

ИЗСЛЕДВАНЕ НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

ЦЕЛ НА УПРАЖНЕНИЕТО

1. Да се запознаят студентите с конструкцията, принципа на действие и начините на пускане, реверсиране и регулиране на скоростта на асинхронните двигатели.

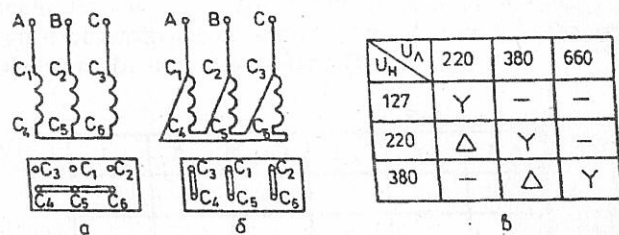
2. Да се снимат опитно работните характеристики на трифазен асинхронен двигател и да се подобри факторът на мощността $\cos\varphi$ в захранващата го електрическа мрежа.

3. Да се разширят и задълбочат знанията на студентите за асинхронните двигатели чрез решаване на изчислителни примери.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Асинхронният двигател е електрическа машина за променлив ток, чието действие се основава на взаимодействието на въртящото се магнитно поле, създадено от токовете на статорните намотки и от тока, протичащ през проводниците на ротора. Трифазният асинхронен двигател е прост по конструкция и евтин, сигурен при работа, лесно се обслужва и има добри технически характеристики, затова е най-широко разпространен. По-рядко се използват еднофазните и двуфазните асинхронни двигатели.

Статорът на асинхронния двигател представлява кух цилиндричен пакет от листов електротехническа стомана с канали по вътрешната му повърхност. В тях са поместени статорните намотки. Трите статорни намотки на трифазния асинхронен двигател могат да бъдат свързани в звезда (Y) (фиг. 10.1а) или в триъгълник (Δ) (фиг. 10.1б), в зависимост от номиналното напрежение U_{11} на двигателя и от линейното напрежение $U_{\text{л}}$ на мрежата (фиг. 10.1в).



Фиг. 10.1

Роторът на двигателя също представлява цилиндричен пакет от листов електротехническа стомана с канали по външната повърхност. В тях се поставя роторната намотка. В зависимост от вида ѝ трифазните асинхронни двигатели са с накъсо съединен (кафезен) или с фазов (навит) ротор. При първия - роторната намотка се състои от неизолирани алуминиеви пръчки, излети в каналите на ротора и свързани накъсо от двете страни на каналите чрез пръстени, които могат да бъдат оформени с перки за вентилация. При фазовия ротор навитите от изолиран меден проводник бобици на трифазната роторна намотка се полагат в каналите на ротора. Краищата им се свързват в обща точка (звезда). Началата им са изведени посредством медни пръстени и четки на отделно клемно табло върху корпуса на двигателя. Еднофазните и двуфазните двигатели се изпълняват само с кафезен ротор.

Трифазната система токове в трифазната статорна намотка създава въртящо се статорно магнитно поле с честота на въртене n_1 , наречена синхронна. Тя се определя от честотата f на променливия ток и броя p на двойките (чифтовете) полюси на статорната намотка

$$(10.1) \quad n_1 = \frac{f}{p}, s^{-1}; \quad \text{или} \quad n_1 = \frac{60f}{p}, \text{min}^{-1},$$

а съответната синхронна ъглова скорост Ω е

$$(10.2) \quad \Omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \text{rad/s.}$$

Статорното магнитно поле пресича роторната намотка, индуцира в нея е.д.н. E_2 и в затворената верига на намотката протича ток I_2 . От електромагнитното взаимодействие на роторния ток с въртящото се статорно магнитно поле възникват електромагнитни сили, които създават двигателен момент M .

