (особено в началната си част) расте по-бързо, отколкото по закона на параболата.

Линейният ток на късо съединение $I_{клин}$, който би се получил при напрежение, равно на номиналното, се определя чрез изчисление. При характеристики от вида, показан на фиг. 5.4а

$$I_{клин} = I_{кл} \frac{U_{нл}}{U_{кл}}$$

а при характеристики от вида, показан на фиг. 5.4б

$$I_{клин} = I_{кл} \frac{U_{нл} - \Delta U}{U_{кл} - \Delta U}$$

където $I_{кл}$ и $U_{кл}$ са получените от опита линейни ток и напрежение; $U_{нл}$ – номиналното линейно напрежение; ΔU – отрезък от абсцисната ос, който се получава при продължаване на линейната част на кривата $I_{кл} = f(U_{кл})$.

Препоръчва се в горните формули да се поставят най-големите стойности на $I_{кл}$ и $U_{кл}$, които са достигнати при провеждане на опита.

УПРАЖНЕНИЕ 6

СХЕМАНЕ НА РАБОТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

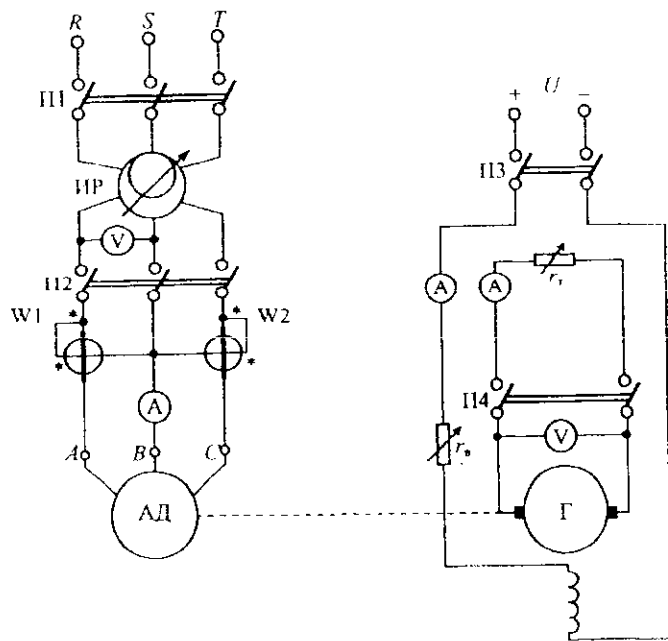
1. Снемане на работните характеристики

B. Изчисления и построения:

1. Построяване на работните характеристики.

II. Схема на опитната постановка

На фиг. 6.1 е показана схемата за провеждане на опита. Асинхронният двигател АД се захранва от индукционния регулатор ИР. Двигателят е куплиран механично с генератор за постоянен ток с независимо възбуждане Г.



Фиг. 6.1

Този генератор трябва да бъде тариран, т.е. за него да е известна зависимостта $P'_0 = f(n)$ при $I_a = \text{const}$. Мощността P'_0 представлява сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на товарната машина. Пояснения, относно тарирането на товарния генератор, са дадени в първа глава.

При избора на измервателни апарати трябва да се знае, че за провеждането на опита на статорната намотка на АД се подава номиналното напрежение. Натоварването се изменя от празен ход до такова натоварване, при което статорният ток достигне стойност от порядъка на $1,25I_n$.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Работните характеристики на АД представляват зависимостите на: скоростта на въртене n , полезния момент M_2 , коефициента на полезно действие η , фактора на мощността $\cos \varphi_1$, статорния ток I_1 и консумираната мощност P_1 от полезната мощност P_2 при напрежение $U_1 = \text{const}$ и честота $f_1 = \text{const}$

$$n, M_2, \eta, \cos \varphi_1, I_1, P_1 = f(P_2) \quad \text{при} \quad U_1 = U_{1n} = \text{const} \quad \text{и} \quad f_1 = f_{1n} = \text{const}.$$

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

Опитното изследване се извършва в следния ред. Включва се прекъсвачът П1 и се установява минималното напрежение на изхода на регулатора ИР. Затваря се прекъсвачът П2 и чрез ИР се повишава напрежението, подавано към АД, до достигане на номиналното напрежение, което се поддържа неизменно по време на целия опит.

В случай че АД се включва директно към номиналното напрежение, в момента на пускането трябва да бъдат шунтирани амперметърът и токовите намотки на ватметрите, за да се предпазят измервателните апарати от пусковия ток, който може да надвиши (4 ÷ 7) пъти номиналния. След развъртането на двигателя се премахват шунтиращите проводници.

Затваря се прекъсвачът П3, с което се подава напрежение на възбудителната намотка на генератора Г. Чрез съпротивлението r_g се установява такъв възбудителен ток I_a , какъвто е бил при тарирането на генератора, и този ток се поддържа неизменен при провеждането на опита.

При отворен прекъсвач П4, т.е. при котвен ток на генератора $I_f = 0$, се прави първото отчитане. След това се затваря прекъсвача П4 и чрез товарния реостат R_r се установяват поредица натоварвания, докато статорният ток на АД достигне стойност $I_1 \approx 1,25I_n$. Резултатите се нанасят в табл. 6.1. При изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = k_n (\alpha_1 \pm \alpha_2); \quad P_2 = U_1 I_1 + P'_0 + I_1^2 r_s;$$

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

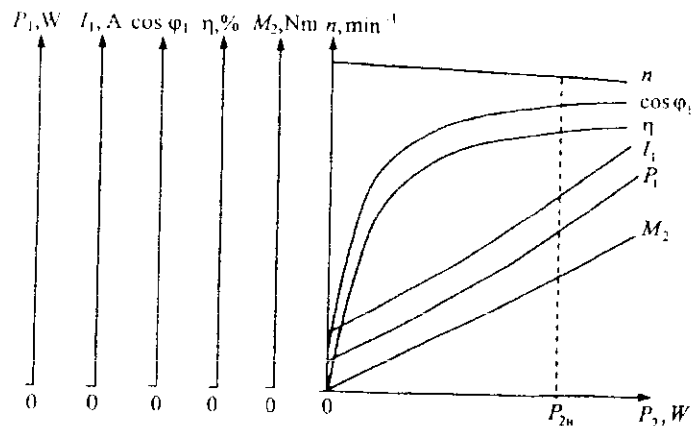
където P'_0 е сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на генератора Г и се отчита от тарифовъчната крива. U_1 и I_1 – токът и напрежението на котвата на Г; r_s – съпротивлението на котвената намотка и на преходното контактно съпротивление между четките и колектора на генератора.

Таблица 6.1

Отчитат се										
U_1		I_1		I_1		α_{n1}	α_{n2}	k_m	n	
дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	дел	A/дел	A	дел	дел

Изчисляват се							
P_1	$U_1 I_1$	P'_0	P_{en2}	P_2	$\cos \varphi$	η	M_2
W	W	W	W	W		%	Nm

По данни от табл. 6.1 се построяват работните характеристики на асинхронния двигател, показани на фиг. 6.2.



Фиг. 6.2

Анализът на работните характеристики на АД показва следното.

- Зависимост $n = f(P_2)$

Както е известно скоростта на въртене на ротора е $n = n_1(1 - s)$, а хлъзгането $s = \frac{P_{en2}}{P_2}$, където n_1 е синхронната скорост на въртене; P_{en2} – електрически-

те загуби в роторната намотка; P_2 – електромагнитната мощност, която се прехвърлява чрез магнитното поле от статора към ротора. При празен ход $P_{en2} \approx 0$ и следователно $s \approx 0$, а $n \approx n_1$. С увеличаване на натоварването отношението $\frac{P_{en2}}{P_2}$ нараства, но с цел получаване на добър к.п.д. то е ограничено в тесни граници.

Обикновено при номинално натоварване отношението $\frac{P_{en2}}{P_2} = (0,02 + 0,05)$. Следователно с увеличаване на натоварването скоростта на въртене 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 взема предвид, че с увеличаване на P_2 скоростта на въртене n слабо се намалява, кривата $M_2 = f(P_2)$ се закривява леко нагоре.

- Зависимост $\eta = f(P_2)$

Тази крива има характерният 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 започва да расте. След това нарастването на к.п.д. се забавя, тъй като става все по-голямо влиянието на електрическите загуби. Коефициентът на полезно действие става максимален при този товар, при който постоянните и променливите загуби се изравняват. Максимумът на к.п.д. се получава при близък до номиналния товар, като този максимум е "притъпен" 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 и има стойност не по-голяма от 0,2. С увеличаване на натоварването $\cos \varphi_1$ бързо нараства и обикновено при товар, близък до номиналния, получава най-голямата си стойност. При претоварване на двигателя $\cos \varphi_1$ започва да намалява. Това се обяснява с факта, че при първоначалното увеличаване на натоварването вторичният ток нараства главно със своята активна съставка, а при претоварване започва да се увеличава дефазиранието между вторичния ток и вторичното е.д.н.

- Зависимост $I_1 = f(P_2)$

Моментът, развиван от асинхронния двигател, се дава с израза

$$M = c\Phi I_2 \cos \psi_2,$$

където c е константа; Φ – основният магнитен поток; I_2 – вторичният ток; ψ_2 – ъгълът на дефазиране между вторичния ток и вторичното е.д.н.

При снемане на работните характеристики напрежението $U_1 = \text{const}$ и може да се счита, че при изменението на натоварването от празен ход до номиналното магнитният поток е $\Phi \approx \text{const}$, а освен това ъгълът ψ_2 е твърде малък и се изменя слабо. Следователно $I_2 \approx M$, а понеже $M \approx P_2$, $I_2 \approx P_2$. Тъй като стартерният ток е $I_1 \approx I_2$, може да се направи изводът, че зависимостта $I_1 = f(P_2)$ е блика до праволинейната.

- Зависимост $P_1 = f(P_2)$

Консумираната мощност е $P_1 = \frac{P_2}{\eta}$. Тъй като в първоначално к.п.д. η

бързо нараства, а след това се изменя незначително, кривата $P_1 = f(P_2)$ в началото си е изпъкнала към абсцисната ос, а след това се доближава до права линия

УПРАЖНЕНИЕ 7

ЕДНОФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С РАБОТЕН КОНДЕНЗАТОР

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

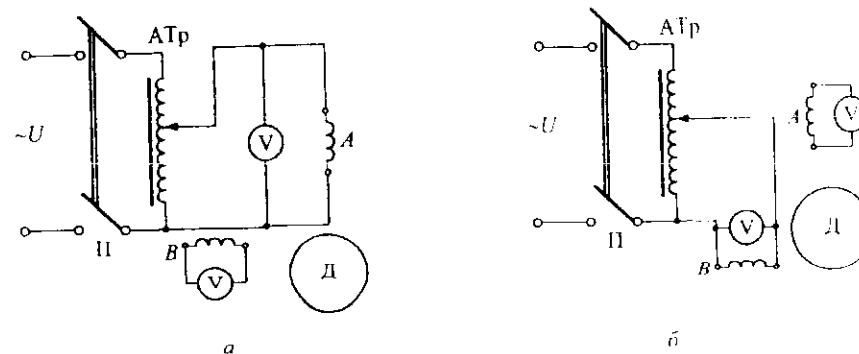
1. Определяне на коефициента на трансформация.
2. Определяне на максималния момент.
3. Определяне на пусковия момент и пусковия ток.
4. Снемане на работните характеристики.

