

## Тема 8

---

### Энергетика переходных процессов в электроприводе

1. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе без нагрузки.
2. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе с постоянной нагрузкой.
3. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе без нагрузки.
4. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе с нагрузкой.
5. Определение передаточного числа в электроприводе.
6. Способы уменьшения потерь энергии в переходных режимах.
7. Расчет допустимого числа включений в час.

## Энергетика переходных процессов в электроприводе.

Работа большинства электрифицированных машин происходит в условиях переменных нагрузок, регулирования скорости, пуска, торможения, реверсирования. Все эти нестационарные режимы приводят к изменению скорости, запаса кинетической энергии в подвижных частях агрегата, тока в обмотках двигателя и величины переменных потерь. Постоянные потери, связанные с изменением магнитного потока, и потери на трение в подшипниках в переходных процессах изменяются незначительно и в рассматриваемом анализе не учитываются. Переходные процессы, как правило, протекают при повышенных токах, что приводит к увеличению переменных потерь, влияющих на общий расход электрической энергии, и вызывающих повышенный нагрев электродвигателей. Поэтому анализ факторов, определяющий величину потерь энергии при переходных процессах, представляется весьма важным. Рассмотрим методы расчета потерь энергии в наиболее типичных переходных режимах двигателей постоянного и переменного тока.

### 1. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе без нагрузки

Если уравнение баланса напряжений якорной цепи умножить на ток якоря, получим уравнение баланса мощностей

$$UI_{\dot{y}} = EI_{\dot{y}} + I_{\dot{y}}^2 r_{\dot{y}} \quad (\text{Э.1.1})$$

Здесь  $U$  и  $E$  – напряжение сети и э.д.с. якоря;

$I_{\dot{y}}$  и  $r_{\dot{y}}$  – ток якоря и сопротивление якорной цепи.

Предполагается, что сопротивление якорной цепи включает сопротивление обмотки якоря и добавочные сопротивления, если такие имеются.

где  $UI_{\dot{y}}$  – мощность, подведенная к якорю из сети;

$EI_{\dot{y}}$  – мощность, преобразуемая двигателем в механическую;

$I_{\dot{y}}^2 r_{\dot{y}}$  – потери мощности в сопротивлениях якорной цепи.

Энергия, подведенная к двигателю из сети за время переходного процесса определится из выражения:

$$A_{\dot{n}} = \int_{t_1}^{t_2} UI_{\dot{y}} dt \quad (\text{Э.1.2})$$

Энергия, преобразуемая в механическую

$$A_{i\dot{a}\dot{o}} = \int_{t_1}^{t_2} EI_{\dot{y}} dt \quad (\text{Э.1.3})$$

Потери энергии в двигателе (электрические потери) найдем как разность энергии, подведенной из сети и преобразованной в механическую

$$\Delta A_{\dot{y}\dot{e}} = A_{\dot{n}} - A_{i\dot{a}\dot{o}} \quad (\text{Э.1.4})$$

Здесь  $t_1$  и  $t_2$  — время начала и окончания переходного процесса.

Напряжение в ( $A_{\bar{n}} = \int_{t_1}^{t_2} UI_{\bar{y}} dt$ ) выразим через магнитный поток и угловую

скорость идеального холостого хода:

$$U = c\hat{O}\omega_{\bar{i}} \quad (\text{Э.2.1})$$

Ток якоря в найдем из формулы электромагнитного момента:

$$M_{\bar{a}} = c\hat{O}I_{\bar{y}} \quad (\text{Э.2.2})$$

С другой стороны, момент, развиваемый двигателем при  $M_c=0$ , как следует из уравнения движения, равен динамическому

$$M_{\bar{a}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Э.2.3})$$

Приравняв между собою правые части выражений ( $M_{\bar{a}} = c\hat{O}I_{\bar{y}}$ ) и ( $M_{\bar{a}} = J \frac{d\omega}{dt}$ ), найдем ток якоря:

$$I_{\bar{y}} = \frac{J}{c\hat{O}} \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Э.2.4})$$

В уравнение ( $A_{\bar{n}} = \int_{t_1}^{t_2} UI_{\bar{y}} dt$ ) введем значения напряжения из ( $U = c\hat{O}\omega_{\bar{i}}$ ) и тока из ( $I_{\bar{y}} = \frac{J}{c\hat{O}} \frac{d\omega}{dt}$ ). После небольших преобразований получим:

$$A_c = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J\omega_{\bar{i}} d\omega \quad (\text{Э.3.1})$$

Поскольку после подстановки значений напряжения и тока в ( $A_{\bar{n}} = \int_{t_1}^{t_2} UI_{\bar{y}} dt$ ) интегрирование ведется по угловой скорости, пределы интегрирования по времени заменяются соответствующими пределами по скорости.

