

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
ГОМЕЛЬКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О.СУХОГО

Факультет автоматизированных и информационных систем  
Специальность 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАСЧЕТНО-ПОЯНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к курсовому проекту

по дисциплине: «Электрические машины»

**на тему:** «Проектирование трёхфазного асинхронного электродвигателя с  
короткозамкнутым ротором»

Выполнил: студент гр. ЭП-21

Рощин М.Ю.

Руководитель: доцент к.т.н.

Тодарев В.В.

Дата проверки \_\_\_\_\_

Дата защиты \_\_\_\_\_

Оценка работы \_\_\_\_\_

Подписи членом комиссии

По защите курсового проекта \_\_\_\_\_

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3   |
| Задание.....  | 4   |
| 1. Определение главных размеров электродвигателя .....  | 5   |
| 2. Расчёт обмотки, паза и ярма статора. ....  | 9   |
| 3. Расчёт обмотки, паза и ярма ротора .....   | 16  |
| 4. Расчёт магнитной цепи асинхронной машины.....  | 22  |
| 5. Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима .....                              | 27  |
| 6.Расчёт постоянных потерь мощности.....  | 33  |
| 7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....   | 37  |
| 8. Пусковые характеристики асинхронного двигателя.....  | 421 |
| 8.1 Расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока .....                            | 421 |
| 8.2. Расчёт пусковых характеристик с учётом насыщения магнитной системы<br>асинхронной машины ..... | 486 |
| 9. Тепловой расчёт.....   | 531 |
| Заключение.....   | 574 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....   | 585 |

|                  |             |                    |                |             |                                  |             |               |
|------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|----------------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                    |                |             | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b> |             |               |
|                  |             |                    |                |             |                                  |             |               |
| <i>Изм</i>       | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>    | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | <b>Содержание</b>                |             |               |
| <i>Разработ.</i> |             | <i>Рощин М.Ю.</i>  |                |             |                                  |             |               |
| <i>Проверил</i>  |             | <i>Тодарев В.В</i> |                |             |                                  |             |               |
|                  |             |                    |                |             |                                  |             |               |
|                  |             |                    |                |             |                                  |             |               |
|                  |             |                    |                |             | <i>Литер.</i>                    | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
|                  |             |                    |                |             | <i>У</i>                         | <i>2</i>    |               |
|                  |             |                    |                |             | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b>           |             |               |

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данного курсового проектирования является расширение и закрепление знаний по курсу “Электрические машины”, овладение современными методами расчёта и конструирования электрических машин, приобретение навыков пользования справочной литературой, что потребуется в процессе работы на производстве при пересчёте обмоток электрических машин на другое напряжение или при ремонте машин.

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства.

Уже в настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 40 % вырабатываемой в стране электроэнергии, на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточной меди, изоляции, электротехнической стали и других, а затраты на обслуживание и ремонт асинхронных двигателей в эксплуатации составляют более 5 % затрат на ремонт и обслуживание всего установленного оборудования. Поэтому создание серий высокоэкономичных и надёжных асинхронных двигателей является важнейшей народнохозяйственной задачей, а правильный выбор двигателей, их эксплуатация и высококачественный ремонт играют первоочередную роль в экономии материальных и трудовых ресурсов в нашей стране.

|           |      |             |         |      |                           |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |                           |                 |      |        |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.. |         |      | ВВЕДЕНИЕ                  | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                           | у               | 3    |        |
|           |      |             |         |      |                           | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |                 |      |        |

## Задание

Разработать проект трёхфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором со следующими основными параметрами в качестве исходных данных:

- номинальная мощность на валу:  $P=3$  кВт;
- номинальные напряжения:  $U_{1\text{ном.ф}}/U_{1\text{ном}}=380/220$  В;
- число полюсов:  $2p=6$ ;
- конструктивное исполнение: IM1;
- исполнение по способу защиты: IP44;
- способ охлаждения: ICO1;
- климатическое исполнение и категория размещения: УЗ;
- установочный размер: М;
- класс нагревостойкости изоляции: Н.

|           |      |             |         |      |                           |  |  |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------|--|--|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ |  |  |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | Задание                   |  |  |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |                           |  |  |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                           |  |  |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |
|           |      |             |         |      | Литер.                    |  |  |
|           |      |             |         |      | Лист                      |  |  |
|           |      |             |         |      | Листов                    |  |  |
|           |      |             |         |      | у                         |  |  |
|           |      |             |         |      | 4                         |  |  |
|           |      |             |         |      | ГГТУ, гр. ЭП-21           |  |  |

## 1. Определение главных размеров электродвигателя

Высоту оси вращения  $h$  АД предварительно определяют по рисунку П.1 [1] для заданных  $P_2$  и  $2p$  в зависимости от исполнения двигателя.

Принимают предварительное значение оси вращения (рис. П.1, а, стр.121, источник 1):

$$h = 110 \text{ мм} = 0,11 \text{ м.}$$

Принимаем стандартное значение:

$$h = 112 \text{ мм} = 0,112 \text{ м.}$$

Тогда по таблице П.1 (ист.1, стр.121) принимаем значения внешнего диаметра статора АД:  $D_a = 191 \text{ мм} = 0,191 \text{ м.}$

Выбираем коэффициент  $K_D$  по таблице П.2 (ист.1, стр.121):

$$K_D = 0,7.$$

Определяем внутренний диаметр статора:

$$D = K_D \cdot D_a = 0,7 \cdot 0,191 = 0,134 \text{ м, где}$$

$D$  – внутренний диаметр статора АД, м;

$K_D$  – коэффициент, характеризующий отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статор асинхронных двигателей серий 4А и АИР при различных числах полюсов.

Находим полюсное деление двигателя, м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,134}{6} = 0,07 \text{ м.}$$

Находим расчетную мощность двигателя:

$$P = P_2 \cdot 10^3 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,94}{0,79 \cdot 0,72} = 4957,8 \text{ В} \cdot \text{А,}$$

где  $P_2$  – номинальная мощность на валу АД, кВт;

$k_E$  – коэффициент, характеризующий отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению (приблизенно – по рис. П.2, [1], стр.122).

$$k_E = 0,94.$$

|                  |                    |                 |                |             |  |                        |             |               |
|------------------|--------------------|-----------------|----------------|-------------|--|------------------------|-------------|---------------|
|                  |                    |                 |                |             | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                             |                        |             |               |
| <i>Изм</i>       | <i>Лист</i>        | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                        |             |               |
| <i>Разработ.</i> | <i>Рошин М.Ю.</i>  |                 |                |             | <b>Определение<br/>главных размеров<br/>электродвигателя</b> | <i>Литер.</i>          | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Проверил</i>  | <i>Тодарев В.В</i> |                 |                |             |  | у                      | 5           |               |
|                  |                    |                 |                |             |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |             |               |
|                  |                    |                 |                |             |  |                        |             |               |

$\eta$  - КПД машины, о.е., предварительное значения которого можно определить по рис. П.3, а ([1], стр. 122).

$$\eta = 0,79.$$

$\cos\varphi$  – коэффициент мощности АД, о.е., предварительное значение которого можно определить по рис. П.3 и П.4 ([1]).

$$\cos\varphi = 0,72$$

|           |             |          |         |      |   |                 |      |        |
|-----------|-------------|----------|---------|------|---|-----------------|------|--------|
|           |             |          |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                           |                 |      |        |
|           |             |          |         |      |   |                 |      |        |
| Изм       | Лист        | № докум. | Подпись | Дата |   |                 |      |        |
| Разработ. | Рощин М.Ю.  |          |         |      | Определение<br>главных размеров<br>электродвигателя | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  | Тодарев В.В |          |         |      |   | У               | 6    |        |
|           |             |          |         |      |   | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |             |          |         |      |   |                 |      |        |
|           |             |          |         |      |   |                 |      |        |

Выбираем электромагнитные нагрузки ( предварительные значения по рис. П.5, а, [1], стр.123).

$$B_{\sigma}=0,88 \text{ Тл}; A= 26,4 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Выбираем однослойную обмотку исходя из малой мощности двигателя и невысокой оси вращения

$$k_{обм1}=0,95.$$

Предварительно коэффициент полюсного перекрытия  $a_{\sigma}$  и коэффициент формы поля  $k_B$  определяем следующим образом:

$$a_{\sigma} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64.$$

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Синхронная частота вращения двигателя:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500, \text{ об / мин },$$

где  $f_1=50$  Гц;

$p$  – число пар полюсов

Синхронная угловая частота вращения АД:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2\pi \cdot \frac{500}{60} = 52,3, \text{ рад / с}$$

С учётом выбранных ранее параметров определяем расчётная длина магнитопровода двигателя:

$$l_{\sigma} = \frac{P'}{D^2 \cdot \omega \cdot k_B \cdot k_{обм1} \cdot A \cdot B_{\sigma}} = \frac{4957,8}{0,134^2 \cdot 52,3 \cdot 1,11 \cdot 0,95 \cdot 26,4 \cdot 10^3 \cdot 0,88} = 0,21, \text{ м}$$

Определяем правильность выбора главных размеров  $D$  и  $l_{\sigma}$  по выражению:

$$\lambda = \frac{l_{\sigma}}{\tau} = \frac{0,21}{0,07} = 3$$

Данное значение лежит в допустимых пределах для АД принятого исполнения IP44 (рис. П.8, [1], стр.124).

Так как, длина сердечника не превышает 250...300 мм, радиальные вентиляционные каналы отсутствуют, поэтому:

$$l_1=l_{CT1}=l_{\sigma}=0,21 \text{ м}$$

|      |      |         |         |      |                           |      |
|------|------|---------|---------|------|---------------------------|------|
|      |      |         |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ | Лист |
|      |      |         |         |      |                           |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                           | 7    |

Конструктивная длина сердечника ротора в машинах с  $h < 250$  мм принимается равной длине сердечника статора:

$$l_2 = l_1 = 0,21 \text{ м}$$

Длина стали сердечника ротора если вентиляционные каналы отсутствуют

$$l_{ст2} = l_2 = 0,21 \text{ м}$$

|      |      |         |         |      |                                  |      |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
|      |      |         |         |      | <i>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</i> | Лист |
|      |      |         |         |      |                                  | 8    |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                                  |      |



## 2. Расчёт обмотки, паза и ярма статора.

Предварительно по рис. П.9 ([1], стр. 125) определяют диапазон возможных значений зубцового деления статора электродвигателя:

$$t_{z1\min}=0,014 \text{ м и } t_{z1\max}=0,016 \text{ м.}$$

Находим предельные значения числа пазов статора АД исходя из ранее принятых значений  $t_{z1\min}$  и  $t_{z1\max}$ :

$$Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{z1\max}} = \frac{\pi \cdot 0,134}{0,016} = 26,3 \approx 26;$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{z1\min}} = \frac{\pi \cdot 0,134}{0,014} = 30,05 \approx 30$$

Окончательное число пазов статора  $Z_1$  выбирается из диапазона между значениями  $Z_{1\min}$  и  $Z_{1\max}$ . При этом необходимо учесть два условия:

Число пазов статора  $Z_1$  будет кратно числу фаз  $m_1$  АД ( $m_1=3$ ) и число пазов на полюс и фазу  $q_1$  будет целым числом:

$$\frac{Z_1}{m_1} = \frac{27}{3} = 9;$$

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p m_1} = \frac{9}{6 \cdot 3} = 1;$$

Окончательно принимаем  $Z_1=27$ .