Необходимо условие за индуциране на е.д.н. E_2 в роторната намотка е честотата на въртене на ротора n да бъде по-малка от синхронната честота n_1 или съответно $\Omega < \Omega_1$, поради което двигателят се нарича асинхронен. Относителната разлика между честотите на въртене на статорното магнитно поле и това на ротора (или между ъгловите скорости) се нарича хлъзгане (плъзгане) s :

$$(10.3) \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \quad \text{или} \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100, \%$$

От (10.3) следва, че ъгловата скорост Ω или честотата на въртенето му n са функция от хлъзгането s :

$$(10.4) \quad \Omega = \Omega_1(1 - s) \quad \text{или} \quad n = n_1(1 - s).$$

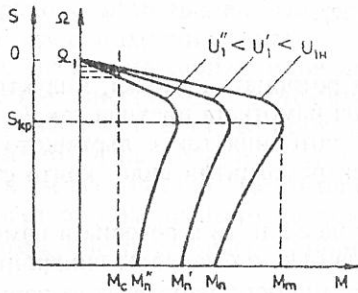
При неподвижен ротор (при пускане) $n = 0$ хлъзгането s е голямо ($s = 1$), в роторната намотка се индуцира голямо е.д.н. $E_{2(II)}$ и протича голям ток $I_{2(II)}$, който създава пусковия двигателен момент M_{II} . Поради "трансформаторната" връзка между роторния и статорния ток, последният също надвишава значително номиналния ток I_{II} и се нарича *пусков ток* I_{II} ($I_{II} = (5-8) I_{II}$).

Ако честотата на въртене n се изравни със синхронната n_1 ($n = n_1$ и $s = 0$), в роторната намотка няма да се индуцира е.д.н. E_2 и токът в нея I_2 , а следователно и двигателният момент M са равни на нула. При различни товари M_C хлъзгането има различни стойности в границите от 0 до 1 ($0 < s < 1$), а при номинален товар ($M_{C(II)}$) хлъзгането е $s_{II} = 0,02 \div 0,06$.

Двигателният момент M на асинхронния двигател зависи от квадрата на захранващото напрежение U_1 , от активното съпротивление на ротора R_2 и от хлъзгането s (фиг. 10.2)

$$(10.5) \quad M = f(U_1^2, R_2, s).$$

Механичната характеристика $\Omega = f(M)$ (фиг. 10.2) на асинхронния двигател и зависимостта $M = f(s)$ (10.5) имат аналогичен вид, тъй като ъгловата скорост на двигателя е линейна функция на хлъзгането (10.4).



Фиг. 10.2

Максималната стойност на момента на двигателя M_m зависи от квадрата на захранващото напрежение U_1 и от конструкцията му (от индуктивното му съпротивление X_K):

$$(10.6) \quad M_m = f(U_1^2, X_K^{-1}).$$

Този момент се получава при

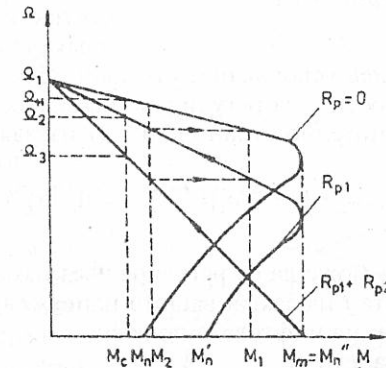
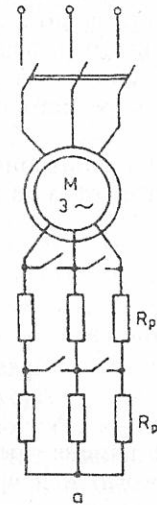
т.нар. *критично хлъзгане* s_{kp} (фиг. 10.2):

$$(10.7) \quad s_{kp} = \frac{R_2}{X_K}.$$

което определя и устойчивия режим на работа на двигателя ($0 < s_{уст} < s_{kp}$).

Големият пусков ток на асинхронния двигател е неблагоприятен както за самия двигател, така и най-вече за останалите потребители (осветителни тела, асинхронни двигатели, чиято работа зависи от квадрата на напрежението), включени в паралел с него. Затова при пускане на големи асинхронни двигатели се използват различни начини за ограничаване на пусковия ток. Те зависят от вида на ротора им.

Асинхронните двигатели с фазов (навит) ротор се пускат чрез включване на резистори R_p към роторните намотки (фиг. 10.3а). Това води до намаляване на роторния и статорния ток и до изменение на механичните характеристики и критичното хлъзгане s_{kp} (фиг. 10.3б) на двигателя, като същевременно се увеличава пусковия момент. При подходящ избор на съпротивлението на пусковите резистори R_p пусковият момент M_{II} може да стане равен на максималния M_m т.е. $s_{kp} = 1$ (фиг. 10.3б). Чрез същите резистори R_p , ако са оразмерени за продължителна работа, може да се регулира скоростта на двигателя. Тя се определя от съответните изкуствени характеристики, съответстващи на съпротивленията R_{p1} и $R_{p1} + R_{p2}$ (фиг. 10.3б).