Решением интеграла ( $I_{\bar{y}} = \frac{J}{c\hat{O}} \frac{d\omega}{dt}$ ) является

$$A_{\bar{n}} = J\omega_{\bar{i}} (\omega_2 - \omega_1) \quad (\text{Э.3.2})$$

Энергию, преобразуемую в механическую, определим путем решения интеграла ( $A_{i\bar{a}\bar{o}} = \int_{t_1}^{t_2} EI_{\bar{y}} dt$ ), выразив э.д.с. якоря через угловую скорость  $E=c\Phi\omega$  и ток якоря из ( $I_{\bar{y}} = \frac{J}{c\hat{O}} \frac{d\omega}{dt}$ ), тогда после преобразований получим:

$$A_{i\bar{a}\bar{o}} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J\omega d\omega \quad (\text{Э.3.3})$$

$$\text{Решением интеграла является: } A_{i\bar{a}\bar{o}} = J \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} \quad (\text{Э.3.4})$$

Путем вычитания из энергии, подведенной к якорю, механической энергии определяем электрические потери

$$\Delta A_{y\ddot{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\dot{a}\ddot{o}} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}] \quad (\text{Э.4.1})$$

В качестве примера рассмотрим расчет потерь энергии при некоторых переходных процессах.

Потери энергии при разбеге двигателя от начальной скорости  $\omega_1=0$ , до конечной  $\omega_2=\omega_o$ . В виду большой жесткости механических характеристик рассматриваемых двигателей скорость холостого хода без большой погрешности можно принимать равной скорости идеального холостого хода, то есть  $\omega_{xx}=\omega_o$ :

энергия, подведенная из сети:  $A_{\bar{n}} = J\omega_o^2, \quad (\text{Э.4.2})$

механическая энергия:  $A_{i\dot{a}\ddot{o}} = J \frac{\omega_o^2}{2}, \quad (\text{Э.4.3})$

электрические потери энергии:  $\Delta A_{y\ddot{e}} = J \frac{\omega_i^2}{2} \quad (\text{Э.4.4})$

Из этих соотношений видно, что при пуске ДПТ без нагрузки половина подведенной из сети энергии преобразуется в кинетическую. Вторая половина составляет потери в якорной цепи.

Потери энергии при динамическом торможении от начальной скорости,  $\omega_1 = \omega_o$  до конечной  $\omega_2=0$ . Согласно  $(\Delta A_{y\ddot{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\dot{a}\ddot{o}} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}])$

$$\Delta A_{y\ddot{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\dot{a}\ddot{o}} = -J \frac{\omega_i^2}{2} \quad (\text{Э.5.1})$$

Здесь знак минус означает, что двигатель работает в режиме генератора.

Потери энергии при торможении противовключением путем реверсирования вычисляются при начальной скорости  $\omega_{нач} = -\omega_o$ , и конечной, равной 0. Подставляя эти значения скорости в  $(\Delta A_{y\ddot{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\dot{a}\ddot{o}} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}])$  полу-

чим:  $\Delta A_{y\ddot{e}} = 3J \frac{\omega_i^2}{2} \quad (\text{Э.5.2})$

Отсюда следует, что при торможении противовключением потери электрические потери в якорной цепи втрое превышают потери при динамическом торможении.

## 2. Расчет потерь энергии в переходных режимах двигателей постоянного тока независимого возбуждения при работе с постоянной нагрузкой

При работе двигателя с постоянной нагрузкой ( $M_c = \text{const}$ ) баланс мощностей, выраженный уравнением ( $UI_y = EI_y + I_y^2 r_y$ ), сохраняется. Потребляемая из сети энергия и энергия, преобразуемая в механическую, рассчитываются по тем же уравнениям ( $A_{\bar{n}} = \int_{t_1}^{t_2} UI_y dt$ ) и ( $A_{i\bar{a}\bar{o}} = \int_{t_1}^{t_2} EI_y dt$ ) соответственно.

