Приложение М

Расчет переходных процессов электропривода по известным аналитическим выражениям

М1 Общие положения

В технической литературе приводятся аналитические выражения нагрузочных диаграмм, и требуемые расчеты можно получить при различных параметрах системы электропривода. Сложность заключается в том, что эти выражения оказываются достаточно сложными, и придется прибегать к составлению расчетных программ простого арифметического расчета. Но и для такого расчета потребуется определить начальные условия.

М 2 Механические переходные процессы электроприводов с прямолинейными механическими характеристиками и с идеально жесткими связями

При питании от тиристорных преобразователей, когда переходные процессы формируются задатчиком интенсивности, при постоянном статическом моменте M_c и прямолинейной механической характеристике, что справедливо для двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения и для асинхронных двигателей на участке механической характеристики с $M < 0.8*M_K$, где M_K – критический момент, возможно построение нагрузочных диаграмм $\omega(t), M(t)$, $\omega_0(t)$, $\alpha(t)$ по аналитическим выражениям [10].

$$\omega_0(t) = \omega_{онач} + \varepsilon_0 \cdot t \; , \tag{М 2.1}$$

$$M(t) = M_c + J \cdot \varepsilon_0 + (M_{нач} - M_c - J \cdot \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{t}{Tм}} \; ; \tag{М 2.2}$$

$$\omega(t) = \omega_{снач} + \varepsilon_0 \cdot (t - T_м) + (\omega_{нач} - \omega_{снач} + \varepsilon_0 \cdot T_м) \cdot e^{-\frac{t}{Tм}} \; , \tag{М 2.3}$$

$$\alpha(t) = \alpha_{нач} + (\omega_{снач} - T_м) \cdot t + \varepsilon_0 \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{\omega_{нач} + \varepsilon_0 \cdot T_м - \omega_{снач}}{T_м} \left(1 - e^{-\frac{t}{Tм}}\right), \tag{М 2.4}$$

где $\omega_{0НАЧ}$ – скорость холостого хода при t = 0;

$\varepsilon_0 = \omega_{ОН} / T_{ЗИ}$ – угловое ускорение скорости идеального холостого хода двигателя,

J – момент инерции электропривода;

$M_{НАЧ}$ – значение момента двигателя при $t = 0$;

J – момент инерции электропривода;

β – жесткость механической характеристики электропривода;

$T_м = J / \beta$ – электромеханическая постоянная времени электропривода;

$\omega_{СНАЧ} = \omega_{0НАЧ} - M_C / \beta$ – скорость на характеристике $\omega_{0НАЧ}$, соответствующая статическому моменту M_C.

Переходный процесс обычно состоит из нескольких этапов, каждый этап соответствует своим значениям M и ε_0. При использовании формул (М 2.2) … (М 2.4) каждый этап рассчитывают, полагая в начале этапа

$$t = 0,\ \omega_0 = \omega_{нач},\ M = M_{нач},\ \omega = \omega_{нач}.$$

Значения $\omega_{0НАЧ}$ и $M_{НАЧ}$ определяются из расчёта предыдущего этапа.

При пуске электропривода с реактивным M_C в условиях, когда $M_{НАЧ} < M_C$ (например, при $\omega_{0НАЧ} = 0$ и $M_{НАЧ} = 0$), двигатель остаётся неподвижным до тех пор, пока момент $M(t)$ не достигнет значения $M = M_C$. На этом этапе $\omega=0$, момент изменяется по закону $M(t) = \varepsilon_0 \cdot \beta \cdot t$, время запаздывания

$$t_0 = \frac{M_C}{\varepsilon_0 \cdot \beta}.$$

При питании двигателя от цеховой сети (в схеме магнитного контроллера)

$$\omega_o(t) = \omega_{он} = const, \qquad \varepsilon_o = 0,$$

уравнения (К2.2) … (К2.4) принимают вид:

$$M(t) = M_C + (M_{нач} - M_C) \cdot e^{-\frac{t}{T_м}}; \qquad \text{(М2.5)}$$

$$\omega(t) = \omega_C + (\omega_{нач} - \omega_C) \cdot e^{-\frac{t}{T_м}}. \qquad \text{(М 2.6)}$$

$$\alpha(t) = \alpha_{нач} + (\omega_c \cdot t + \frac{\omega_{нач} - \omega_c}{T_м}(1 - e^{-\frac{t}{T_м}}), \qquad \text{(М 2.7)}$$

Эти уравнения используются для расчёта переходных процессов пуска, наброса нагрузки, торможения, реверса.

