

10. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ

10.1 Общие положения

В зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу, различают режимы пуска: – форсированный, при котором время пуска минимально, а максимальный момент двигателя при пуске принимают равным максимально допустимому $M_{\text{МАКС.ДОП}}$ (для двигателей постоянного тока – предельно допустимому по условиям коммутации, для асинхронных двигателей – критическому моменту с учетом допустимого снижения напряжения питающей сети – $0,8 \cdot M_k$);

– нормальный, при котором время пуска не ограничивается, а величина момента двигателя на всех этапах пуска не должна быть ниже момента сопротивления движения – $M_2 \geq 1,2 \cdot M_C$;

– обеспечивающий заданное допустимое ускорение $a_{\text{ДОП}}$ при пуске, при котором ограничивается динамический момент двигателя (см. формулу 10.9).

Ускорение электропривода не должно превышать допустимых значений.

Из рассмотренных режимов будем использовать режим пуска с ограничением ускорения электропривода, так как два других режима являются граничными.

При питании двигателя от цеховой сети обычно применяют реостатный пуск с постепенным выводом ступеней сопротивлений из работы. В системах электропривода с питанием двигателя от преобразователя (ТП–Д, ПЧ–АД и др.) пусковые режимы обеспечиваются системой управления путем формирования выходного напряжения (тока) преобразователя.

10.2. Реостатный пуск

Формирование ускорения при пуске осуществляется правильной пусковой диаграммой, а замедление при торможении чаще всего ограничивается одной ступенью тормозного резистора.

Таким образом, ускорение в таких системах является переменным, и его допустимая величина определяется механическими характеристиками двигателя в режиме пуска и торможения.

Пуск двигателя при питании от цеховой сети осуществляется включением в цепь двигателя добавочных сопротивлений с последующим их шунтированием по мере разгона в функции тока (скорости, времени). Для пуска рассчитывается правильная пусковая диаграмма [3,5,7,8], в которой максимальные моменты $M1$ равны на каждой из пусковых характеристик. Также равны между собой и моменты переключения $M2$ (см. рис. 10.1).

Расчет правильной пусковой диаграммы начинают с расчета максимального момента $M1$ и полного сопротивления силовой цепи R_l при скорости $\omega=0$.

Максимальный момент $M1$ зависит от режима пуска. Из условия обеспечения допустимого ускорения момент $M1$ рассчитан в таблице 5.1.