Однако момент двигателя в этом случае определяется из уравнения движения как

$$M_{\bar{a}} = J \frac{d\omega}{dt} + M_{\bar{n}} \quad (\text{Э.5.3})$$

Подставляя в это значение момента двигателя в ( $M_{\bar{a}} = c\hat{O}I_y$ ), находим ток якоря

$$I_y = \frac{1}{\bar{n}\hat{O}} \left( J \frac{d\omega}{dt} + M_{\bar{n}} \right) \quad (\text{Э.5.4})$$

Подведенную к якорю двигателя энергию из сети за время переходного процесса с учетом ( $U = c\hat{O}\omega_i$ ) и ( $I_y = \frac{1}{\bar{n}\hat{O}} \left( J \frac{d\omega}{dt} + M_{\bar{n}} \right)$ ) получим

$$A_{\bar{n}} = \omega_i \int_{t_1}^{t_2} UI_y dt = \omega_i \int_{t_1}^{t_2} \left( J \frac{d\omega}{dt} + M_c \right) dt \quad \text{или} \quad A_{\bar{n}} = J\omega_i \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega + M_{\bar{n}}\omega_i \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (\text{Э.6.1...2})$$

Решением интеграла является

$$A_{\bar{n}} = J\omega_i (\omega_2 - \omega_1) + M_{\bar{n}}\omega_i (t_2 - t_1) \quad (\text{Э.6.3})$$

Энергия, преобразуемая в механическую, определяется путем решения уравнения ( $A_{i\bar{a}\bar{o}} = \int_{t_1}^{t_2} EI_y dt$ ) после подстановки в него значений тока из (

$$I_y = \frac{1}{\bar{n}\hat{O}} \left( J \frac{d\omega}{dt} + M_{\bar{n}} \right) \text{ и э.д.с. } E = c\Phi\omega$$

$$A_{i\bar{a}\bar{o}} = \int_{t_1}^{t_2} \omega \left( J \frac{d\omega}{dt} + M_{\bar{n}} \right) dt \quad (\text{Э.6.4})$$

После раскрытия скобок получим 
$$A_{i\bar{a}\bar{o}} = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega d\omega + M_{\bar{n}} \int_{t_1}^{t_2} \omega dt \quad (\text{Э.7.1})$$

Для упрощения дальнейших выкладок примем движение электропривода в переходном режиме равноускоренным, то есть  $\omega = \varepsilon t$ , где  $\varepsilon$  – постоянное угловое ускорение. С учетом этого решением ( $A_{i\bar{a}\bar{o}} = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega d\omega + M_{\bar{n}} \int_{t_1}^{t_2} \omega dt$ ) является

$$A_{i\bar{a}\bar{o}} = J \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} + M_{\bar{n}} \varepsilon \frac{t_2^2 - t_1^2}{2} \quad (\text{Э.7.2})$$

Электрические потери в переходном режиме определяются как разность энергии, подведенной и механической, т.е.

$$\Delta A_{y\bar{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\bar{a}\bar{o}} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}] + M_{\bar{n}}[\omega_i(t_2 - t_1) - \varepsilon \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}] \quad (\text{Э.7.3})$$

В полученном выражении **первое слагаемое** правой части, заключенное в квадратные скобки, представляет собою изменение **запаса кинетической энергии** в системе при изменении угловой скорости от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , **второе – энергия**, затрачиваемая двигателем на преодоление статических сопротивлений за время переходного процесса от  $t_1$  до  $t_2$ .

В качестве примера рассмотрим расчет электрических потерь при пуске электродвигателя с постоянной нагрузкой.

Ввиду высокой жесткости механических характеристик двигателей независимого возбуждения без большой погрешности можно считать, что угловая скорость при нагрузке мало отличается от скорости идеального холостого хода, то есть  $\omega_c \approx \omega_o$ . Тогда

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = \omega_i, \quad t_1 = 0, \quad t_2 - t_1 = t_i$$

Подставив принятые значения величин в  $(\Delta A_{y\bar{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\bar{a}\bar{o}})$  (Э.7.3), находим

$$\Delta A_{y\bar{e}} = J \frac{\omega_i^2}{2} + M_{\bar{n}} \varepsilon \frac{t_i^2}{2} \quad (\text{Э.8.1})$$

С учетом того, что  $\varepsilon t_n = \omega_c \approx \omega_o$  можно записать

$$\Delta A_{y\bar{e}} \approx J \frac{\omega_i^2}{2} + M_{\bar{n}} \frac{\omega_i t_i}{2} \quad (\text{Э.8.2})$$

Аналогичным образом рассчитываются потери энергии в якоре при тормозных режимах электродвигателей.

Таким образом, потери энергии в якорной цепи двигателя равны сумме кинетической энергии, запасаемой в подвижных частях агрегата, и энергии, расходуемой на преодоление сопротивлений в процессе разбега от нуля до скорости  $\omega_o$ .

Потери энергии в переходных режимах двигателей последовательного и смешанного возбуждения так же обуславливаются изменением запаса кинетической энергии и работой, совершаемой на преодоление статических сопротивлений, но в связи с непостоянством магнитного потока методика их расчета несколько отличается от рассмотренной.