М 3 Расчёт нагрузочных диаграмм при нелинейных механических характеристиках, т.е. для двигателей постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения и для асинхронных двигателей при работе их в зоне, близкой к критическому моменту, производится приближенными графическими или графоаналитическими методами [10].

Универсальным методом расчёта переходных режимов является метод кусочно-линейной аппроксимации. Он пригоден для электропривода, питающегося от сети и обладающего механической характеристикой любого вида. При этом пусковые и тормозные механические характеристики разбивается на участки, позволяющие заменить их прямыми линиями. Каждый участок характеризуется начальной скоростью $\omega_{начi}$, начальным моментом $M_{начi}$, конечной скоростью $\omega_{конi}$ и конечным моментом $M_{конi}$.

Электромеханическую постоянную времени электропривода на рассматриваемом участке механической характеристики рассчитывают по формуле

$$T_{мi} = J_i \cdot \frac{\omega_{конi} - \omega_{начi}}{M_{начi} - M_{конi}}. \qquad \text{(М 3.1)}$$

Время работы (разгона или торможения) электропривода на данном участке характеристики может быть рассчитано по формуле

$$\Delta t_i = T_{мi} \cdot \ln \frac{M_{начi} - M_{ci}}{M_{конi} - M_{ci}}. \qquad \text{(М 3.2)}$$

Время разгона электропривода от скорости $\omega_{нач1} = 0$ до скорости $\omega_{конi}$ определяется суммированием времен работы на каждом из аппроксимированных участков характеристик:

$$t_i = \sum_{k=0}^{i} \Delta t_k. \qquad \text{(М 3.4)}$$

Аналогично можно рассчитать время торможения от начальной скорости $\omega_{нач1}$ (скорости, при которой двигатель переключается на тормозной режим) до скорости в конце i-го участка торможения.

Для скоростей $\omega_{начi}$ и $\omega_{конi}$ – границ участков механических характеристик – по соответствующим электромеханическим характеристикам определяются значения тока в силовой цепи $I_{начi}$ и $I_{конi}$.

Таким образом, для каждого участка, на которые разбивается механические характеристики двигателя, определяются все величины, необходимые для построения нагрузочных диаграмм $\omega(t)$, $M(t)$, $I(t)$, $\alpha(t)$ переходных режимов электропривода.

Путь, проходимый электроприводом за время работы на рассматриваемом участке (угол поворота вала двигателя), может быть рассчитан по формуле

$$\Delta\alpha_i \cong \frac{\omega_{начi} + \omega_{конi}}{2} \cdot \Delta t_i. \qquad \text{(М 3.5)}$$

Путь, проходимый электроприводом при пуске и торможении за время t_i (когда скорость изменяется от $\omega_{НАЧi}$ до $\omega_{КОНi}$) определяется по соотношению

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^{i} \Delta\alpha_k. \qquad \text{(М 3.6)}$$

М 4 Электромеханический переходный процесс

Учёт индуктивностей обмоток двигателя вызывает появление дополнительной (по отношению к механическому переходному процессу) электромагнитной инерционности в системе электропривода, заставляет анализировать изменение электромагнитной энергии в переходных процессах.

Электромеханический переходный процесс описывается (для жесткой механической системы) системой дифференциальных уравнений второго порядка. Нагрузочные диаграммы этого процесса могут быть рассчитаны по аналитическим выражениям [10,11] или интегрированием этих дифференциальных уравнений с помощью ЭВМ.

При питании двигателя от цеховой сети, когда в переходных процессах в силовую цепь включаются добавочные резисторы, влияние электромагнитной инерции снижается. Необходимость учёта $T_э$ возникает при расчёте переходных процессов, когда добавочные резисторы отсутствуют и двигатель работает на естественной характеристике.

Влияние электромагнитной инерции существенно проявляется при отношении $(T_м / T_э) < 2$ [1],

где $T_м = J / \beta$ – электромеханическая постоянная времени электропривода,

$T_э = L_\Sigma / R_\Sigma$ – электромагнитная постоянная времени силовой цепи.