$$M1 = M_{\text{ДОП.УСК.}}$$

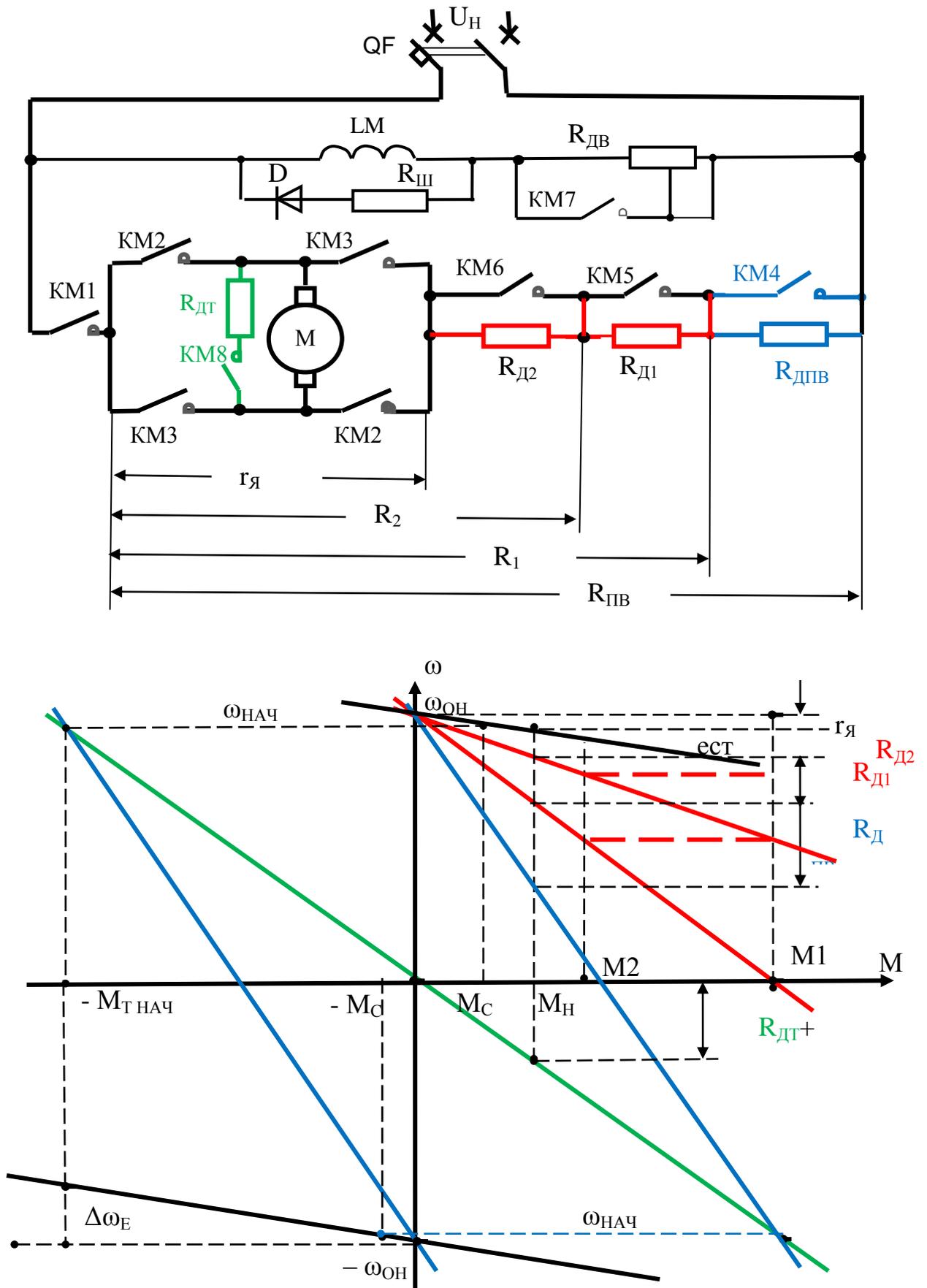


Рис. 10.1 Механические характеристики пуска и торможения ДНВ

Необходимо обязательно убедиться, что M_I не превышает максимально допустимый момент двигателя

$$M_I \leq M_{\text{МАКС.ДОП.}}$$

В цикле работы двигателя возможно наличие нескольких значений моментов $M_{\text{ДОП.УСК}}$, ограничивающих ускорение рабочего органа. Так при пуске на холостом ходу или пуске с уменьшенной нагрузкой, а также при изменении приведенного момента инерции рабочего органа изменяется и $M_{\text{ДОП.УСК}}$. При реостатном пуске обычно используется один набор пусковых резисторов. Поэтому при расчете правильной пусковой диаграммы необходимо выбирать такой максимальный момент M_I , который позволял бы запускать двигатель при всех возможных сочетаниях статического момента M_C и приведенного момента инерции $J_{\text{ПР}}$ без превышения допустимого ускорения рабочего органа.

Чаще всего минимальное значение $M_{\text{ДОП.УСК}}$ соответствует пуску на холостом ходу, и для этого значения следует строить правильную пусковую диаграмму. Зная M_I , по каталожным данным рассчитывают пусковой ток I_1 и величину полного сопротивления R_1 . Сопротивление R_1 разбивают на ступени таким образом, чтобы обеспечивалась правильная пусковая диаграмма.

Для электропривода с прямолинейной механической характеристикой выполняют аналитический расчет, используя соотношение λ между моментами M_1 и M_2 правильной пусковой диаграммы:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = m \sqrt{\frac{1}{M_1 \cdot r_{\text{Я}}}}, \quad (10.1)$$

где \overline{M}_1 – относительное значение момента M_1 ;

m – число пусковых ступеней.

Необходимо убедиться, что значение $M_2 \geq 1,2M_C$.