B. Изчисления и построения:

1. Изчисляване на коефициента на трансформация.
2. Изчисляване на кратността на максималния момент.
3. Изчисляване на кратностите на пусковия момент и пусковия ток.
4. Построяване на работните характеристики.
5. Построяване на векторната диаграма при номинален режим.

II. Схема на опитната постановка

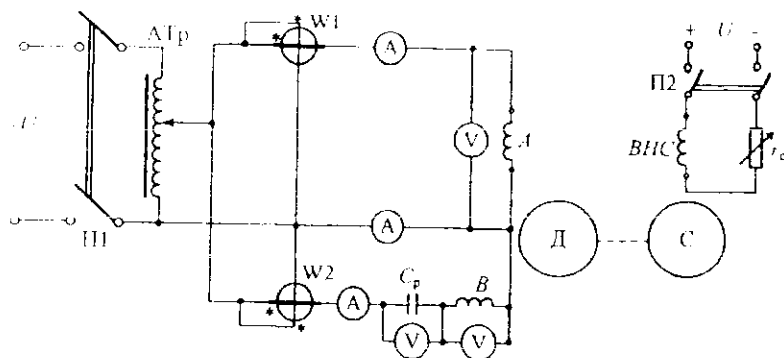
За определяне на коефициента на трансформация се свързват схемите, показани на фиг. 7.1, а за всички останали изследвания – схемата на фиг. 7.2.



Фиг. 7.1

Изследваният двигател Д се захранва посредством автотрансформатор АТр. Натоварването на Д се осъществява с електромагнитна спирачка С, чиято

възбудителна намотка BHC се захранва с постоянно напрежение, а токът през нея се регулира с реостата r_c . Пояснения за работата на електромагнитната спирачка са дадени в първа глава. Удобно е скоростта на въртене да се измерва с цифров оборотомер.



Фиг. 7.2

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Статорният пакет и нахъсоъединеният 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.

1. Коефициент на трансформация

Коефициентът 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, показана на фиг. 7.1а. На намотка A се подава напрежение $U_A = U_n$ и се измерва е.д.н. E_B , индуцирано в намотка B . След това се свързва схемата от фиг. 7.1б, при която на намотка B се подава напрежение $U_B = 1,2E_B$ и се измерва е.д.н. E_A , индуцирано в намотка A . Резултатите се нанасят в табл. 7.1.

Таблица 7.1

$U_A = U_n$			E_B			$U_B = 1,2E_B$		E_A		k
дел	V/дел	V	дел	V/дел	V	V	дел	V/дел	V	

Коефициентът на трансформация се изчислява по формулата

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

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

2. Максимален момент

Максималният момент е най-големият момент, който може да развие двигателят. При опитното му определяне се свързва схемата, показана на фиг. 7.2. На двигателя се подава номиналното му напрежение. Затваря се П2 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 в нестабилния участък на механичната си характеристика, моментът му и скоростта на въртене започват бързо да намаляват. Необходимо е двигателят да бъде своевременно разтоварен чрез отваряне на П2.

Кратността на максималния момент е

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

Номиналният момент M_n се изчислява по формулата

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

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

3. Пускови характеристики

При опитното определяне на пусковия момент M_n и пусковия ток I_n се свързва схемата, показана на фиг. 7.2. Дискът на електромагнитната спирачка се фиксира към полюсната ѝ система с шифт. На двигателя се подава U_n и по ска-

чита на спирачката се отчита M_n , а от амперметъра, измерваш общия ток, се отчита I_n . Изчисляват се кратностите на пусковия момент и пусковия ток:

$$m_n = \frac{M_n}{M_n}, \quad i_n = \frac{I_n}{I_n}$$

Номиналният ток I_n се взема от табелката на двигателя. Измерванията трябва да се направят достатъчно бързо, тъй като пусковият ток надвишава няколкократно номиналния.

4 Работни характеристики

Работните характеристики представляват зависимостите на: скоростта на въртене n , консумирания ток I , консумираната мощност P_1 , полезната мощност P_2 , коефициента на полезно действие η и фактора на мощността $\cos \varphi$ от полезния момент M_2 при постоянна стойност на захранващото напрежение

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

При снимане на характеристиките на двигателя (фиг. 7.2) се подава U_n и чрез електромагнитната спирачка се задават поредица стойности на момента. Измерванията започват от $M_2 = 0$ (пр.х.) и завършват при $M_2 = (0,8 + 0,9)M_{\max}$. Задължително се прави измерване при номиналния момент.

Таблица 7.2

Отчитат се											
M_2		n	I_A			I_B			I		
дел	Nm/дел	min ⁻¹	дел	A/дел	A	дел	A/дел	A	дел	A/дел	A

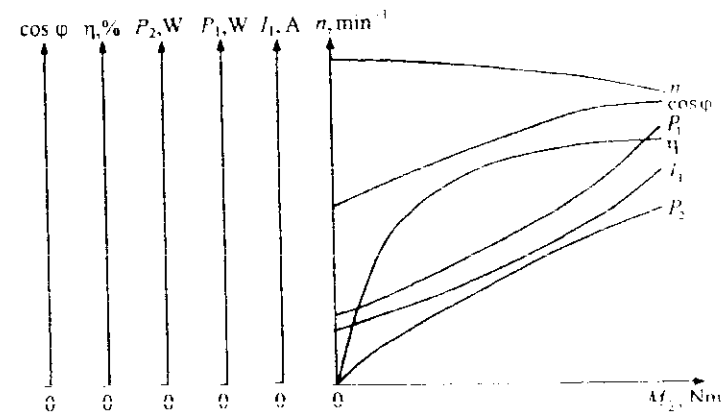
Отчитат се									
U_B^*			U_C			P_A		P_B	
дел	V/дел	V	дел	V/дел	V	дел	W/дел	дел	W/дел

Изчисляват се				
M_2	P_1	P_2	η	$\cos \varphi$
Nm	W	W	%	-

Резултатите се нанасят в табл. 7.2, като за изчисленията се използват формулите:

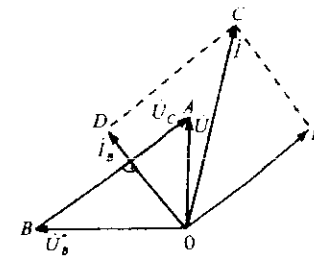
$$P_1 = P_A + P_B; \quad P_2 = M_2 \frac{2\pi n}{60}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100; \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{UI}$$

По данните от табл. 7.2 се построяват работните характеристики, показани на фиг. 7.3.



Фиг. 7.3

Векторната диаграма на фиг. 7.4 се построява по данните от табл. 7.2 за номиналния режим по следния начин. Избират се подходящи мащаби за напрежението m_U и за тока m_I . Построява се напрежението $U = U_A$, а след него триъгълникът 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 OCD по три страни (I_B , I_A , I).



Фиг. 7.4

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

$$\frac{I_A}{I_B} = k \text{ и } I_A^2 + I_B^2 = I^2, \text{ или } \frac{U_B^*}{U} = k \text{ и } U^2 + U_B^2 = U_C^2.$$

ИЗПИТВАНЕ НА СИНХРОННИ МАШИНИ

УПРАЖНЕНИЕ 8

СИНХРОНЕН РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

4. *Опитни изследвания:*

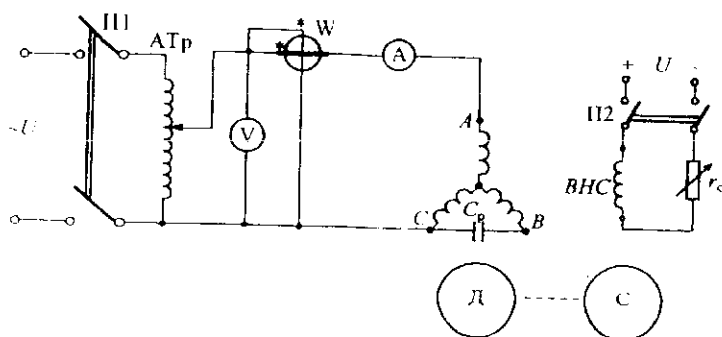
1. Определяне на пусковите параметри.
2. Определяне на изходящия момент.
3. Определяне на входящия момент.
4. Снемане на работните характеристики.

6. *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

На фиг. 8.1 е показана схемата за изпитване на синхронен реактивен двигател с трифазна намотка в статора, свързана в звезда.



Фиг. 8.1

Двигателят се захранва с еднофазно променливо напрежение от регулируем автотрансформатор АТр чрез дефазиращ елемент – кондензатор С_p. Съпро-

тивителният момент се създава от електромагнитна спирачка С, която е тарирана предварително и има определена константа на скалата. Пояснения за работата на електромагнитната спирачка са дадени в глава първа. За контрол на скоростта на въртене *n* при излизане и влизане в синхронизъм може да се използва 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.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Отличителна особеност на синхронния реактивен двигател е липсата на възбуждане от страна на ротора, който е с различни магнитни проводимости по надлъжната и напречната ос. Най-често такъв ротор се получава от кафезен ротор на асинхронен двигател чрез фрезование на изрези. Пусковият момент е асинхронен и се създава от въртящото се магнитно поле и възбудените от него токове в кафезна роторна намотка. Влизането в синхронизъм става благодарение на реактивен момент (роторът се стреми да се ориентира така, че магнитното съпротивление за силовите линии на полето да бъде минимално). Двигателят се върти със синхронна скорост под действие на реактивния момент. Асинхронният момент е равен на нула, тъй като хлъзгането е *s* = 0, а пусковата намотка играе ролята на успокоителна намотка.

1. *Пускови параметри*

Това са стойностите на пусковия момент *M*_n и пусковия ток *I*_n и на техните кратности, по отношение на номиналните стойности на момента *M*_n и тока *I*_n. Определянето на пусковите параметри става по схемата на фиг. 8.1. Роторът на двигателя се застопорява към електромагнитната спирачка С. На двигателя се подава номинално напрежение и се отчитат стойностите на момента и тока, след което се записват в табл. 8.1.

За изчисленията се използват формулите:

$$M_n = \frac{60P_{2n}}{2\pi n_n}; \quad m_n = \frac{M_n}{M_n}; \quad i_n = \frac{I_n}{I_n}$$

където *P*_{2n} е номиналната полезна мощност (W); *I*_n – номиналният ток (A); *n*_n – номиналната скорост на въртене (min⁻¹).

Номиналните стойности се вземат от табелката на двигателя.