Окончательное значение зубцового деления обмотки статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2p m_1 q_1} = \frac{\pi \cdot 0,134}{6 \cdot 3 \cdot 1} = 0,023375 \text{ м} = 23 \text{ м}$$

Номинальный ток обмотки статора АД:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_2}{m_1 U_{1\text{ном.ф}} \eta \cos \varphi} = \frac{3 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,79 \cdot 0,72} = 7,9 \text{ А}$$

Число эффективных проводников в пазу (предварительное значение при условии, что число параллельных ветвей обмотки  $a = 1$  (параллельные ветви отсутствуют):

|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|--|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                   |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |  |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | <b>Расчёт обмотки,<br/>паза и ярма<br/>статора</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |  | у                      | 9    |
|           |              |          |         |      |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |

$$u'_п = \frac{\pi D A}{I_{1ном} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,134 \cdot 26,4 \cdot 10^3}{7,9 \cdot 27} = 52,08$$

Число параллельных ветвей:

$$a = \frac{2p}{k} = 1.$$

|           |             |          |         |      |   |  |  |
|-----------|-------------|----------|---------|------|---|--|--|
|           |             |          |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                 |  |  |
|           |             |          |         |      |   |  |  |
| Изм       | Лист        | № докум. | Подпись | Дата | Расчёт обмотки,<br>паза и ярма<br>статора |  |  |
| Разработ. | Роцин М.Ю.  |          |         |      |   |  |  |
| Проверил  | Тодарев В.В |          |         |      |   |  |  |
|           |             |          |         |      |   |  |  |
|           |             |          |         |      |   |  |  |
|           |             |          |         |      | Литер.                                    |  |  |
|           |             |          |         |      | у   |  |  |
|           |             |          |         |      | Лист                                      |  |  |
|           |             |          |         |      | 10  |  |  |
|           |             |          |         |      | Листов                                    |  |  |
|           |             |          |         |      | ГГТУ, гр. ЭП-21                           |  |  |

Тогда фактическое число эффективных проводников в пазу  $u_{\Pi}$  при  $a = 1$  (в этом случае обмотка однослойная):

$$u_{\Pi} = au'_{\Pi} = 2 \cdot 52,08 = 104,16 \approx 104$$

Таким образом,  $u_{\Pi} = 104$

Число витков в фазе обмотки статора:

$$w_1 = \frac{u_{\Pi} Z_1}{2am_1} = \frac{104 \cdot 27}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 468.$$

Находят окончательное значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2I_{\text{ном}} m_1 w_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 7,9 \cdot 3 \cdot 468}{\pi \cdot 0,134} = 53322 = 53,322 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Значение  $A$  находится в допустимых пределах (рис. П.5, а, [1], стр.123).

Так как в нашем случае однослойная концентрическая обмотка из круглого изолированного провода (всыпная обмотка), то она выполняется без укорочения шага, поэтому для них  $\beta=1$  и  $k_{\text{обм}}=1$ .

Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E U_{\text{ном.ф}}}{4k_B w_1 k_{\text{обм}1} f_1} = \frac{0,94 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 468 \cdot 1 \cdot 50} = 0,0019 \text{ Вб}.$$

Индукция магнитного поля в воздушном зазоре:

$$B_6 = \frac{\rho \Phi}{Dl_6} = \frac{1 \cdot 0,0019}{0,134 \cdot 0,21} = 0,87 \text{ Тл}.$$

Значение произведения линейной нагрузки на плотность тока  $AJ$  найдём по рис. П.11, а ([1], стр.129):

$$AJ = 185 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3.$$

Плотность тока в обмотке статора (предварительное значение):

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{185 \cdot 10^9}{13,214 \cdot 10^3} = 3,46 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = 3,46 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительное значение):

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{aJ_1} = \frac{7,9}{2 \cdot 3,46 \cdot 10^6} = 0,23 \text{ мм}^2.$$

При таком сечении диаметр эффективного проводника будет равен:

|      |      |         |         |      |                                  |      |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
|      |      |         |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b> | Лист |
|      |      |         |         |      |                                  |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                                  | 11   |

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4q_{\text{эф}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,23}{\pi}} = 0,54 \text{ м} = 5,4 \text{ мм.}$$

В качестве обмоточного провода принимаем круглый медный изолированных провод марки ПЭТВ сечением  $q_{\text{эл}}=0,221 \text{ мм}^2$  и диаметром  $d_{\text{эл}}=0,53 \text{ мм}$  (таблица 6, [1], стр.127). Диаметр провода с учетом изоляции  $d_{\text{из}}=0,585 \text{ мм}$

С учетом рекомендаций на странице 13 и 14 ([1]), принимаем число элементарных проводников  $n_{\text{эл}}=1$ . Тогда уточнённое значение площади поперечного сечения эффективного проводника:

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} = 0,221 \cdot 1 = 0,221 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в обмотке статора (уточнённое значение):

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}} = \frac{7,9}{1 \cdot 0,23 \cdot 1} = 36,1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

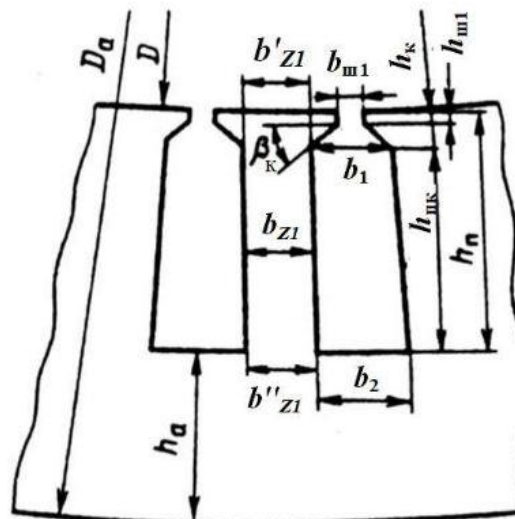
Всыпную обмотку статора с круглыми обмоточным проводом будем укладывать в пазы трапецеидальной формы (рисунок П.13, а; [1], стр. 130).

Длина стали сердечника статора  $l_{\text{СТ1}}=l_{\text{с}}=0,21 \text{ м}$ .

Коэффициент заполнения сталью магнитопровода статора (таблица П.8, [1], стр. 132)  $k_{\text{С1}}=0,97$ .

По таблице П.7 ([1], стр.131) предварительно принимаем значения:

- Магнитной индукции в зубцах статора при постоянном сечении  $B_{\text{Z1}}=1,65 \text{ Тл}$ .
- Магнитной индукции в ярме статора  $B_{\text{а}}=1,6 \text{ Тл}$ .



|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

Лист

12

*Рис. 2.1. Размеры трапецеидальных полузакрытых пазов статора  
асинхронного двигателя*

Ширина зубца статора (предварительное значение):

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{z1} l_{\delta}}{B_{z1} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0,87 \cdot 23 \cdot 0,21}{1,65 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 12,5 \text{ мм.}$$

Высота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 B_a l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0,0019}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 29,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 29,1 \text{ мм.}$$

Размеры паза в штампе определим с учётом приведённых на стр. 15 и 16 ([1]) рекомендаций и рассчитаем по соответствующим выражениям (рис. 2.1).

- Ширина шлица паза  $b_{ш1} = 3,5$  мм.
- Высота шлица паза  $h_{ш1} = 1$  мм.
- Угол наклона грани клиновой части паза  $\beta_k = 45^\circ$ .
- Высота паза:

$$h_{п1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{191 - 134}{2} - 0,29 = 28,2 \text{ мм.}$$

- Меньшая ширина паза:

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{ш1} - b_{ш1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi(134 + 2 \cdot 1 - 3,5) - 27 \cdot 12,5}{27 - \pi} = 4,2 \text{ мм.}$$

Большая ширина паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{п1})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi(134 + 2 \cdot 28,2)}{27} - 12,5 = 9,64 \text{ мм.}$$

Высота клиновой части паза:

$$h_k = \frac{b_1 - b_{ш1}}{2} = \frac{9,64 - 3,5}{2} = 3,07 \text{ мм.}$$

Высота паза без учёта высота клиновой части и высота шлица:

$$h_{п.к.} = h_{п1} - \left( h_{ш1} + \frac{b_1 - b_{ш1}}{2} \right) = 28,2 - \left( 1 + \frac{9,64 - 3,5}{2} \right) = 26,8 \text{ мм.}$$

Припуски на сборку по ширине  $\Delta b_{п1}$  и высоте  $\Delta h_{п1}$  паза (таблица П.9, [1], стр. 132):

$$\Delta b_{п1}=0,1 \text{ мм}; \Delta h_{п1}=0,1 \text{ мм}.$$

Размеры паза «в свету»:

Высота паза:

$$h'_{п1}=h_{п1}-\Delta h_{п1}=28,2-0,1=28,1 \text{ мм}.$$

Высота паза без учёта высоты клиновой части и высота шлица:

$$h'_{п.к.}=h_{п.к.}-\Delta h_{п1}=26,8-0,1=26,7 \text{ мм}.$$

Меньшая ширина паза:

$$b'_2=b_2-\Delta b_{п1}=4,2-0,1=4,1 \text{ мм}.$$

Большая ширина паза:

$$b'_1=b_1-\Delta b_{п1}=9,64-0,1=9,54 \text{ мм}.$$

Односторонняя толщина изоляции в пазу (таблица П.11, [1], стр. 133):

$$b_{из}=0,25 \text{ мм}.$$

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу:

$$S_{из}=b_{из}(2h_{п1}+b_1+b_2)=0,25 \cdot (2 \cdot 28,2+4,2+9,64)=17,6 \text{ мм}^2.$$

Площадь, занимаемая прокладками для однослойной обмотки:

$$S_{пр}=0.$$

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки:

$$S'_{п}=\frac{b'_1-b'_2}{2} h'_{п.к.}-(S_{из}+S_{пр})=\frac{9,54-4,1}{2} \cdot 26,7-(17,6+0)=90,97 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент заполнения паза статора:

$$k_3=\frac{d_{из}^2 u_{п} n_{эл}}{S'_{п}}=\frac{0,585^2 \cdot 104 \cdot 1}{90,97}=0,39.$$

Который находится в допустимом диапазоне для  $2p=6$  (0,72..0,74).

Уточняем среднее значение ширины зубца статора, приняв его в качестве расчётного:

|      |      |         |         |      |                                  |      |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
|      |      |         |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b> | Лист |
|      |      |         |         |      |                                  |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                                  | 14   |

$$b'_{z1} = \pi \frac{D+2(h_{ш1}+h_k)}{Z_1} - b_1 = \pi \frac{134+2(1+0,35)}{27} - 4,2 = 11,69 \text{ мм.}$$

$$b''_{z1} = \pi \frac{D+2h_{п1}}{Z_1} - b_2 = \pi \frac{134+2 \cdot 28,2}{27} - 9,64 = 12,5 \text{ мм.}$$

Поскольку расхождение между  $b'_{z1}$  и  $b''_{z1}$  до 0,5 мм, то

$$b_{\ddot{z}1} = \frac{b'_{z1} + b''_{z1}}{2} = \frac{11,69+12,5}{2} = 12,09$$

Пользуясь рекомендациями на странице 19 и рисунком П.14 ([1], стр. 134) определим величину воздушного зазора между статором и ротором:

$$\delta = 0,35 \text{ мм.}$$

|      |      |         |         |      |   |      |
|------|------|---------|---------|------|---|------|
|      |      |         |         |      | <p><i>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</i></p> | Лист |
|      |      |         |         |      |   |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |   | 15   |

### 3. Расчёт обмотки, паза и ярма ротора

Выбираем  $Z_2=44$ , поскольку для машин небольшой мощности обычно выполняется условие  $Z_2 < Z_1$  ( $Z_1=54$ ). Выбор пазов ротора выбирали из таблица П.12([1], стр. 134).

Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta = 134 - 2 \cdot 0,35 = 133,3 \text{ мм.}$$

Длина сердечника ротора:

$$l_2 = l_{CT1} = l_{CT2} = l_6 = 0,21 \text{ м.}$$

Зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 133,3}{44} = 9,5 \text{ мм.}$$

Сердечник ротора выполнен с непосредственной посадкой на вал ( $D_2 < 990$  мм), а так как  $h \leq 250$  мм ( $h=112$ ), то при непосредственной посадке на вал не используем шпонку.

Внутренний диаметр сердечника ротора:

$$D_j = D_B = k_B D_a = 0,19 \cdot 0,191 = 0,036 \text{ м.}$$

где  $D_B$  – диаметр вала

$k_B=0,19$  – коэффициент, выбранный по табл. П.13 ([1], стр. 135).

Коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение токов  $I_1/I_2$  (предварительное значение):

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,72 = 0,776$$

Выполняем скос пазов ротора. Ширину скоса выбираем из условия:

$$b_{ск} = (0,5 \dots 1) t_{Z2} = 0,5 \cdot 9,5 = 4,75 \text{ мм.}$$

Относительная ширина скоса пазов в долях зубцового деления:

$$\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_{Z2}} = \frac{4,75}{9,5} = 0,5.$$

Угол скоса в электрических радианах:

|           |             |          |         |      |   |                        |      |
|-----------|-------------|----------|---------|------|---|------------------------|------|
|           |             |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>              |                        |      |
| Изм       | Лист        | № докум. | Подпись | Дата |   |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю   |          |         |      | <b>Расчёт обмотки,<br/>паза и ярма ротора</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В |          |         |      |   | У                      | 16   |
|           |             |          |         |      |   | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |             |          |         |      |   |                        |      |
|           |             |          |         |      |   |                        |      |



$$\gamma_{\text{СК}} = \beta_{\text{СК}} \frac{2p}{Z_2} = 0,5 \cdot \frac{2 \cdot 6}{44} = 0,136.$$

.

|           |      |             |         |      |                                       |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------------------|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ             |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                                       |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |                                       |                 |      |        |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю   |         |      | Расчёт обмотки,<br>паза и ярма ротора | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                                       | У               | 17   |        |
|           |      |             |         |      |                                       | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |                                       |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                                       |                 |      |        |

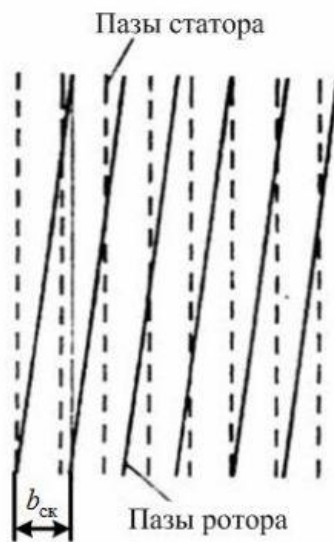


Рис. 3.1. Скос пазов ротора асинхронной машины

Коэффициент скоса:

$$k_{ск} = \frac{2 \sin(\frac{\gamma_{ск}}{2})}{\gamma_{ск}} = \frac{2 \cdot \sin(\frac{0,136}{2})}{0,136} = 0,9992.$$

Коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2m_i w_1 k_{обм1}}{Z_2 k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 468 \cdot 1}{44 \cdot 0,9992} = 64.$$

Ток в обмотке ротора (предварительное значение):

$$I_2 = k_i I_{1ном} v_i = 0,776 \cdot 7,9 \cdot 64 = 392,3 \text{ А.}$$

В качестве обмотки ротора принимаем литую конструкцию с алюминиевыми стержнями и короткозамкнутыми кольцами (страница 20, [1]).

Задаёмся плотностью тока в алюминиевых стержнях ротора (страница 22, [1]):

$$J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительное значение):

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{392,3}{2,5 \cdot 10^6} = 156,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 156,9 \text{ м}^2.$$

В данном двигателе применяем трапецеидальные полузакрытые пазы (страница 23, рис. 3.2, а; [1]):

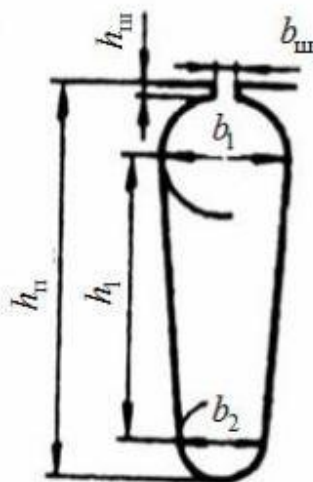


Рис. 3.2. Размеры трапецевидальных полузакрытых пазов ротора асинхронной машины

Ширина шлица паза  $b_{ш2}=1,5$  мм.

Высота шлица паза  $h_{ш2}=0,75$  мм.

Высота перемычки над пазом  $h'_{ш2}=0,3$  (так как паз полузакрытый).

По таблице П.7 ([1], стр. 131) принимаем значение магнитной индукции в зубцах ротора при постоянном сечении  $B_{Z2}=1,7$  Тл.

Допустимая ширина зубца статора:

$$b_{Z2.д} = \frac{B_{\sigma} t_{Z2} l_{\sigma}}{B_{Z2} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0,87 \cdot 9,5 \cdot 0,21}{1,7 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 5,01 \text{ мм.}$$

Где  $k_{C2}=0,97$  – коэффициент заполнения сталью магнитопровода ротора (таблица П.8, [1], стр. 132).

Размеры паза ротора:

Диаметр закругления верхней части паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{ш2} - 2h'_{ш2}) - Z_2 b_{Z2.д}}{Z_2 + \pi} = \frac{\pi(133,3 - 2 \cdot 0,75 - 2 \cdot 0,3) - 44 \cdot 5,01}{44 + \pi} = 7,1 \text{ мм.}$$

Диаметр закругления нижней части паза:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left( \frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{7,1^2 \left( \frac{44}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 156,9}{\frac{44}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 3,3 \text{ мм.}$$

Расстояние между центрами закруглений верхней и нижней частей паза:

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (7,1 - 3,3) \frac{44}{2\pi} = 26,60 \text{ мм.}$$

|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

Лист

19

Полная высота паза ротора для полузакрытого паза:

$$h_{п2} = h_1 + h_{ш2} + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = 26,60 + 0,75 + \frac{7,1}{2} + \frac{3,3}{2} = 32,6 \text{ мм.}$$

Уточняем ширину зубцов ротора:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{ш2} + h'_{ш}) - b_1}{Z_2} - b_1 = \pi \frac{133,3 - 2(0,75 + 0) - 7,1}{44} - 7,1 = 7,8 \text{ мм}$$

$$b''_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_{п2} + b_2}{Z_2} - b_2 = \pi \frac{133,3 - 2 \cdot 32,6 + 3,3}{44} - 3,3 = 7,9 \text{ мм.}$$

Уточнённое значение ширины зубца ротора:

$$b_{z2} = \frac{b'_{z2} + b''_{z2}}{2} = \frac{7,8 + 7,9}{2} = 7,85 \text{ мм.}$$

Уточнённое значение площади поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = \frac{\pi}{8} (7,1^2 + 3,3^2) + \frac{1}{2} (7,1 + 3,3) \cdot 26,60 = 162,4 \text{ мм.}$$

Плотность тока в стержне ротора (уточнённое значение):

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{392,3}{162,4} = 2,4 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

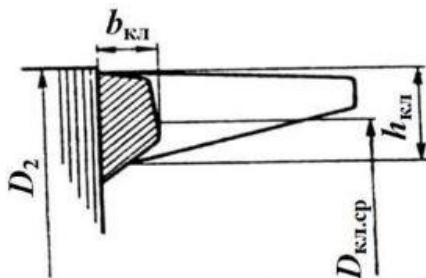


Рис. 3.3. Замыкающее кольцо короткозамкнутого ротора с литой алюминиевой обмоткой и его размеры

Коэффициент для расчёта тока короткозамкнутого кольца:

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \sin \left( \frac{\pi \cdot 6}{44} \right) = 1,6.$$

Ток короткозамкнутого кольца ротора:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{392,3}{1,6} = 245,2 \text{ А.}$$

|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

Лист

20

Плотность тока в короткозамкнутых кольцах принимаем согласно рекомендациям на странице 27 ([1]):

$$J_{\text{кл}} = (J_2 \cdot 0,85) = 2,33 \cdot 0,85 = 1,98 \text{ А/мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения короткозамкнутого кольца:

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{245,2}{1,98} = 123,8 \text{ мм}^2.$$

Размеры замыкающих колец:

Высота кольца:

$$h_{\text{кл}} = 1,2h_{\text{п2}} = 1,2 \cdot 32,6 = 39,12 \text{ мм.}$$

Ширина кольца:

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = \frac{123,8}{39,12} = 3,16 \text{ мм.}$$

Средний диаметр кольца:

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 133,3 - 39,12 = 94 \text{ мм.}$$

Уточняем площадь поперечного сечения замыкающего кольца, принимая полученное значения в качестве расчётного:

$$q_{\text{кл}} = b_{\text{кл}} h_{\text{кл}} = 3,16 \cdot 39,12 = 140,8 \text{ мм}^2.$$

|      |      |         |         |      |                           |      |
|------|------|---------|---------|------|---------------------------|------|
|      |      |         |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ | Лист |
|      |      |         |         |      |                           |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                           | 21   |

#### 4. Расчёт магнитной цепи асинхронной машины

Марку стали магнитопровода принимаем согласно рекомендациям таблицы П.14([1], стр. 135): сталь марки 2013.

Коэффициент для расчёта магнитного напряжения воздушного зазора:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш1}}}{\sigma}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\sigma}} = \frac{\left(\frac{3,5}{0,35}\right)^2}{5 + \frac{3,5}{0,35}} = 7$$

Коэффициент для расчёта магнитного напряжения воздушного зазора:

$$k_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \sigma} = \frac{23}{23 - 7 \cdot 0,35} = 0,4.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\sigma \sigma k_\sigma = \frac{2}{12,56 \cdot 10^{-7}} 0,88 \cdot 0,35 \cdot 0,4 = 196,2 \text{ А.}$$

Где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость (стр. 28, [1]).

Расчётная высота зубца статора:

$$h_{z1} = h_{\text{ш1}} = 28,2 \text{ мм.}$$

Расчётная индукция в зубцах статора:

$$B'_{z1} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\sigma}{b_{z1} l_{\text{ст1}} k_{C1}} = \frac{0,88 \cdot 23 \cdot 0,21}{12,5 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 1,66 \text{ Тл.}$$

Если индукция в зубцах статора  $B'_{z1}$ , будет меньше 1,8 Тл, то её фактическое уточнённое значение:

$$B_{z1} = B'_{z1}$$

Тогда напряжённости магнитного поля  $H_{z1}$ :

$$H_{z1} = 982 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 28,2 \cdot 10^{-3} \cdot 982 = 55,3 \text{ А.}$$

Расчётная высота зубца ротора:

|           |              |          |         |      |   |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|---|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |   |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | <b>Расчёт магнитной цепи асинхронной машины</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |   | у                      | 22   |
|           |              |          |         |      |   | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |   |                        |      |

$$h_{z2}=h_{п2}-0,1b_2=32,6-0,1\cdot 3,3=32,27 \text{ мм.}$$

Расчётная индукция в зубцах ротора:

$$B'_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{z2} l_{\sigma}}{b_{z2} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0,88 \cdot 9,5 \cdot 0,21}{7,85 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 1 \text{ Тл}$$

|           |      |             |         |      |  |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|--|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                      |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |  |  |                 |      |        |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      | Расчёт магнитной<br>цепи асинхронной<br>машины |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |  |  | у               | 23   |        |
|           |      |             |         |      |  |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |                 |      |        |

Так как расчётная индукция в зубцах ротора  $B'_{z2}$ , равна 1,0 Тл, то её фактическое уточнённое значение:

$$B_{z2}=B'_{z2}$$

Тогда напряжённости магнитного поля  $H_{z1}$ :

$$H_{z2}=185 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{z2}=2h_{z2}H_{z2}=2 \cdot 32,27 \cdot 10^{-3} \cdot 185=12 \text{ А.}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\sigma}} = 1 + \frac{55,3 + 12}{196,2} = 1,22.$$

Значение коэффициента насыщения зубцовой зоны находится о пределах 1,2 до 1,6, что предварительно говорит о правильности выбранных размерных соотношений и обмоточных данных АД (стр. 31, [1]).

Длина средней силовой линии магнитного поля в ярме статора:

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0,191 - 0,0291}{6} = 0,084 \text{ м.}$$

Проектируемый АД имеет длину сердечника статора  $l_{CT1}=0,21 \text{ м} < 300 \text{ мм}$ , поэтому вентиляционные каналы в статоре отсутствуют (стр. 31, [1]). В этом случае расчётная высота ярма статора:

$$h'_a=h_a=0,0291 \text{ м. (при } m_{kl}=0).$$

Индукция в ярме статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0,0019}{2 \cdot 0,0291 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 0,4 \text{ Тл.}$$

Напряжённость поля ярма статора при индукции  $B_a$  (таблица П.16, [1], стр. 136):

$$H_a=56 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение ярма статора:

|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|--|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                                     |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |  |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | <b>Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |  | У                      | 24   |
|           |              |          |         |      |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |



$$F_a = L_a H_a = 0,084 \cdot 56 = 5 \text{ А.}$$

Сердечник ротора проектируемого АД является сердечником с непосредственной посадкой на вал. Определим значение следующего выражения и оценим выполнения условия:

$$0,75 \left( \frac{D_a}{2} - h_{п2} \right) = 0,75 \left( \frac{0,191 \cdot 10^3}{2} - 32,6 \right) = 47,2 \text{ мм.}$$

$$47,2 > (D_B = 36 \text{ мм}).$$

Поэтому для АД с  $2p=6$  расчётная высота ярма ротора определится по выражению:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_B}{2} - h_{п2} = \frac{133,3 - 36}{2} - 32,6 = 16,05 \text{ мм} = 0,016 \text{ м.}$$

Длина средней силовой линии магнитного поля в ярме ротора:

$$L_j = \pi \cdot \frac{D_j - h'_j}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{36 - 16,05}{2 \cdot 6} = 5,2 \text{ мм} = 0,0052 \text{ м.}$$

Индукция в ярме ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0,0019}{2 \cdot 0,052 \cdot 0,21 \cdot 0,97} = 0,896 \text{ Тл.}$$

Напряжённость поля ярма ротора при индукции  $B_j$  (таблица П.16, [1], стр. 136):

$$H_j = 97 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = L_j H_j = 0,052 \cdot 97 = 5,044 \text{ А.}$$

Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи на одну пару полюсов:

$$F_{\Sigma} = F_6 + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 196,2 + 55,3 + 12 + 5 + 5,044 = 273,544 \text{ А.}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\sigma}} = \frac{273,544}{196,2} = 1,31$$

Намагничивающий ток АД:

|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|--|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                                     |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |  |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | <b>Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |  | у                      | 25   |
|           |              |          |         |      |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\mu}}{0,9m_1w_1k_{обм1}} = \frac{4 \cdot 273,544}{0,9 \cdot 3 \cdot 468 \cdot 1} = 1,4A.$$

Относительное значение намагничивающего тока:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = \frac{1,4}{7,9} = 0,18.$$

Данное значение находится в пределах от 0,18 до 0,4, что говорит о корректном выборе размеров двигателя и параметров его обмоток (стр. 35, [1]).

|           |      |             |         |      |   |  |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---|--|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ   |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | Определение<br>параметров<br>асинхронной<br>машины для<br>рабочего режима |  |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |   |  |  | У               | 26   |        |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |   |  |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |  |                 |      |        |

## 5. Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима

Длина пазовой части катушки обмотки статора:

$$l_{п1}=l_1=l_2=0,21 \text{ м.}$$

Средняя ширина катушки обмотки статора:

$$b_{кт} = \frac{\pi(D+h_{п1})}{2p} \beta = \frac{\pi(134+28,2)}{2 \cdot 6} \cdot 1 = 42 \text{ мм} = 0,042 \text{ м.}$$

Коэффициенты  $k_{л}=1,4$  и  $k_{выл}=0,5$  для расчёта длины лобовой части катушки обмотки статора (таблица П.24, обмотка насынная с неизолированными лобовыми частями, [1], стр. 141).