Полное сопротивление силовой цепи на пусковых характеристиках определяются по формулам:

$$R_2 = R_1 / \lambda; \quad R_3 = R_2 / \lambda; \quad R_4 = R_3 / \lambda. \quad (10.2)$$

Сопротивление ступеней пусковых реостатов определяются из (10.2):

$$\begin{aligned} R_{\partial 1} &= R_1 - R_2; \\ R_{\partial 2} &= R_2 - R_3; \\ R_{\partial 3} &= R_3 - R_4. \end{aligned} \quad (10.3)$$

Для асинхронного двигателя (рис. 10.2) аналитический метод применим при $M_I \leq 0,7 \cdot M_K$ [3]. Вместо относительного сопротивления якоря двигателя $r_{\text{Я}}$ в формулу (15.1) следует подставить относительное значение активного сопротивления r_2 фазы ротора или номинальное скольжение s_H . На рисунке 10.3 приведено построение правильной пусковой диаграммы АД после расчета аналитическим методом. Естественная механическая характеристика, обозначенная «ест»,

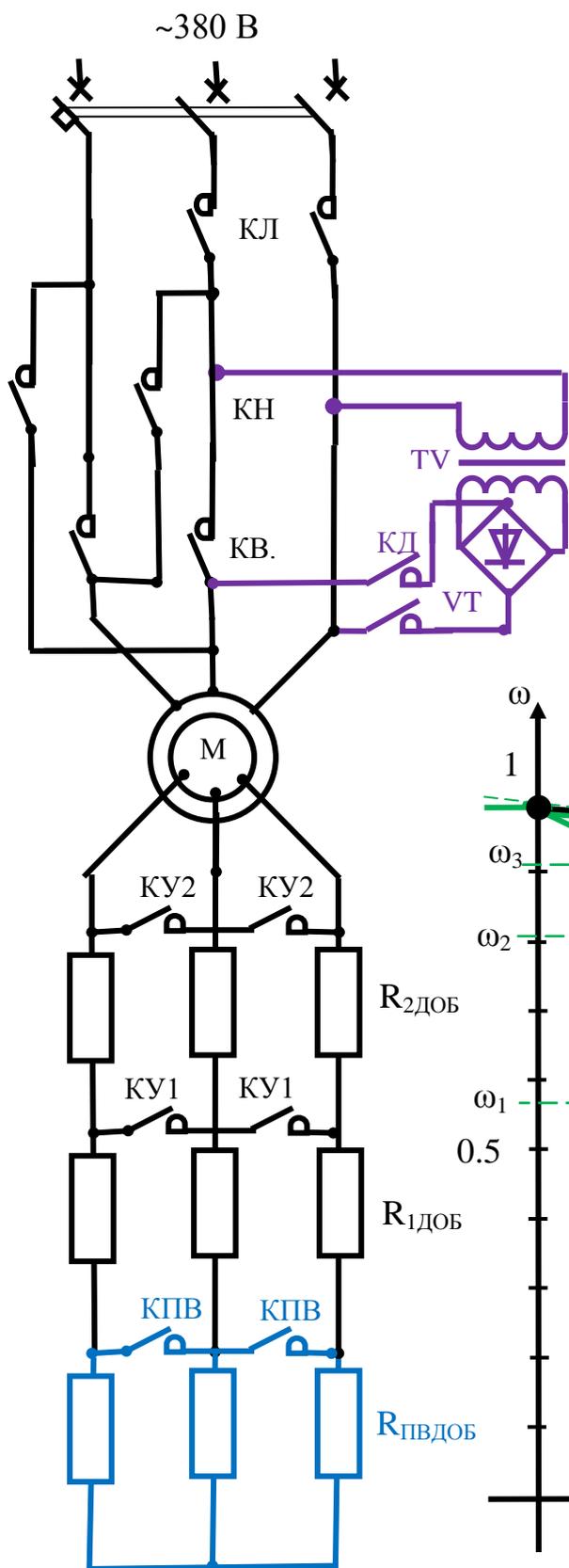


Рис. 10.2 Схема пуска и торможения АД

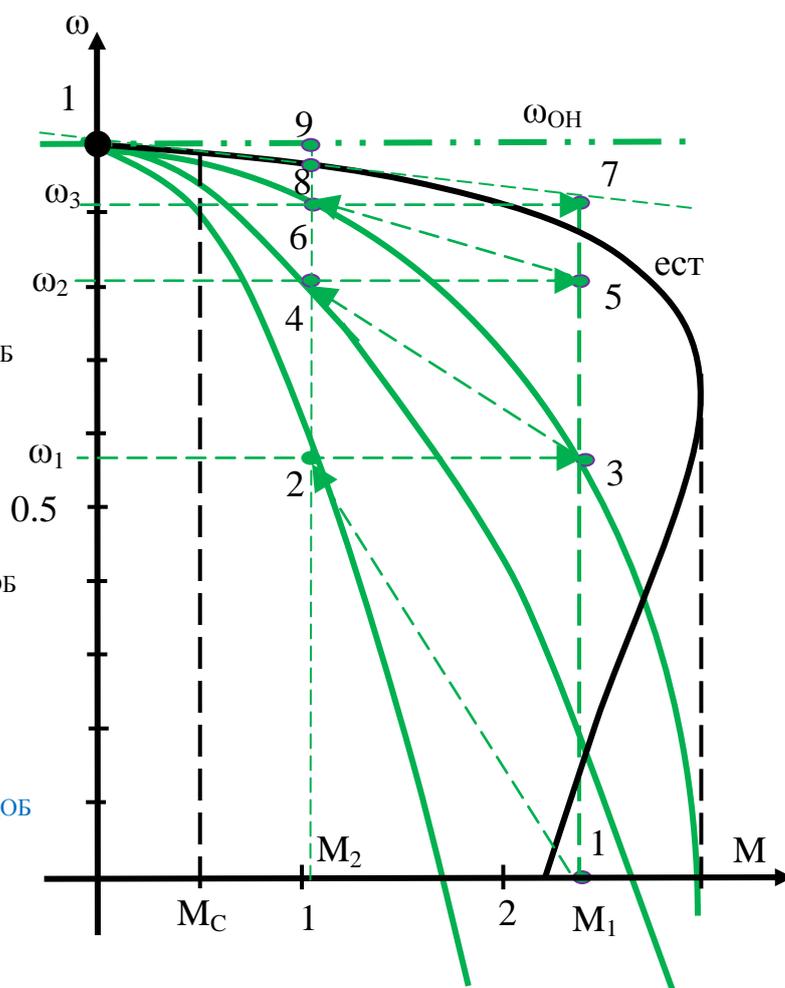


Рис. 10.3 Построение правильной пусковой диаграммы АД без учета кривизны механической характеристики

заменена прямолинейной характеристикой, проходящей через точки

$$\omega = \omega_{OH}, M = 0 \text{ и } \omega = \omega_H, M = M_H$$