### 3. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе без нагрузки.

*Электромагнитная мощность, развиваемая асинхронным двигателем в воздушном зазоре*

$$P_{y\dot{i}} = M_{\dot{a}}\omega_{\dot{i}} \quad (\text{Э.9.1})$$

где  $M$ —электромагнитный момент;

$\omega_o$ —угловая скорость вращающегося магнитного поля.

*Мощность, на валу двигателя*

$$P_2 = M_{\dot{a}}\omega \quad (\text{Э.9.2})$$

*Вычитанием мощности на валу двигателя из мощности в воздушном зазоре определяется потеря мощности в роторе*

$$\Delta P_2 = M_{\dot{a}}\omega_{\dot{i}} - M_{\dot{a}}\omega = M_{\dot{a}}(\omega_{\dot{i}} - \omega) \quad (\text{Э.9.3})$$

*Потери энергии в роторе за время переходного процесса*

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_2 dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{\dot{a}}(\omega_{\dot{i}} - \omega) dt \quad (\text{Э.9.4})$$

*Подставим в это выражение значение момента двигателя, найденное из уравнения движения при  $M_c=0$*

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} J \frac{d\omega}{dt} (\omega_{\dot{i}} - \omega) dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J(\omega_{\dot{i}} - \omega) d\omega \quad (\text{Э.9.5})$$

*После интегрирования получим:*

$$\Delta A_2 = J[\omega_{\dot{i}}(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}] \quad (\text{Э.10.1})$$

Из полученного выражения следует, что потери энергии в роторе асинхронного двигателя в переходном режиме как и потери в якоре двигателя постоянного тока при работе без нагрузки, равны изменению запаса кинетической энергии агрегата. Так при пуске, когда  $\omega_1=0$ , а  $\omega_2=\omega_o$  потери энергии в роторе составляют

$$\Delta A_2 = J \frac{\omega_{\dot{i}}^2}{2} \quad (\text{Э.10.2})$$

В асинхронном двигателе электрическая энергия подводится к обмотке статора и далее посредством вращающегося магнитного поля передается в ротор. При протекании тока по обмоткам статора в них также образуются потери. Полные потери в переходном режиме двигателя определяются как сумма потерь в обмотках статора и ротора, т.е.

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 = mI_2'^2 R_1 t_i + mI_2'^2 R_2' t_i \quad (\text{Э.10.3})$$

где  $\Delta A_1$ — потери энергии в обмотках статора;

$m$ —число фаз;

$R_1$ —активное сопротивление фазы обмотки статора;

$R'_2$ — активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статору;

$I'_2$ —ток ротора, приведенный к обмотке статора;

$t_n$ — время переходного процесса.

В выражении ( $\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 = mI_2'^2 R_1 t_i + mI_2'^2 R'_2 t_i$ ) вынесем за скобки потери в роторе

$$\Delta A = mI_2'^2 R'_2 t_i \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \quad (\text{Э.10.4})$$

С учетом ( $\Delta A_2 = J \frac{\omega_i^2}{2}$ ) формула для потерь в двигателе приобретает вид:

$$\Delta A = J \frac{\omega_i^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \quad (\text{Э.11.1})$$

Здесь  $R_1/R'_2$ —отношение активного сопротивления фазы обмотки статора к приведенному активному сопротивлению фазы обмотки ротора — коэффициент сопротивлений. Этот коэффициент в расчетах часто принимают равным единице, тогда

$$\Delta A \approx 2\Delta A_2 = J\omega_i^2 \quad (\text{Э.11.2})$$

Из этого следует, что потери энергии в переходных режимах асинхронных двигателей примерно в два раза превышают потери в якорной цепи двигателей постоянного тока. Соотношение потерь при пуске и при тормозных режимах асинхронных двигателей такое же как и у двигателей постоянного тока.

#### 4. Расчет потерь энергии в переходных режимах асинхронных двигателей при работе с нагрузкой.

Расчет потерь энергии в асинхронных двигателях в переходных режимах при работе с нагрузкой затрудняется тем, что уравнения механических характеристик этих двигателей не линейны, а интегрирование нелинейных функций как правило не представляется возможным. В этих случаях обычно прибегают к приближенным или графическим методам решения. Так площадь под линией изменения скорости при определении времени разбега электропривода методом пропорций (рис. ) в определенном масштабе выражает собою потери энергии. Применение ПК позволяет с большей точностью и меньшими затратами времени решать эти задачи и в тех случаях, когда не только механические характеристики двигателей, но и характеристики рабочих машин описываются нелинейными уравнениями.

