**ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ**

**Задача 1.** Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в табл. 1, определить:

* номинальный ток первичной I1H и вторичной I2H обмоток;
* ток холостого хода трансформатора I0;
* коэффициент мощности холостого хода cos φ0;
* угол магнитных потерь в стали δ;
* напряжение короткого замыкания UК
* параметры схемы замещения;
* построить внешнюю характеристику U2 = f(β);
* построить зависимость КПД от нагрузки η = f(β);
* построить в масштабе векторную диаграмму приведенного трансформатора.

При расчете параметров схемы замещения определить фактические значения сопротивлений r1, X1, Z1 первичной обмотки, приведенные и фактические значения сопротивлений r2/, X2/, Z2/, r2, X2, Z2 вторичной обмотки и сопротивления намагничивающей цепи r0, X0, Z0. Изобразить схему замещения.

**Задача 2.** Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором включен в сеть с номинальными значениями напряжения и частоты. Паспортные параметры двигателя приведены в табл. 2. По результатам расчета определить:

* потребляемую электрическую мощность в номинальном режиме P1Н;
* номинальный МН и максимальный Мmax момент;
* номинальный I1H и пусковой I1пуск ток;
* номинальное SH и критическое SКР скольжение;
* построить механическую характеристику n = f(M) или М = f(S);

Выполнить анализ возможности пуска двигателя при снижении напряжения на 17%. Привести схему включения при пуске для снижения пускового тока.

Таблица 1

Паспортные параметры трансформаторов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № варианта | Группа соединений | Паспортные данные |
| SНОМ,кВ∙А | U1НОМ, В | U20, B | uк,% | I0,% | РК,Вт | Р0,Вт |  |
| 0 | Y/Y0 - 0 | 10 | 6300 | 400 | 5,0 | 10,0 | 335 | 105 |  |
| 1 | Y/Δ - 11 | 20 | 6300 | 230 | 5,0 | 9,0 | 600 | 180 |  |
| 2 | Y/Y0 - 0 | 30 | 10000 | 400 | 5,0 | 9,0 | 850 | 300 |  |
| 3 | Y/Y0 - 0 | 50 | 10000 | 400 | 5,0 | 8,0 | 1325 | 440 |  |
| 4 | Y/Y0 - 0 | 75 | 10000 | 230 | 5,0 | 7,5 | 1875 | 590 |  |
| 5 | Y/Y0 - 0 | 100 | 10000 | 525 | 5,0 | 7,5 | 2400 | 730 |  |
| 6 | Y/Δ - 11 | 180 | 10000 | 525 | 5,0 | 7,0 | 4100 | 1200 |  |
| 7 | Y/Y0 - 0 | 240 | 10000 | 525 | 5,0 | 7,0 | 5100 | 1600 |  |
| 8 | Y/Δ - 11 | 320 | 35000 | 10500 | 6,5 | 7,5 | 6200 | 2300 |  |
| 9 | Y/Y0 - 0 | 420 | 10000 | 525 | 5,5 | 6,6 | 7000 | 2100 |  |
| 10 | Y/Y0 - 0 | 25 | 6000 | 230 | 4,5 | 3,0 | 600 | 125 |  |
| 11 | Y/Y0 - 0 | 25 | 10000 | 230 | 4,7 | 3,0 | 690 | 125 |  |
| 12 | Y/Δ - 11 | 25 | 6000 | 400 | 4,5 | 3,0 | 600 | 125 |  |
| 13 | Y/Δ - 11 | 25 | 10000 | 400 | 4,7 | 3,0 | 690 | 125 |  |
| 14 | Y/Y0 - 0 | 40 | 10000 | 230 | 4,5 | 3,0 | 880 | 180 |  |
| 15 | Y/Y0 - 0 | 40 | 6000 | 230 | 4,5 | 3,0 | 880 | 180 |  |
| 16 | Y/Y0 - 0 | 40 | 6000 | 400 | 4,7 | 3,0 | 1000 | 180 |  |
| 17 | Y/Δ - 11 | 40 | 10000 | 400 | 4,0 | 3,2 | 690 | 125 |  |
| 18 | Y/Δ - 11 | 63 | 6000 | 230 | 4,5 | 2,8 | 1280 | 260 |  |
| 19 | Y/Δ - 11 | 63 | 6000 | 400 | 4,5 | 2,8 | 1280 | 260 |  |
| 20 | Y/Y0 - 0 | 63 | 10000 | 230 | 4,7 | 2,8 | 1470 | 260 |  |
| 21 | Y/Y0 - 0 | 63 | 10000 | 400 | 4,7 | 2,8 | 1470 | 260 |  |
| 22 | Y/Y0 - 0 | 63 | 2000 | 400 | 4,7 | 2,8 | 1470 | 260 |  |
| 23 | Y/Y0 - 0 | 63 | 20000 | 230 | 4,7 | 2,8 | 1470 | 260 |  |
| 24 | Y/Y0 - 0 | 63 | 2000 | 400 | 4,5 | 2,8 | 1280 | 260 |  |
| 25 | Y/Δ – 11 | 100 | 10000 | 230 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 365 |  |
| 26 | Y/Δ - 11 | 100 | 10000 | 400 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 365 |  |
| 27 | Y/Δ - 11 | 100 | 6000 | 230 | 4,5 | 2,6 | 1970 | 365 |  |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 28 | Y/Y0 - 0 | 100 | 6000 | 400 | 4,5 | 2,6 | 1970 | 365 |  |
| 29 | Y/Δ - 11 | 100 | 20000 | 230 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 465 |  |