Длина вылета прямолинейной части катушек обмотки статора из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части (стр.37, [1], когда насынная обмотка укладывается в пазы до запрессовки сердечника в корпус):

$$B=0,01 \text{ м.}$$

Длина изогнутой лобовой части катушки обмотки статора:

$$l_{л1}=k_{л}b_{кт}+2B=1,4 \cdot 0,042+2 \cdot 0,01=0,079 \text{ м.}$$

Длина вылета лобовой части катушки обмотки статора:

$$l_{выл1}=k_{выл}b_{кт}+B=0,5 \cdot 0,042 + 0,01=0,031 \text{ м.}$$

Средняя длина витка обмотки фазы статора:

$$l_{ср1}=2(l_{п1}+l_{л1})=2(0,21+0,079)=0,578 \text{ м.}$$

Длина проводников фазы обмотки статора:

$$L_1= l_{ср1} w_1=0,578 \cdot 468=270,50 \text{ мм.}$$

Расчётная температура и удельное сопротивление материала проводника медной обмотки статора при расчётной температуре (стр. 37, табл. П.26, [1]):

$$V_{расч}=115^{\circ}\text{C (для класса изоляции F);}$$

$$\rho_{м} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|--|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                                     |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |  |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | <b>Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |  | у                      | 27   |
|           |              |          |         |      |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |
|           |              |          |         |      |  |                        |      |

Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = k_R \rho_M \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = 1 \cdot \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{270,50}{0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 2,8 \text{ Ом.}$$

где  $k_R=1$  – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки статора от действия эффекта вытеснения тока.

|           |      |             |         |      |   |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ   |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | Определение<br>параметров<br>асинхронной<br>машины для<br>рабочего режима | Литер.          | Лист | Листов |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |   | У               | 28   |        |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |   | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |                 |      |        |

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном.ф}}} = 2,8 \cdot \frac{7,9}{220} = 0.100 \text{ о. е.}$$

Удельное сопротивление материала алюминиевой литой обмотки ротора и короткозамкнутого кольца при расчётной температуре  $V_{\text{расч}}=115^\circ\text{C}$  (стр. 37, [1]):

$$\rho_a = \frac{1}{22} \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ (П. 26, [1], стр. 142).}$$

Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора:

$$r_c = k_R \rho_a \frac{l_2}{q_c} = 1 \cdot \frac{1}{22} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,21}{164,2 \cdot 10^{-6}} = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

$k_R=1$  (стр. 38, [1]).

Активное сопротивление фазы алюминиевого короткозамкнутого кольца:

$$r_{\text{кл}} = \rho_a \frac{\pi D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 q_{\text{кл}}} = \frac{1}{22} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 94 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 140,8 \cdot 10^{-6}} = 2,16 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 5,8 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 2,16 \cdot 10^{-6}}{0.16^2} = 17,45 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление ротора, приведённое к числу витков обмотки статора:

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1(w_1 k_{\text{обм1}})^2}{Z_2 k_{\text{ск}}^2} = 17,45 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (468 \cdot 1)^2}{44 \cdot 0.9992^2} = 1,04 \text{ Ом.}$$

Относительное значение приведённого активного сопротивления ротора:

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном.ф}}} = 1,04 \cdot \frac{7,9}{220} = 0.037 \text{ о. е.}$$

Радиальные вентиляционные каналы в данном АД отсутствуют, поэтому расчётная длина магнитопровода статора (при  $n_k=0$ ).

$$l'_\sigma = l_1 = 0,21 \text{ м.}$$

Обмотка без укорочения шага ( $\beta=1$ ): (стр. 39, [1]):

$$k_\beta = k'_\beta = 1;$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора (стр.40, формула (5.20), рис. П.15, [1], стр. 142):

$$\lambda_{п1} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left( \frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right) k'_\beta = \frac{26,2}{3 \cdot 7,1} \cdot 1 + \left( \frac{0}{7,1} + \frac{3 \cdot 0,35}{7,1 + 2 \cdot 3,5} + \frac{1}{3,5} \right) \cdot 1 = 1,59$$

где  $h_1=0$  (проводники закреплены пазовой крышкой), и

$$h_2 = h_{п.к} - 2b_{ш3} = 26,7 - 2 \cdot 0,25 = 26,2 \text{ мм.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l'_\delta} (l_{л1} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \cdot \frac{1}{0,21} (0,079 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,07) = 0,55.$$

Коэффициент  $\xi$  (паз статора – полузакрытый, скос пазов ротора присутствует  $\beta_{ск}=0,75$ ).

$$\xi = 2k'_{ск} k_\beta - k_{обм1}^2 \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 (1 + \beta_{ск}^2) = 2 \cdot 1,8 \cdot 1 - 1^2 \left( \frac{14,5}{10,6} \right)^2 (1 + 0,75^2) = 0,676$$

где  $k'_{ск}=1,0$  – коэффициент, который находят по рис. П.16 ([1], стр. 143) в зависимости от отношения  $t_{z2}/t_{z1}$  и  $\beta_{ск}$ .

$$\frac{t_{z2}}{t_{z1}} = \frac{9,5}{23} = 0,61.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора:

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{23}{12 \cdot 0,35 \cdot 0,4} \cdot 0,733 = 1,03$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq_1} (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{468}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,21}{6 \cdot 1} \cdot (1,59 + 0,55 + 1,03) = 1,9 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы статора:  $\xi$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном.ф}} = 1,9 \cdot \frac{7,9}{220} = 0,068 \text{ о. е.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутого ротора: (рис. П.18 а-д, рекомендации на стр. 41-42, [1], стр. 144):

$$\lambda_{П2} = \left[ \frac{h_0}{3b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2b_1} k_D + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \right] =$$

$$= \left[ \frac{27,92}{3 \cdot 9,64} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 9,64^2}{8 \cdot 162,4} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 9,64} \right] \cdot 1 + \frac{0,75}{1,5} = 1,66$$

где  $h_0=27,92$  мм – параметр паза по рис. П.18, а ([1], стр. 1444):

$$h_0 = h_1 + \frac{b_2}{2} - 0,1b_2 = 26,6 + \frac{3,3}{2} - 0,1 \cdot 3,3 = 27,92 \text{ мм.}$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора:

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_8 \Delta^2} \lg \left( \frac{4,7D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2b_{кл}} \right) = \frac{2,3 \cdot 94 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 0,21 \cdot 0,16^2} \lg \left( \frac{4,7 \cdot 94 \cdot 10^{-3}}{39,12 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3,16 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,902$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора:

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_{Z2}}{128k_8} \xi = \frac{9,5}{12 \cdot 0,35 \cdot 0,4} \cdot 0,062 = 0,140$$

Где коэффициент  $\xi$  равен:

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right) - \frac{\Delta z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 6}{44} \right) - \frac{0,4}{1 - \left( \frac{6}{44} \right)} = 0,062, \text{ где}$$

$\Delta z=0,4$  - коэффициент, который находят по рис. П.17 ([1], стр. 143) в зависимости от отношения  $t_{Z2}/t_{Z1}$  и  $b_{ш2}/\sigma$

Коэффициент проводимости скока:

$$\lambda_{ск} = \frac{t_{Z2} \beta_{ск}^2}{12k_8 k_\mu} = \frac{23 \cdot 0,75^2}{12 \cdot 0,4 \cdot 0,4} = 0,673$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9f_1 l'_8 \cdot 10^{-6} (\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{ск}) =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} (1,66 + 0,902 + 0,140 + 0,673) =$$

$$= 27,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, приведённое к числу витков обмотки статора:

$$x'_2 = x_2 \frac{4m_1(w_1 k_{обм1})^2}{Z_2 k_{ск}^2} = 27,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (468 \cdot 1)^2}{44 \cdot 0,9992^2} = 1,70 \text{ Ом.}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы ротора:

$$x_{2*} = x_2 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном.ф}}} = 1,70 \cdot \frac{7,9}{220} = 0.061 \text{ о. е.}$$

|      |      |         |         |      |                                  |      |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
|      |      |         |         |      | <i>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</i> | Лист |
|      |      |         |         |      |                                  |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                                  | 32   |



## 6.Расчёт постоянных потерь мощности

Удельные потери мощности в стали марки 2013 при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц (табл. П.27, [1], стр. 144):

$$P_{1,0/50}=2,5 \text{ Вт/кг.}$$

Масса стали ярма статора:

$$m_a=\pi(D_a-h_a)h_a l_{CT1} k_{C1} \gamma_c=\pi(0,191-0,0291) \cdot 0,0291 \cdot 0,21 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3=2,530 \text{ кг,}$$

где  $\gamma_c=7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – удельная масса стали (стр. 44, источник 1).

Масса стали зубцов статора:

$$m_{Z1}=h_{Z1}b_{Z1}Z_{1l_{CT1}} k_{C1} \gamma_c=0,0282 \cdot 0,00125 \cdot 54 \cdot 0,21 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3=2,464 \text{ кг.}$$

Коэффициенты для нахождения основных потерь в стали (стр. 44, ист-ик 1):

$$k_{да}=1,6; k_{дз}=1,8; b=1,3.$$

Основные потери активной мощности в стали статора АД:

$$\begin{aligned} P_{ст.осн} &= p_{1,0} \left( \frac{f_1}{50} \right)^b (k_{да} B_a^2 m_a + k_{дз} B_{z1}^2 m_{z1}) \\ &= 2,5 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^{1,5} (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 2,530 + 1,8 \cdot 1,65^2 \cdot 2,464) = 56,09 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Отношение ширины шлица пазов статора АД к воздушному зазору:

$$\frac{b_{ш1}}{\delta} = \frac{3,5}{0,35} = 10.$$

По рис. П.19, б ([1], стр. 145) находим значения коэффициента  $\beta_{02}$ :

$$\beta_{02} = 0,4$$

Амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора:

$$B_{02}=\beta_{02}k_{\sigma}B_{\sigma}=0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,88=0,141 \text{ Тл.}$$

Удельные поверхностные потери, т.е. потери, приходящиеся на 1 м<sup>2</sup> поверхности головок ротора:

|           |             |          |         |      |  |                        |      |
|-----------|-------------|----------|---------|------|--|------------------------|------|
|           |             |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                 |                        |      |
| Изм       | Лист        | № докум. | Подпись | Дата |  |                        |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.  |          |         |      | <b>Расчёт<br/>постоянных<br/>потерь мощности</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В |          |         |      |  | у                      | 33   |
|           |             |          |         |      |  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |             |          |         |      |  |                        |      |

$$P_{\text{пов2}} = 0,5k_{02} \left( \frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{z1} \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left( \frac{54 \cdot 500}{10000} \right)^2 \cdot (0,141 \cdot 23)^2 = 53,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

где  $k_{02}=1,4$  (стр. 45, [1]);  $n \approx n_1=500$  об/мин.