Для определения потерь энергии в роторе воспользуемся уравнением ( $\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_2 dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{\ddot{a}}(\omega_i - \omega) dt$ ), умножив и разделив выражение под интегралом на синхронную угловую скорость

$$\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} M_{\ddot{a}}(\omega_i - \omega) \frac{\omega_i}{\omega_i} dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{\ddot{a}} \omega_i s dt \quad (\text{Э.11.1})$$

Из уравнения движения электропривода при  $M_c \neq 0$  найдем дифференциал времени

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{n}}} \quad (\text{Э.12.2})$$

После подстановки этого выражения в ( $\Delta A_2 = \int_{t_1}^{t_2} M_{\ddot{a}}(\omega_i - \omega) \frac{\omega_i}{\omega_i} dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{\ddot{a}} \omega_i s dt$ )

$$\Delta A_2 = J \omega_i \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_{\ddot{a}} s}{M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{n}}} d\omega \quad (\text{Э.12.3})$$

Решение интеграла на ПК возможно, если входящие в него моменты двигателя и рабочей машины выразить в виде функций угловой скорости

$$\Delta A_2(\omega) = J \omega_i \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_{\ddot{a}}(\omega) s(\omega)}{M_{\ddot{a}}(\omega) - M_{\ddot{n}}(\omega)} d\omega \quad (\text{Э.12.4})$$

Здесь  $M_{\ddot{a}}(\omega)$ —уравнение механической характеристики асинхронного двигателя;

$M_{\ddot{c}}(\omega)$ —уравнение механической характеристики рабочей машины;

$s(\omega)$ —зависимость скольжения от угловой скорости.

Механические характеристики асинхронных электродвигателей, выраженные через угловую скорость требуют определения параметров обмоток двигателя, представляют собою довольно сложные функции и

используются редко. Поэтому в  $(\Delta A_2(\omega) = J\omega_i \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_{\ddot{a}}(\omega)s(\omega)}{M_{\ddot{a}}(\omega) - M_{\ddot{n}}(\omega)} d\omega)$  дифференциал скорости, уравнения механических характеристик двигателя и рабочей машины целесообразно выразить с помощью известных зависимостей через скольжения. В этом случае уравнение для определения потерь энергии в роторе принимает вид:

$$\Delta A_2(s) = J\omega_i^2 \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_{\ddot{a}}(s)s}{M_{\ddot{a}}(s) - M_{\ddot{n}}(s)} ds \quad (\text{Э.13.1})$$

Полные потери энергии в двигателе рассчитываются как сумма потерь в роторе и статоре

$$\Delta A(s) = \Delta A_2(s) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \quad (\text{Э.13.2})$$

При расчетах потерь энергии в переходных режимах рассматриваемым методом необходимо использовать уравнения механических характеристик асинхронных двигателей с поправочными коэффициентами (

$$M = \frac{2M_e(1 + \varepsilon')}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon'} \quad (\text{Э.13.3}) \text{ или } (M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 s(r_2' + Rs^2)}{(r_1s + r_2' + Rs^2)^2 + x_k^2 s^2}) \quad (\text{Э.13.4}), \text{ при ко-}$$

торых вычисляемые пусковые моменты соответствуют каталожным.

$$\varepsilon' = \frac{\frac{1}{s} + s_k - 2\lambda}{2(\lambda - 1)}$$

Здесь  $R$ —некоторое активное сопротивление, величину которого легко определить из выражения  $(M = \frac{m}{\omega_o} \frac{U_1^2 s(r_2' + Rs^2)}{(r_1s + r_2' + Rs^2)^2 + x_k^2 s^2})$ , подставив в него пусковой момент по каталогу при скольжении, равном единице, т.е.  $(M = M_{n \text{ кат}}, \text{ и } s = 1)$ .

## 5. Определение передаточного числа в электроприводе.

В тех случаях, когда частота включений производственных механизмов достигает сотен, а иногда и тысяч включений в час, время разбега и торможения оказывает существенное влияние на их производительность и на потери энергии в переходных режимах. Передаточное число, при котором обеспечивается минимальное время протекания переходных процессов, называется наиболее выгодным или оптимальным. Практически это сводится к выбору такого передаточного числа, которое обуславливает максимальные ускорения при пуске и максимальные замедления при торможении.

Для определения такого передаточного числа запишем уравнение движения электропривода с параметрами, приведенными к валу рабочего механизма (пренебрегая потерями в передачах)

$$iM_{\bar{a}} - M_{\bar{n}} = (J_i + kJ_{\bar{a}}i^2) \frac{d\omega_i}{dt} \quad (\text{Э.14.1})$$

где  $M_{\bar{d}}$ — момент, развиваемый двигателем;

$M_{\bar{c}}$ — момент сопротивления на валу рабочей машины ;

$J_{\bar{m}}$  и  $J_{\bar{d}}$ — моменты инерции рабочей машины и ротора двигателя;

$\omega_{\bar{m}}$ —угловая скорость вала рабочей машины;

$k$ —коэффициент, учитывающий момент инерции передач;

$i = \omega_{\bar{d}} / \omega_{\bar{m}}$  — передаточное число.