2. *Изходящ момент*

Този момент е най-голямата стойност на съпротивителния момент, приложен на вала на двигателя, при който двигателят все още е в синхронизъм. Ако се надвиши изходящия момент *M*_{изх}, двигателят излиза от синхронизъм и продължава да работи в асинхронен режим.

Определянето на *M*_{изх} става по схемата, показана на фиг. 8.1, за номинално напрежение. Включва се електромагнитната спирачка С и с намаляване на съпротивлението *r*_с двигателят се натоварва до излизане от синхронизъм. Изме-

ревата стойност на $M_{\text{нх}}$ се записва в табл. 8.1, а кратността на изходящия момент се изчислява по формулата

$$m_{\text{нх}} = \frac{M_{\text{нх}}}{M_{\text{н}}}$$

3. Входящ момент

Това е най-големият съпротивителен момент, приложен на вала на двигателя, при който двигателят все още може да влезе в синхронизъм. Използва се схемата от фиг. 8.1. След като двигателят е излязъл от синхронизъм, натоварването постепенно се намалява чрез увеличаване на съпротивлението r_c до влизането му в синхронизъм. Измерената стойност на $M_{\text{нх}}$ се записва в табл. 8.1. Изчислението на $m_{\text{нх}}$ се извършва по формулата

$$m_{\text{нх}} = \frac{M_{\text{нх}}}{M_{\text{н}}}$$

Таблица 8.1

Отчитат се						
$M_{\text{н}}$	$M_{\text{нх}}$	$M_{\text{нхх}}$	$K_{\text{м}}$	$I_{\text{п}}$		
дел	дел	дел	Nm/дел	дел	A/дел	A

Изчисляват се						
$M_{\text{п}}$	$M_{\text{вх}}$	$M_{\text{нхх}}$	$M_{\text{н}}$	$m_{\text{п}}$	$m_{\text{вх}}$	$m_{\text{нхх}}$
Nm	Nm	Nm	Nm	—	—	—

4. Работни характеристики

Това са зависимостите на: тока I , консумираната мощност P_1 , полезната мощност P_2 , коефициента на полезно действие η и фактора на мощността $\cos \phi$ от полезния момент M_2 при постоянни стойности на напрежението U и честотата f

$$I, P_1, P_2, \eta, \cos \phi = f(M_2) \quad \text{при} \quad U = U_{\text{н}} = \text{const}; \quad f = f_{\text{н}} = \text{const}.$$

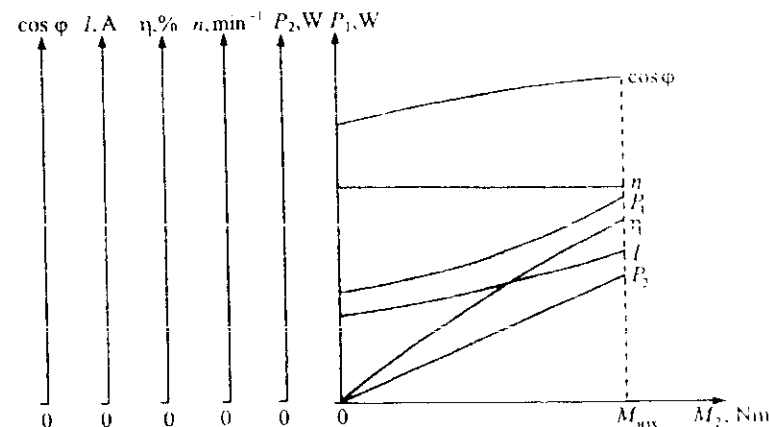
Използва се опитната постановка, показана на фиг. 8.1. Двигателят се захранва с номинално напрежение и номинална честота. Снемането на характеристиките започва от празен ход при $M_2 = 0$, т.е. при изключена спирачка С. Включва се спирачката и с регулиране на реостата r_c моментът се увеличава до достигане на стойност $0.95 M_{\text{нх}}$. За изчисленията се използват показаните по-долу формули, а резултатите се записват в табл. 8.2:

$$P_1 = \alpha_{\text{н}} k_{\text{н}}; \quad P_2 = \frac{2\pi n M_2}{60}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%; \quad \cos \phi = \frac{P_1}{UI}$$

Таблица 8.2

Отчитат се							Изчисляват се				
M_2	n	$\alpha_{\text{н}}$	$k_{\text{н}}$	I			M_2	P_1	P_2	η	$\cos \phi$
дел	Nm/дел	min ⁻¹	дел	W/дел	дел	A/дел	A	Nm	W	W	%

От получените изчисления (табл. 8.2) се построяват работните характеристики (фиг. 8.2) на изследвания двигател.



Фиг. 8.2

Скоростта на въртене n е постоянна и определена от честотата на захранващото напрежение и от броя на двойките полюси. Тъй като полезната мощност P_2 е пропорционална на полезния момент M_2 при постоянна скорост на въртене, зависимостта $P_2 = f(M_2)$ представлява права линия, която започва от началото на координатната система.

Коефициентът на полезно действие η има типичния за всички електрически машини вид. Той достига максимална стойност при това натоварване, при което променливите загуби (електрическите) са равни на постоянните (загубите в стоманата и механичните). След максималната си стойност к.п.д. започва да намалява, поради бързото нарастване на електрическите загуби. За тези двигатели максималният к.п.д. е от порядъка на $(30 \div 60)\%$. Токът се изменя незначително в широк диапазон на натоварването от празен ход до излизане от синхронизъм.

Сравнително големите стойности на $\cos \phi$ на изпитвания двигател се дължат на включения дефазиращ кондензатор C_p .

ШЕСТА ГЛАВА
ИЗПИТВАНЕ НА КОЛЕКТОРНИ МАШИНИ

УПРАЖНЕНИЕ 9

ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК
С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

1. Пускане в ход и реверсиране.
2. Регулиране на скоростта на въртене.
3. Снемане на работните характеристики.

B. Изчисления и построения:

1. Построяване на скоростната (електромеханичната) характеристика и определяне на изменението на скоростта на въртене.
2. Построяване на работните характеристики.

II. Схема на опитната постановка

На фиг. 9.1 е показана схемата за снемане на работните характеристики. Изследваният двигател Д се натоварва с тариран генератор за постоянен ток с независимо възбуждане Г. Пояснения относно тарирането на товарния генератор са дадени в първа глава. Със *C* и *D* са означени изводите на възбудителните намотки на двете постояннотоккови машини (ВНД и ВНГ), а с *A* и *B* – изводите на котвените им намотки.

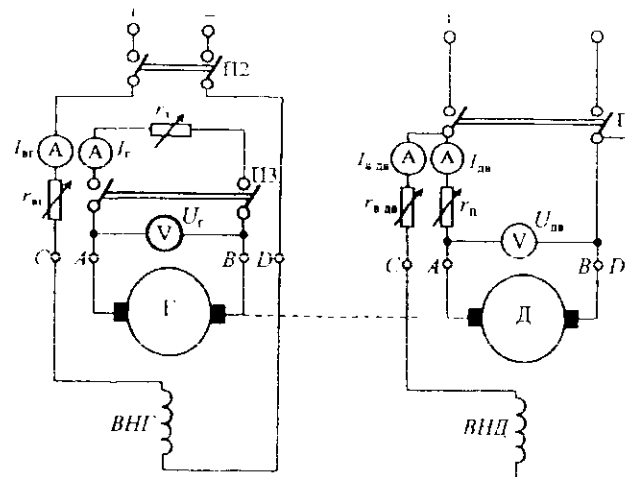
Когато се избират измервателните апарати трябва да се има предвид, че при постояннотокковите машини с независимо или с паралелно възбуждане възбудителният ток е (2 ÷ 5) % от номиналния.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

1. Пускане в ход и реверсиране

Двигателите за постоянен ток се пускат в ход по един от следните начини:

- a. директно пускане;
- б. пускане с пусков реостат в котвената верига;
- в. пускане с понижено напрежение на котвената верига.



Фиг. 9.1

Уравнението за равновесие на напреженията на постояннотокков двигател е

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

където $U_{дв}$ е захранващото напрежение; $I_{дв}$ – котвеният ток; r_a – съпротивлението на котвената верига, включващо съпротивлението на котвената намотка и контактното съпротивление между четките и колектора; E – противо- е.д.н., индуктирано в котвената намотка; n – скоростта на въртене на ротора; Φ – основният магнитен поток; C_e – константа, зависи от конструктивните параметри на машината.

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

$$I_{п. дир} = \frac{U_{дв}}{r_a}.$$

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

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 – $I_{п. дир} = (10 \div 50) I_n$. 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_n , включен в котвената верига. Тогава началният пусков ток ще бъде

$$I_n = \frac{U_{дв}}{r_a + r_n}$$

Пусковият реостат се подбира така, че $I_{n\text{дир}} = (1,4 \div 2,5) I_n$. След включването на двигателя към мрежата роторът му започва да се ускорява, при което n и I нарастват. Пусковият реостат вече може да се изключва постепенно и в края на пусковия процес $r_n = 0$.

Обикновено във веригата на възбудителната намотка на двигателя ВЩ е включен реостат $r_{в.дв}$ за регулиране на възбудителния ток. При пускането този реостат трябва да бъде напълно изключен, т.е. $r_{в.дв} = 0$. Причината е следната.

Пусковият момент се определя от израза

$$M_n = C_M \Phi I_n$$

За да се развърти бързо двигателят е нужно стойността на M_n да е голяма, а това означава, че е необходима голяма стойност на магнитния поток Φ , което води до висока стойност на $I_{в.дв}$, а тя се постига при $r_{в.дв} = 0$.

Особено важно е да се извършва задължителна проверка преди включването на двигателя към мрежата - дали реостатът r_n е напълно включен, а $r_{в.дв}$ - напълно изключен.

Друг начин за ограничаване на пусковия ток е захранването на котвата на двигателя с понижено напрежение, което с развъртането 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 двигателя (реверсиране), 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.

2. Регулиране на скоростта на въртене на двигателя

От израза за скоростта на въртене

$$n = \frac{U_{дв} - I_{в.дв} r_a}{C_e \Phi}$$

следват непосредствено възможните начини за регулиране на скоростта на въртене, а именно:

а. чрез изменение на магнитния поток Φ ;

б. чрез включване във веригата на котвата на регулиращ реостат $r_{пр}$;

в. чрез изменението на напрежението, подавано към котвата.

