**Задание на типовой расчет**

**Пуск и торможение электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения**

1. Построить естественную и реостатную механические характеристики электропривода

$R\_{д}=\left(1+0,1\*9\right)R\_{я}=1,9R\_{я}$.

1. Построить электромеханические характеристики процессов реостатного пуска и торможения электропривода.
2. Построить динамические характеристики $i(t)$; $ω(t)$.
3. Составить принципиальную схему электропривода.
4. Проверить двигатель по нагреву.

**Исходные данные:**

1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения:

$P\_{н}=$ 10 кВт – номинальная мощность двигателя;

$U\_{н}=$ 220 В – номинальное напряжение;

$I\_{н}=$ 52,2 А – номинальный ток;

$n\_{н}=$ 2250 об/мин – номинальная скорость;

$J\_{дв}=$ 0,125 кг·м2 – момент инерции двигателя.

1. Добавочное сопротивление в якорной цепи для построения реостатной механической характеристики

$R\_{д}=\left(1+0,1\*9\right)R\_{я}=1,9R\_{я}$, Ом.

1. Момент холостого хода двигателя

$M\_{0}=0,01\*9M\_{н}=0,09M\_{н}$, Н·м,

где $M\_{н}$ – номинальный момент двигателя.

1. Момент на исполнительном валу при пуске и торможении электродвигателя

$$M\_{и.в}=\frac{\left(1+9\right)}{12}M\_{н}=\frac{10}{12}M\_{н}, Н∙м.$$

1. Момент инерции исполнительного механизма

$$J\_{и.м}=\frac{3\*9^{2}J\_{дв}}{2}=\frac{3\*9^{2}\*0,125}{2}=15,1875 кг∙м^{2}.$$

1. Передаточное отношение кинематической цепи от вала двигателя до исполнительного вала

$i\_{кц}=$ 9.

1. КПД кинематической цепи

$η\_{кц}=0,98-0,01\*9=$ 0,89.

1. Число ступеней динамического торможения – 1.
2. Число пусковых реостатов – 4.
3. Нагрузочная диаграмма, приведенная к валу двигателя:

$M\_{1}=\left(1+0,1\*9\right)M\_{н}=1,9M\_{н}$, Н·м,

$M\_{2}=0,6M\_{н}$, Н·м,

$M\_{3}=1,2M\_{н}$, Н·м,

$t\_{1}=2∙9=18$ c,

$t\_{2}=20$ c,

$t\_{3}=10$ c.

*Решение.*

1. Построить естественную и реостатную механические характеристики электропривода

Применим следующие допущения: реакция якоря не учитывается, момент на валу двигателя равен электромагнитному моменту.

Тогда для установившегося режима можно записать:

$$\left\{\begin{array}{c}\begin{array}{c}U=E\_{я}+I\_{я}R\\E\_{я}=kФω\end{array}\\M=kФI\end{array},\right.$$

где: $R=R\_{я}+R\_{д}$,

$$k=\frac{pN}{2πa},$$

*р -* число пар полюсов,

*N -* число активных проводников обмотки якоря,

*а* - число параллельных ветвей обмотки якоря.

Решая систему уравнений, получим формулу для механической характеристики:

$$ω\left(M\right)=\frac{U}{kФ}-\frac{MR}{\left(kФ\right)^{2}}.$$

*Естественная механическая характеристика двигателя* $\left(при R\_{д}=0\right)$

$R=R\_{я}+R\_{д}=R\_{я} $.

Для построения механической характеристики двигателя достаточно знать 2 точки. Рассчитаем 3:

1. Номинальный режим работы

$$ω\_{ном}=\frac{2πn\_{ном}}{60}=\frac{2∙π∙2250}{60}=235,6 рад/с,$$

$$M\_{ном}=\frac{P\_{ном}}{ω\_{ном}}=\frac{10000}{235,6}=42,44 Н∙м.$$

2. Х.Х.