Окончание табл. 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 30 | Y/Y0 - 0 | 100 | 20000 | 400 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 465 |  |
| 31 | Y/Δ - 11 | 100 | 35000 | 230 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 465 |  |
| 32 | Y/Y0 - 0 | 100 | 35000 | 400 | 4,7 | 2,6 | 2270 | 465 |  |
| 33 | Y/Δ - 11 | 160 | 6000 | 230 | 4,5 | 2,4 | 2650 | 540 |  |
| 34 | Y/Δ - 11 | 160 | 6000 | 400 | 4,5 | 2,4 | 2650 | 540 |  |
| 35 | Y/Y0 - 0 | 160 | 10000 | 230 | 4,5 | 2,4 | 3100 | 540 |  |
| 36 | Y/Y0 - 0 | 160 | 10000 | 400 | 4,5 | 2,47 | 3100 | 540 |  |
| 37 | Y/Δ - 11 | 160 | 6000 | 690 | 4,5 | 2,4 | 2650 | 540 |  |
| 38 | Y/Δ - 11 | 250 | 6000 | 230 | 4,5 | 2,3 | 3700 | 780 |  |
| 39 | Y/Δ - 11 | 250 | 6000 | 400 | 4,5 | 2,3 | 3700 | 780 |  |
| 40 | Y/Y0 - 0 | 250 | 10000 | 230 | 4,7 | 2,3 | 4200 | 780 |  |
| 41 | Y/Y0 - 0 | 250 | 10000 | 690 | 4,7 | 2,3 | 4200 | 780 |  |
| 42 | Y/Y0 - 0 | 400 | 3000 | 400 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 43 | Y/Y0 - 0 | 400 | 6000 | 400 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 44 | Y/Y0 - 0 | 400 | 6000 | 690 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 45 | Y/Y0 - 0 | 400 | 6300 | 400 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 46 | Y/Y0 - 0 | 400 | 100000 | 230 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 47 | Y/Y0 - 0 | 400 | 10000 | 400 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 48 | Y/Y0 - 0 | 400 | 10000 | 690 | 4,5 | 3,2 | 5500 | 1080 |  |
| 49 | Y/Y0 - 0 | 630 | 3000 | 400 | 5,0 | 3,2 | 7600 | 1680 |  |
| 50 | Y/Y0 - 0 | 630 | 6000 | 400 | 5,0 | 3,2 | 7600 | 1680 |  |