В уравнение  $(iM_{\bar{a}} - M_{\bar{n}} = (J_i + kJ_{\bar{a}}i^2) \frac{d\omega_i}{dt})$  введем обозначение для **углового ускорения**

$\frac{d\omega_i}{dt} = \varepsilon$  и выразим из него зависимость ускорения от передаточного числа

$$\varepsilon = \frac{iM_{\bar{a}} - M_{\bar{n}}}{J_i + kJ_{\bar{a}}i^2}$$

Полученное выражение обычными методами исследуем на максимум. Для этого его первую производную приравняем к нулю, т.е.

$$\frac{d\varepsilon}{di} = 0$$

Реально производная в выражении может равняться нулю лишь при условии, что нулю равняется числитель полученной производной, то есть:

$$M_{\bar{a}}(J_i + kJ_{\bar{a}}i^2) - 2kJ_{\bar{a}}i(M_{\bar{a}}i - M_{\bar{n}}) = 0 \quad (\text{Э.14.2})$$

так как величины, входящие в знаменатель, реально бесконечно большими быть не могут. Отсюда

$$i = \frac{M_{\bar{n}}}{M_{\bar{a}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\bar{n}}}{M_{\bar{a}}}\right)^2 + \frac{J_i}{kJ_{\bar{a}}}} \quad (\text{Э.14.3})$$

В тех случаях, когда переходные процессы протекают при моментах сопротивления значительно меньших моментов двигателя (пуск, торможение реверсирование вхолостую), отношением моментов в  $(i = \frac{M_{\bar{n}}}{M_{\bar{a}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\bar{n}}}{M_{\bar{a}}}\right)^2 + \frac{J_i}{kJ_{\bar{a}}}})$  можно пренебречь и тогда оп-

тимальное передаточное число можно выразить как:  $i = \sqrt{\frac{J_i}{kJ_{\bar{a}}}}$  (Э.14.4)

## 6. Способы уменьшения потерь энергии в переходных режимах

Для многих электроприводов, связанных с частыми пусками, реверсами, электрическим торможением, снижение потерь электроэнергии в переходных режимах в значительной степени предопределяет энергетические показатели электрифицированного агрегата в целом. Приведенный выше анализ потерь энергии показывает, что Снижение потерь энергии возможно тремя основными способами: уменьшением приведенного момента инерции, регулированием скорости идеального холостого хода и уменьшением времени переходных процессов.

1. Уменьшение момента инерции достигается за счет применения малоинерционных двигателей (двигатели с полым якорем, асинхронные двигатели с удлиненным ротором), тщательным расчетом и подбором требуемых маховиков. Для уменьшения приведенного момента инерции в приводах большой мощности оказывается целесообразным замена одного двигателя несколькими с суммарной мощностью, равной мощности, заменяемого двигателя. Такая замена кроме уменьшения суммарного момента инерции во многих случаях позволяет достичь рациональной компоновки привода. Так момент инерции ротора двигателя 4A250M4 мощностью 90 кВт равен  $1,17 \text{ кгм}^2$ , суммарный момент инерции двух двигателей 4A200L4. мощностью 45 кВт каждый равен  $0,89 \text{ кгм}^2$ , а при трех двигателях 4A180M4 мощностью по 30 кВт суммарный момент инерции равен  $0,7 \text{ кгм}^2$ .

Под регулированием скорости идеального холостого хода подразумевается ступенчатый пуск двигателей постоянного тока путем регулирования напряжения и изменения числа пар полюсов или частоты питающего тока асинхронных двигателей.

В случае двигателя постоянного тока с двумя ступенями напряжения вначале включают на пониженное напряжение  $U_1$ , которому соответствует скорость идеального холостого хода  $\omega_{o1}$  а затем переключают на полное напряжение  $U_2$ , соответствующее скорости  $\omega_{o2}$ . Учитывая, что скорость идеального холостого хода пропорциональна напряжению и, принимая  $U_1=0,5U_2$  и  $\omega_{o1}=0,5\omega_{o2}$ , определим из  $(\Delta A_{\text{в}e} = A_{\bar{n}} - A_{i\bar{a}o} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}]$

(Э.15.1)) потери энергии при разбеге на первой ступени напряжения без нагрузки

$$\Delta A_1 = J \frac{\omega_{i1}^2}{2} = J \frac{(0,5\omega_{i2})^2}{2} \quad (\text{Э.15.2})$$