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

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

$$n = \frac{U_{дв} - I_{в.дв}(r_a + r_{пр})}{C_e \Phi}$$

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

3. Работни характеристики

Представяват зависимостите на: скоростта на въртене n , полезния момент M_2 , коефициента на полезно действие η , консумираната мощност P_1 и консумирания ток I от полезната мощност P_2 при постоянно напрежение $U_{дв}$ и възбудителен ток $I_{в.дв}$

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

Характеристиките се получават, като се използва схемата от фиг. 9.1 по следния начин. Пуска се в ход изследваният двигател Д и се установяват стойностите на $U_{дв}$ и $I_{в.дв}$, при които ще се снимат характеристиките. Подава се напрежение на възбудителната намотка на товарния генератор Г и чрез r_a се установява такава стойност на възбудителния ток $I_{в.г}$, каквато е била при тарирането. Чрез r_t се изменя натоварването на генератора, следователно - и на изпитвания двигател, като при различните натоварвания се отчитат величините, отразени в табл. 9.1. Опитът започва от празен ход на изпитвания двигател и завършва при товар, при който $I_{дв} \approx 1,1 I_n$.

Таблица 9.1

Отчитат се									
$I_{\text{дв}}$			U_t			I_c			n
дел	А/дел	А	дел	В/дел	В	дел	А/дел	А	min^{-1}

Изчисляват се							
P_1	$U_t I_t$	P'_0	$P_{\text{свт}}$	P_2	I	η	M_2
W	W	W	W	W	A	%	Nm

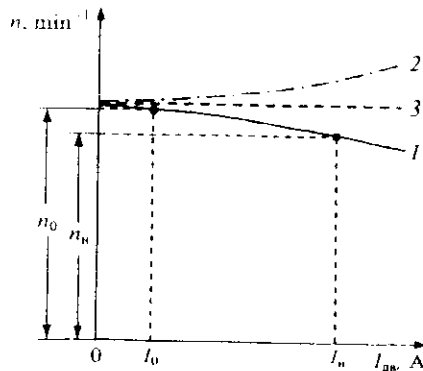
За изчисляване на отделните величини се използват следните формули:

$$P_1 = U_{\text{дв}} I_{\text{дв}} + U_{\text{дв}} I_{\text{свт}}; \quad P_2 = U_t I_t + P'_0 + I_c^2 r_c;$$

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

където P'_0 е сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на Γ и се отчита от тарировъчната крива; U_t и I_t – токът и напрежението на котвата на Γ ; $I_{\text{свт}}$ – съпротивлението на котвената намотка и на преходното контактно съпротивление между четките и колектора на Γ .

По данните от табл. 9.1 се построява скоростната характеристика $n = f(I_{\text{дв}})$ при $U_{\text{дв}} = \text{const}$ и $I_{\text{свт}} = \text{const}$ (фиг. 9.2). По принцип характеристиката може да има вида 1 или 2, или 3. От израза за n следва, че два фактора влияят върху скоростта на въртене.



Фиг. 9.2

Първият фактор е падът на напрежението $U_{\text{дв}} I_{\text{дв}}$, който при нарастване на $I_{\text{дв}}$ се увеличава, което от своя страна води до намаляване на n . Вторият фактор е размагнитващото действие на реакцията на котвата. При увеличаване на $I_{\text{дв}}$ размагнитващото действие нараства, магнитният поток Φ намалява, което води до увеличаване на n . Вижда се, че двата фактора влияят на скоростта 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 възможна усойчива работа на двигателя. Затова двигателите с паралелно възбуждане 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 последователна (стабилизираща) намотка, свързана съпосочно. Стабилизиращата намотка създава м.д.н., което е със стойности около 10% от това на паралелната намотка, и се поставя, за да компенсира намаляването на магнитния поток поради реакцията на котвата.

В съответствие с означенията, показани на фиг. 9.2, може да се определи процентното изменение на скоростта на въртене при преминаване от празен ход към номинално натоварване

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

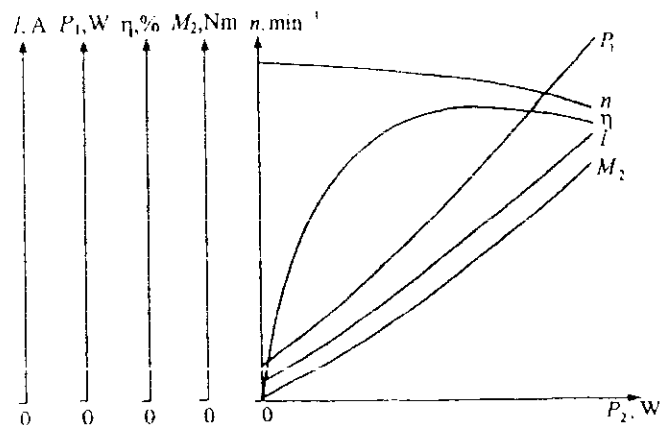
По данните от табл. 9.1 се построяват работните характеристики, показани на фиг. 9.3.

• Както се вижда от *кривата* $n = f(P_2)$ при увеличаване на натоварването скоростта на въртене слабо се намалява. Затова двигателите с паралелно възбуждане са подходящи в случаите, когато е необходимо скоростта на въртене при различни натоварвания да остане почти постоянна.

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

• *Зависимостта* $\eta = f(P_2)$ има типичния за всички електрически машини вид. К.п.д. при празен ход е нула, нараства при увеличаване на натоварването, става максимален при определен товар, след което започва да намалява.

Обикновено максимумът се получава при товар със стойности $(0,75 \pm 1,0)P_{2n}$, като този максимум е "притъпен" и в един диапазон на натоварването около номиналното двигателят работи с достатъчно висок к.п.д.



Фиг. 9.3

• С увеличаване на P_2 (съответно на M_2) консумираният ток I се увеличава, като пропорционално на I нараства и консумираната от мрежата мощност P_1 .

УПРАЖНЕНИЕ 10

УНИВЕРСАЛЕН КОЛЕКТОРЕН ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

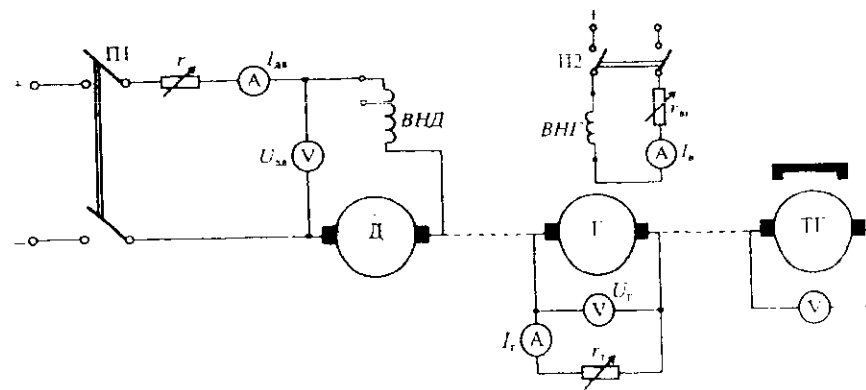
1. Снемане на работните характеристики на двигателя при захранване с постоянно напрежение.
2. Снемане на работните характеристики на двигателя при захранване с променливо напрежение.

B. Изчисления и построения:

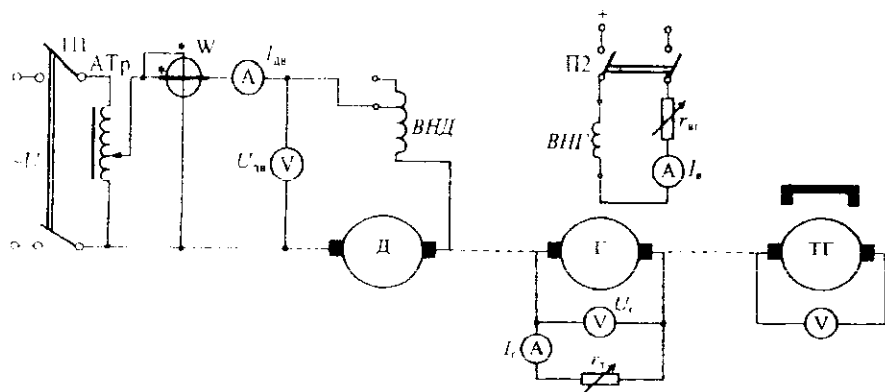
1. Построяване на работните характеристики при захранване с постоянно напрежение.
2. Построяване на работните характеристики при захранване с променливо напрежение.

II. Схема на опитната постановка

Схемата за снемане на работните характеристики при захранване с постоянно напрежение е показана на фиг. 10.1, а при захранване с променливо напрежение – на фиг. 10.2. Изследваният универсален колекторен двигател Д се натоварва с тариран генератор за постоянен ток с независимо възбуждане Г и при двата случая на захранващо напрежение.



Фиг. 10.1



Фиг. 10.2

Тарировъчната характеристика на генератора $P'_0 = f(n)$ при $I_a = \text{const}$ е известна. Пояснения, относно тарирането на товарния генератор, са дадени в Глава I.

От схемите са вижда, че възбудителната намотка на ВЩ е свързана последователно с котвената, т.е. тези двигатели са винаги с последователно възбуждане. От възбудителната намотка са направени отклонения. Когато Д се захранва с променливо напрежение, броят на включените навивки от възбудителната намотка е по-малък отколкото в случая, когато Д се захранва с постоянно напрежение. Това се прави с цел скоростите на въртене да бъдат приблизително еднакви при номинално натоварване за двата вида захранване.

Скоростта на въртене се измерва с постояннотоков тахогенератор ТГ.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

1. Работни характеристики при захранване с постоянно напрежение

Представяват зависимостите на: скоростта на въртене n , коефициента на полезно действие η , полезната мощност P_2 и консумирания ток $I_{ав}$ от полезния момент M_2 при постоянно напрежение $U_{ав}$.

$$n, \eta, P_2, I_{ав} = f(M_2) \quad \text{при} \quad U_{ав} = \text{const.}$$

Характеристиките се получават, като се използва схемата от фиг. 10.1, по следния начин. Двигателите с последователно възбуждане не бива да остават на празен ход, тъй като скоростта на въртене би достигнала недопустимо високи стойности. Затова най-напред се затваря прекъсвачът П2. Подава се напрежение на възбудителната намотка на товарния генератор Г и чрез $r_{гг}$ се установява такава стойност на възбудителния ток $I_{гг}$, каквато е била при тарирането му. След

това се затваря прекъсвачът П1 и на изпитвания двигател се подава номиналното напрежение. Чрез $r_{гг}$ се изменя натоварването на генератора, а оттам и на изпитвания двигател, като при различните натоварвания се отчитат величините, отразени в табл. 10.1. Опитът започва от определен минимален товар, например $M_{\text{мин}} = 0,25M_n$, и завършва при определен максимален товар $M_{\text{макс}} = 2M_n$. Номиналният момент се изчислява по формулата

$$M_n = \frac{60P_{2н}}{2\pi n_n},$$

където номиналната мощност и скорост се вземат от табелката на машината.

Изменението на натоварването може да се контролира и по тока на двигателя, например се започва от $I_{ав} = 0,5I_n$ и се завършва при $I_{ав} \approx 1,4I_n$.

Мощността P'_0 се отчита от кривата $P'_0 = f(n)$ за съответните скорости на въртене.