*М* = *I* = 0, *ω* = *ω*0

$$R\_{я}=0,5\left(\frac{U\_{ном}}{I\_{ном}}-\frac{P\_{ном}}{I\_{ном}^{2}}\right)=0,5\*\left(\frac{220}{52,2}-\frac{10000}{52,2^{2}}\right)=0,272 Ом,$$

$$kФ\_{ном}=\frac{U\_{ном}-I\_{ном}R\_{я}}{ω\_{ном}}=\frac{220-52,2\*0,272}{235,6}=0,874 Вб,$$

$$ω\_{0}=\frac{U}{kФ}=\frac{220}{0,874}=251,7 рад/с.$$

*Реостатная механическая характеристика двигателя* при $R\_{д}=1,9R\_{я}$.

Рассчитаем $R\_{д}$.

$$R\_{д}=1,9R\_{я}=1,9\*0,272=0,517 Ом.$$

Тогда полное сопротивление в цепи якоря

$$R=R\_{я}+R\_{д}=0,272+0,517=0,789 Ом.$$

Параметры в точке ХХ остаются те же.

Для номинального режима

$$ω\_{ном.р}=\frac{U}{kФ}-\frac{MR}{\left(kФ\right)^{2}}=\frac{220}{0,874}-\frac{42,44\*0,789}{0,874^{2}}=207,9\frac{рад}{с}.$$

На рис. 1 представлены графики естественной и реостатной механических характеристик двигателя

Рис. 1. Графики естественной и реостатной механических характеристик двигателя

1. Построить электромеханические характеристики процессов реостатного пуска и торможения электропривода.

Задаёмся максимальным пусковым током переключения

Iпер = 2,5 Iном = 2,5\*52,2 = 130,5 А в допустимых пределах, с учётом которого можно определить пусковой момент Мп

$$M\_{п}=kФI\_{пер}=0,874\*130,5=114,057 Н∙м$$

В относительных единицах Мп и Rдв = RЯ;

$$M\_{п}^{\*}=\frac{M\_{п}}{M\_{ном}}=\frac{114,057}{42,44}=2,69$$

$$R\_{н}=\frac{U\_{н}}{I\_{н}}=\frac{220}{52,2}=4,215 Ом.$$

$$R\_{g}^{\*}=\frac{R\_{дв}}{R\_{н}}=\frac{0,272}{4,215}=0,065.$$

$$λ=\sqrt[m]{\frac{1}{R\_{g}^{\*}M\_{п}^{\*}}}=\sqrt[4]{\frac{1}{0,065\*2,69}}=1,55$$

$$λ=\frac{M\_{п}}{M\_{2}}=>M\_{2}=\frac{M\_{п}}{λ}=\frac{114,057}{1,55}=73,6 Н∙м$$

$$I\_{2}=\frac{M\_{2}}{kФ}=\frac{73,6}{0,874}=84,2 А $$

Сопротивления ступеней пускового реостата













Момент статистической нагрузки:

$$M\_{с}=M\_{0}+\frac{M\_{и.в}}{η\_{кц}i\_{кц}}=0,09M\_{н}+\frac{\frac{10}{12}M\_{н}}{η\_{кц}i\_{кц}}=0,09\*42,44+\frac{\frac{10}{12}\*42,44}{0,89\*9}=8,23 Н∙м$$

$$I\_{c}=\frac{M\_{c}}{kФ}=\frac{8,23}{0,874}=9,4 А.$$

Угловые скорости электропривода для моментов М2 и МС для *i*-ых ступеней пусковой диаграммы

















Рис. 2. Электромеханические статические характеристики при пуске и динамическом торможении

1. Постоянные времени для *i*-ых ступеней



Момент инерции двигателя Д-812 берём в каталожных данных:.