|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ               |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |   |  |                 |      |        |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      | Расчёт<br>постоянных<br>потерь мощности |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |   |  | У               | 34   |        |
|           |      |             |         |      |   |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |

Полные поверхностные потери ротора:

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}}(t_{z2} - b_{\text{ш2}})Z_2 l_{\text{СТ2}} = 53,7 \cdot (0,0095 - 0,0015) \cdot 44 \cdot 0,21 = 3,96 \text{ Вт.}$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора:

$$B_{\text{пул.2}} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{z2}} B_{z2} = \frac{7 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0095} \cdot 1,0 = 0,128 \text{ Тл.}$$

Масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2} Z_2 l_{\text{СТ2}} k_{c2} \gamma_c = 0,03227 \cdot 0,00785 \cdot 44 \cdot 0,21 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 1,770 \text{ кг.}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left( \frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул.2}} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \cdot \left( \frac{54 \cdot 500}{1000} \cdot 0,128 \right)^2 \cdot 1,770 = 2,32 \text{ Вт.}$$

Поверхностные и пульсационные потери в статоре АД с короткозамкнутым ротором незначительны, поэтому принимаем:

$$P_{\text{пов1}} = 0 \text{ и } P_{\text{пул1}} = 0 \text{ (стр. 45, [1])}.$$

Добавочные потери в стали:

$$P_{\text{ст.доб.}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 0 + 0 + 3,96 + 2,32 = 6,28 \text{ Вт.}$$

Обычно  $P_{\text{ст.доб}}$  в 4...8 раз меньше, чем  $P_{\text{ст.осн.}}$

$$\frac{P_{\text{ст.осн.}}}{P_{\text{ст.доб}}} = \frac{56,09}{6,28} = 8,3.$$

Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн.}} + P_{\text{ст.доб.}} = 56,09 + 6,28 = 62,37 \text{ Вт.}$$

Асинхронные двигатели с системой охлаждения IC0141 имеют внешний обдув от центробежного вентилятора (рекомендации на стр. 46-49, [1]), поэтому механические потери:

$$P_{\text{мех}} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 D_a^4 = 1,05 \cdot \left( \frac{500}{10} \right)^2 \cdot 0,191^4 = 3,49 \text{ Вт.}$$

где  $K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a) = 1,05$  (стр. 48, [1]).

Электрические потери в статоре в режиме холостого хода АД:

$$P_{\text{эл.х.}} = m_1 I_m^2 r_1 = 3 \cdot 1,4^2 \cdot 2,8 = 16,5 \text{ Вт.}$$

Активная составляющая тока холостого тока:

$$I_{\text{х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл.х.}}}{m_1 U_{1\text{ном.ф}}} = \frac{62,37 + 3,49 + 16,5}{3 \cdot 220} = 0,124 \text{ А.}$$

Реактивная составляющая тока холостого тока:

$$I_{x.p} \approx I_{\mu} = 1,4 \text{ A.}$$

Ток холостого хода АД:

$$I_x = \sqrt{I_{x.a}^2 + I_{x.p}^2} = \sqrt{0,124^2 + 1,4^2} = 1,4 \text{ A.}$$

Коэффициент мощности АД в режиме холостого хода:

$$\cos \varphi_x = \frac{I_{x.a}}{I_x} = \frac{0,124}{1,4} = 0.088$$

|      |      |         |         |      |                                  |      |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
|      |      |         |         |      | <i>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</i> | Лист |
|      |      |         |         |      |                                  | 36   |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                                  |      |

## 7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Методы расчёта рабочих характеристик асинхронных машины базируются на Г-образной схеме замещения: (рис. 7.1).

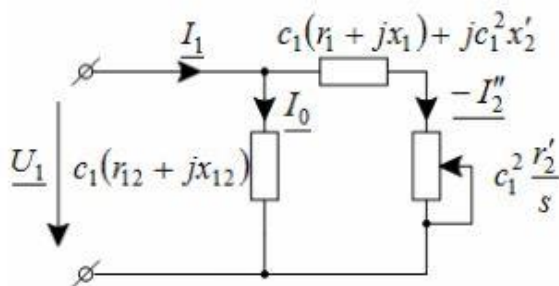


Рисунок 7.1. Г-образная схема замещения асинхронной машины.

Параметры схемы замещения (рис.7.1):

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.очн}}}{m_1 I_{\mu}^2} = \frac{56,09}{3 \cdot 1,4^2} = 9,5 \text{ Ом};$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном.ф}}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{1,4} - 1,9 = 155,2 \text{ Ом}.$$

Угол  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg\left(\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{2,8 \cdot 155,2 - 9,5 \cdot 1,9}{9,5 \cdot (2,8 + 9,5) + 155,2 \cdot (1,9 + 155,2)}\right) = 1,01^\circ > 1^\circ. \end{aligned}$$

Тогда (рекомендации на стр. 52, [1]):

Определим величины  $c_1$ ,  $a$ ,  $a'$ ,  $b$  и  $b'$ :

Активная  $C_{1a}$  и реактивная  $C_{1p}$  составляющие коэффициента  $c_1$

$$C_{1a} = \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{9,5(2,8 + 9,5) + 155,2(1,9 + 155,2)}{9,5^2 + 155,2^2} = 0,4$$

$$C_{1p} = \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{1,9 \cdot 9,5 - 2,8 \cdot 155,2}{9,5^2 + 155,2^2} = 0,017$$

|           |              |          |         |      |  |                 |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|--|-----------------|------|
|           |              |          |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                              |                 |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |  |                 |      |
| Разработ. | Рощин М.Ю.   |          |         |      | Рабочие<br>характеристики<br>асинхронного<br>двигателя | Литер.          | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |  | у               | 37   |
|           |              |          |         |      |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |
|           |              |          |         |      |  |                 |      |
|           |              |          |         |      |  |                 |      |

Модуль коэффициента  $c_1$

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2} = 0,41$$

Параметры  $a'$  и  $b'$ , о.е.

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 0,4^2 - 0,017^2 = 0,16$$

$$b' = 2c_{1a}c_{1p} = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,017 = 0,0136$$

Параметры  $a$  и  $b$ , Ом

$$a = c_{1a}r_1 - c_{1p}x_1 - b'x_2' = 0,4 \cdot 2,8 - 0,017 \cdot 1,9 -$$

$$0,0136 \cdot 1,7 = 1,06$$

$$b = c_{1a}x_1 + c_{1p}r_1 + a'x_2' = 0,4 \cdot 1,9 + 0,017 \cdot 2,8 + 0,16 \cdot 1,7 = 1,08$$

Активная и реактивная составляющие тока синхронного холостого хода АД:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1\text{ном.ф}}} = \frac{56,09 + 3 \cdot 1,4^2 \cdot 2,8}{3 \cdot 220} = 0,111.$$

$$I_{0p} \approx I_{\mu}.$$

|           |      |             |         |      |  |  |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|--|--|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                              |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | Рабочие<br>характеристики<br>асинхронного<br>двигателя |  |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |  |  |  | У               | 38   |        |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |  |  |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |  |  |  |                 |      |        |

Сумма потерь мощности в АД, не зависящих от скольжения:

$$P_{ст} + P_{мех} = 62.37 + 3.49 = 65.86 \text{ Вт.}$$

Выражения для расчёта рабочих характеристик в порядке вычисления и результаты расчёта приведены в табл. 7.1.

На рис. 7.2. приведены сами рабочие характеристики АД, представляющие собой графики зависимостей  $P_1=f(P_2)$ ,  $I_1=f(P_2)$ ,  $\cos\varphi=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ .

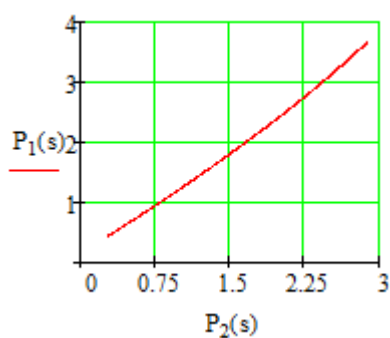
Реактивное сопротивление  $X$  правой ветви  $\Gamma$ -образной схемы замещения АД (рис.7.1.):

$$X = b + \frac{b'r'_2}{s}$$

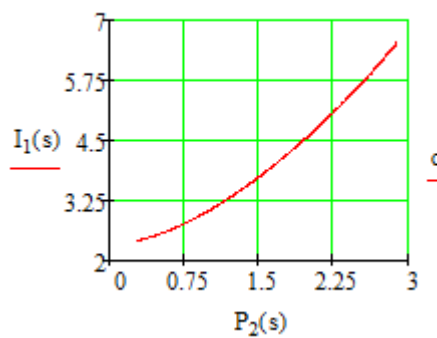
Таблица 7.1. Расчётные выражения и результаты расчёта рабочих характеристик асинхронного двигателя.

| №  | Расчётная формула                        | Ед. изм. | Скольжение $s$ |        |        |        |        |       |                |
|----|--|----------|----------------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|
|    |  |          | 0,004          | 0,011  | 0,018  | 0,025  | 0,032  | 0,039 | $s_{ном}=0,17$ |
| 1  | $\frac{a'r'_2}{s}$                       | Ом       | 41.6           | 15.127 | 9.24   | 6.656  | 5.2    | 4.26  | 6,48           |
| 2  | $R = a + \frac{a'r'_2}{s}$               | Ом       | 42.66          | 16.18  | 10.304 | 7.716  | 6.26   | 5.33  | 2,038          |
| 3  | $X$                                      | Ом       | 4.616          | 4.616  | 4.616  | 4.616  | 4.616  | 4.616 | 4.616          |
| 4  | $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$                   | Ом       | 42.90          | 16.82  | 11.3   | 8.99   | 7.78   | 7.05  | 5,046          |
| 5  | $I_2'' = \frac{U_{1ном.ф}}{Z}$           | А        | 5.12           | 13.6   | 19.46  | 24.5   | 28.28  | 31.20 | 43,60          |
| 6  | $\cos\varphi_2' = \frac{R}{Z}$           | -        | 0.994          | 0,961  | 0,911  | 0,858  | 0,804  | 0,756 | 0,40           |
| 7  | $\sin\varphi_2' = \frac{X}{Z}$           | -        | 0,107          | 0,274  | 0,408  | 0,513  | 0,593  | 0,654 | 0,914          |
| 8  | $I_{0a}$                                 | А        | 0,111          | 0,111  | 0,111  | 0,111  | 0,111  | 0,111 | 0,111          |
| 9  | $I_{0p}$                                 | А        | 1.4            | 1.4    | 1.4    | 1.4    | 1.4    | 1.4   | 1.4            |
| 10 | $I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos\varphi_2'$ | А        | 2,903          | 7.899  | 12.039 | 16.132 | 19.732 | 22.81 | 40,26          |
| 11 | $I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin\varphi_2'$ | А        | 0.765          | 5.15   | 10.809 | 16.83  | 22.12  | 26.57 | 48,34          |
| 12 | $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$       | А        | 3.002          | 9.429  | 16.17  | 23.31  | 29.64  | 35.02 | 62,909         |
| 13 | $I_2' = c_1 I_2''$                       | А        | 2.099          | 5.576  | 7.978  | 10.045 | 11.594 | 12.79 | 17,876         |

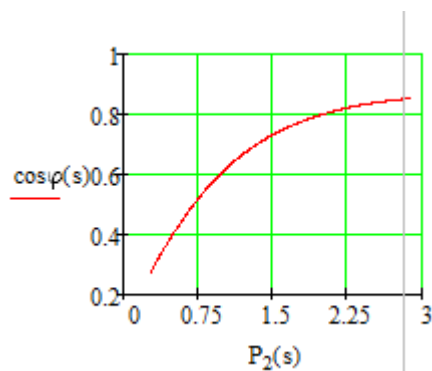
| №  | Расчётная формула   | Ед. изм. | Скольжение s |       |       |        |        |       |                |
|----|---|----------|--------------|-------|-------|--------|--------|-------|----------------|
|    |   |          | 0,004        | 0,011 | 0,018 | 0,025  | 0,032  | 0,039 | $s_{ном}=0,17$ |
| 14 | $P_1=3U_{1ном.ф}I_a \cdot 10^{-3}$                          | кВт      | 1.91         | 5.21  | 7.945 | 10.647 | 13.023 | 15.05 | 26,571         |
| 15 | $P_{\Sigma 1}=3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$                     | кВт      | 0.075        | 0.746 | 2.19  | 4.564  | 7.38   | 10.30 | 33,24          |
| 16 | $P_{\Sigma 2}=3(I_2')^2 r_2' \cdot 10^{-3}$                 | кВт      | 0,013        | 0,097 | 0.198 | 0,314  | 0,42   | 0,51  | 0,997          |
| 17 | $P_{ст} + P_{мех}$  | кВт      | 65.86        | 65.86 | 65.86 | 65.86  | 65.86  | 65.86 | 65.86          |
| 18 | $P_{доб}=0,005P_1$  | кВт      | 0,009        | 0,026 | 0,039 | 0,053  | 0,065  | 0,075 | 0,13           |
| 19 | $\Sigma P=P_{ст}+P_{мех}+P_{\Sigma 1}+P_{\Sigma 2}+P_{доб}$ | кВт      | 0,184        | 0,201 | 0.262 | 0.345  | 0.455  | 0.531 | 0.485          |
| 20 | $P_2=P_1-\Sigma P$  | -        | 1.72         | 5.009 | 7.683 | 10.302 | 12.57  | 14.52 | 26.086         |
| 21 | $\mu=1-\frac{\Sigma P}{P_1}$                                | -        | 0,801        | 0,833 | 0,828 | 0,899  | 0,911  | 0,945 | 0,90           |
| 22 | $\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}$                         | -        | 0,901        | 0,921 | 0,974 | 0,985  | 0,989  | 0,999 | 0.988          |