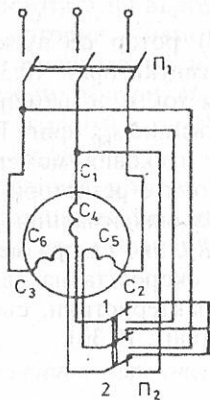


Фиг. 10.3

Асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор се пускат по няколко начина:

а. *Директно включване към мрежа.* Използва се, когато мощността на двигателя не превишава 5% от мощността на трансформаторите, захранващи електрическата мрежа, ако в нея е включено и осветлението, или 25% от нея, ако осветлението се захранва от отделна мрежа.

б. *Пускане при понижено напрежение.* Осъществява се най-често чрез първоначално включване на статорната намотка (оразмерена да работи свързана в триъгълник) в схема звезда - положение 1 на превключвателя Π_2 (фиг. 10.4), при което фазните токове намаляват $\sqrt{3}$ пъти, а линейните - 3 пъти. След ускоряване на двигателя и намаляване на пусковия ток тя се превключва в нормалната работна схема - триъгълник (положение 2 на превключвателя Π_2).



Фиг. 10.4

Напрежението може да бъде понижено също чрез включване във веригата на статорната намотка на понижавач автотрансформатор, индуктивни съпротивления X_p (реактори) или резистори, които се

изключват след ускоряването на двигателя.

Възможностите за регулиране на скоростта на асинхронните двигатели са сравнително ограничени. От израза за честотата на въртене

$$(10.8) \quad n = n_1(1 - s) = \frac{f}{p}(1 - s), \quad s^{-1}$$

следва, че тя може да се регулира чрез изменение на:

- честота f на захранващото напрежение;
- броя p на чифтовете полюси;
- хлъзгането s .

Честотата на напрежението U_1 може да се изменя чрез полупроводникови преобразуватели на честота (*инвертори*) или чрез специален синхронен генератор с регулируема честота, захранващ един или по-често няколко асинхронни двигатели, чиято скорост се изменя синхронно.

Броят на двойките полюси p на двигатели със секционирани ста-

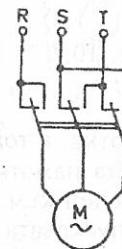
торни намотки се изменя чрез превключване на секциите. Тези двигатели могат да бъдат само с накъсо съединен ротор, тъй като в случая полюсите на ротора съответствуват автоматично на броя p на двойките полюси на статорната намотка. Съществуват дву-, три- и четири скоростни двигатели. Скоростта им се изменя скокообразно.

Хлъзгането s може да се изменя по два начина:

а. Чрез изменение на активното съпротивление R_2 на роторната намотка посредством включване на регулиращи резистори R_p във веригата на тази намотка (фиг. 10.3б). Този начин се използва най-често, въпреки повишените загуби на мощност в резисторите R_p .

б. Чрез изменение на захранващото напрежение U_1 (фиг. 10.2). Използва се рядко поради ограничения диапазон на регулиране и квадратичното намаляване на момента при понижаване на напрежението.

Реверсиране, т.е. смяна на посоката на въртене на трифазния асинхронен двигател, се постига чрез смяна на реда (местата) на две от захранващите го фази (фиг. 10.5), с което се обръща посоката на въртящото се магнитно поле на статора.



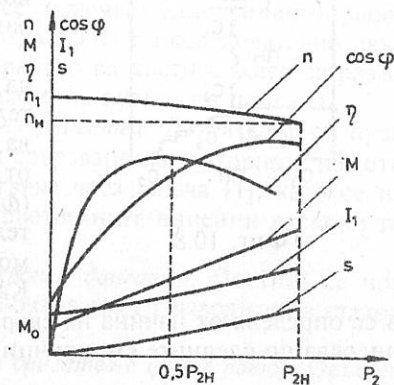
Фиг. 10.5

В каталога и на табелката на асинхронния двигател се посочват типът и номиналните величини: $U_H, I_H, n_H, P_H, \cos \varphi_H, \eta_H$

$$k_I = \frac{I_{II}}{I_H}, \quad k_M = \frac{M_{II}}{M_H}, \quad k_m = \frac{M_m}{M_H}$$

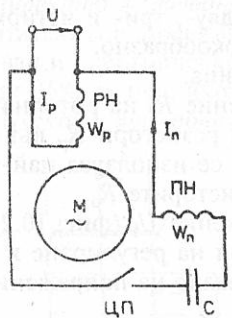
габаритите и теглото му.