Таблица 2

Паспортные параметры асинхронных двигателей

|  |  |
| --- | --- |
| № вар. | Паспортные данные асинхронных двигателей |
| UНОМ, В | РНОМ,кВт | SНОМ,% | ηНОМ | соs φном | р | Мmax Mном | Мпуск Mном | Iпуск/ Iном | nном, об/мин |
| 0 | 220 | 0.37 | - | 0.71 | 0.81 | - | 2.4 | 2.3 | 5.0 | 2800 |
| 1 | 380 | 1,5 | - | 0,79 | 0,87 | - | 3,0 | 2,8 | 6,5 | 2835 |
| 2 | 380 | 2,2 | - | 0,82 | 0,87 | - | 3,4 | 2,9 | 6,5 | 2820 |
| 3 | 380 | 1,1 | - | 0,77 | 0,80 | - | 2,6 | 2,3 | 5,5 | 1420 |
| 4 | 380 | 1,5 | - | 0,785 | 0,80 | - | 2,8 | 2,3 | 5,5 | 1420 |
| 5 | 380 | 0,75 | - | 0,70 | 0,72 | - | 2,5 | 2,2 | 4,0 | 935 |
| 6 | 380 | 1,1 | - | 0,72 | 0,72 | - | 3,0 | 2,2 | 4,0 | 925 |
| 7 | 380 | 3,0 | - | 0,83 | 0,86 | - | 2,6 | 2,4 | 7,0 | 2895 |
| 8 | 380 | 2,2 | - | 0,79 | 0,82 | - | 2,6 | 2,2 | 6,0 | 1420 |
| 9 | 380 | 3,0 | - | 0,81 | 0,81 | - | 2,6 | 2,2 | 6,2 | 1420 |
| 10 | 380 | 1,5 | - | 0,76 | 0,76 | - | 2,1 | 2 | 4,5 | 925 |
| 11 | 380 | 4,0 | - | 0,84 | 0,87 | - | 3,3 | 2,2 | 6,8 | 2895 |
| 12 | 380 | 4,0 | - | 0,855 | 0,84 | - | 2,9 | 2,2 | 6,5 | 1430 |
| 13 | 380 | 2,2 | - | 0,78 | 0,74 | - | 2,5 | 1,9 | 5,5 | 960 |
| 14 | 380 | 1,5 | - | 0,73 | 0,70 | - | 2,1 | 1,7 | 4,5 | 700 |
| 15 | 380 | 5,5 | - | 0,89 | 0,89 | - | 3,0 | 2,4 | 6,5 | 2880 |
| 16 | 380 | 7,5 | - | 0,89 | 0,89 | - | 3,2 | 2,5 | 7,0 | 2890 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 17 | 380 | 11,0 | - | 0,875 | 0,89 | - | 3,3 | 2,0 | 6,8 | 2940 |
| 18 | 380 | 15,0 | - | 0,90 | 0,86 | - | 3,2 | 2,0 | 7,5 | 2940 |