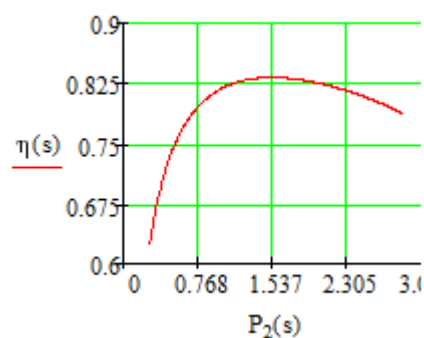
(a)



(б)



(в)



(г)

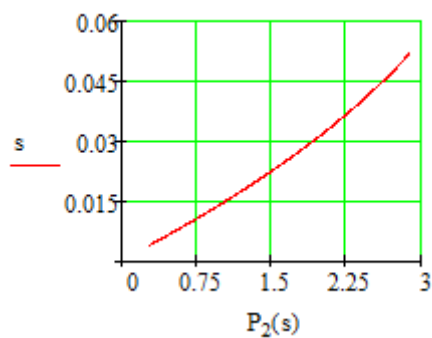
|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

Лист

40





(d)

Рис. 7.2. Рабочие характеристики АД: (а) -  $P_1=f(P_2)$ ; (б) -  $I_1=f(P_2)$ ; (в) -  $\cos\varphi=f(P_2)$ ; (г) -  $\eta=f(P_2)$ ; (д) -  $s=f(P_2)$

По рабочим характеристикам (рис. 7.2.) уточняем номинальные параметры двигателя по известной из условия проектирования номинальной мощности

$P_{2,ном} = 26 \text{ кВт}$ :

Номинальный ток (рис 7.2., б):

$I_{1,ном} = 62 \text{ А}$ ;

Номинальный коэффициент мощности (рис. 7.2., в):

$\cos\varphi_{ном} = 0.988$ ;

номинальный КПД (рис.7.2., г):

$\eta_{ном} = 0.90$ ;

номинальное скольжение (рис. 7.2., д):

$s_{ном} = 0.17$ .

Для уточнённого значения номинального скольжения рассчитываем параметры в табл. 7.1 и заносим результаты в последний столбец.

## 8. Пусковые характеристики асинхронного двигателя

### 8.1 Расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока

Вначале выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока, но без учёта влияния насыщения от полей рассеяния.

Расчёт проведём для ряда скольжений, который будет начинаться со значения чуть ниже критического и заканчиваться  $s=1$ . Значение критического скольжения также необходимо включить в расчётный ряд (стр. 62, [1]).

Ниже покажем подробный расчёт для значения скольжения  $s=1$ .

Расчётная высота стержня ротора (полузакрытый паз):

$$h_{c2} = h_{п2} - h_{ш2} = 32,6 - 0,75 = 31,85 \text{ мм}$$

Определяют «приведённую высоту» алюминиевого стрежня ротора литой короткозамкнутой обмотки в зависимости от расчётной температуры обмотки (п.5.)

$$v_{расч} = 115^{\circ}\text{C}.$$

$$\zeta = 63,61 h_{c2} \sqrt{s} = 63,61 \cdot 31,85 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 2,0$$

По рис. П.22 и П.23 ([1], страница) соответственно находим значения величин  $\varphi$  и  $\varphi'$ .

$$\varphi = f(\zeta) = 0,48$$

$$\varphi' = f(\zeta) = 0,72$$

Глубина проникновения тока:

$$h_r = \frac{h_{c2}}{1 + \varphi} = \frac{31,85}{1 + 0,48} = 21,52 \text{ мм} = 0,0215 \text{ м}$$

Проверяем условие (стр. 58, источник 1):

$$\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}, \text{ или } \frac{6,9}{2} \leq 21,52 \leq 26,6 + \frac{6,9}{2}, \text{ или } 3,45 \leq 21,52 \leq 30,05$$

Условие выполняется, поэтому площадь сечения верхней части стрежня ротора, по которому распространяется ток при пуске:

|           |              |          |         |      |   |                        |      |
|-----------|--------------|----------|---------|------|---|------------------------|------|
|           |              |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b>                                  |                        |      |
| Изм       | Лист         | № докум. | Подпись | Дата |   |                        |      |
| Разработ. | Рошин М.Ю.   |          |         |      | <b>Пусковые<br/>характеристики<br/>асинхронного<br/>двигателя</b> | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В. |          |         |      |   | У                      | 42   |
|           |              |          |         |      |   | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |              |          |         |      |   |                        |      |
|           |              |          |         |      |   |                        |      |

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 6,9^2}{8} + \frac{6,9 + 4,45}{2} \cdot \left( 21,52 - \frac{6,9}{2} \right) = 121,24 \text{ мм}^2.$$

где ширина паза на глубине проникновения тока  $b_r$ :

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 6,9 - \frac{6,9 - 3,3}{26,6} \cdot \left( 21,52 - \frac{6,9}{2} \right) = 4,45 \text{ мм}.$$

|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ                               |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |   |  |                 |      |        |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      | Пусковые<br>характеристики<br>асинхронного<br>двигателя |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |   |  | У               | 43   |        |
|           |      |             |         |      |   |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |   |  |                 |      |        |

Коэффициент  $k_r$ :

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{156,9}{121,24} = 1,3$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_r = \frac{r_2 + r'_c(k_r - 1)}{r_2} = \frac{17,45 \cdot 10^{-6} + 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot (1,3 - 1)}{17,45 \cdot 10^{-6}} = 1,1$$

где  $r'_c = r_c = 5,8 \cdot 10^{-6}$  Ом.

Приведённое активное сопротивление ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r'_{2\zeta} = K_r r'_2 = 1,1 \cdot 1,04 = 1,144 \text{ Ом.}$$

Коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого проводником с обмоткой:

$$\lambda'_{п2} = \frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2b_1} = \frac{27,92}{3 \cdot 6,9} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 6,9^2}{8 \cdot 156,9}\right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,9} = 1,59$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{п2\zeta} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\zeta} = 1,66 - 0,44 = 1,22$$

где  $\Delta\lambda_{п2\zeta} = \lambda'_{п2}(1 - k_d) = 1,59 \cdot (1 - 0,72) = 0,44$

$$k_d = \varphi' = 0,72$$

Коэффициент, показывающий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока:

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\zeta} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{1,22 + 0,902 + 0,140}{1,66 + 0,902 + 0,140} = 0,83$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора с учетом эффекта вытеснения тока:

$$x'_{2\zeta} = K_x x'_2 = 0,83 \cdot 1,7 = 1,41$$

В пусковом режиме активным сопротивлением  $r_{12}$  схемы замещения АД на рис. П.20, б (страница, [1]), пренебрегают, то есть  $r_{12п} = 0$ . (стр. 60, [1]).

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции в схеме замещения АД (рис. П.20, б, страница, [1]) в пусковом режиме:

$$x_{12п} = k_{\mu} x_{12} = 1,31 \cdot 155,2 = 203 \text{ Ом}$$

Коэффициент  $c_1$  в пусковом режиме АД:

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{1,9}{203} = 1,009$$

Активное и реактивное сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД (рис.7.1) в пусковом режиме с учётом вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} r_2' \zeta}{s} = 2,8 + \frac{1,009 \cdot 1,144}{1} = 4,95 \text{ Ом}$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} x_2' \zeta = 1,9 + 1,009 \cdot 1,41 = 3,32 \text{ Ом}$$

Ток в обмотке ротора с учётом вытеснения тока в пусковом режиме:

$$I_{2п}' = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = \frac{220}{\sqrt{4,95^2 + 3,32^2}} = 36,9 \text{ А}$$

Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока:

$$I_{1п} = I_{2п}' \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} x_{12п}} = 36,9 \cdot \frac{\sqrt{4,95^2 + (3,32 + 203)^2}}{1,009 \cdot 203} = 37,17 \text{ А.}$$

Кратность пускового тока АД с учётом вытеснения тока:

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п}}{I_{1ном}} = \frac{37,17}{7,9} = 4,70$$

Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока при скольжении:

$$M^* = \left( \frac{I_{2п}'}{I_{2ном}'} \right)^2 K_r \frac{s_{ном}}{s} = \left( \frac{36,9}{17,876} \right)^2 \cdot 1,1 \cdot \frac{0,17}{1} = 0,8$$

Предварительно значение критического скольжения можно оценить по формуле:

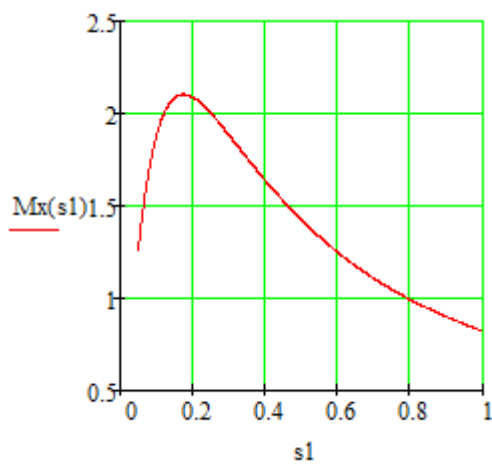
$$s_{кр} = \frac{r_2'}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x_2'} = \frac{1,04}{\frac{1,9}{1,009} + 1,70} = 0,290$$

Соответственно, выберем расчётный ряд скольжений  $s$ : 0,05; 0,144; 0,3; 0,5; 0,7; 1.

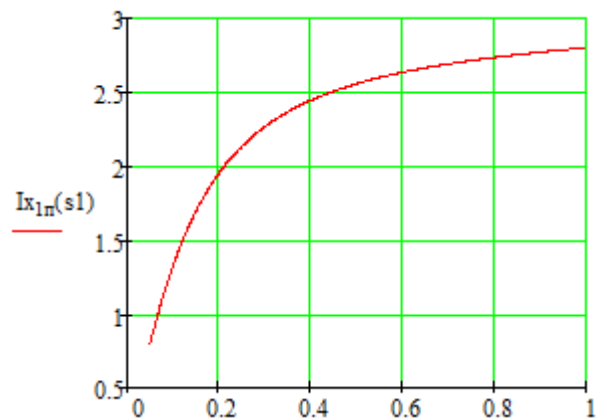
Значение критического скольжения уточним после расчёта и построения пусковых характеристик.