Таблица 10.1

Отчитат се									
$I_{ав}$		$U_{гг}$		$I_{гг}$		$I_{гг}$		n	
дел	А/дел	А	дел	В/дел	В	дел	А/дел	А	min ⁻¹

Изчисляват се						
P_1	$U_{гг}I_{гг}$	P'_0	$P_{енг}$	P_2	η	M_2
W	W	W	W	W	%	Nm

При изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = U_{ав}I_{ав}; \quad P_2 = U_{гг}I_{гг} + P'_0 + I_{гг}^2 r_{гг};$$

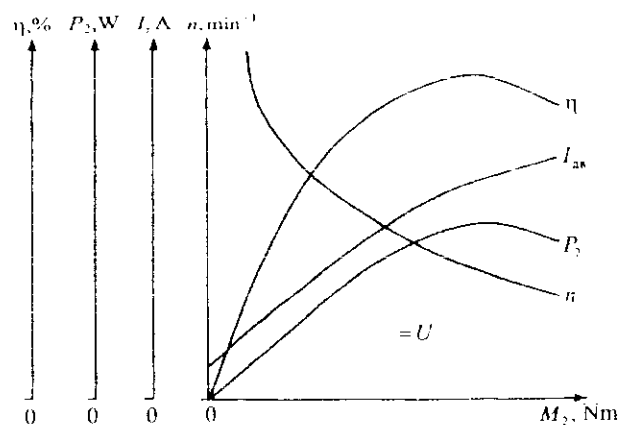
$$M_2 = \frac{60P_2}{2\pi n}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

където $U_{гг}$ и $I_{гг}$ са токът и напрежението на котвата на Г; $r_{гг}$ – съпротивлението на котвената намотка и на преходното контактно съпротивление между четките и колектора на Г.

По данните от табл. 10.1 се построяват работните характеристики на универсалния колекторен двигател при постояннотоково захранване, показани на фиг. 10.3.

Механичната характеристика $n = f(M_2)$ представлява хипербола. С увеличаване

значение на натоварването скоростта на въртене силно намалява, т.е. изследваният двигател има мека механична характеристика.



Фиг. 10.3

2. Работни характеристики при захранване с променливо напрежение

Представяват зависимостите на: скоростта на въртене n , коефициента на полезно действие η , полезната мощност P_2 , фактора на мощността $\cos \varphi$ и консумирания ток $I_{дв}$ от полезния момент M_2 при постоянно напрежение $U_{дв}$ и честота f

$$n, \eta, P_2, I_{дв}, \cos \varphi = f(M_2) \quad \text{при} \quad U_{дв} = \text{const} \quad \text{и} \quad f = \text{const}.$$

За снимане на характеристиките се свързва схемата от фиг. 10.2. Опитът се провежда по същия начин както при постояннотоково захранване. На изследвания двигател се подава номиналното напрежение чрез автотрансформатора АТр. Очигните резултати се попълват в табл. 10.2.

При изчисленията се използват формулите:

$$P_1 = k_n (\alpha_1 \pm \alpha_2); \quad P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_a^2 r_a;$$

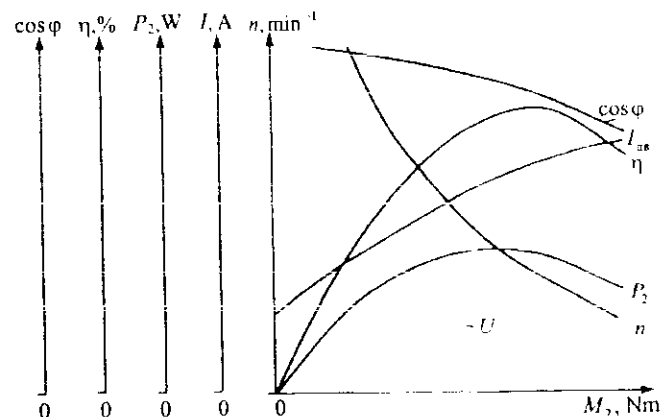
$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{дв} I_{дв}}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%; \quad M_2 = \frac{60 P_2}{2 \pi n}.$$

Таблица 10.2

Отчитат се										
U_r		I_r			$I_{дв}$			$\alpha_{ж1}$	k_n	n
дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	дел	A/дел	A	дел	min ⁻¹

Изчисляват се							
P_1	$U_r I_r$	P'_0	$P_{сгг}$	P_2	$\cos \varphi$	η	M_2
W	W	W	W	W		%	Nm

По данните от табл. 10.2 се построяват работните характеристики на универсалния колекторен двигател при променливотоково захранване, показани на фиг. 10.4.



Фиг. 10.4

От сравнението на работата на универсалния колекторен двигател при постояннотоково и променливотоково захранване се установява следното:

- При постояннотоково и променливотоково захранване електромагнитният момент е съответно:

$$M_{п} = c_m \Phi I_{дв}; \quad M_{п} = c_m \Phi I_{дв} \cos \gamma,$$

където γ е ъгълът на дефазирание между магнитния поток Φ и котвения ток $I_{дв}$.

Потокът изостава от тока поради загубите в стоманата и реакцията на тока в комутиращата секция. Става ясно защо не се правят еднофазни колекторни двигатели за променлив ток с паралелно възбуждане. При такъв двигател ъгълът γ ще бъде голям и следователно въртящият момент – малък.

- Поради по-малкия брой включени навивки от възбудителната намотка при променливотоково захранване, скоростта на въртене е приблизително еднаква при номинално натоварване и при двата вида захранващо напрежение.

- При един и същ момент M_2 токът на двигателя при захранване с променливо напрежение е по-голям от този при постояннотоково захранване, поради по-малкия брой включени навивки от възбудителната намотка.

• При един и същ момент M_2 к.п.д. при захранване с променливо напрежение е по-нисък от този при постояннотоково захранване. При променливо-токово захранване загубите са по-големи. От една страна по-големи са електрическите загуби в намотките поради по-големия ток. От друга страна по-големи са и загубите в стоманата, тъй като се добавят загубите в стоманата на статора.

• Условието за комутация при променливотоково захранване са по-тежки. Причина за това е индуктирането на трансформаторно е.д.н. в комутационната секция от променливия възбудителен магнитен поток.

УПРАЖНЕНИЕ 11

ИЗПЪЛНИТЕЛЕН ПОСТОЯННОТОКОВ ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. *Опитни изследвания:*

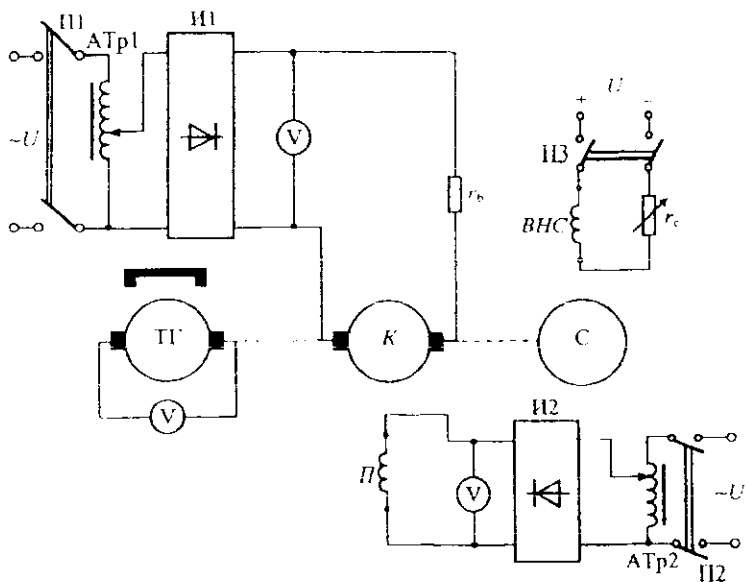
1. Определяне на момента M_{10} .
2. Снемане на механичните характеристики за две стойности на коефициента на сигнала при котвено управление.
3. Снемане на механичните характеристики за две стойности на коефициента на сигнала при полюсно управление.
4. Снемане на регулационните характеристики за две стойности на момента при котвено управление.
5. Снемане на регулационните характеристики за две стойности на момента при полюсно управление.

B. *Изчисления и построения:*

1. Построяване на механичните характеристики при котвено управление.
2. Построяване на механичните характеристики при полюсно управление.
3. Изчисляване и построяване на характеристиките на полезната мощност при котвено управление.
4. Изчисляване и построяване на характеристиките на полезната мощност при полюсно управление.
5. Построяване на регулационните характеристики при котвено управление.
6. Построяване на регулационните характеристики при полюсно управление.

II. Схема на опитната постановка

При снемане на характеристиките се използва схемата, показана на фиг. 11.1. Котвената K и полюсната P намотки на постоянно-токовия изпълнителен двигател се захранват с постоянно напрежение от отделни регулируеми изправители И1 и И2 с регулиране на напрежението на входа на изправителите от автотрансформатори АТр1 и АТр2. Във веригата на котвата е свързано баластно съпротивление r_6 . Скоростта на въртене се измерва с постоянно-токов тахогенератор. Нагряването на двигателя се осъществява с електромагнитна спирачка С, чиято възбудителна намотка ВИС се захранва от постоянно-токов източник. Токът през спирачката се регулира с реостат r_c .



Фиг. 11.1

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

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

Изпълнителният постоянен ток двигател с електромагнитно възбуждане има две намотки: полюсна, разположена в статора и котвена, разположена в ротора.

Под управление на изпълнителен двигател се разбира регулирането на скоростта 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.

Основни изисквания към изпълнителните двигатели са:

а) липса на самоход, което означава че скоростта на въртене трябва да е нула при управляващо напрежение, равно на нула;

б) линейни механични и регулировъчни характеристики;

в) голямо бързодействие.