Момент инерции исполнительного механизма , приведенный к валу двигателя, определяем как



Суммарный момент инерции привода , 













Время торможения и разгона на i-ой ступени













Результаты вычислений

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № i-ой ступени | Ri | TM | ωнач | ωкон | ωС | $$E\_{i}$$ | T | ω | Mнач | М |
| Размерность | Ом | с | Рад/с | Рад/с | Рад/с | В | с | Рад/с | H·м | H·м |
| *0**естественная характеристика* | 0,023 | 0,013 | 58,38 | 59,17 | 59,78 | 215,6 | 0,00 | 58,58 | 1165 | 865,60 |
| 0,00 | 58,77 | 665,32 |
| 0,01 | 58,927 | 525,55 |
| 0,01 | 59,06 | 424,68 |
| 0,01 | 59,172 | 349,93 |
| ***1****искусственная**характеристика* | 0,071 | 0,039 | 54,13 | 58,38 | 58,52 | 212,7 | 0,01 | 56,26 | 1165 | 768,69 |
| 0,02 | 57,359 | 564,83 |
| 0,02 | 57,924 | 460,17 |
| 0,03 | 58,214 | 406,43 |
| 0,04 | 58,363 | 378,84 |
| ***2****искусственная**характеристика* | 0,221 | 0,122 | 40,98 | 54,13 | 54,57 | 197,2 | 0,02 | 47,67 | 1165 | 763,01 |
| 0,05 | 51,075 | 559,03 |
| 0,07 | 52,8 | 455,73 |
| 0,10 | 53,674 | 403,41 |
| 0,12 | 54,116 | 376,92 |
| ***3****искусственная**характеристика* | 0,685 | 0,378 | 0 | 40,98 | 42,34 | 149,3 | 0,08 | 20,94 | 1165 | 762,10 |
| 0,15 | 31,528 | 558,11 |
| 0,23 | 36,876 | 455,03 |
| 0,30 | 39,579 | 402,94 |
| 0,38 | 40,945 | 376,62 |
| ***4****искусственная**характеристика* | 0,756 | 0,417 | 59,78 | 0 | -20,5 | 217,8 | 0,0834 | 43,277 | 349 | 286,33 |
| 0,1668 | 31,716 | 234,43 |
| 0,2502 | 22,251 | 191,93 |
| 0,3336 | 14,502 | 157,14 |
| 0,417 | 8,1569 | 128,66 |

1. **Расчет переходных процессов**

Переходные характеристики пуска и торможения электропривода для скорости и момента строятся по следующим формулам:





$$\overset{Пуск}{\overbrace{ } }\overset{Торможение}{\overbrace{ }}$$

Рис. 3. Переходные процессы момента и скорости

при пуске и динамическом торможении

4. Управление в функции скорости требует контроля скорости двигателя с последующим воздействием на соответствующий аппарат. Устройства, контролирующие непосредственно скорость двигателя, например, тахогенераторы или центробежные регуляторы, применяются сравнительно редко, так как существенно усложняют схему управления и снижают ее надежность. Поэтому скорость двигателя часто контролируется косвенным путем - измерением других параметров, однозначно связанных со скоростью. Для двигателей постоянного тока с независмымым возбуждением (далее ДПТ) таким параметром является ЭДС двигателя, которая при неизменном магнитном потоке двигателя пропорциональна его скорости.

Принципиальная электрическая схема пуска реверсивного ДПТ в четыре ступени в функции скорости и с динамическим торможением в одну ступень приведена на рис. 1.

Как ДПТ М, так и схема управления им подключены к источнику питания через автоматические выключатели QF1 и QF2. Якорь двигателя М включается контактами контакторов КМ1 и КМ2. Последовательно с якорем включаются пусковые сопротивления R5, являющиеся в данной схеме одновременно регулировочными. Каждая пусковая ступень может быть зашунтирована соответствующим контактом контакторов ускорения КМ4, КМ5 и КМ6, катушки которых включены непосредственно на якорь двигателя и с помощью резисторов R1, R2 и R3 настроены на включение при определенной скорости.