(на рисунке 10.3 – характеристика ω_{OH} – точка 7) . Правильная пусковая диаграмма построена зеленым пунктиром по точкам 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Сопротивления роторной цепи соответствуют отрезкам 2 – 4, 4– 6, 6 –8, невыключаемое сопротивление роторной обмотки соответствует отрезку 8 – 9. По этим сопротивлениям в программе «harad.m» построены характеристики, показанные на рисунке сплошным зеленым цветом. Если при $M = M_2$ характеристики близки к расчетным, то при $M = M_1$ задачи расчета не выполнены.

При нелинейных механических характеристиках двигателей для построения правильной пусковой диаграммы используют методы линеаризации характеристик, описанные в технической литературе [3,7,8], с последующим подбором момента переключения M_2 .

Следует применить метод расчета, учитывающий кривизну механических характеристик. Графический метод расчета отличается от аналитического тем, что после расчета максимального момента $M1$ значение момента $M2 \geq 1,2M_C$ выбирается из условия построения правильной пусковой диаграммы при известном числе ступеней путем последовательных приближений. После построения правильной пусковой диаграммы величины сопротивлений рассчитывают графически по отклонению скорости от значения при идеальном холостом ходе. Для расчета правильной пусковой диаграммы асинхронного двигателя, обладающего нелинейной механической характеристикой, можно воспользоваться графическим методом лучевой диаграммы.