Окончание табл. 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 19 | 380 | 18,5 | - | 0,90 | 0,88 | - | 3,2 | 2,0 | 7,5 | 2940 |
| 20 | 380 | 30,0 | - | 0,92 | 0,89 | - | 3,0 | 2,4 | 7,5 | 2950 |
| 21 | 380 | 37,0 | - | 0,92 | 0,89 | - | 3,0 | 2,4 | 7,5 | 2950 |
| 22 | 380 | 18,5 | - | 0,87 | 0,82 | - | 2,7 | 1,8 | 5,5 | 970 |
| 23 | 380 | 22,0 | - | 0,87 | 0,84 | - | 2,5 | 2,0 | 6,0 | 970 |
| 24 | 380 | 15,0 | - | 0,88 | 0,80 | - | 2,5 | 2,0 | 5,7 | 730 |
| 25 | 380 | 22,0 | - | 0,91 | 0,88 | - | 2,9 | 2,1 | 7,0 | 1460 |
| 26 | 220 | 0,8 | 3,0 | 0,78 | 0,88 | 1 | 2,2 | 1,9 | 7,0 | - |
| 27 | 220 | 0,1 | 3,0 | 0,795 | 0,87 | 1 | 2,2 | 1,9 | 7,0 | - |
| 28 | 220 | 1,5 | 4,0 | 0,805 | 0,88 | 1 | 2,2 | 1,8 | 7,0 | - |
| 29 | 220 | 2,2 | 4,5 | 0,83 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,8 | 7,0 | - |
| 30 | 220 | 3,0 | 3,5 | 0,845 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 | - |
| 31 | 220 | 4,0 | 2,0 | 0,855 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 | - |
| 32 | 220 | 5,5 | 3,0 | 0,86 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,7 | 7,0 | - |
| 33 | 220 | 7,5 | 3,5 | 0,87 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,6 | 7,0 | - |
| 34 | 220 | 10 | 4,0 | 0,88 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,5 | 7,0 | - |
| 35 | 220 | 13 | 3,5 | 0,88 | 0,89 | 1 | 2,2 | 1,5 | 7,0 | - |
| 36 | 220 | 17 | 3,5 | 0,88 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,2 | 7,0 | - |
| 37 | 220 | 22 | 3,5 | 0,88 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,1 | 7,0 | - |
| 38 | 220 | 30 | 3,0 | 0,89 | 0,90 | 1 | 2,2 | 1,1 | 7,0 | - |
| 39 | 220 | 40 | 3,0 | 0,89 | 0,91 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 | - |
| 40 | 220 | 55 | 3,0 | 0,90 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 | - |
| 41 | 220 | 75 | 3,0 | 0,90 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 | - |
| 42 | 220 | 100 | 2,5 | 0,915 | 0,92 | 1 | 2,2 | 1,0 | 7,0 | - |
| 43 | 380 | 10 | 3,0 | 0,885 | 0,87 | 2 | 2,0 | 1,4 | 7,0 | - |
| 44 | 380 | 13 | 3,0 | 0,885 | 0,89 | 2 | 2,0 | 1,3 | 7,0 | - |
| 45 | 380 | 17 | 3,0 | 0,89 | 0,89 | 2 | 2,0 | 1,3 | 7,0 | - |
| 46 | 380 | 22 | 3,0 | 0,90 | 0,90 | 2 | 2,0 | 1,2 | 7,0 | - |
| 47 | 380 | 30 | 3,0 | 0,91 | 0,91 | 2 | 2,0 | 1,2 | 7,0 | - |
| 48 | 380 | 40 | 3,0 | 0,925 | 0,92 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 | - |
| 49 | 380 | 55 | 3,0 | 0,925 | 0,92 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 | - |
| 50 | 380 | 75 | 3,0 | 0,925 | 0,92 | 2 | 2,0 | 1,1 | 7,0 | - |

**ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

**Задача 1.** Для трехфазного трансформатора мощностью Sном = 100 кВ∙А, соединение обмоток Y/Y0 – 0, известно: номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора U1 ном = 6000 В, напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода U20 = 400 В, напряжение короткого замыкания uк = 5,5 %, мощность короткого

замыкания РК = 2400 Вт, мощность холостого хода Р0 = 600 Вт, ток холостого хода i0 = 7,0 %.

Определить: 1) сопротивление обмоток трансформатора R1, X1, R2, X2; 2) сопротивление намагничивающей цепи Z0 и его составляющие R0 и X0, которыми заменяется магнитная цепь трансформатора; 3) угол магнитных потерь δ.

Построить характеристики трансформатора: 1) зависимость U2 = f(β) напряжения от нагрузки (внешняя характеристика); 2) зависимость η = f(β) коэффициента полезного действия от нагрузки; β – коэффициент нагрузки трансформатора (коэффициент мощности нагрузки принять cos φ2 = 0,75).

Построить векторную диаграмму трансформатора при нагрузке, составляющей 0,8 от номинальной мощности трансформатора Sном и cos φ2

= 0,75). Составить Т-образную схему замещения трансформатора.

**Решение.**

* Полная паспортная мощность трансформатора Sном соответствует вторичной обмотке. Так как КПД трансформатора близок к 100 %, то значение Sном близко к мощности его первичной обмотки. Для трехфазного трансформатора Sном = 3 ∙U1ном I1ном, где U1ном и I1ном номинальные значения напряжения и тока первичной обмотки. Отсюда

*I*1*ном* =

*Sном*

= 100 ×1000 *Вт* = 9,62 *А* .

