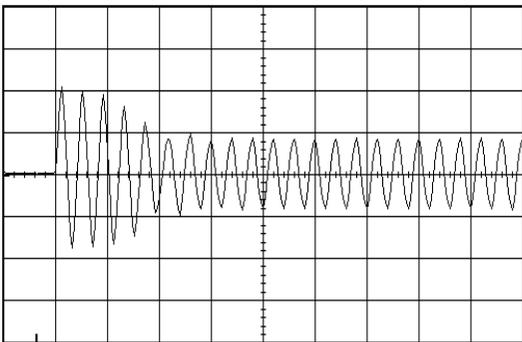
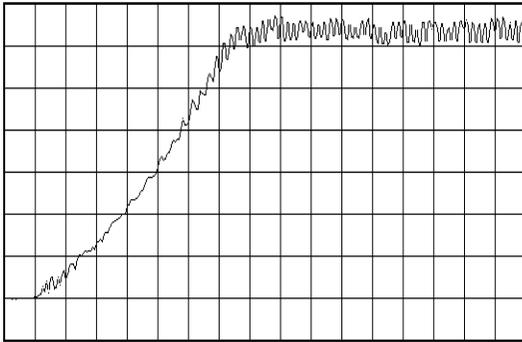


Д.А. Тонн

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

Учебное пособие



Воронеж 2007

ГОУВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Д.А. Тонн

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2007

УДК 62-83(075.8)

Тонн Д.А. Переходные процессы в автоматизированном электроприводе : учеб. пособие / Д.А. Тонн. — Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. — 130 с.

В учебном пособии рассматриваются методы расчета переходных процессов, требования к характеру их протекания, анализируются механические, электромеханические и тепловые переходные процессы в различных типах автоматизированных электроприводов.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», дисциплинам «Электрический привод» и «Теория электропривода».

Издание предназначено студентам технических специальностей, аспирантам и специалистам, занимающимся вопросами разработки электроприводов и теорией переходных процессов в них.

Ил. 38. Библиогр.: 15 назв.

Рецензенты: кафедра электрификации сельского хозяйства Воронежского государственного аграрного университета им. К.Д. Глинки (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. В.В. Картавец);

д-р техн. наук, проф. В.М. Питолин

© Тонн Д.А., 2007

© Оформление. ГОУВПО

«Воронежский государственный

технический университет», 2007

ВВЕДЕНИЕ

Электрический привод широко применяется для повышения производительности труда в разных отраслях промышленности, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Электрический привод представляет собой единую электромеханическую систему, состоящую из электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств и механической части. Электрический привод является крупнейшим потребителем электрической энергии, необходимой для работы машин и механизмов.

Электропривод занимает важное место в общепрофессиональной подготовке инженера-электромеханика, представляя необходимые знания для усвоения последующих специальных дисциплин, в частности «Системы управления электроприводами», «Автоматизированное проектирование электроприводов». Предметом изучения этих дисциплин являются физические особенности механики электропривода (ЭП), электромеханические свойства и характеристики электродвигателей (ЭД) в статических режимах, влияние упругих механических связей, способы регулирования координат ЭП, расчет мощности электропривода, переходные процессы и динамические режимы ЭП.

Электропривод представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой в каждый момент времени определяется текущими значениями ее переменных, параметров и приложенных к ней внешних воздействий. В разомкнутой электромеханической системе имеются механические переменные, такие как перемещения масс, скорости, ускорения, силы, моменты и т. п., и электрические переменные, такие как токи обмоток, потокосцепления, их производные и т. п. В связи с нагревом двигателя к числу переменных состояния следует отнести температуры различных частей двигателя, их производные и т. п. Внешними воздействиями в электромеханиче-

ской системе являются приложенные к обмоткам напряжения, а также внешние силы и моменты.

Переходные процессы в электроприводе происходят при переходе из одного установившегося состояния к другому, когда изменяются скорость, ток, момент, температура и другие параметры двигателя. В переходном режиме величины, характеризующие работу привода, непрерывно меняются.

Переходные процессы возникают в любой системе электропривода при его пуске, торможении, реверсировании и регулировании скорости, изменении нагрузки на рабочем органе, колебании напряжения или частоты питающей сети, то есть под воздействием внешнего возмущающего фактора. Реакция привода на возмущающее воздействие составляет сущность переходных процессов.