Построение правильной пусковой диаграммы показано на рис. 10.4:

- строится естественная механическая характеристика двигателя;
- находят скорости в точках а, b , при известном максимальном моменте M_1 и моменте переключения ступеней M_2 ;
- на пересечении прямой, проходящей через точки а, b, и горизонтали из точки $\omega = \omega_{OH}$ определяется полюс лучевой диаграммы в точке О;
- из точки О выполняют построение пусковой диаграммы; – при неудаче придется изменить M_2 и повторить расчет; – по отрезкам к–а, а–с, с–d графически определяют сопротивления ступеней пусковых реостатов.

На рис. 10.4 зеленым цветом показаны точки аналитического расчета. При моментах, использованных для аналитического расчета, построить пусковую диаграмму с учетом кривизны характеристики не удалось. Получена пусковая диаграмма при моменте другом M_2' . Красным цветом показаны механические характеристики, построенные в программе «harad.m», при этом число ступеней уменьшилось.

Выбор резисторов для силовых цепей двигателя производится на основе данных электрического расчёта их величин и нагрузочных диаграмм токов (см. п.16.4.3).

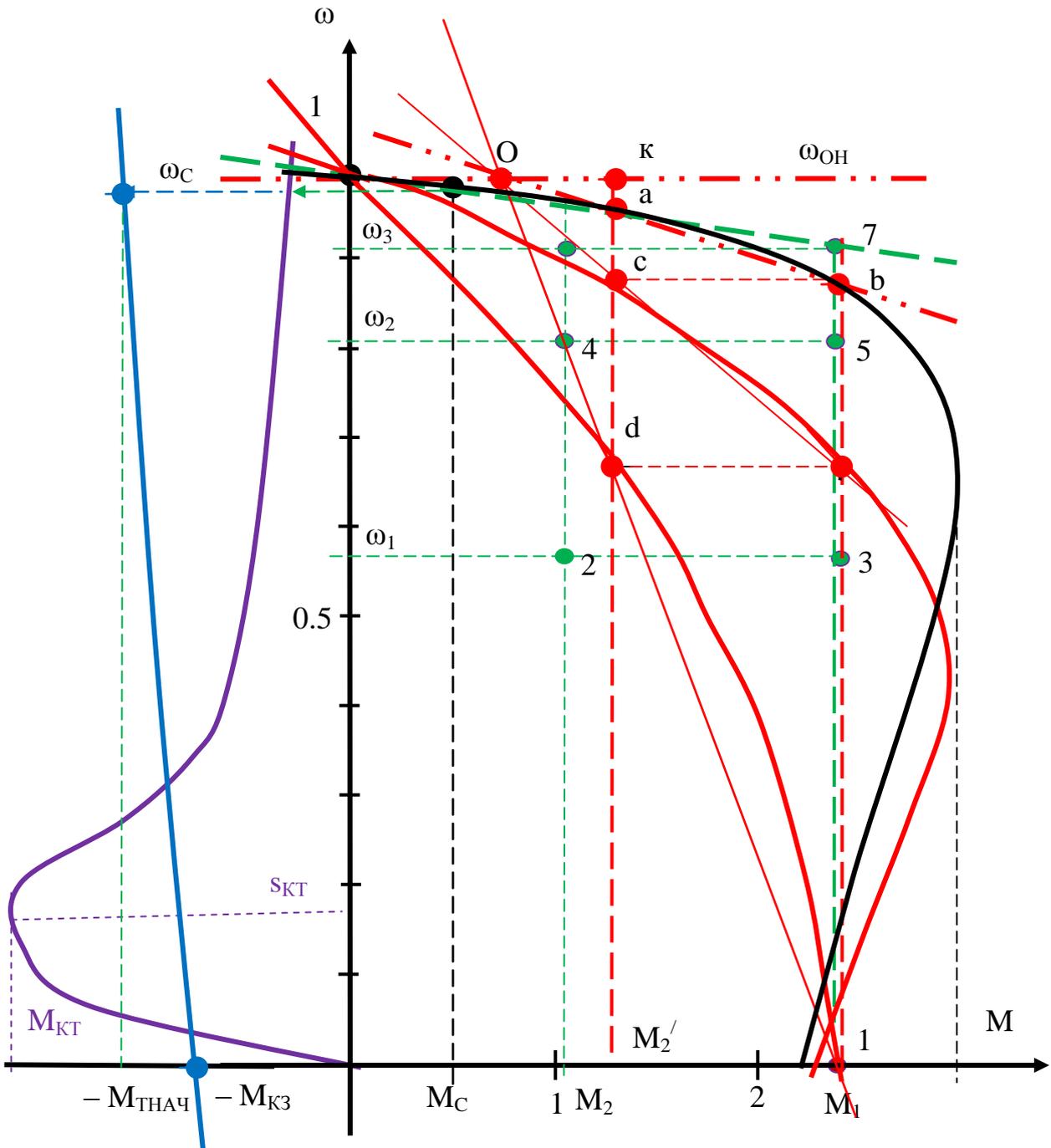


Рис. 10.4 Правильная пусковая диаграмма с учетом кривизны механической характеристики, механические характеристики динамического торможения и противовключения

10.3. Реостатное торможение

При питании двигателя от цеховой сети для торможения двигателя используют лишь динамическое торможение и торможение противовключением. Лишь для торможения многоскоростного асинхронного двигателя используют рекуперативное торможение при переходе с высокой скорости на низкую.

При реостатном торможении, как и при пуске, необходимо рассчитывать начальный тормозной момент $M_{ТНАЧ}$ из условий ограничения ускорения рабоче-

го органа на уровне допустимого значения $a_{ДОП}$. Значение этого момента $M_{ДОП.УСК}$ рассчитано в таблице 5.1. Таким образом, при переходе на торможение с начальной скорости $\omega_{НАЧ} = \omega_C$ момент двигателя принимают равным

$$M_{ТНАЧ} = M_{ДОП.УСК} = M_T.$$

Значение $M_{ТНАЧ}$ должно обеспечивать ограничение ускорения при различных статических моментах M_C и моментах инерции $J_{ПР}$, поэтому следует принимать минимальное значение $M_{ДОП.УСК}$ из всех режимов рабочего органа в цикле. Через точку $(\omega_{НАЧ}, M_{ТНАЧ})$ должна проходить прямолинейная механическая характеристика (см. рис. 10.4), а величина полного сопротивления силовой цепи двигателя (с учетом невыключаемого сопротивления)