При разбеге на второй ступени напряжения

$$\Delta A_2 = J[\omega_i(\omega_{i2} - \omega_{i1}) - \frac{\omega_{i2}^2 - \omega_{i1}^2}{2}] = 0,25J \frac{\omega_{i2}^2}{2} \quad (\text{Э.15.3})$$

*Сумма потерь на первой и второй ступенях разбега*

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_1 + \Delta A_2 = 0,5J \frac{\omega_{i2}^2}{2} \quad (\text{Э.15.4})$$

*Потери энергии при пуске на одной ступени полного напряжения*

$$\Delta A = J \frac{\omega_{i2}^2}{2} \quad (\text{Э.16.1})$$

*Из полученных выражений следует, что Потери электроэнергии при пуске с двумя ступенями скорости уменьшаются в 2 раза. Нетрудно показать, что при разделении каждой из двух ступеней напряжения пополам, т.е. при пуске в четыре ступени, потери энергии уменьшаются в 4 раза. Следовательно, Потери в якоре снижаются во столько раз, сколько имеется пусковых ступеней, т.е. при количестве ступеней, равном  $k$ , потери энергии*

$$\Delta A = \frac{1}{k} J \frac{\omega_{i2}^2}{2} \quad (\text{Э.16.2})$$

*При плавном регулировании напряжения, подводимого к якору в процессе пуска (что равноценно  $k \rightarrow \infty$ ) переходные процессы, как видно из ( $\Delta A = \frac{1}{k} J \frac{\omega_{i2}^2}{2}$ ) протекают без потерь.*

Ступенчатый пуск двухскоростного асинхронного двигателя аналогичен пуску двигателя постоянного тока с двумя ступенями подводимого к якору напряжения.

*Многоскоростные асинхронные двигатели имеют значительно большие габариты и момент инерции в сравнении с односкоростными той же мощности и с номинальной скоростью, равной максимальной скорости многоскоростного двигателя. Поэтому в целях уменьшения потерь энергии целесообразно для этих двигателей применять ступенчатый пуск. В современных электроприводах получают широкое применение асинхронные двигатели с частотным регулированием скорости. Пуск таких двигателей с плавным регулированием частоты ток позволяет значительно уменьшить потери энергии в переходных режимах.*

**Третьим фактором** снижения потерь при пуске двигателей согласно (6.13) и (6.18) является сокращение времени переходных процессов, которое зависит от величины избыточного момента и передаточного числа в электроприводе.

*В полученном выражении первое слагаемое правой части, заключенное в квадратные скобки, представляет собою изменение запаса кинетической энергии в системе при изменении угловой скорости от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , второе—энергия, затрачиваемая двигателем на преодоление статических сопротивлений за время переходного процесса от  $t_1$  до  $t_2$ .*

## Расчет допустимого числа включений в час

В переходных режимах пуска, электрического торможения, реверсирования и др. по обмоткам двигателей протекают повышенные токи и их работа сопровождается значительными потерями энергии, что может привести к их перегреву. Особенно это относится к асинхронным двигателям для повторно-кратковременного режима работы, которые нашли широкое применение в приводе различных механизмов, работающих в весьма напряженном режиме, частота включений которых измеряется многими сотнями час.

Условия работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором оказываются более тяжелыми, чем двигателей постоянного тока или асинхронных с фазным ротором, так как в двигателях с короткозамкнутым ротором тепло, выделяемое во время переходных процессов, должно рассеиваться самими обмотками. Во избежание перегрева асинхронного двигателя число циклов в единицу времени должно быть таким, чтобы количество тепла, выделяемого в двигателе за время одного цикла, равнялось количеству тепла, отдаваемого двигателем в окружающее пространство за это же время при допустимом превышении температуры. Под допустимой частотой понимают такое число включений двигателя в час, при котором средняя его температура после большого количества рабочих циклов будет равна допустимой.

Потери энергии в двигателе за цикл работы составляют:

$$\Delta A_{\sigma, i} = \Delta A_i + \Delta A_{\sigma} + \Delta P_{\sigma} t_{\sigma} \quad (\text{Э.17.1})$$

где  $\Delta A_n$  и  $\Delta A_m$  потери в двигателе при пуске и торможении;

$\Delta P_x$  – потери мощности в двигателе при работе с некоторой нагрузкой  $P_x$  и установившейся угловой скоростью;

$t_y$  – продолжительность установившейся работы в одном цикле.