3 × 6000 *В*

По условию ток холостого хода i0 = 7,0 %, тогда фактическое значение I0 = 0,07∙9,62 А = 0,67 А.

Мощность потерь холостого хода Р0 = 3 ∙U1ном I0∙cosφ0,

где φ0 – сдвиг фаз между током и напряжением в первичной обмотке, откуда

cos*j*0 = 0

= 600 *Вт*

3 × 6000 *B* × 0,67 *A*

= 0,086 , а угол φ0 = arcos (0,086) = 85,07°.

Угол магнитных потерь δ = 90° - φ0 ≈ 90° - 85° = 5°.

Напряжение короткого замыкания uк = 5,5 % от U1ном, где U1ном - линейное значение напряжения. По условию трансформатор включен по схеме Y/Y0, тогда действующее значение линейного напряжения короткого замыкания UК = 0,055∙6000 В = 330 В, а значение фазного напряжения

короткого замыкания

*U КФ*

= *UК* = 190,5 *В* .

Ток короткого замыкания IК соответствует номинальному значению I1ном. При соединении в звезду линейный ток равен фазному, поэтому IК = IКФ = I1 ном = 9,62 А.

Коэффициент трансформации трансформатора

*k* = *U*1*НОМ* = 6000 *В* =15

*U*20

400 *В*

* **Расчет сопротивлений схемы замещения трансформатора**

Полное сопротивление короткого замыкания фазы

*Z* = *U КФ*

*I КФ*

= 190,5 *В* = 19,8 *Ом* .

9,62 *А*

Мощность потерь короткого замыкания PК = 3∙(IК)2∙RК, откуда

активное сопротивление короткого замыкания

*RК* =

*PК*

3 × I2

= 2400

3 × 9,62

= 8,7 *Ом* .

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

*ХК* = = =17,9 *Ом* .

По найденным значениям сопротивлений короткого замыкания можно определить синус и косинус угла сдвига фаз между током и напряжением в режиме КЗ:

*сosj* *RК*

*К*

= 8,7

19,8

= 0,44 и

sin *j* *X К К*

= 17,9 = 0,9

19,8

Активное сопротивление первичной обмотки

R = (R )¢ = RК = 8,7 *Ом* = 4,35 *Ом*.

1 2 2 2

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

X = (X )¢ = XК = 17,9 *Ом* = 8,95 *Ом*.

1 2 2 2

Активное сопротивление вторичной обмотки

*R* = *R*2¢ = 4,35 *Ом* = 0,0193*Ом* .

2 *k* 2

225

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

*Х* = *Х* 2¢ = 8,95 *Ом* = 0,0398 *Ом* .

2 *k* 2

225

Сопротивления намагничивающей цепи:

- полное

*Z* = *U*1*НОМФ* =

*I*0*Ф*

6000*В*

3 × 0,67 *А*

= 5180*Ом* ;

- активное

*R*0 =

*P*0

3 × *I* 2

= 600 *Вт*

3 × (0,67 *А*)2

= 447 *Ом* ;

- индуктивное *Х* 0 = =

=5160 *Ом* .

* **Расчет КПД трансформатора.** КПД трансформатора:

*h* = *b* × *SНОМ* × *соsj*2 ,

*b* × *S*

*НОМ*

× *соsj*2

*
* *P*0

+ *b* 2 × *P*

где β – коэффициент нагрузки трансформатора. Так как параметры SНОМ, P0, PК и cosφ2 являются постоянными, КПД является функцией только одной переменной β, то есть η = f(β). Задаваясь набором дискретных значений β (0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0.3; 0,5; 0.6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0) можно

вычислить соответствующие значения η. Результаты расчета занесем в табл. 3.

Коэффициент нагрузки имеет максимальное значение, которое вычисляется по паспортным значениям для мощностей потерь P0 и PК:

*b*max = =

= 0,5

и тогда ηmax = η(βmax) = 0,969.