**Таблица 8.1. Расчётные выражения и результаты расчёта пусковых характеристик асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока.**

| №  | Расчётная формула  | Ед. изм. | Скольжение s |        |        |        |        |        |
|----|--|----------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |  |          | 0,05         | 0,144  | 0,3    | 0,5    | 0,7    | 1      |
| 1  | $\zeta=63,61h_{c2}\sqrt{s}$  | -        | 0.358        | 0.607  | 0.876  | 1.131  | 1.338  | 1.6    |
| 2  | $\varphi = f(\zeta)$   | -        | 0.058        | 0.063  | 0.07   | 0.14   | 0.245  | 0.1    |
| 3  | $h_r = \frac{h_{c2}}{1+\varphi}$   | мм       | 23.761       | 23.669 | 23.334 | 22.055 | 20.196 | 17.839 |
| 4  | $k_r = \frac{q_c}{q_r}$  | -        | 1.364        | 1.362  | 1.356  | 1.332  | 1.299  | 1.259  |
| 5  | $K_r = \frac{r_2 + r'_c(k_r - 1)}{r_2}$  | -        | 1.266        | 1.265  | 1.26   | 1.243  | 1.218  | 1.189  |
| 6  | $r'_{2\zeta} = K_R r'_2$   | Ом       | 2.152        | 2.15   | 2.142  | 2.113  | 2.071  | 2.022  |
| 7  | $k_{\Delta} = \varphi' = f(\zeta)$   | -        | 0.992        | 0.98   | 0.967  | 0.948  | 0.921  | 0.86   |
| 8  | $\lambda_{\pi 2\zeta} = \lambda_{\pi 2} - \Delta \lambda_{\pi 2\zeta}$   | -        | 1.79         | 1.774  | 1.757  | 1.732  | 1.698  | 1.618  |
| 9  | $K_X = \frac{\lambda_{\pi 2\zeta} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\Delta 2}}{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\Delta 2}}$ | -        | 0.998        | 0.995  | 0.992  | 0.988  | 0.982  | 0.968  |
| 10 | $x'_{2\zeta} = K_X x'_2$   | Ом       | 8.256        | 8.232  | 8.208  | 8.172  | 8.123  | 8.008  |
| 11 | $R_{\pi} = r_1 + \frac{c_{1\pi} r'_{2\zeta}}{s}$   | Ом       | 48.348       | 19.363 | 11.332 | 8.326  | 7.021  | 6.055  |
| 12 | $X_{\pi} = x_1 + c_{1\pi} x'_{2\zeta}$   | Ом       | 12.182       | 12.157 | 12.132 | 12.096 | 12.045 | 11.926 |
| 13 | $I'_{2\pi} = \frac{U_{1\text{НОМ.}\phi}}{\sqrt{R_{\pi}^2 + X_{\pi}^2}}$  | А        | 4.412        | 9.622  | 13.252 | 14.982 | 15.78  | 16.448 |
| 14 | $I_{1\pi} = \frac{I'_{2\pi} \sqrt{R_{\pi}^2 + (X_{\pi} + x_{12\pi})^2}}{c_{1\pi} x_{12\pi}}$                                       | А        | 5.02         | 10.388 | 14.205 | 16.028 | 16.866 | 17.558 |
| 15 | $I_{1\pi}^* = \frac{I_{1\pi}}{I_{1\text{НОМ}}}$  | -        | 0.801        | 1.657  | 2.266  | 2.556  | 2.69   | 2.8    |
| 16 | $M^* = \left(\frac{I'_{2\pi}}{I'_{2\text{НОМ}}}\right)^2 K_r \frac{S_{\text{НОМ}}}{s}$   | кВт      | 1.258        | 2.076  | 1.883  | 1.424  | 1.106  | 0.821  |



(а)



(б)

Рис 8.1. Пусковые характеристики АД с учётом эффекта вытеснения тока:

(а) -  $M^*=f(s)$ ; (б) -  $I_{1n}^*=f(s)$

По построенным пусковым характеристикам (рис.) уточняем, что  $s_{кр}=0,171$ .

Максимальный момент АД, соответствующий критическому скольжению, с учётом вытеснения тока:

$$M_{\max}^* = \left( \frac{I'_{2п(s_{кр})}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_{R(s_{кр})} \frac{s_{ном}}{s_{кр}} = \left( \frac{36.9}{17.876} \right)^2 \cdot 1,1 \cdot \frac{0.17}{0,290} = 2.103$$

|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

## 8.2. Расчёт пусковых характеристик с учётом насыщения магнитной системы асинхронной машины

Определим необходимость учёта влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД. Для этого найдём значение полного тока паза статора в начальный момент времени пуска двигателя, то есть при  $s=1$ .

$$I_{1\text{паза}} = \frac{I_{1п} u_{п}}{a} = \frac{37.17 \cdot 104}{1} = 386.68 \text{ А.}$$

Полученное значение  $I_{1\text{паза}} > 400 \text{ А}$ , поэтому учёт влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД необходим. (стр. 64, [1]).

Выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока и влияния насыщения от полей рассеяния.

Расчётный ряд скольжений  $s$  примем таким же, что и при расчёте с учётом только вытеснения тока: 0,05, 0,144, 0,3, 0,5, 0,7, 1.

Покажем подробный расчёт для значения скольжений  $s=1$ .

Первоначально зададимся значением коэффициента увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния (рекомендации на стр. 65, [1]);

$$k_{\text{нас}} = 1,45$$

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора:

$$\begin{aligned} F_{\text{п.ср}} &= 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_{1п} u_{п}}{a} \left( k'_{\beta} + k_y k_{\text{обм1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \\ &= 0,7 \cdot \frac{1,45 \cdot 37.17 \cdot 104}{1} \cdot \left( 1 + 1 \cdot 1 \cdot \frac{54}{44} \right) = 886.7 \text{ А} \end{aligned}$$

Коэффициент  $C_N$ :

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,35}{23 + 9.5}} = 0.89$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6\delta C_N} \cdot 10^{-3} = \frac{886.7}{1,6 \cdot 0,35 \cdot 0.89} \cdot 10^{-3} = 1.77 \text{ Тл}$$

Коэффициент  $K_{\phi}$ , характеризующий отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины (рис. П.26, [1], страница):

$$K_{\phi} = f(B_{\phi\delta}) = 0,42$$



Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов статора:

$$c_{э1} = (t_{z1} - b_{ш1})(1 - K_{\delta}) = (23 - 3.5) \cdot (1 - 0.42) = 11.31 \text{ мм}$$

Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов ротора:

$$c_{э2} = (t_{z2} - b_{ш2})(1 - K_{\delta}) = (9.5 - 1.5) \cdot (1 - 0.42) = 4.64 \text{ мм}$$

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза статора для полузакрытых пазов (рис. П.27, в,г, стр. 148, [1]):

$$\Delta\lambda_{п1.нас} = \frac{h_{ш1} + 0.58h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{1э}}{c_{1э} + 1.5b_{ш1}} = \frac{1 + 0.58 \cdot 0.95}{3.5} \cdot \frac{11.31}{11.31 + 1.5 \cdot 3.5} = 0.30$$

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния пазов ротора для полузакрытых пазов:

$$\Delta\lambda_{п2.нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{c_{э2}}{b_{ш2} + c_{э2}} = \frac{0.75}{1.5} \cdot \frac{4.64}{1.5 + 4.64} = 0.38$$

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора и ротора соответственно:

$$\lambda_{п1.нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1.нас} = 1.18 - 0.19 = 0.99$$

$$\lambda_{п2\zeta.нас} = \lambda_{п2\zeta} - \Delta\lambda_{п2.нас} = 1.62 - 0.42 = 1.2$$

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора и ротора соответственно:

$$\lambda_{д1.нас} = \lambda_{д1} K_{\delta} = 1.82 \cdot 0.42 = 0.764$$

$$\lambda_{д2.нас} = \lambda_{д2} K_{\delta} = 3.69 \cdot 0.42 = 1.55$$

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$X_{1.нас} = X_1 \frac{\lambda_{п1.нас} + \lambda_{д1.нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 3.67 \cdot \frac{0.99 + 0.764 + 0.749}{1.18 + 1.82 + 0.749} = 2.45 \text{ Ом}$$

$$X'_{2\zeta.нас} = X'_2 \frac{\lambda_{п2\zeta.нас} + \lambda_{д2.нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 8.27 \cdot \frac{1.2 + 1.55 + 0.257}{1.8 + 3.69 + 0.257} = 4.33 \text{ Ом}$$

Коэффициент  $c_1$  в пусковом режиме АД с учётом насыщения:

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{X_{1.нас}}{X_{12п}} = 1 + \frac{2.45}{120} = 1.02$$

Находим активное  $R_{п.нас}$  и реактивное  $X_{п.нас}$  сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД (рис. 7.1) в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$R_{п.нас} = r_1 + \frac{c_{1п.нас} r'_{2\zeta}}{s} = 0,277 + \frac{1,02 \cdot 2,02}{1} = 6,03 \text{ Ом}$$

$$X_{п.нас} = x_{1.нас} + c_{1п.нас} x'_{2\zeta,нас} = 2,45 + 1,02 \cdot 4,33 = 6,87 \text{ Ом}$$

Ток в обмотке ротора в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I'_{2п.нас} = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{6,03^2 + 6,87^2}} = 24,07 \text{ А}$$

Ток статора с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1п.нас} = I'_{2п.нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}} = 24,07 \cdot \frac{\sqrt{6,03^2 + (6,87 + 120)^2}}{1,02 \cdot 120} = 24,98 \text{ А}$$

Кратность тока статора АД с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}} = \frac{24,98}{6,27} = 3,984 \text{ о. е.}$$

Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$M^* = \left( \frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s} = \left( \frac{24,07}{3,703} \right)^2 \cdot 1,19 \cdot \frac{0,035}{1} = 1,8$$

Фактическое значение коэффициента насыщения:

$$k'_{нас} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1п}} = \frac{24,98}{17,558} = 1,423$$

Данное значение не отличается от принятого изначально на 10.... 15% , что допустимо и означает, что уточняющий перерасчёт пусковых параметров АД не требуется (стр. 68, [1]).

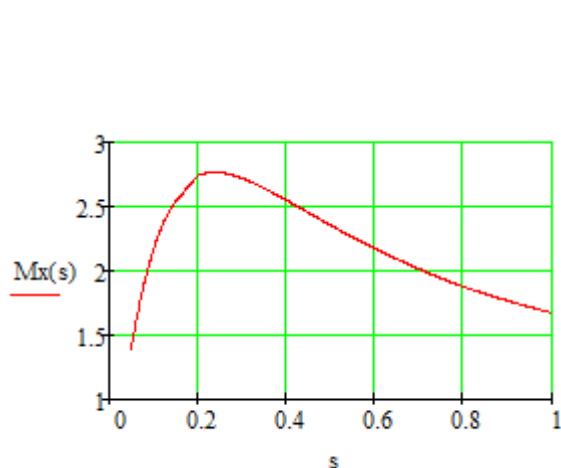
$$k_{нас} = 1,45 \text{ для } s=1$$

*Таблица 8.2.* Расчётные выражения и результаты расчёта пусковых характеристик асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения:

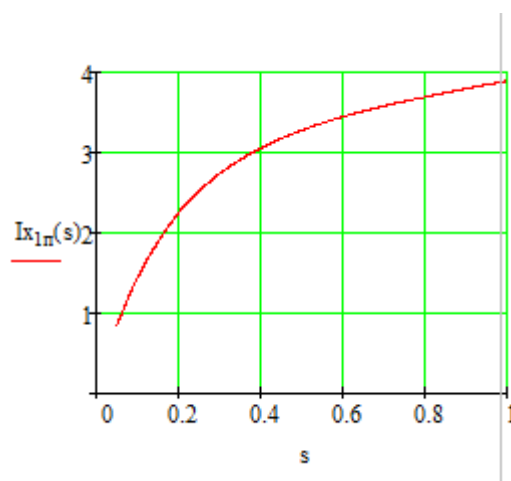
|      |      |         |         |      |                           |    |
|------|------|---------|---------|------|---------------------------|----|
|      |      |         |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ | 50 |
|      |      |         |         |      |                           |    |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |                           |    |