По-ясна представа за свойствата на двигателя дават механичната и работните му характеристики при *установен* режим, а така също и поведението му в *динамичен* режим (пускане, регулиране на скоростта му и реверсиране). Работните характеристики представляват зависимостите на величините $n, M, \eta, \cos \varphi, I_1$ и s от полезната мощност P_2 на вала (фиг. 10.6), при постоянно захранващо напрежение U_{1H} и честота $f = 50$ Hz. Съпротивителни-



Фиг. 10.6

ят момент M_c , приложен на вала, и мощността P_2 се изменят посредством генератор за постоянен ток (фиг. В.2).

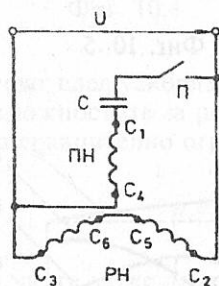


Фиг. 10.7

работната намотка, а токът през нея трябва да бъде дефазизиран спрямо тока в работната намотка на ъгъла $\pi/2$, най-често посредством последователно включен към нея кондензатор C (фиг. 10.7). След ускоряване на ротора пусковата намотка може да бъде изключена от центро-

бежен прекъсвач (ЦП), като двигателят продължава да се върти като еднофазен, или да остане включена при двуфазния кондензаторен двигател, който има по-добри технически характеристики.

Като *еднофазен* или *двуфазен* може да се използва и *трифазният* двигател. Работната му намотка се образува, като се свързват краищата на две от фазите на статорната му намотка (фиг. 10.8). Третата фаза, с последователно свързан към нея кондензатор, може да се използва като пускова.



Фиг. 10.8

Капацитетът C на пусковия кондензатор се определя от начина на свързване на статорната намотка. Той се изчислява по следните емпирични формули:

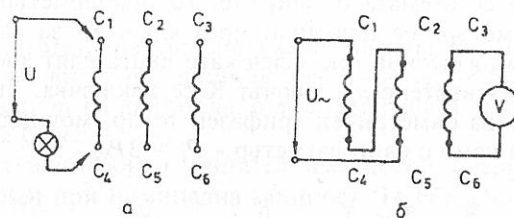
$$(10.9) \quad C_Y = \frac{P_H \cdot 10^6}{314 \cdot U^2} \cdot \mu F \quad \left[C_Y = (5 \cdot 7) \frac{P_H}{100} \cdot \mu F \right] \quad C_{\Delta} = 0.1 P_H \cdot \mu F$$

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Лабораторната работа започва със запознаване на студентите с лабораторната постановка и описание на елементите ѝ в табл. В.1 и В.2. Изследванията се провеждат в следната последователност:

1. Определят се началната и краищата на статорната намотка.

Когато на таблото на двигателя началата c_1, c_2, c_3 и краищата c_4, c_5, c_6 на трифазната статорна намотка не са означени, те могат да се определят опитно с помощта на волтметър или контролна лампа посредством схемата, показана на фиг. 10.9.



Фиг. 10.9

2. Пускане и реверсиране на асинхронни двигатели.

а. *Пускане и реверсиране на трифазен асинхронен двигател като еднофазен.* Свързва се схемата, показана на фиг. 10.8. Най-напред към захранващото еднофазно напрежение се включва само работната намотка (PH). Установява се, че двигателят не се завърта, защото няма пусков момент ($M_{\Pi} = 0$). След това се включват едновременно работната намотка (PH) и пусковата намотка (ПН) с последователно свързан към нея кондензатор C . Реверсирането се постига, като се разменят изводите само на работната или само на пусковата намотка.

б. *Пускане на трифазен асинхронен двигател.* Двигателят се пуска при двете различни схеми (Y и Δ) на свързване на статорната намотка (фиг. 10.4). Включването се осъществява чрез ключа Π_2 , като се измерват с амперметър и се сравняват съответните линейни пускови токове.