Неучет переходных процессов может отрицательно повлиять на правильность выбора мощности электродвигателя, производительности и надежности рабочего механизма, соблюдении требований технологического режима. Большинство рабочих машин к ЭП предъявляют различные жесткие требования в отношении заданного характера протекания переходного процесса. Поэтому знание физической сущности переходных процессов, законов изменения величин, характеризующих работу привода, является важнейшей задачей, возникающей при изучении вышеперечисленных дисциплин.

Основной причиной переходных процессов в электроприводах является наличие элементов, обладающих механической, электромагнитной и тепловой инерциями. В движущихся частях накапливается кинетическая энергия, в упругих элементах — потенциальная, в индуктивностях — электромагнитная, в массе двигателя — тепловая. При отсутствии инерций при скачкообразном возмущающем воздействии происходило бы мгновенное изменение скорости, момента двигателя, тока и других величин, что исключило бы возможность протекания переходных процессов. В зависимости от вида энергии, обу-

словливающей переходные процессы, различают механические, электромагнитные и тепловые процессы.

Если механическую часть электропривода рассматривать обособленно от электрической части и момент двигателя при этом задавать в виде независимой функции времени $M = f(t)$, то переходные процессы, вызванные изменениями момента двигателя или внешних нагрузок, называются механическими переходными процессами.

В электромеханической системе момент двигателя в соответствии с механической характеристикой зависит от механической переменной — скорости двигателя. Электромеханическая связь объединяет механическую и электрическую части электропривода в единую систему, переходные процессы в которой называются электромеханическими переходными процессами.

Изменения внешних воздействий приводят к изменению количества энергии, выделяющейся в двигателе в виде теплоты, и к изменениям его температуры. Процессы нагрева и охлаждения двигателя зависят от электрических и электромагнитных нагрузок его элементов. Соответственно такие переходные процессы называются электротепловыми или тепловыми переходными процессами.

Специалист-электроприводчик должен уметь математически описать переходные процессы в электроприводах, а также рассчитывать их и учитывать при составлении расчетных и структурных схем механической части электропривода (МЧ ЭП), при выполнении анализа динамических свойств систем ЭП с жесткими механическими связями и при наличии диссипативных сил, при расчете мощности и выборе ЭД.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Установившиеся режимы работы электроприводов имеют место при выполнении условия

$$M - M_C = 0. \quad (1)$$

Переходные процессы или неустановившиеся режимы имеют место при переходе привода из одного установившегося состояния в другое. При этом выполняются следующие условия:

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} \neq 0. \quad (3)$$

Среди причин возникновения переходных процессов можно назвать следующие:

- 1) изменение M_C ;
- 2) изменение M , то есть переход привода с одной характеристики на другую, имеющий место при пуске, торможении, реверсе, регулировании скорости, изменении какого-либо параметра привода.

Необходимость в анализе переходных процессов возникает в связи с тем, что:

- 1) производительность ряда ответственных механизмов определяется быстротой протекания переходных процессов;
- 2) качество выполнения многих технологических операций определяется переходными процессами;
- 3) механические и электрические перегрузки оборудования в большинстве случаев определяются переходными процессами.

В качестве объекта исследования рассмотрим упрощенную, идеализированную модель электропривода, которая показана на рис. 1.

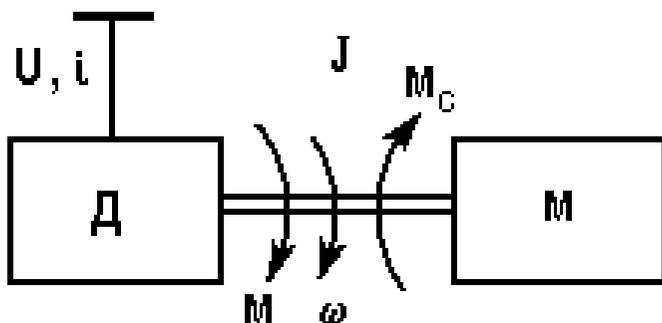


Рис. 1. Модель электропривода для исследования динамики

Основная задача при изучении переходных процессов сводится к определению зависимостей $\omega(t)$, $M(t)$ и $i(t)$ для любых конкретных приводов в любых условиях.