Уравнения нагрузочных диаграмм в общем виде для $T_м / T_э < 4$ имеют вид

$$\omega(t) = \omega_c + e^{-\alpha \cdot t} \cdot [(\omega_{нач} - \omega_c) \cdot \cos\Omega_p \cdot t + \\ + \frac{(M_{нач} - M_c) + J \cdot \alpha \cdot (\omega_{нач} - \omega_c)}{J \cdot \Omega_p} \cdot \sin\Omega_p \cdot t],$$

$$M(t) = M_c + e^{-\alpha \cdot t} \cdot [(M_{нач} - M_c) \cdot \cos\Omega_p \cdot t + \\ + \frac{\beta \cdot (\omega_0 - \omega_{нач}) - M_{нач} \cdot (1 - \alpha \cdot T_э) - \alpha \cdot T_э \cdot M_c}{T_э \cdot \Omega_p} \cdot \sin\Omega_p \cdot t],$$

С помощью приведенных уравнений можно рассчитать переходные процессы пуска, особенно переход на естественную характеристику, а также торможение.

Если переходный процесс начинается из установившегося режима, то уравнения значительно упрощаются (например, для наброса нагрузки см. [7, с. 242]).

При питании двигателя от преобразователя при линейном изменении напряжения (частоты) электромагнитная инерция создаёт задержку нарастания тока (момента) в начальный момент переходного процесса, когда электромагнитная энергия в силовой цепи запасается. Затем запасенная электромагнитная энергия начинает выделяться, вызывая более быстрое нарастание тока, чем в механическом переходном процессе. При $T_м / T_э < 2$ возникает перерегулирование тока (момента), что приходится учитывать при проверке двигателя по перегрузочной способности.

Влияние электромагнитной инерции проявляется лишь в начале процесса, затем прекращаются колебания тока и момента, и влияние $T_я$ на характер процесса уже не сказывается.

Нагрузочные диаграммы в общем виде при $T_м / T_э < 2$ для процесса с линейным изменением напряжения (частоты) для жесткой механической системы имеют вид

$$\omega(t) = \omega_{снач} + \xi_0 (t - T_M) + (\omega_{нач} - \omega_{снач} + \xi_0 \cdot T_M) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \times [\cos \Omega_p \cdot t -$$

$$- \frac{M_{нач} - M_c - \beta \cdot T_M \cdot \xi_0 + \beta \cdot T_M \cdot \alpha \cdot (\omega_{нач} - \omega_{снач} + \xi_0 \cdot T_M)}{\beta \cdot T_M \cdot \Omega_p \cdot (\omega_{снач} + \xi_0 \cdot T_M - \omega_{нач})} \cdot \sin \Omega_p t; \quad (M4.5)$$

$$M(t) = M_c + \beta \xi_0 T_M - (M_{нач} - M_c - \beta \xi_0 T_M) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \times [\cos \Omega_p t +$$

$$+ \frac{\beta(\omega_{онач} - \omega_{нач}) - M_{нач} + \alpha T_э (M_{нач} - M_c - \beta \xi_0 T_M)}{T_э \Omega_p (M_{нач} - M_c - \beta \xi_0 T_M)} \cdot \sin \Omega_p t. \quad (M4.6)$$

Расчет переходных процессов с учётом $T_я$ для упругой системы затруднен (см. Приложение И). Для расчёта можно использовать программы, приведенные в [13].

К5 Среднеквадратичное значение тока (момента)

Для проверки по нагреву двигателя, пусковых и тормозных резисторов одновременно с расчётом нагрузочных диаграмм целесообразно определить величину, характеризующую нагрев за время t_i.,

$$\int_0^{ti} I^2 dt \cong \sum_{i=1}^{k} I^2_{скi} \cdot \Delta t_i, \quad (M4.7)$$

где $I_{скк}$ – среднеквадратичный ток на участке интегрирования за время $\Delta t_к$.

Если кривая I(t) имеет в пределах интервала Δt_i аналитическое выражение, можно определить среднеквадратичный ток $I_{скi}$ на участке по формулам:

– при линейной зависимости I(t)

$$I_{cki} = \sqrt{\frac{1}{3}(I^2{}_{нач i} + I_{нач i} \cdot I_{кон i} + I^2{}_{кон i})}; \qquad (M4.8)$$

– при экспоненциальной зависимости I(t)

$$I_{cki} = \sqrt{I^2{}_y - \frac{T_м}{\Delta t_i}(I_{кон i} - I_{нач i})(\frac{I_{кон i} + I_{нач i}}{2} + I_y)}, \qquad (M4.9)$$

где $I_у$ – установившееся значение, к которому стремится экспонента I(t);

$T_м$ – электромеханическая постоянная времени электропривода.