| №  | Расчётная формула   | Ед.<br>изм. | Скольжение s |        |        |       |       |       |
|----|---|-------------|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|
|    |   |             | 0,05         | 0,144  | 0,3    | 0,5   | 0,7   | 1     |
| 1  | $k_{\text{нас}}$  | -           | 1            | 1      | 1.183  | 1.25  | 1.317 | 1.45  |
| 2  | $F_{\text{п.ср}} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_{1\text{п}} u_{\text{п}}}{a} \cdot \left( k'_{\beta} + k_y k_{\text{обм1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$   | кА          | 1.312        | 1.312  | 1.552  | 1.639 | 1.727 | 1.902 |
| 3  | $B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6\delta C_N} \cdot 10^{-3}$  | ТЛ          | 3.684        | 3.684  | 4.36   | 4.605 | 4.851 | 5.342 |
| 4  | $K_{\sigma} = f(B_{\phi\sigma})$  | -           | 0.999        | 0.998  | 0.997  | 0.994 | 0.99  | 0     |
| 5  | $c_{\text{э1}} = (t_{Z1} - b_{\text{ш1}})(1 - K_{\delta})$  | мм          | 2.681        | 2.681  | 3.173  | 3.35  | 3.522 | 3.833 |
| 6  | $\Delta\lambda_{\text{п1.нас}} = \frac{h_{\text{ш1}} + 0,58h_k}{b_{\text{ш1}}} \cdot \frac{c_{1\text{э}}}{c_{1\text{э}} + 1,5b_{\text{ш1}}}$  | -           | 0.015        | 0.15   | 0.167  | 0.173 | 0.178 | 0.187 |
| 7  | $\lambda_{\text{п1.нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1.нас}}$   | -           | 1.03         | 1.03   | 1.013  | 1.007 | 1.002 | 0.993 |
| 8  | $\lambda_{\text{д1.нас}} = \lambda_{\text{д1}} K_{\delta}$  | -           | 1.133        | 1.133  | 1.007  | 0.961 | 0.917 | 0.837 |
| 9  | $x_{1.\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1.нас}} + \lambda_{\text{д1.нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}}$              | Ом          | 2.85         | 2.85   | 2.71   | 2.66  | 2.612 | 2.525 |
| 10 | $c_{\text{э2}} = (t_{Z2} - b_{\text{ш2}})(1 - K_{\delta})$  | мм          | 4.91         | 4.91   | 5.809  | 6.134 | 6.448 | 7.018 |
| 11 | $\Delta\lambda_{\text{п2.нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} \frac{c_{\text{э2}}}{b_{\text{ш2}} + c_{\text{э2}}}$   | -           | 0.383        | 0.383  | 0.397  | 0.402 | 0.406 | 0.412 |
| 12 | $\lambda_{\text{п2}\zeta.\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\zeta} - \Delta\lambda_{\text{п2.нас}}$  | -           | 1.237        | 1.237  | 1.223  | 1.218 | 1.214 | 1.208 |
| 13 | $\lambda_{\text{д2.нас}} = \lambda_{\text{д2}} K_{\delta}$  | -           | 2.296        | 2.296  | 2.041  | 1.949 | 1.86  | 1.698 |
| 14 | $x'_{2\zeta.\text{нас}} = x'_2 \frac{\lambda_{\text{п2}\zeta.\text{нас}} + \lambda_{\text{д2.нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}}$ | Ом          | 5.454        | 5.454  | 5.066  | 4.927 | 4.794 | 4.552 |
| 15 | $c_{1\text{п.нас}} = 1 + \frac{x_{1.\text{нас}}}{x_{12\text{п}}}$   | -           | 1.024        | 1.024  | 1.023  | 1.022 | 1.022 | 1.021 |
| 16 | $R_{\text{п.нас}} = r_1 + \frac{c_{1\text{п.нас}} r'_{2\zeta}}{s}$  | Ом          | 45.33        | 18.331 | 10.855 | 8.1   | 6.919 | 6.033 |

| №  | Расчётная формула   | Ед. изм. | Скольжение s |        |        |        |        |        |
|----|---|----------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |   |          | 0,05         | 0,144  | 0,3    | 0,5    | 0,7    | 1      |
| 17 | $X_{п.нас}$<br>$= X_{1.нас} + c_{1п.нас} X'_{2\zeta.нас}$   | Ом       | 8.434        | 8.434  | 7.891  | 7.697  | 7.51   | 7.172  |
| 18 | $I'_{2п.нас} = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$                                     | А        | 4.771        | 10.903 | 16.393 | 19.689 | 21.545 | 23.474 |
| 19 | $I_{1п.нас}$<br>$= I'_{2п.нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}}$ | А        | 5.29         | 11.514 | 17.146 | 20.539 | 22.439 | 24.392 |
| 20 | $k'_{нас} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1п}}$  | -        | 0.301        | 0.656  | 0.977  | 1.17   | 1.278  | 1.389  |
| 21 | $I_{1п}^* = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}}$  | -        | 0.844        | 1.836  | 2.735  | 3.276  | 3.579  | 3.89   |
| 22 | $M^* = \left(\frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2ном}}\right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{s}$                              | -        | 1.383        | 2.507  | 2.721  | 2.355  | 2.014  | 1.674  |



(a)



(б)

Рис. 8.2. Пусковые характеристики АД с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения: (а) -  $M^*=f(s)$ ; (б) -  $I_{1н}^*=f(s)$

По построенным пусковым характеристикам определяем критическое скольжение и максимальный момент, соответствующий критическому скольжению:

$$s_{кр}=0,288; M_{\max}^*=2.735$$

|      |      |         |         |      |
|------|------|---------|---------|------|
|      |      |         |         |      |
| Изм. | Лист | № Докум | Подпись | Дата |

КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ

## 9. Тепловой расчёт

Электрические потери в пазовой части обмотки статора:

$$P'_{\text{эп1}} = k_p P_{\text{э1}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 288 \cdot \frac{2 \cdot 0,21}{0,403} = 104,6$$

где:  $k_p=1,07$  для класса Н.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta\theta_{\text{пов1}} = K \frac{P'_{\text{эп}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{104,6 + 60,86}{\pi \cdot 134 \cdot 0,077 \cdot 180} = 5,19^\circ\text{C}.$$

где:  $K=0,22$  – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду (табл. П.29, [1], стр. 148);

$\alpha_1=180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  коэффициент теплоотдачи с поверхности (рис. П. 28, [1], стр. 149)

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора (стр. 71, [1], полузакрытый трапецеидальный паз).

$$\Pi_{\text{п1}}=2h_{\text{п.к.}}+b_1+b_2=2 \cdot 14,7+6,9+3,3 = 39,6 \text{ мм} = 0,0396 \text{ м}$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{из.п1}} &= \frac{P'_{\text{эп1}}}{Z_1 \Pi_{\text{п1}} l_1} \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{экв}}} \right) \cdot 10^{-3} \\ &= \frac{104,6}{48 \cdot 0,04 \cdot 0,077} \cdot \left( \frac{0,25}{0,16} + \frac{6,9 + 3,3}{16 \cdot 1,3} \right) \cdot 10^{-3} = 1,5^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

где: средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции

$$\lambda_{\text{экв}}=0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (стр. 72, [1].)}$$

среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников с учетом неплотного прилегания проводников друг к другу

|           |             |          |         |      |                                  |                        |      |
|-----------|-------------|----------|---------|------|----------------------------------|------------------------|------|
|           |             |          |         |      | <b>КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ</b> |                        |      |
| Изм       | Лист        | № докум. | Подпись | Дата |                                  |                        |      |
| Разработ. | Роцин М.Ю.  |          |         |      | <b>Тепловой расчёт</b>           | Литер.                 | Лист |
| Проверил  | Тодарев В.В |          |         |      |                                  | У                      | 53   |
|           |             |          |         |      |                                  | <b>ГГТУ, гр. ЭП-21</b> |      |
|           |             |          |         |      |                                  |                        |      |
|           |             |          |         |      |                                  |                        |      |

$$\lambda'_{\text{ЭКВ}} = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (по рис. П.30, стр. 151, [1], для } \frac{d}{d_{\text{из}}} = \frac{1,06}{1,14} = 0,93)$$

Электрические потери в лобовых частях катушек обмотки статора:

$$P'_{\text{эл1}} = k_{\rho} P_{\text{эл}} \frac{2l_2}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 288 \cdot \frac{2 \cdot 0,125}{0,403} = 191,2 \text{ Вт.}$$

|           |      |             |         |      |                           |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата |                           |  |                 |      |        |
| Разработ. |      | Роцин М.Ю.  |         |      | Тепловой расчёт           |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                           |  | У               | 54   |        |
|           |      |             |         |      |                           |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |                 |      |        |

Периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки обмотки статора:

$$\Pi_{л1} \approx \Pi_{п1} = 0,04 \text{ м} = 40 \text{ мм. (стр. 72, [1])}.$$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей обмотки статора:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{из.л1} &= \frac{P'_{эл1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left( \frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п1}}{16\lambda'_{экв}} \right) \cdot 10^{-3} \\ &= \frac{191.2}{2 \cdot 48 \cdot 0,04 \cdot 0,125} \cdot \left( \frac{0}{0,16} + \frac{16.6}{16 \cdot 1,3} \right) \cdot 10^{-3} = 0,3^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

где  $b_{из.л1}=0$ , т.к. лобовые части обмотки без изоляции (стр.72, [1]).

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta\vartheta_{пов.л1} = K \frac{P'_{эл1}}{2\pi D l_{выл1} \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{191.2}{2\pi \cdot 0,134 \cdot 0,045 \cdot 180} = 5.1^\circ\text{C}.$$

Среднее повышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta'_1 &= \frac{(\Delta\vartheta_{пов1} + \Delta\vartheta_{из.п1})2l_1 + (\Delta\vartheta_{из.л1} + \Delta\vartheta_{пов.л1})2l_{л1}}{l_{ср1}} = \\ &= \frac{(5.19 + 1.5) \cdot 2 \cdot 0,077 + (0,3 + 5.1) \cdot 2 \cdot 0,125}{0,403} = 5.89^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса АД (поскольку двигатель имеет степень защиты IP44, то с учётом поверхности рёбер станины – стр.73, [1]):

$\Pi_p=0,24$  м – условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя (по рис. П.31., [1], стр. 151).

$$S_{кор} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{выл1}) = (\pi \cdot 0,191 + 8 \cdot 0,24) \cdot (0,21 + 2 \cdot 0,045) = 0,437 \text{ м}^2$$

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя (стр.73, [1], двигатель имеет внешний вентилятор).

АД с внешним вентилятором (степень защиты двигателя IP44, система охлаждения IC0141):

$$\begin{aligned}\Sigma P'_B &= \Sigma P + (k_p - 1)(P_{э1} + P_{э2}) - (1 - K)(P'_{эп1} + P_{ст.оч}) - 0,9P_{мех} = \\ &= 475 + (1,07 - 1) \cdot (288 + 82,5) - (1 - 0,22) \cdot (104,6 + 60,86) \\ &- 0,9 \cdot 14,52 = 358,81 \text{ Вт}\end{aligned}$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\alpha_B = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ - коэффициент подогрева воздуха (рис. П.28, [1], стр. 149).}$$

$$\Delta\vartheta_B = \frac{\Sigma P'_B}{s_{кор} \alpha_B} = \frac{32,8}{0,437 \cdot 25} = 32,8^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_B = 5,89 + 32,8 = 38,69^\circ\text{C}.$$

Значение величины  $\Delta\vartheta_1$  не выше допустимого превышения температуры обмотки для изоляции класса Н, равного  $100^\circ\text{C}$  (табл. П.30, стр. 152, [1]), поэтому нагрев двигателя находится в допустимых значениях.

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором (стр. 75, [1]):

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n_1}{100} D_a} = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{500}{100} \cdot 0,191} = 1,75.$$

где  $m' = 2,8$  для АД с  $2p=8$  и  $h \leq 132$  мм;

Требуемый для охлаждения расход воздуха:

$$Q_B = \frac{k_m \Sigma P'_B}{1100 \Delta\vartheta_B} = \frac{1,75 \cdot 358,81}{1100 \cdot 32,8} = 0,017 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:

$$Q'_B = 0,6 D_a^3 \frac{n_1}{100} = 0,6 \cdot 0,191^3 \cdot \frac{500}{100} = 0,020 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Фактически обеспечиваемый расход воздуха должен быть больше требуемого, то есть должно выполняться условие:

$$Q'_B > Q_B \text{ или } 0,020 > 0,017 \text{ - в нашем случае условие выполняется.}$$



## Заключение

При проектировании данного электродвигателя были рассчитаны размеры статора и ротора, выбраны типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины были сконструированы так, чтобы при изготовлении машины трудоёмкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала наилучшими энергетическими показателями. При этом данная электрическая машина соответствует условиям применения её в электроприводе.

При выполнении проекта учитывалось соответствие технико-экономических показателей машины современному мировому уровню. Проектирование производилось с учётом требований государственных и отраслевых стандартов. При проектировании пришлось учесть назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надёжность в работе и патентную чистоту.

|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------|--|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | Заключение                |  |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |                           |  |  | У               | 57   |        |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                           |  |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические машины: Курсовое проектирование. Учебное пособие по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения / В.В. Тодарев, В.В. Брель. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – 158 с.

2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов/ И.П. Копылов; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

3. Обмотки электрических машин: метод. указания к практ. занятиям и курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост.: В. С. Захаренко, В. В. Тодарев. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 49 с.

|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
|-----------|------|-------------|---------|------|---------------------------|--|--|-----------------|------|--------|
|           |      |             |         |      | КП.1-53 01 05.ЭП-21.48.ПЗ |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
| Изм       | Лист | № докум.    | Подпись | Дата | СПИСОК<br>ЛИТЕРАТУРЫ      |  |  | Литер.          | Лист | Листов |
| Разработ. |      | Рощин М.Ю.  |         |      |                           |  |  | у               | 58   |        |
| Проверил  |      | Тодарев В.В |         |      |                           |  |  | ГГТУ, гр. ЭП-21 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |
|           |      |             |         |      |                           |  |  |                 |      |        |