При изучении переходных процессов обычно полагают, что известны следующие исходные данные:

- 1) начальное состояние: $\omega_{нач}$, $M_{нач}$, $i_{нач}$;
- 2) конечное состояние: $\omega_{кон}$, $M_{кон}$, $i_{кон}$ и соответствующая ему механическая характеристика $\omega(M)$;
- 3) характер изменения во времени фактора, вызвавшего переходный процесс;
- 4) параметры электропривода.

Все возникающие практические задачи в целях их упорядоченного изучения иногда делят на четыре большие группы:

1. Преобладающей инерционностью в приводе является механическая инерционность J ; электрические инерционности L малы или не проявляются. Фактор, вызывающий переходный процесс, изменяется скачкообразно (мгновенно), то есть много быстрее, чем скорость.

К этой группе задач относятся: мгновенный наброс и сброс нагрузки, пуск, реверс, торможение, регулирование ско-

рости асинхронных двигателей при питании от сети, если не учитывать индуктивности обмоток; то же для двигателей постоянного тока независимого возбуждения, если $\Phi = const$, а $L_{я} = 0$, то же для двигателей последовательного или смешанного возбуждения, если $L_{я} = L_{в} = 0$.

2. Преобладающая инерционность — механическая J ; индуктивности электрических цепей малы или не проявляются. Фактор, вызывающий переходный процесс, изменяется не мгновенно, то есть темп его изменения соизмерим с темпом изменения скорости ω .

К этой группе задач относятся: переходные процессы в системах управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока, преобразователь частоты — асинхронный двигатель, если $L = 0$.

3. Механическая и электрическая инерционность соизмеримы. Фактор, вызывающий переходный процесс, изменяется мгновенно.

К этой группе задач относятся: переходные процессы в приводе постоянного тока при $\Phi = var$; то же при $\Phi = const$, но $L_{я} \neq 0$, то же в системе источник тока — двигатель.

4. Учитываются несколько инерционностей, фактор, вызывающий переходный процесс, изменяется не мгновенно. Эти наиболее сложные задачи, относящиеся к замкнутым системам регулирования.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРУ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Одной из важнейших функций электропривода является осуществление требуемых законов движения рабочего органа механизма в переходных процессах пуска и торможения и в других режимах изменения скорости, например при изменениях нагрузки. Переход от одного состояния системы к другому может совершаться по различным траекториям, отличающимся длительностью перехода, максимальными нагрузками, потерями и потреблением энергии, также и другими показателями. Из множества возможных траекторий при управлении электроприводом необходимо выбирать такие, которые обеспечивают максимальное быстродействие, минимум потерь энергии и динамических нагрузок, максимум полезной работы и оптимальные значения других показателей. Характер переходных процессов электропривода, соответствующий таким траекториям, является оптимальным лишь в общем смысле. Его определение является сложной задачей в связи с многообразием оптимизируемых показателей, их различной практической значимостью и противоречивостью требований к динамическим свойствам электропривода и законам изменения управляющих воздействий.

Рассмотрим общие требования к характеру переходных процессов. Наиболее часто при проектировании электроприводов требуется обеспечить изменение скорости от $\omega_{нач}$ до $\omega_{кон}$ за минимальное время при наложенном ограничении на максимально допустимый момент двигателя $M_{дон}$. Такие процессы называются оптимальными по быстродействию при ограничении момента. При $M_C = const$ этому условию соответствует равномерно ускоренный характер изменения скорости $\omega(t)$, показанный на рис. 2. (кривая 1), а при $M = M_{дон} = const$ (кривая 2). Если нагрузка механизма зави-

сит от скорости, то в соответствии с уравнением движения ускорение электропривода $\varepsilon = \text{var}$.

При реактивном моменте нагрузки скорость ω должна при реверсе изменяться в процессе торможения и пуска с различным ускорением (рис. 2.).