* **Расчет потери напряжения и параметров внешней характеристики.** При изменении коэффициента нагрузки напряжение на вторичной обмотке изменяется:

Δu2 = β∙(uка∙cos φ2 + uкр∙sin φ2),

где uка и uкр – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания uк, выраженные в процентах или относительных единицах, причем uка = uк∙cos φк, а uкр = uк∙sin φк. Подставляя вычисленные ранее значения, получим uка = 5,5∙0,44 = 2,42 и uкр = 5,5∙0,9 = 4,95. Так как uк, cos φк и cosφ2 величины постоянные, то зависимость Δu2 = f(β) является линейной: Δu2(β) = k∙β, где k =(uка∙cos φ2 + uкр∙sin φ2) = 2,42∙ 0,75 + 4,95∙ 0,66

= 5,082 (%). В итоге Δu2 = 5,082 ∙β, u2 = 100%-Δu2 = 100% - 5,082 ∙β, а

абсолютное значение U2 = u2∙U20. Зависимость линейна, ее можно построить по двум точкам, но для последующих расчетов значения u2 и U2 вычисляются для выбранного выше набора дискретных значений β и заносятся в табл. 3.

Таблица 3 Результаты расчета КПД и напряжения на вторичной обмотке

|  |  |
| --- | --- |
| Пара- метр | Коэффициент нагрузки трансформатора β |
| β | 0,01 | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| η | 0,555 | 0,757 | 0,904 | 0,924 | 0,956 | 0,965 | 0,967 | 0,969 | 0,967 | 0,966 | 0,964 | 0,963 | 0,962 |
| Δu2, % | - | - | - | 0,507 | 1,014 | 1,521 | 2,028 | 2,535 | 3,042 | 3,549 | 4,056 | 4,563 | 5,070 |
| U2, В | - | - | - | 397,97 | 395,94 | 393,92 | 391,89 | 389,86 | 387,83 | 385,80 | 383,78 | 381,75 | 379,72 |

* **Построение векторной диаграммы**

По условию векторную диаграмму требуется построить для коэффициента нагрузки β = 0,8 и коэффициента мощности нагрузки cos φ2

= 0,75. Векторная диаграмма строится для одной фазы, поэтому все величины должны быть рассчитаны для фазных значений.

Из таблицы 3 для заданных параметров линейное напряжение

U2(0,8) = 383,78 В, тогда фазное

*U*2*ф*

= *U*2 *л*

= 383,78 = 221,8 В.

3

Приведенное значение вторичного напряжения

U**′** = U ∙k = 221,8 B ∙15 = 3327,6 B.

Вектор тока I2ф отстает по фазе от вектора напряжения U2ф на заданный угол φ2 и для β = 0,8 имеет значение I2 = 0,8∙I2ном, где I2ном вычисляется через полную паспортную мощность Sном:

*I*2*ном* =

*Sном*

= 100 ×1000 = 144,51 А.

1,73× 400

Тогда I2ф(0,8) = 0,8∙144,51 = 115,6 А, а приведенное значение тока I′2ф =

I2ф = 115,6 = 7,71

А. Сдвиг фаз между приведенными значениями тока и

k 15

напряжения I′2ф и U′2ф остается неизменным, то есть φ2. Построение векторной диаграммы удобно начать с векторов I′2ф, U′2ф и угла φ2.

Рекомендуется выполнять следующие подготовительные операции и требования:

* изображать диаграмму по размерам страницы или на отдельном листе миллиметровой бумаги;
* выбрать масштаб для векторов исходя из размеров листа и значений параметров;
* внимательно рассмотреть взаимное расположение векторов на типовой векторной диаграмме и по возможности придерживаться того же расположения. Обратить внимание на то, что векторы U′2ф, Е1 и Е′2 ориентируются вниз под небольшим углом (ориентация может быть совершенно произвольной).

С учетом замечаний начинают выполнять диаграмму с вектора U′2ф, который направляется от середины листа вниз. Под углом φ2 к вектору U′2ф строится вектор тока I′2ф, который отстает от напряжения и сдвинут по фазе по часовой стрелке.