$$R_T = r_{я} \frac{|\omega_0| + \omega_{нач}}{\Delta\omega_e}, \quad (10.4)$$

где $\Delta\omega_e$ – снижение скорости на естественной характеристике при $M = M_{ТНАЧ}$.

При динамическом торможении электропривода с прямолинейной характеристикой в формуле (10.4) нужно принять $\omega_0 = 0$. Ограничение ускорения при динамическом торможении асинхронного двигателя, если скольжение при начальной скорости больше критического скольжения $S_{НАЧ} > S_K$, обеспечивается ограничением критического момента $M_{КТ} \leq M_{ДОП.УСК} = M_T$.

Величина сопротивления в цепи ротора асинхронного двигателя при динамическом торможении определяется из условия минимального времени торможения и минимального тормозного пути, принимая $S_K = 0,3 \dots 0,5$ [3] при $\alpha = 1$. В качестве сопротивления обычно используют пусковое сопротивление или его ступени. После выбора $M_{ТНАЧ}$ рассчитывают механические характеристики двигателя для режима торможения.

Если при работе с выбранным начальным тормозным моментом не удастся обеспечивать заданное время работы в цикле, то возникает необходимость уменьшить время торможения. В этом случае за счет усложнения схемы управления электроприводом применяют торможение в две–три ступени. Если и это решение не дает нужного результата, придется отказаться от релейно-контакторной схемы управления и применить систему электропривода с индивидуальным преобразователем напряжения, тока, частоты.

10.4. Система преобразователь – двигатель

При питании двигателя от индивидуального преобразователя появляется возможность плавного регулирования напряжения (частоты), поэтому переходные процессы пуска и торможения обеспечиваются формированием напряжения управления преобразователем. В разомкнутой системе преобразователь – двигатель чаще всего применяют линейное нарастание напряжения управления, что определяет линейное нарастание напряжения (частоты) питания двигателя. В этом

случае величина динамического момента двигателя определяется темпом нарастания напряжения, и, в конечном итоге, производной скорости идеального холостого хода двигателя во времени $d\omega_0 / dt$.