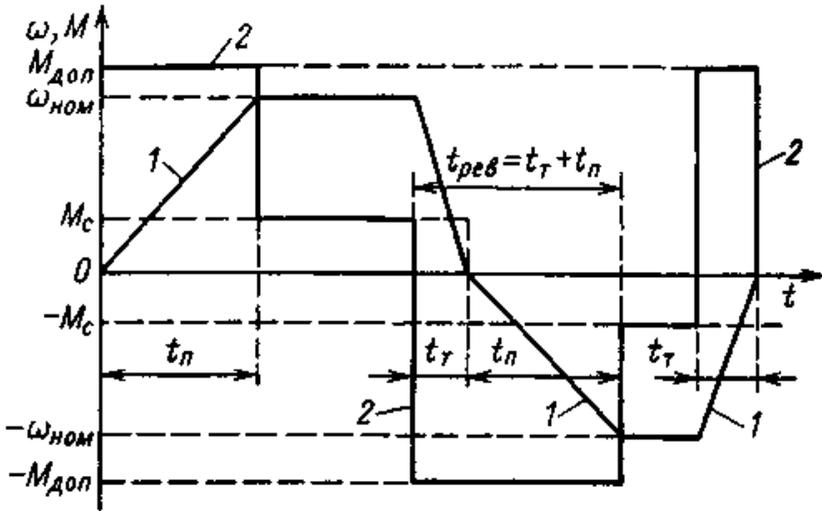


Рис. 2. Оптимальные по быстродействию процессы пуска, реверса и торможения электропривода при ограничении момента

Для ряда производственных механизмов переходные процессы электропривода должны протекать при строго ограниченном ускорении $\varepsilon < \varepsilon_{доп}$, например, такое требование предъявляется к электроприводу скоростных лифтов, что связано с неблагоприятным воздействием на организм человека динамических нагрузок, превышающих определенный предел, называемый «комфортным» ускорением. Превышать это значение ускорения недопустимо независимо от нагрузки кабины. При этом условием минимальной длительности переходных процессов является поддержание постоянства ускорения

$\varepsilon = \varepsilon_{\text{доп}} = \text{const}$ при различных нагрузках.

Такие переходные процессы называются оптимальными по быстродействию при ограничении ускорения.

Характер переходных процессов пуска при этих условиях, если момент нагрузки изменяется от минимального значения до максимального, показан на рис. 3,а. Здесь зависимость $\omega(t)$ (кривая 1) должна оставаться неизменной при разных нагрузках, а момент двигателя при максимальном и минимальном моменте M_C в соответствии с уравнением движения

$$M = J_{\Sigma} \varepsilon_{\text{доп}} + M_C \quad (4)$$

является различным (кривые 2 и 3).

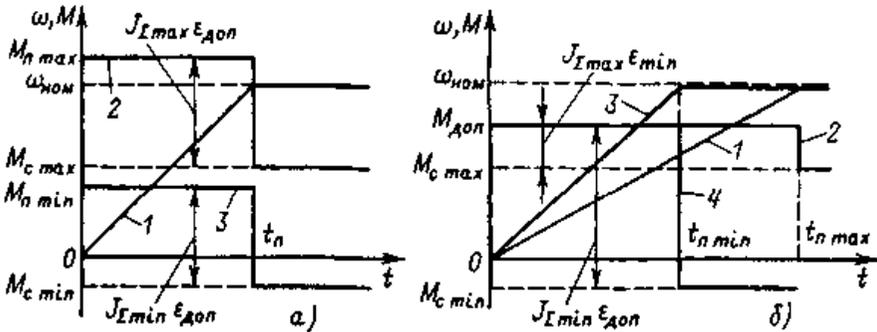


Рис. 3. Переходные процессы пуска при ограниченном ускорении

Но поддерживать ускорение постоянным удастся не всегда. В ряде случаев момент электропривода при пуске и торможении не изменяется при изменении нагрузки. При этом для ограничения ускорений при любых нагрузках необходимо выбирать значение допустимого пускового момента из следующего условия:

$$M_{\text{доп}} = J_{\Sigma} \text{min} \varepsilon_{\text{доп}} + M_{C \text{ min}}. \quad (4a)$$

Здесь учтено, что при минимальной загрузке механизма

суммарный приведенный момент инерции электропривода также может снижаться. Если пусковой момент выбран в соответствии с выражением (4а) и при различных нагрузках остается неизменным, ускорение электропривода при возрастании нагрузки уменьшается и при максимальной нагрузке принимает следующее значение:

$$\varepsilon_{\min} = (M_{\partial on} - M_{C \max}) / J_{\Sigma \max}, \quad (5)$$

где $J_{\Sigma \max}$ — суммарный приведенный момент инерции электропривода при максимальной нагрузке механизма.