Вектор ЭДС Е′2 строится на основе уравнения электрического состояния вторичной обмотки:

Е′2 = U′2ф + I′2ф∙r′2 + jI′2ф∙X′2,

где модуль произведения I′2ф∙r′2 = 7,71 А ∙4,35 Ом = 33,6 В;

а I′2ф∙X′2 = 7,71 А ∙8,95 Ом = 68,3 В.

Вектор I′2ф∙r′2 есть напряжение на активном сопротивлении, по фазе совпадает с направлением тока I′2ф. Изобразим его на векторной диаграмме, совмещая начало с концом вектора U′2ф. Вектор jI′2ф∙X′2 есть напряжение на индуктивном сопротивлении, оно опережает напряжение I′2ф∙r′2 на угол 90°. Изобразим его, совмещая начало с концом вектора I′2ф∙r′2 с поворотом на 90° против часовой стрелки.

Примечание. Для наглядности рисунок выполнен с нарушением пропорций напряжений относительно общего масштаба.

Фрагмент векторной диаграммы для описанной части на рис. 1.

E′2

Рис. 1. Фрагмент векторной диаграммы

Вектор магнитного потока Фm по закону электромагнитной индукции всегда опережает наведенную им ЭДС Е′2 и Е1 на угол 90°. Изобразим его из начала векторной диаграммы с поворотом против часовой стрелки в произвольном масштабе. Ток холостого хода I0 опережает магнитный поток на угол потерь δ = 5°. После его построения на основе уравнения

намагничивающих токов (I1ф = I0 - I′2ф) можно изобразить вектор тока первичной обмотки I1ф.

Вектор напряжения первичной обмотки U1 строится на основе уравнения электрического состояния первичной обмотки:

U1 = - E1 + I1ф∙r1 + jI1ф∙X1,

где произведение I1ф∙r1 есть падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки, а I1ф∙X1 на ее индуктивном сопротивлении.

В этих произведениях неизвестен ток I1ф, соответствующий току I2ф при β = 0,8. Его можно определить по масштабу на векторной диаграмме или пренебречь током I0 в уравнении намагничивающих токов и принять, что I1ф = I′2ф = 7,71 А. Тогда I1ф∙r1 = I′2ф∙r′2 =33,6 В, а I1ф∙X1 = I′2ф∙Х′2 = 68,3 В.

Построение векторов уравнения U1 = - E1 + I1ф∙r1 + jI1ф∙X1 аналогично построению векторов по уравнению электрического состояния вторичной обмотки. При этом необходимо учесть условие, что Е1 = Е′2 и что вектор E1 по направлению противоположен вектору - E1.

В итоге векторная диаграмма в целом будет соответствовать рис. 3, а схема замещения рис. 2.

R1 X1

X**′**2

R**′**2

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  | X0 |
|  |  |

Рис. 2. Схема замещения трансформатора

**Задача 2.** Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором Рном = 10 кВт, номинальное напряжение Uном = 380 В, номинальная частота вращения ротора nном =

1420 об/мин, номинальный КПД ηном = 0,84 и номинальный коэффициент мощности cos φном = 0,85. Кратность пускового тока I пуск/Iном = 6,5, а перегрузочная способность двигателя λ = 1,8.

Рис. 3. Векторная диаграмма трансформатора для β = 0,8 и соs φ2 = 0,75

Определить: 1) потребляемую мощность; 2) номинальный и

максимальный (критический) вращающие моменты; 3) пусковой ток; 4) номинальное и критическое скольжения. Построить механические характеристики М = f(S) и n = f(M).

**Решение.**

* **Расчет потребляемой мощности**

КПД двигателя

*h* = *Рмех* =

*Рэл*

*Рном* ,

*Р*1*ном*

где Рмех = Рном – полезная механическая мощность на валу двигателя, Рэл = Р1 ном – потребляемая из сети электрическая мощность.

Следовательно, потребляемая мощность

*Р*1*ном*

= *Рном* =

*h*

10

0,84

= 11,9

кВт.

* **Расчет номинального и максимального моментов**

Номинальный момент

*М* = 9550 × *Рном* = 9550 ×

*ном*

10

1420

= 67,3 Н∙м.