в. *Реверсиране на трифазен асинхронен двигател.* Постига се чрез размяна на фазите, към които се включват два от изводите на статорната намотка на двигателя.

г. *Пускане на трифазен асинхронен двигател с фазов ротор.* Осъществява се схемата от фиг. 10.3а. Двигателят се пуска последователно при изключени и при напълно включени пускови резистори R_{P1} и R_{P2} . Измерват се с амперметър и се сравняват пусковите токове при

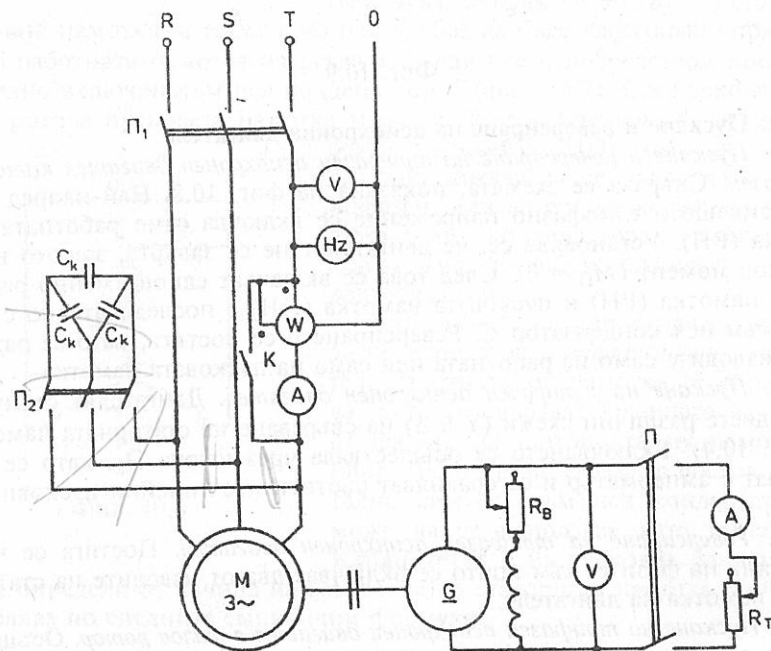
двата случая.

3. Регулиране на честотата на въртене на асинхронен двигател с фазов ротор.

Осъществява се схемата, показана на фиг. 10.3а и при определено натоварване на двигателя се изменят съпротивленията на регулиращите резистори R_p , включени в роторната верига. Измерват се съответните честоти на въртене на ротора. Прави се извод относно диапазона и плавността на регулирането.

4. Снемане на работните характеристики на трифазен асинхронен двигател с накъсо съединен ротор.

Осъществява се схемата от фиг. 10.10. Амперметърът и токовата намотка на ватметъра се шунтират чрез ключ К, за да се предпазят уредите от големия пусков ток. След като двигателят достигне установената честота на въртене n_n , ключът К се изключва. Тъй като двигателят представлява симетричен трифазен товар, мощността му P_1 може да се измери само с един ватметър - $P_1 = 3P_w$.



Фиг. 10.10

Двигателят се натоварва чрез постоянен ток генератор, чийто товар се изменя посредством товарния резистор R_T , а напрежението му се поддържа постоянно с резистора R_B , включен последователно във веригата на възбудителната му намотка. За зададени шест стойности на генераторния ток I_T се отчитат и нанасят в табл. 10.1. величините f , U , I и P_w .

Честотата на въртене n се измерва най-често косвено по стробоскопичния метод:

$$(10.10) \quad n = n_1 \pm n_s = \frac{60f}{p} \pm n_s, \quad \text{min}^{-1},$$

където n_1 е честотата на светене на безинертна газоразрядна лампа, осветяваща белег върху въртящия се вал. Тази честота е равна на синхронната скорост n_1 на двигателя, а n_s е измерената честота на въртене на осветявания белег.