Очевидно, что время пуска по мере возрастания нагрузки увеличивается. Процессы пуска при ограниченном ускорении для $M = M_{C \max}$ (кривые 1 и 2) и $M = M_{C \min}$ (кривые 3 и 4) представлены на рис. 3,б. Они отличаются от оптимальных по быстродействию при $\varepsilon = \varepsilon_{\partial on}$.

Следует понимать, что снижение ускорения по (5) и увеличение времени пуска могут быть недопустимыми по условиям технологического процесса. При этом необходимо использовать способы управления пуском, обеспечивающие переходные процессы при $\varepsilon = \varepsilon_{\partial on} = const$.

Для большинства механизмов наряду с необходимостью ограничения момента $M < M_{\partial on}$ или ускорения $\varepsilon < \varepsilon_{\partial on}$ выдвигается требование повышенной плавности протекания переходных процессов путем или ограничения производной момента $(dM/dt) < (dM/dt)_{\partial on}$, или ограничения так называемого «рывка» $\rho = d\varepsilon/dt \leq \rho_{\partial on}$. Такие переходные процессы называются оптимальными по быстродействию при ограничении момента или ускорения и рывка.

Необходимость этих ограничений вызывается различными причинами. Например, для двигателей постоянного тока по условиям коммутации необходимо ограничивать производную тока якоря $(di_{\text{я}}/dt) < (di_{\text{я}}/dt)_{\partial on}$, а следовательно, и про-

изводную момента двигателя. Для приводов с упругими связями и зазорами ограничение производной момента уменьшает динамические нагрузки, обусловленные упругими колебаниями. Для пассажирских лифтов ограничение рывка улучшает реакцию пассажиров на ускорения в переходных процессах, соответственно повышает удобство пользования лифтом.

Оптимальные графики переходных процессов пуска с ограничением производной момента $(dM/dt) < (dM/dt)_{дон}$ и $M_{Пmax} = M_{дон} = const$ представлены на рис. 4.

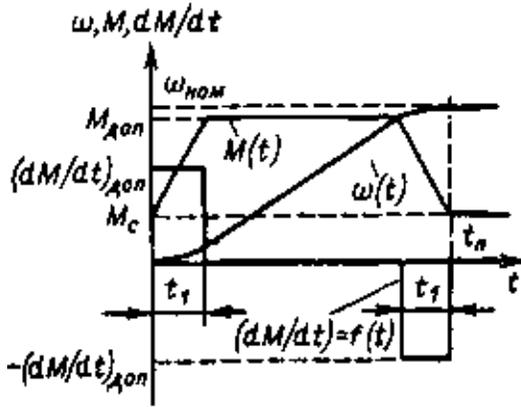


Рис. 4. Оптимальные зависимости ω , M , dM/dt , обеспечивающие минимальные динамические нагрузки

Сравнение рис. 4 с рис. 2 говорит о том, что введение дополнительного ограничения влечет за собой снижение быстродействия электропривода, так как время пуска t_n возрастает при уменьшении $(dM/dt)_{дон}$ и соответствующем увеличении времени нарастания и снижения момента t_1 .

Для электроприводов позиционных механизмов, осуществляющих заданные перемещения, в ряде случаев нагрев двигателя ограничивает производительность, при этом требуется, чтобы электропривод обрабатывал заданное перемещение

при условии минимума выделяющихся в двигателе потерь. При отсутствии других ограничений оптимальные по данному критерию зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ при $M_C = 0$ имеют вид, показанный на рис. 5,а. Из этого рисунка видно, что поставленное условие выполняется при линейном законе изменения момента при пуске и торможении и соответствующей ему параболической зависимости $\omega = f(t)$.