При включении автоматических выключателей QF1 и QF2 втягивается реле KV2, обеспечивая работоспособность схемы пуска.

Пуск двигателя в необходимую сторону осуществляется путем нажатия кнопки «Пуск» - SB2 или SB3. При этом включается контактор КМ1 или КМ2 и двигатель подключается в сеть. ДПТ начинает разгоняться с полностью включенным пусковым сопротивлением в цепи якоря R5. По мере разгона двигателя растет его ЭДС, и, соответственно, растет напряжение на катушках контакторов КМ4, КМ5 и КМ6. При скорости двигателя Ω1 включается контактор КМ4 и закорачивает первую ступень пускового резистора R5.1, при скорости двигателя Ω2 включается контактор КМ5 и закорачивает вторую ступень пускового резистора R5.2, при скорости двигателя Ω3 включается контактор КМ6 и закорачивает третью ступень пускового резистора R5.3. Двигатель выходит на естественную характеристику. Пуск заканчивается в точке установившегося режима, где момент двигателя равен статическому моменту при пуске.



Рис. 1. Принципиальная электрическая схема пуска реверсивного ДПТ в четыре ступени в функции скорости и с динамическим торможением в одну ступень

Остановка двигателя динамическим торможением осуществляется нажатием на кнопку «СТОП» - SВ1. При этом отключается линейный контактор КМ1 (КМ2) и отключает двигатель от сети. Кроме того, замыкается его размыкающий вспомогательный контакт КМ1.3 (контакт КМ2.3 уже замкнут) в цепи катушки реле КV1, подключённого к якорю двигателя. Реле КV1 включается и замыкает свой контакт в цепи контактора динамического торможения КМ3. Он включается и подключает якорь двигателя на тормозной резистор R4. Происходит динамическое торможение двигателя. Процесс торможения будет происходить до некоторой минимальной скорости, при которой реле КV1 отключается. Далее остановка двигателя происходит самовыбегом. Реле КА1, также включенное последовательно якорю двигателя, обеспечивает тепловую защиту ДПТ. Обмотка возбуждения двигателя LM при отключении от сети замыкается на разрядное сопротивление R6, обеспечивающему защиту от перенапряжений. Нулевую защиту обеспечивают катушки контакторов КМ1 и КМ2, контролирующие наличие напряжение сети. Защиту от обрыва поля обеспечивает реле KV2, включенное последовательно с обмоткой возбуждения.

**5. Проверка двигателя по нагреву**

Проверка двигателя по нагреву произведем по рекомендациям, изложенным в [6] , по методу эквивалентного момента. По этой методике эквивалентный момент за полный цикл работы не должен превышать номинального момента двигателя



Эквивалентный момент двигателя за полный цикл работы определяется как:

******

где ****** - рабочие моменты двигателя на первом, втором, третьем и т.д. участках времени (Н·м).

 ****** - длительность первого, второго, третьего и т. д. участков, с.

Тогда рабочий момент на первом и пятом участках определим как:

******

Аналогичным образом по формуле (6.3) находим рабочие моменты для других участков при пуске. Для второго и шестого участков:

******

Для третьего участка:

******

Тогда находим рабочие моменты на участках торможения:

 ******

Для рассматриваемого цикла



Где ****** и ****** - коэффициенты, учитывающие ухудшение условий охлаждения соответственно при пуске, торможении и остановке.
Для закрытых самовентилируемых двигателей, каким и является рассматриваемый двигатель, коэффициент ****** равен 0,5. Коэффициент рассчитываем по следующей формуле:

******

Подставляя числовые значения в формулу, мы получим следующее значение эквивалентного момента:



Полученный эквивалентный момент не превышает номинального момента двигателя, равного 699,456. Эквивалентный и номинальный момент двигателя незначительно отличаются от друг друга, следовательно, двигатель будет эффективно использован по нагреву.