Под *коэффициент на сигнала* α се разбира отношението на управляващото U_y и възбудителното U_x напрежение

$$\alpha = \frac{U_y}{U_x}$$

1. Определяне на момента $M_{н0}$

$M_{н0}$ представлява пусковият момент при $\alpha = 1$, т.е. $U_x = U_n = U_{нн}$. Измерва се като дискът на електромагнитната спирачка се фиксира с подходящ шифт към полюсната ѝ система. Подава се номиналното напрежение на котвената намотка и се отчита стойността на момента. Ако този момент надвишава обхвата на спирачката, се прави измерване на пусковия момент M_n при номинално полюсно напрежение $U_n = U_{нн}$ и понижено напрежение на котвата $U_x < U_{нн}$, а $M_{н0}$ се изчислява по формулата

$$M_{н0} = M_n \frac{U_{нн}}{U_x}$$

2. Механични характеристики при котвено управление (КУ)

Тези характеристики представляват зависимостта на полезния момент M_2 от скоростта на въртене n при постоянен коэффициент на сигнала α и възбудително напрежение U_x

$$M_2 = f(n) \quad \text{при} \quad \alpha = \text{const} \quad \text{и} \quad U_x = U_{нн} = \text{const}$$

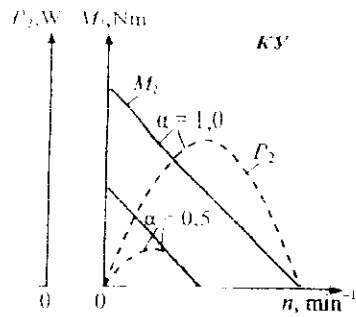
При опитното изследване се използва схемата от фиг. 11.1. С автотрансформаторите АТр1 и АТр2 се установяват необходимите напрежения на двете намотки. Задават се поредица от нарастващи стойности на момента M_2 и се измерва скоростта на въртене. Измерванията започват при $M_2 = 0$ (празен ход) и завършват при $n = 0$ (късо съединение – застопорен ротор). Снемат се две характеристики при стойности на коефициента на $\alpha = 1$ и $\alpha = 0,5$. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 11.1. Полезната мощност се изчислява по израза

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

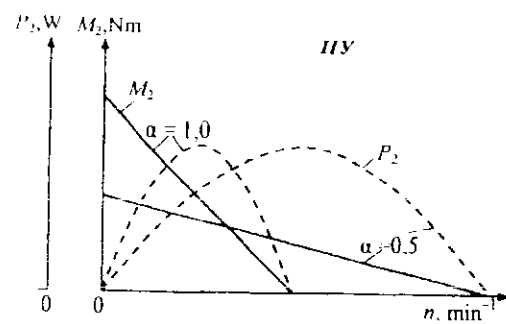
Таблица 11.1

$U_x = U_n = U_{нн}$									
$\alpha = 1,0$					$\alpha = 0,5$				
$U_y = U_x = U_{нн}$					$U_y = U_x = 0,5U_{нн}$				
M_2		n	P_2		M_2		n	P_2	
дел	Nmm дел	Nmm	min ⁻¹	W	дел	Nmm дел	Nmm	min ⁻¹	W

По данните от табл. 11.1 се построяват механичните характеристики при котвено управление, които са показани на фиг. 11.2.



Фиг. 11.2



Фиг. 11.3

3 Механични характеристики при полюсно управление (ПУ)

Аналогично на т. 2, това са зависимостите

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

По схемата на фиг. 11.1 се установяват необходимите напрежения на двете намотки. Задават се поредица от нарастващи стойности на момента M_2 и се измерва скоростта на въртене. Измерванията започват при $M_2 = 0$ (празен ход) и завършват при $n = 0$ (късо съединение – застопорен ротор). Снемат се две характеристики при стойности на коефициента на $\alpha = 1$ и $\alpha = 0,5$. Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 11.2.

Таблица 11.2

$U_n = U_k = U_n$									
$\alpha = 1,0$					$\alpha = 0,5$				
$U_y = U_n = U_n$					$U_y = U_n = 0,5U_n$				
M_2		n	P_2		M_2		n	P_2	
дел	Nm/дел	Nm	min ⁻¹	W	дел	Nm/дел	Nm	min ⁻¹	W

Характеристиките при полюсното управление са показани на фиг. 11.3.

От сравнението на механичните характеристики при котвено и полюсното управление се вижда, че при коефициент на сигнала $\alpha = 1,0$ те съвпадат. При други стойности на коефициента на сигнала ($\alpha < 1,0$) характеристиките за ПУ са по-меки. Тук трябва да се има в предвид, че при $U_y = U_n \rightarrow 0$ магнитни-

ят поток също клони към нула ($\Phi \rightarrow 0$) и индуктираното в котвената намотка напрежение $E \rightarrow 0$. Тогава в котвата протича голям ток, равен на тока на късо съединение, който е много по-голям от номиналния. За да се предпази котвената намотка в схемата, се поставя токоограничаващ (баластен) реостат r_b . И в двата случая на управление на постоянноотокъв изпълнителен двигател механичните характеристики са линейни, но само при котвено управление са и успоредни.

Характеристиките на полезната мощност представляват параболи, които пресичат абсцисната ос в две точки: при пускане ($n = 0$) и при празен ход ($M_2 = 0$). Максималната полезна мощност при котвено управление силно се намалява с намалението на α , докато при полюсното – тя е постоянна при различни стойности на α .

4. Снемане на регулационни характеристики при котвено управление (KV)

Тези характеристики представляват зависимостта на скоростта на въртене n от управляващото напрежение U_y при постоянен момент M_2 и възбудително напрежение U_n .

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

Използва се схемата от фиг. 11.1. Измерванията започват от стойности на управляващото напрежение $U_y = U_n$, след което постепенно напрежението се намалява. Снемат се две регулационни характеристики: при $M_2 = 0$ и $M_2 = 0,5M_{n0}$. Резултатите се нанасят в табл. 11.3.

Таблица 11.3

$U_n = U_n = U_n$							
$M_2 = 0$				$M_2 = 0,5M_{n0}$			
$U_y = U_n$		n		$U_y = U_n$		n	
дел	V/дел	V	min ⁻¹	дел	V/дел	V	min ⁻¹

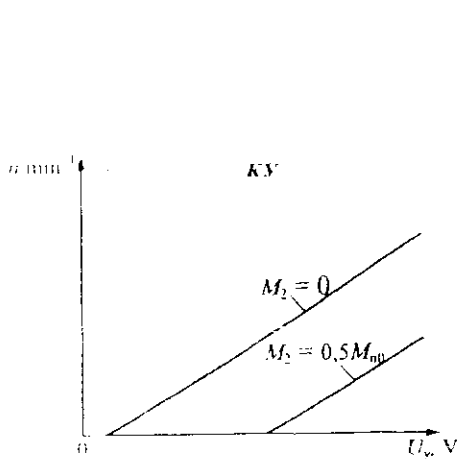
5. Снемане на регулационни характеристики при полюсно управление (ПУ)

Характеристиките $n = f(U_y)$ при $M_2 = \text{const}$ и $U_n = U_n = \text{const}$ се получават, като се използва схемата от фиг. 11.1 (аналогично на т. 4) с разликата, че в този случай управляващото напрежение се подава на полюсната намотка. Резултатите се нанасят в табл. 11.4.

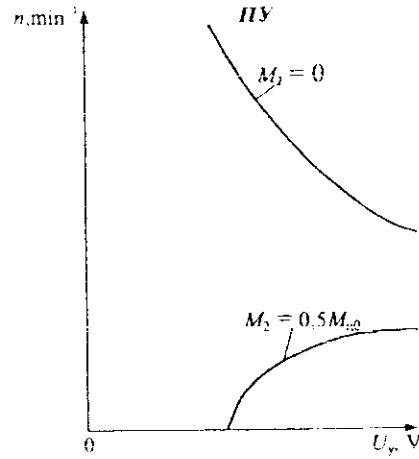
На фиг. 11.4 и фиг. 11.5 са показани регулационните характеристики съответно при котвено управление и при полюсно управление.

Таблица 11.4

$U_e = U_v = U_n$							
$M_2 = 0$				$M_2 = 0,5M_{n0}$			
$U_y = U_n$		n		$U_y = U_n$		n	
дел	V/дел	V	min ⁻¹	дел	V/дел	V	min ⁻¹



Фиг. 11.4



Фиг. 11.5

Характеристиките при котвено управление са линейни и успоредни. При пълномото управление са нелинейни и ако $M_2 < 0,5M_{n0}$, се получават двузначни и непригодни за управление. Скоростта на въртене при празен ход ($M_2 = 0$) и при липса на управляващ сигнал ($\alpha = 0$) е недопустимо висока.

В схемите на автоматиката и изчислителната техника се използва предимно котвено управление. Освен това, ако постояннотоковият изпълнителен двигател е с възбуждане от постоянни магнити е възможно само котвено управление.

УПРАЖНЕНИЕ 12

ПОСТОЯННОТОКОВ ТАХОГЕНЕРАТОР

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

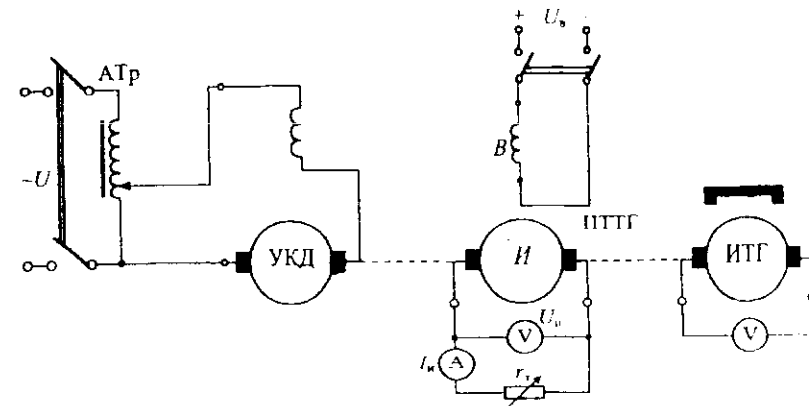
1. Снемане на изходните характеристики $U_n = f(n)$ при $R_t = \infty$ и $R_t = R_{t0}$.
2. Снемане на зависимостта $U_n = f(R_t)$ при $n = n_n$.

B. Изчисления и построения:

1. Построяване на изходните характеристики и определяне на стръмността им.
2. Построяване на зависимостта на изходното напрежение от товарното съпротивление.

II. Схема на опитната постановка

Използва се схемата, показана на фиг. 12.1. Роторът на изследвания постояннотоков тахогенератор ПТГГ се върти от универсален колекторен двигател УКД, захранван от автотрансформатор АТр. Чрез изменение на напрежението, подавано от АТр към УКД, се регулира плавно скоростта на въртене. Възбудителната намотка В на ПТГГ се захранва с постоянно напрежение, а към изходната (котвената) намотка И е включен товарен реостат $r_{тв}$. Скоростта на въртене се измерва с измервателния тахогенератор ИТГ.



Фиг. 12.1

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Тахогенераторите са електрически микромашини, които се използват в схемите на автоматиката и служат за преобразуване на скоростта 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 имат две намотки: възбудителна B и котвена K . Възбудителната намотка е разположена в статора и се захранва с постоянно напрежение U_* от страничен източник. Протичащият през нея ток създава основния магнитен поток. Котвената намотка е разположена в ротора и от нея се снима изходното напрежение U_n . 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 скоростта 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.

1. Снемане на изходните характеристики

Тези характеристики представляват зависимостта на изходното напрежение U_n от скоростта на въртене n при постоянно товарно съпротивление R_T и постоянно възбудително напрежение U_*

$$U_n = f(n) \quad \text{при} \quad r_T = \text{const} \text{ и } U_* = U_{*н}$$

За снемане на характеристиките се свързва схемата от фиг. 12.1. Чрез изменението на напрежението от автотрансформатора се регулира скоростта на въртене в диапазона $n = (0 \div 1,25) n_n$. Снемат се две характеристики: първата при $r_T = \infty$, а втората при $r_T = r_{Tн}$. Номиналната стойност на товарното съпротивление $r_{Tн}$ се определя от отношението на номиналното изходно напрежение $U_{нн}$ и номиналния изходен ток $I_{нн}$

$$r_{Tн} = \frac{U_{нн}}{I_{нн}}$$

Резултатите от измерванията се нанасят в табл. 12.1.