Количество тепла, отдаваемого в пространство за цикл с учетом ухудшения условий охлаждения двигателя при разбеге, торможении и остановке:

$$\Delta A_{\sigma, i} = \frac{1 + \beta}{2} \Delta P_i t_i + \frac{1 + \beta}{2} \Delta P_i t_{\sigma} + \Delta P_i t_{\sigma} + \beta \Delta P_i t_i \quad (\text{Э.17.2})$$

Время цикла  $t_{\sigma}$  суммируется из времени пуска  $t_n$ , торможения  $t_m$ , работы в установившемся режиме  $t_y$  и паузы  $t_o$ :

$$t_{\sigma} = t_i + t_{\sigma} + t_{\sigma} + t_i \quad (\text{Э.17.3})$$

Здесь  $\beta$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи неработающего двигателя;

$\frac{1+\beta}{2}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при разбеге и торможении двигателя.

При допустимом числе включений должно соблюдаться равенство

$$\Delta A_{\delta,i} = \Delta A_{\delta,i} \quad (\text{Э.17.4})$$

Если в течение 1 часа (3600 с) совершается  $z$  циклов, то продолжительность одного цикла определится как

$$t_{\delta} = \frac{3600}{z} \quad (\text{Э.17.5})$$

Определив из  $(t_{\delta} = \frac{3600}{z})$  время одного цикла и из графика нагрузки относительную продолжительность включения, находим

$$t_{\delta} = \frac{3600}{z} \varepsilon; \quad t_i = \frac{3600}{z} (1 - \varepsilon); \quad \text{и} \quad t_{\delta} = \frac{3600}{z} \varepsilon - (t_i + t_{\delta}) \quad (\text{Э.18.1})$$

где  $\varepsilon$  – относительная продолжительность включения  $\varepsilon = t_p / t_u$

Подставим в  $(\Delta A_{\delta,i} = \Delta A_{\delta,i})$  значения потерь из (

$$\Delta A_{y\bar{e}} = A_{\bar{n}} - A_{i\bar{a}\bar{o}} = J[\omega_i(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}] + M_{\bar{n}}[\omega_i(t_2 - t_1) - \varepsilon \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}], \quad \text{отдачи} \quad \text{тепла} \quad \text{из} \quad ($$

$\Delta A_{\delta,i} = \frac{1+\beta}{2} \Delta P_i t_i + \frac{1+\beta}{2} \Delta P_i t_{\delta} + \Delta P_i t_{\delta} + \beta \Delta P_i t_i$  (Э.17.2) и из (Э.18.1) – отрезков времени в цикле

$$\begin{aligned} \Delta A_i + \Delta A_{\delta} + \Delta P_{\delta} \left[ \frac{3600}{z} \varepsilon - (t_i + t_{\delta}) \right] &= \frac{1+\beta}{2} \Delta P_i (t_i + t_{\delta}) + \\ &+ \frac{3600}{z} \Delta P_i \varepsilon - \Delta P_i (t_i + t_{\delta}) + \frac{3600}{z} \Delta P_i \beta (1 - \varepsilon). \end{aligned} \quad (\text{Э.18.2})$$

Решая относительно  $z$ , находим допустимое число включений в час

$$z = 3600 \frac{(\Delta P_i - \Delta P_{\delta}) \varepsilon + \Delta P_i \beta (1 - \varepsilon)}{\Delta A_i + \Delta A_{\delta} - a} \quad (\text{Э.18.3})$$

где  $a = (t_i + t_{\delta}) \left[ \Delta P_i \left( \frac{1+\beta}{2} - 1 \right) + \Delta P_{\delta} \right] \quad (\text{Э.19.1})$

Если время переходных процессов при пуске и торможении невелико по сравнению с продолжительностью установившегося режима и коэффициент ухудшения охлаждения принять равным 0,5, величина  $a$  в знаменателе допустимого числа включений в час  $(z = 3600 \frac{(\Delta P_i - \Delta P_{\delta}) \varepsilon + \Delta P_i \beta (1 - \varepsilon)}{\Delta A_i + \Delta A_{\delta} - a})$  составляет 2...4% от суммы электрических потерь при разбеге и торможении, поэтому можно принять

$$z = 3600 \frac{(\Delta P_i - \Delta P_{\delta}) \varepsilon + \Delta P_i \beta (1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_i + \Delta A_{\delta})} \quad (\text{Э.19.2})$$

Когда в установившемся режиме двигатель работает с номинальной нагрузкой и потери равны номинальным, допустимое число включений в час определяется как

$$z = 3600 \frac{\Delta P_i \beta (1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_i + \Delta A_\delta)} \quad (\text{Э.19.3})$$

Допустимое число включений в час можно повысить главным образом за счет увеличения коэффициента теплоотдачи, путем независимого обдува двигателя и снижения потерь в переходных режимах. Последнее достигается за счет правильного выбора моментов инерции электропривода и рационального способа электрического торможения.