Трифазният асинхронен двигател има добри енергийни характеристики (η , $\cos\varphi$) при номинална мощност. Те обаче силно се влошават, когато двигателят работи не натоварен. Токът му на празен ход е значителен ($I_0 = 30 \div 70\% I_H$) и има индуктивен характер, тъй като е свързан със създаването на статорното магнитно поле. Поради лошия $\cos\varphi$ общият ток в линията е голям. Големи са и загубите $\Delta P_{\text{л}} = R_{\text{л}} I_{\text{л}}^2$ при пренасяне на електрическата енергия по електропроводите. Това налага да се предприемат мерки за неговото подобряване. Ефикасен начин за подобряване на $\cos\varphi$ на асинхронните двигатели до стойност $\cos\varphi_K$ е паралелното включване към тях на кондензаторни батерии (фиг. 10.10), с капацитет определен по формулата:

$$C_K = \frac{I \cos\varphi (\text{tg}\varphi - \text{tg}\varphi_K)}{2\pi f U_{\text{л}}^2} = \frac{P_1 (\text{tg}\varphi - \text{tg}\varphi_K)}{6\pi f U_{\text{л}}^2}.$$

ОБРАБОТКА НА ОПИТНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

От измерените величини, нанесени в табл. 10.1, се изчисляват величините, определящи работните характеристики на двигателя: консумираната мощност $P_1 = 3P_w$, полезната мощност P_2 , честотата на въртене n (10.10) и двигателният момент $M = 9,55 \frac{P_2}{n}$, к.п.д. $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, $\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$, и хлъзгането s (10.3) и се нанасят в табл. 10.1.

Таблица 10.1

№	f	U	I	P _в	n _s	U _r	I _r	P ₁	P ₂	η	n	M	s	cos φ
	Hz	V	A	W	min ⁻¹	V	A	W	W		min ⁻¹	Nm		

Начертават се в обща координатна система работните характеристики при установен режим: n , M , η , $\cos \varphi$, I_1 и $s = f(P_2)$ (фиг. 10.7).

Разглежданите в лабораторното упражнение проблеми могат да се доизяснят със следния изчислителен пример.

Данните от табелката и каталога на трифазен асинхронен двигател АО90 L-4D са: $U = 220/380V$, $I = 6,4/3,7A$, $n = 1400 \text{ min}^{-1}$, $P = 1,5kW$, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 77\%$, $\kappa_I = 5,3$; $\kappa_M = 2,5$; $\kappa_m = 2,6$.

Да се определят: номиналният момент M_H , максималният пусков ток $I_{п}$ при свързване в Y, синхронната честота на въртене n_1 , хлъзгането s_H и честотата f_2 на тока в ротора при номинален товар, както и капацитетът на трифазна кондензаторна батерия C_K (свързване в триъгълник), необходим за подобряване на $\cos \varphi$ на линията до $\cos \varphi_K = 0,95$ при номинален товар.

Решение:

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{1500}{1400} = 10,23 \text{ Nm}; \quad I_{пY} = \kappa_I \cdot I_{LY} = 5,3 \cdot 3,7 = 19,61 \text{ A}.$$

В означението на типа на двигателя цифрата 4 означава, че $2p = 4$, т.е. $p = 2$ и при $f = 50 \text{ Hz}$ се определят:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1};$$

$$s_H = \frac{n_1 - n}{n_1} = 0,066(6);$$

$$f_2 = f \cdot s_H = 3,33 \text{ Hz};$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1500}{0,77} = 1948,05 \text{ W};$$

$$C_K = \frac{P_1 (\text{tg } \varphi - \text{tg } \varphi_K) \cdot 10^6}{6\pi f \cdot U_{л.}^2} = 6,015 \text{ } \mu\text{F}.$$

Контролни въпроси

1. Какво е устройството на трифазния асинхронен двигател? Обяснете принципа на действието му и защо се нарича асинхронен.
2. Защо и колко е голям пусковият ток на асинхронния двигател?
3. Какви начини на пускане на асинхронни двигатели (АД) познавате?
4. Как може да се осъществи реверсиране (смяна на посоката на въртене) на АД?
5. Как може да се регулира честотата на въртене на АД?
6. В какви граници се изменя хлъзгането s при двигателен режим и какво е хлъзгането на АД при номинален товар?
7. Как зависи въртящият момент на АД от напрежението, хлъзгането и съпротивлението на роторната верига?
8. Какви са предимствата и недостатъците на АД с фазов ротор в сравнение с АД с накъсо съединен ротор?
9. Защо АД все още не могат да изместят напълно двигателите за постоянен ток в промишлеността и в транспорта?
10. Има ли еднофазният АД пусков момент? Как може да се създаде пусков момент?