Построените по данните от табл. 12.1 изходни характеристики са показани на фиг. 12.2. От опитно снетите характеристики могат да се направят изводи за тяхната линейност.

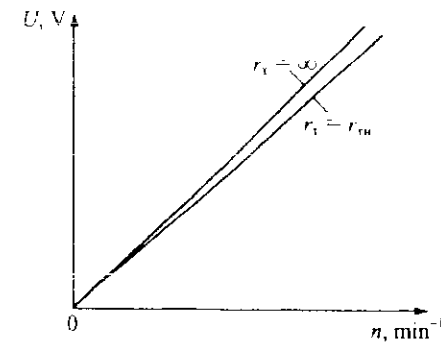
Стръмността s на изходните характеристики се определя с израза

$$s = \frac{U_n}{n_n}$$

където U_n е измереното изходно напрежение при номиналната скорост на въртене n_n

Таблица 12.1

$r_T = \infty$		$r_T = r_{Tн}$	
n	U_n	n	U_n
min^{-1}	V	min^{-1}	V



Фиг. 12.2

2. Снемане на зависимостта $U_n = f(r_T)$

За снемане на тази характеристика се използва схемата, показана на фиг. 12.1. През време на целия опит възбудителното напрежение U_* и скоростта на въртене n са неизменни и равни на номиналните си стойности. Чрез r_T изходният ток се изменя в диапазона $I_n = (0 \div 1,25) I_{нн}$. Резултатите се нанасят в табл. 12.2.

Стойността на товарното съпротивление се изчислява чрез израза

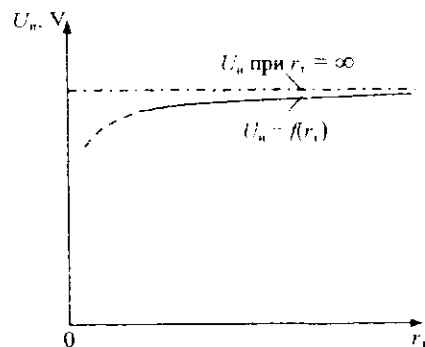
$$r_T = \frac{U_n}{I_n}$$

Таблица 12.2

$n = n_n$		
U_n	I_n	r_T
V	A	Ω

3. Зависимост $U_n = f(r_r)$

На фиг. 12.3 е показана зависимостта $U_n = f(r_r)$. От нея се вижда влиянието на големината на товара върху изходното напрежение при номиналната скорост на въртене. Показано е и изходното напрежение при $r_r = \infty$. Става ясно, че е желателно товарното съпротивление да бъде колкото е възможно по-голямо.



Фиг. 12.3

СЕДМА ГЛАВА

ИЗПИТВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ С ЕЛЕКТРОННО УПРАВЛЕНИЕ

УПРАЖНЕНИЕ 13

СТЪПКОВ ДВИГАТЕЛ

I. Програма на работа

A. *Опитни изследвания:*

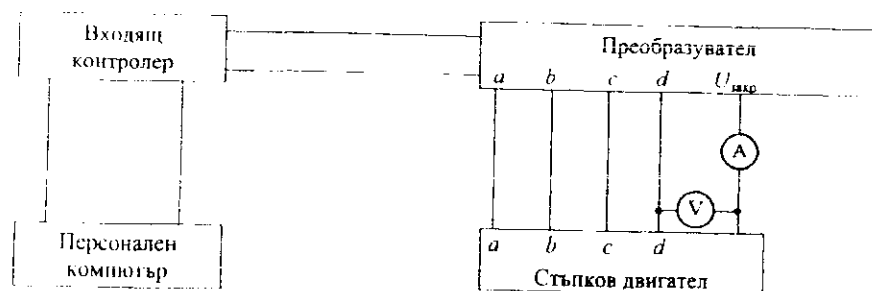
1. Запознаване с данните от табелката, устройството на стенда за изпитване на стъпков електродвигател и зададените в основното меню на компютърната програма режими.
2. Определяне стъпката на завъртане на ротора на електродвигателя при симетрична и несиметрична комутация и скоростта на въртене на ротора за три зададени предварително фиксирани управляващи честоти.
3. Определяне броя на стъпките, необходими за едно пълно завъртане на ротора при симетрична и несиметрична комутация. Проверка на отработката от двигателя на определения брой стъпки за едно пълно завъртане за три фиксирани честоти при симетрична и несиметрична комутация.
4. Снемане на статичната ъглова характеристика – зависимостта на статичния синхронизиращ момент от ъгъла на завъртане $M_{\text{стн}} = f(\Theta)$ при симетрична двутактна комутация.
5. Снемане зависимостта на максималния динамичен синхронизиращ момент от честотата на комутация $M_{\text{дин}} = f(f_k)$ при симетрична двутактна комутация и несиметрична комутация.

B. *Изчисления и построения:*

1. Изчисляване на стъпката на ротора при симетрична и несиметрична комутация и скоростта на въртене на ротора за три зададени предварително фиксирани управляващи честоти.
2. Изчисляване броя на стъпките, необходими за едно пълно завъртане на ротора при симетрична и несиметрична комутация.
3. Построяване на статичната ъглова характеристика $M_{\text{стн}} = f(\Theta)$ за симетрична двутактна комутация.
4. Построяване на динамичната характеристика $M_{\text{дин}} = f(f_k)$ за симетрична двутактна комутация и несиметрична комутация.

II. Схема на опитната постановка

Блоквата схема на опитната постановка е показана на фиг. 13.1. Изпитваният стъпков електродвигател се захранва от преобразувател, който от своя страна получава команди за изпълнение от персонален компютър чрез специално изработен входящ контролер. Преобразувателят е изграден от два основни възела – логически блок и комутиращ блок. Логическият блок трябва да преобразува входните импулси, идващи последователно във времето, в управляващи сигнали за отделните токови усилватели.



Фиг. 13.1

След подходящо формиране входните сигнали постъпват на входа на реверсивен брояч, чиито изходи се дешифрират и буферират. Комутаторът е изграден на базата на транзисторни ключове, които превключват фазите на стъпковия двигател в определена последователност, която зависи от типа на комутацията. Когато е включена само една фаза комутацията е еднотактна, а при едновременната работа на две фази – двутактна. Входящият контролер трябва да съгласува обменните сигнали между персоналния компютър и преобразувателя по ниво и по време. Същевременно чрез него компютърът получава обратна информация за състоянието на преобразувателя и не разрешава неговата работа при липса на захранване.

Персоналният компютър управлява подаването на сигнали към стъпковия електродвигател. Програмното му осигуряване е изградено на две нива – бейзикова програма за визуализация и диалог с потребителя и асемблерски програми за обработка на определени процеси. Първоначално се провежда тест за работоспособност на стенда, както и зареждане на асемблерските програми. След успешното приключване се предлага диалогов режим при следното меню.

1. Работа при зададена честота.
2. Обработка на зададен брой стъпки.
3. Обработка на единични стъпки.

4. Край на програмата.

При първия режим се задава желаната честота в диапазона (1 – 500) Hz. По време на работата е възможно увеличаването на честотата при натискане на бутон „>” или намаляването ѝ чрез натискане на бутон „<”. Натискането на клавиш RETURN спира въртенето, а за продължаването му се натиска произволен клавиш. Натискането на бутон „ESC” при спрял двигател връща програмата в основното меню.

При втория режим се избира първоначално една от предложените честоти на работа и се задават желаните за отработка стъпки, които могат да са максимално 65535. След стартиране на екрана се отпечатват зададените, оставащите и отработените стъпки, както и графичен символ. Възможно е и спиране на движението, което става по аналогичен начин. Изпълнението на зададените и отработени стъпки се сигнализира с характерен звук.

Третият режим на работа позволява отработването на единични стъпка при натискане на произволен клавиш, а връщането в основното меню става също при натискане на бутон “ESC”.

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Стъпковите двигатели работят съвместно с електронни комутатори. В зависимост от превключванията на управляващите намотки се получават различен брой състояния на комутатора или брой тактове K_1 . Върху тях влияе още и броят на едновременно включените фази на всеки такт, което разделя комутацията на еднотактна или двутактна. Броят на тактовете е пропорционален и на посоката на тока в управляващите фази, което води до еднополярна и разнополярна комутация. K_1 се определя от зависимостта

$$K_1 = mJ_1J_2,$$

където m е броят на фазите; $J_1 = 1$ – при симетрична комутация; $J_1 = 2$ – при несиметрична комутация; $J_2 = 1$ – при еднотактна комутация; $J_2 = 2$ – при двутактна комутация.

Стъпката при двигателите с активен ротор може да се определи чрез зависимостта

$$\Theta = \frac{360}{K_1 p},$$

където p е броят на двойките полюси.

Тогава броят на стъпките за едно пълно завъртане на ротора ще се определи чрез израза

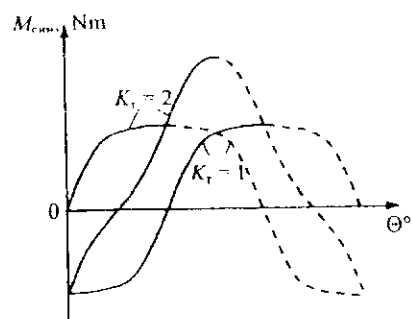
$$b = \frac{360}{\Theta}$$

При стъпковите електродвигатели се различават статичен и динамичен

режим на работа. При първия режим скоростта на въртене е нула. Ако роторът бъде отклонен чрез външен момент на някакъв ъгъл Θ , то двигателят развива съпротивителен момент, чиято зависимост от ъгъл Θ се нарича ъглова характеристика. За определянето ѝ чрез електронния комутатор на стъпковия двигател се задава режим на двукратна комутация и общ статорен ток, равен на номиналния, при което роторът се фиксира в определено положение. На шайбата се прикрепва нишка, застопорена от едната страна в специален отвор, а от другата ѝ страна се закрепват тежести и по скалата се отчита ъгъла на отклонение. Големината на тежестите се увеличава дотогава, докато двигателят превърти, което показва превишаване на максималния статичен синхронизиращ момент. Опитните резултати могат да бъдат представени в табл. 13.1. Видът на характеристиката е показан на фиг. 13.2.

Таблица 13.1

Θ	m_g	$M_{\text{стн}}$
deg	kg	Nm



Фиг. 13.2

$M_{\text{стн}}$ се определя от зависимостта

$$M_{\text{стн}} = m_g g r,$$

където m_g е общата маса на тежестите; g – земното ускорение $\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)$; r – радиус на шайбата (0,04 m).

При квазистатичния режим се обработват отделни стъпки, като роторът успява да премине в неподвижно състояние след затихване на колебанията.