В установившемся режиме нарастания скорости двигателя, когда затухают свободные составляющие переходного процесса,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_0}{dt} = \varepsilon_0 = const,$$

а величина установившегося значения динамического момента двигателя

$$M_{дин} = J\varepsilon_0 \quad (10.5)$$

Для формирования линейного закона изменения напряжения управления на вход преобразователя подключают интегральный задатчик интенсивности ЗИ, выходное напряжение которого при подаче на его вход скачка задающего напряжения $U_{зад}$ изменяется по линейному закону. При достижении величины $U_{зад}$ нарастание напряжения на выходе ЗИ прекращается. Выходное напряжение ЗИ, таким образом, является управляющим напряжением преобразователя, а величина $U_{зад}$ определяет установившуюся величину скорости ω_0 двигателя. Темп нарастания скорости определяется величиной базовой постоянной времени ЗИ $T_{ЗИ}$ (см. рис. Ж8), численно равной времени достижения выходного напряжения преобразователя от нуля до базового значения U_n (от нуля до базового значения скорости идеального холостого хода $\omega_{0н}$).

Таким образом, базовая постоянная задатчика интенсивности определяется по формуле

$$T_{зи} = \frac{\omega_{0н}}{\varepsilon_0} = \frac{J \cdot \omega_{0н}}{M_n} \cdot \frac{M_n}{M_{дин}} = \frac{T_{\partial}}{M_{дин}}, \quad (10.6)$$

$$T_{\partial} = J \cdot \frac{\omega_{0н}}{M_n}, \quad (10.7)$$

где T_{∂} – механическая постоянная времени, с;

$M_{дин}$ – относительное значение динамического момента двигателя.

Динамические моменты, ограничивающие ускорение допустимыми значениями, рассчитаны ранее и приведены в табл.5.1, а значения механической постоянной времени двигателя T_{∂} рассчитываются по формуле (10.7).

Из полученных соотношений видно, что при различных моментах инерции J величина $T_{ЗИ} = const$, а динамические моменты изменяются. Поэтому значение $T_{ЗИ}$ рассчитывают по любому сочетанию J и $M_{дин}$ (грузовой режим или режим холостого хода), но обязательно проверяют величину момента двигателя

$$M = M_c + M_{дин} \leq M_{макс.дин}.$$

С целью снижения времени пуска и торможения возможно применение пропорционально - интегрального (ПИ) задатчика интенсивности. ПИ задатчик при подаче скачка $U_{зад}$ обеспечивает за счет пропорционального канала скачок напряжения на выходе преобразователя (скачок $\Delta\omega_0$), затем выполняет линейное нарастание напряжения с помощью интегрального канала с темпом, определяемым $T_{зи}$, до величины, превышающей заданное значение $\overline{\omega}_{0кон}$ на $\Delta\omega_0$.

По достижении значения $(\overline{\omega}_{0кон} + \Delta\omega_0)$ пропорциональный канал снижает скачком выходное значение напряжения (скорости $\overline{\omega}_0$) до величины $\overline{\omega}_{0кон}$, соответствующей напряжению задания $U_{зад}$. Использование ПИ задатчика позволяет обеспечить начальный бросок момента двигателя (при неучете электромагнитной инерции силовой цепи), соответствующий допустимому по условиям ускорения. Для прямолинейной механической характеристики величина скачка $\Delta\omega_0$ определяется по формуле:

$$\Delta\omega_0 = M_{доп.уск} / \beta, \quad \beta = k_{яц} \frac{M_H}{\omega_{0н}} \quad (10.8)$$

где β – жесткость механической характеристики системы преобразователь - двигатель.

ПИ задатчик интенсивности определяет начальную пусковую механическую характеристику, проходящую через точки $\omega_0 = \Delta\omega_0$ и $M = M_{доп.уск}$.

В системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель начальная пусковая характеристика определяется минимальной частотой преобразователя, а величина пускового момента при этой минимальной частоте существенно снижена из-за значительного влияния активного сопротивления статорной цепи двигателя.

Пусковую характеристику этой системы, в которой пусковой момент был бы равен моменту, допустимому по ускорению, приходится рассчитывать методом подбора. В первом приближении – это параллельный перенос естественной механической характеристики (см. рис. 8.1). Последующий подбор проще выполнить с помощью программы harad [13].