Перегрузочная способность по максимальному моменту

*l* = *М* max ,

*Mном*

где Mmax и Mном – максимальный и номинальный моменты соответственно, откуда

Мmax = λ∙Mном = 1,8 ∙ 67,3 = 121,1 Н∙м.

* **Расчет номинального и пускового токов**

Номинальная мощность двигателя

Р1 ном = 3 ∙Uном ∙ Iном ·cos φном,

следовательно,

*Iном* =

*P*1*ном*

= 11,9 ×1000 3 × 380 × 0,84

= 21,5 А.

С учетом кратности пускового тока Iпуск = 6,5∙Iном = 6,5∙21,5 = 139,8 А.

* **Расчет номинального и критического скольжения**

По определению, скольжение

*S* = *n*1 - *n*2 ,

*n*1

где n1 – частота вращения магнитного поля статора, n2 - частота вращения ротора.

Для номинального режима n2 = nном = 1420 об/мин, частота вращения магнитного поля n1 может составлять только 1500 об/мин и тогда:

*S* = *n*1 - *nном* = 1500 -1420 = 0,053

или 5,3 %.

*ном*

1

1500

Критическое скольжение: Sкр = Sном∙(λ+

) = 0,053∙(1,8 +

) = 0,175.

* **Построение механической характеристики**

В практических задачах механическую характеристику М = f(S) строят на основе уравнения Клосса:

*M* = 2 × *M* max = 2 × *M* max .

*Sкр S*

*
* *S Sкр*

0,175 +

*S*

*S*

0,175

Построение графика можно выполнить в программе Matchad по аналитическому выражению или построить по точкам. Во втором случае скольжению S задается набор значений в интервале от 0 до 1 и одновременно для каждого значения S вычисляется частота вращения n2. Результаты расчетов заносятся в табл. 4. Построение механических характеристик в программе Matchad приведено на рис. 4 и 5. Для корректной работы программы Matchad диапазон изменения переменных и аналитические выражения должны быть приведены выше и левее поля графиков.

Таблица 4

Точки механической характеристики двигателя

|  |  |
| --- | --- |
| Парамет | Номер точки |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| р | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| S | 0,053 | 0,1 | 0,175 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| n,об/мин | 1420 | 1350 | 1238 | 1200 | 1050 | 900 | 750 | 600 | 450 | 300 | 150 | 0 |
| M, Н∙м | 67,3 | 104,3 | 121,0 | 120,5 | 105,3 | 88,8 | 75,5 | 65,2 | 57,0 | 50,5 | 45,5 | 41,2 |

S := 0, 0.001.. 1

M(S) :=

242

0.175 +

S

S 0.175

150

135

120

105

90

M(S)



75

60

45

30

15

0

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

S

n2 := 0, 1.. 1500

Рис. 4. Механическая характеристика двигателя М = f(S), построенная в программе Matchad

M(n2) :=

242

0.175×1500 +

1500 - n2

1500 - n2

0.175×1500

1600

1400

1200

1000

n2 800

600

400

200

Рис. 5. Механическая характеристика двигателя n2 = f(M), построенная в программе Matchad

**ЛИТЕРАТУРА**

**Основная:**

* Набиев Ф.М. Электрические машины: учеб. пособие для вузов -2-е изд./ Ф.М. Набиев, И.И. Алиев. – М.: РадиоСофт, 2014. – 256 с.
* Алиев И.И. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. / И.И. Алиев.– СПб.: Питер, 2014. – 448 с.

**Дополнительная:**

* Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов / А.И. Вольдек– СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
* Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
* Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные / В.Л. Лихачев. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
* Зайцев А.В. Асинхронный электропривод подъемно-транспортных машин: учеб. пособие / А.В. Зайцев. – Саратов: СООО «АН ВЭ», 2011. - 258 с.
* Данку А. Электрические машины: сборник задач и упражнений; пер с венг./ А. Данку, А. Фаркаш, Л. Надь.- М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.
* Соколов Б.П. Электротехника и основы электроники: методические указания и контрольные задания для студентов-заочников / Б.П. Соколов, В. Б. Соколов. – М: Высшая школа, 1985. - 107 с.