При установения динамичен режим управляващите импулси имат постоянна честота f_k и роторът се върти с постоянна скорост n . Въртящият момент,

развиван при въртенето на ротора, се нарича динамичен въртящ момент. Неговата големина зависи както от честотата на обработване, така и от големината на фазния ток.

Преходно-динамичният режим е основният режим на работа на стъпковия двигател. Това са процесите на включване, спиране, реверсиране и преминаване от една честота към друга. Важен параметър е честотата на възприемане. Това е максималната честота, при която е възможно директно пускане, без да се пропусне стъпка. Първоначално се задава номиналната стойност на общия захранващ ток в статичен режим. Определя се чрез задаване на съпротивителен момент, като за целта нишката се прикрепва неподвижно към стойката на двигателя, а изработената специална спирална накладката се поставя в канала на шайбата. Двигателят се пуска директно на изследваната честота. Честотата се увеличава до момента, когато започват да се изпускат стъпки. За най-голямата честота, при която двигателят е работил нормално, се определя динамичния въртящ момент и мощността P_2 от зависимостите:

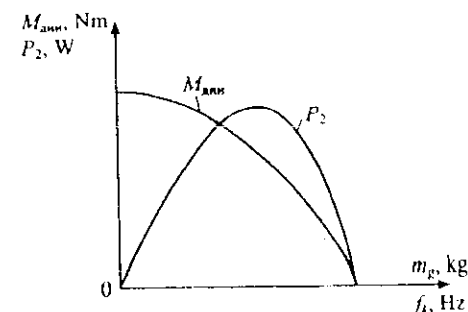
$$M_{\text{дин}} = K_{\text{тр}} m_g g r; \quad P_2 = M_{\text{дин}} \frac{f_k 2\pi}{b},$$

където $K_{\text{тр}} = 0,35$ е коефициентът на триене.

Опитните резултати могат да бъдат представени в табл. 13.2, а видът на характеристиката е показан на фиг. 13.3.

Таблица 13.2

f_k	m_g	$M_{\text{дин}}$	P_2
Hz	kg	Nm	W



Фиг. 13.3

УПРАЖНЕНИЕ 14

БЕЗКОНТАКТЕН ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

I. Програма на работа

A. Опитни изследвания:

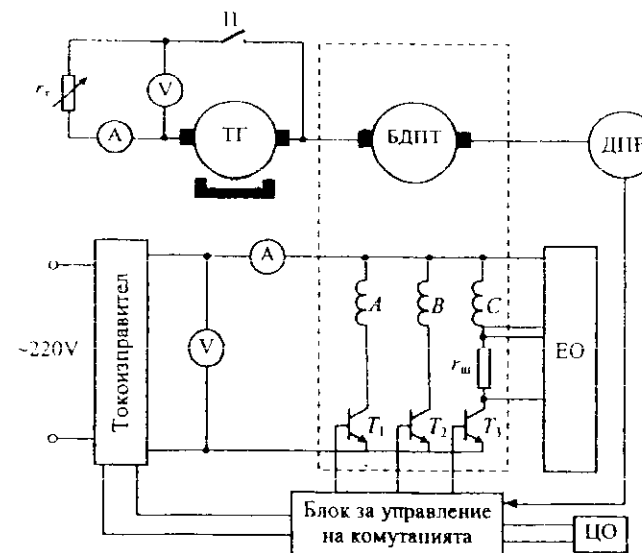
1. Снемане на работните характеристики на двигателя при захранване с напрежения $U_a = 24\text{ V}; 18\text{ V}; 12\text{ V}$.
2. Снемане на регулационните характеристики $n = f(U_a)$ при празен ход и при $M_2 = 0,5M_n = \text{const}$.

B. Изчисления и построения:

1. Построяване в обща координатна система на работните характеристики $\eta, n, P_1, M_2, I_a = f(P_2)$ при $U_a = 24\text{ V}$.
2. Построяване в обща координатна система на работните характеристики $\eta, n, P_1, M_2, I_a = f(P_2)$ при $U_a = 18\text{ V}$.
3. Построяване в обща координатна система на работните характеристики $\eta, n, P_1, M_2, I_a = f(P_2)$ при $U_a = 12\text{ V}$.
4. Построяване в обща координатна система на регулировъчните характеристики $n = f(U_a)$ при празен ход и при $M_2 = 0,5M_n = \text{const}$.

III. Схема на опитната постановка

За провеждане на опитните изследвания се свързва схемата, показана на фиг. 14.1. С БДПТ е означен безконтактният двигател за постоянен ток с трифазна паралелна нереверсивна намотка, включващ фазите A, B и C , транзисторните ключове T_1, T_2 и T_3 , които комутират тока във фазите, ротор с възбуждане от постоянни магнити, датчик на положението на ротора ДПР и блок за управление на комутацията. Двигателят се захранва от токоизправител с три нестабилизирани напрежения ($U_a = 12, 18, 24\text{ V}$) и едно стабилизирано напрежение $U_{\text{ин}} = 18\text{ V}$. Натоварването на двигателя се извършва, с тариран товарен генератор ПГ с възбуждане от постоянни магнити и товарен реостат r_r . Скоростта на въртене се измерва с цифров оборотомер ЦО. Кривата на тока във фазата i_ϕ и фазовото е.д.н. се наблюдават с електронен осцилоскоп ЕО чрез шунт $r_{\text{ш}}$, свързан последователно на фаза C .



Фиг. 14.1

III. Начин на провеждане на упражнението, обработка и анализ на резултатите

Безконтактният двигател за постоянен ток с паралелна нереверсивна намотка има ротор с възбуждане от постоянни магнити, а в статора му е разположена най-често трифазна намотка. Към двигателя е монтиран датчик на положението на ротора. Статорът на ДПР се монтира към статора на двигателя и съдържа чувствителни елементи (фотодатчици, магниточувствителни датчици и др.). Броят на чувствителните елементи е равен на броя на фазите на двигателя m като датчиците са разположени в пространството на ъгъл $\alpha_1 = \frac{2\pi}{mp}$, където p е

броят на двойките полюси на двигателя. Роторът на ДПР или както най-често се нарича сигналният сектор е закрепен към вала, като преминавайки покрай чувствителните елементи ги възбужда и те генерират електрически сигнали. Така получените сигнали се усилват от блок за управление на комутацията и включват силовите полупроводникови ключове, които комутират тока във фазите на двигателя. Обикновено във всеки момент от време работи само една фаза, като интервалът на включването ѝ е $\alpha_k = \frac{2\pi}{m}$. Интервалът α_k е определен така,

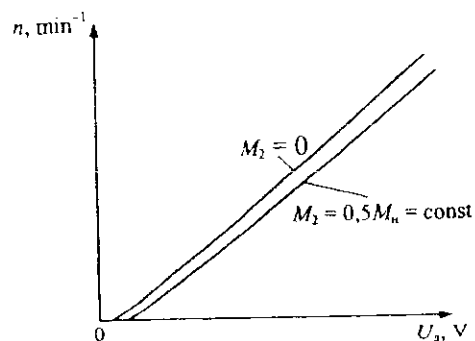
че при протичане на ток през фазата да се създава само положителен момент. През интервала α_k към фазата се подава цялото захранващо напрежение като е.д.н. на фазата е срещу посоката на тока.

БДПТ е аналог на колекторния двигател за постоянен ток, като разликата между тях е в устройството, което комутира тока в намотките. При колекторния двигател това устройство е механичен колектор, а при БДПТ – полупроводникови ключове, управлявани от датчик на положението на ротора. Следователно характеристиките на БДПТ – работни, пускови и регулировъчни по вид са напълно аналогични на характеристиките на колекторен двигател за постоянен ток с независимо възбуждане.

Пускането в ход на БДПТ се извършва по същия начин, както на двигателя с паралелно възбуждане. Особено в случая е че полупроводниковият комутатор, който включва ключовете T_1 , T_2 и T_3 и блока за управление на комутацията, позволява да се ограничи пусковия ток на двигателя чрез преминаване на ключовите транзистори в линеен режим на работа или в режим на ШИМ, при което не са необходими пускови реостати.

Регулирането на скоростта на въртене на БДПТ се извършва по същия начин както при двигателя за постоянен ток с паралелно възбуждане. Реализира се чрез изменение на захранващото напрежение или чрез импулсно регулиране (най-често с използване на ШИМ), като за целта се използва комутатора на БДПТ. Регулировъчната характеристика $n = f(U_a)$ при $M_2 = 0$ и $M_2 = 0,5M_n = \text{const}$ е от вида, показан на фиг. 14.2. Построяването се извършва по данни от табл. 14.1.

Работните характеристики представляват зависимостите на скоростта на въртене n , въртящия момент M_2 , коефициента на полезно действие η , консумираната мощност P_1 и консумирания ток I_a от полезната мощност P_2 при постоянно захранващо напрежение U_a .



Фиг. 14.2

Характеристиките се снемат по следния начин: пуска се в ход изследваният двигател като предварително се задава желаното захранващо напрежение U_a чрез изправителя. Чрез r_1 се задават товарни токове от $I_r = 0$ до $I_r = 1,2I_n$ като

се изменя товарът на генератора, а оттам и товарът на двигателя и се попълва табл. 14.1.

Таблица 14.1

Отчитат се										
U_a	I_a			U_r			I_r			n
V	дел	A/дел	A	дел	V/дел	V	дел	A/дел	A	min

Изчисляват се						
P_1	$U_r I_r$	P'_0	$P_{ел1}$	P_2	η	M_2
W	W	W	W	W	%	Nm

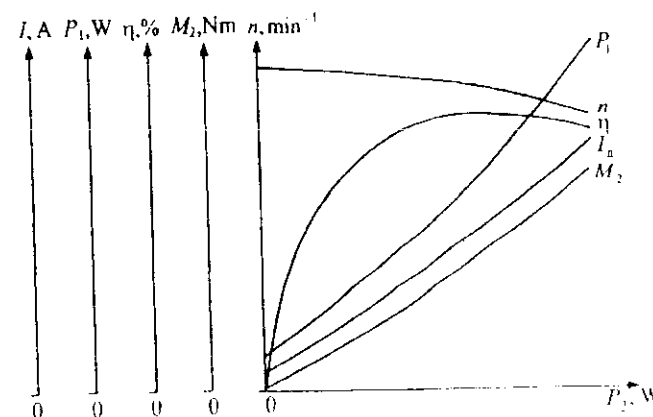
За изчисляване на отделните величини се използват следните формули:

$$P_1 = U_a I_a; \quad P_2 = U_r I_r + P'_0 + I_r^2 r_a + 2\Delta U_a I_r;$$

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2\pi n}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

където P'_0 е сумата от механичните загуби и загубите в стоманата на Γ и се отчита от тарировъчната крива; U_r и I_r – токът и напрежението на котвата на Γ ; r_a – съпротивлението на котвената намотка на Γ ; ΔU_a – пад на напрежение в четките на генератора.

По данните от табл. 14.1 се построяват работните характеристики, показани на фиг. 14.3.



Фиг. 14.3