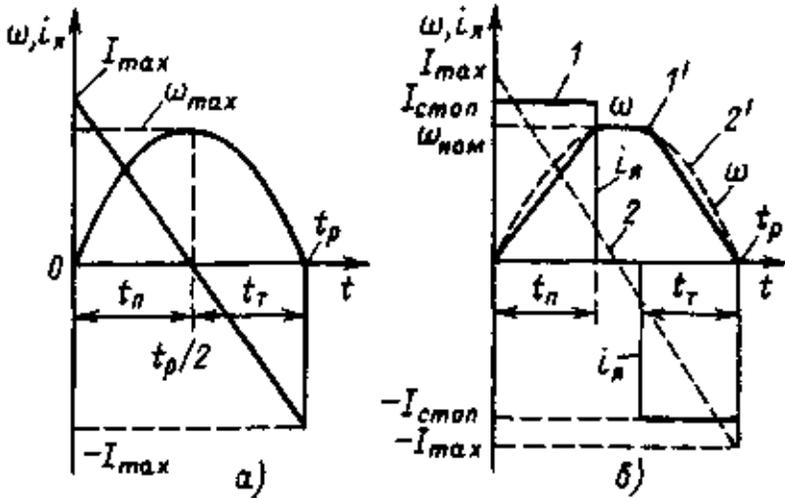


Рис. 5. Сравнение переходных процессов при минимуме потерь (а) и при $M = const$ (б)

Для сравнения на рис. 5,б приведены характеристики, соответствующие максимуму быстродействия при ограничении момента и скорости (кривые 1 и 1') и минимуму потерь при заданном перемещении (кривые 2 и 2'), у которых одинаковы время работы t_p и максимум скорости $\omega_{ном}$. Так как перемещение пропорционально площади, ограниченной кривой $\omega(t)$ и осью абсцисс, то из рис. 5 видно, что перемещение при линейном изменении момента несколько больше, чем при $M = const$. Расчетами установлено, что при одинаковом пере-

мещении потери при линейном изменении момента на 12% меньше, чем при $M = const$. Но это преимущество достигается из-за дополнительной перегрузки по моменту, т. е. имеем, что $M_{max} > M_{don}$. В связи с наличием на практике ограничения производных тока и момента это преимущество реализуется не полностью, а параболический график скорости используется редко.

Проведенный анализ дает представление о требуемых законах изменения момента, скорости и ускорения в переходных процессах электроприводов. В разомкнутой системе электропривода характер переходных процессов пуска и торможения в той или иной степени отличается от оптимального. При этом знание оптимальных зависимостей необходимо для правильной оценки качества реальных переходных процессов при различных способах пуска и торможения электропривода.

Обычно при создании, наладке и эксплуатации электроприводов требуется детальный анализ переходных процессов, соответствующих различным способам пуска и торможения, различным начальным условиям, режимам изменения нагрузки и т. п. Поэтому в теории и практике электропривода большое значение имеют методы расчета переходных процессов.

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Реальные электромеханические системы нелинейны, и их поведение в динамических режимах работы описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Нелинейности имеют два принципиально различных вида:

- 1) нелинейности характеристик элементов электромеханической системы (зазоров в механической части, кривых намагничивания стали, нелинейные обратные связи и т. п.);
- 2) нелинейности произведения переменных.

Применяемые в электроприводе методы расчета переходных процессов всегда пытаются учитывать наличие указанных нелинейностей. Использование тех или иных методов и приемов решения нелинейных задач анализа переходных процессов электропривода обычно зависит от целей и требуемой точности анализа.

Наиболее эффективным и широко используемым методом расчета переходных процессов с возможно более полным учетом нелинейностей и инерционностей электропривода является решение системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих его динамику, с помощью вычислительной техники.

При этом, если необходимо оперативно исследовать характер переходных процессов в конкретной системе при выбранных параметрах и визуально наблюдать влияние изменений их, рационально использование структурного моделирования систем электропривода.

Персональные компьютеры обладают достаточно высокой точностью расчетов и широкими возможностями исследования. Их использование для анализа переходных процессов в электроприводах представляет наибольший практический интерес в задачах исследовательского характера, когда требуется получение обобщенных зависимостей, характеризующих свойства системы при широких пределах изменения ее параметров.

Кроме того, современная вычислительная техника позволяет решать сложные задачи поиска оптимальных по тем или иным критериям параметров и управлений, поэтому ее значение для теории и практики электропривода трудно переоценить.

Несмотря на отмеченные возможности современной вычислительной техники, пока еще достаточно часто применяемым первичным инструментом при анализе динамики электропривода остаются аналитические и графоаналитические методы решения дифференциальных уравнений.

Так как математическое описание динамических процессов в электроприводе всегда в исходном варианте нелинейно, для расчета переходных процессов без применения персональных компьютеров иногда используют следующие известные методы: фазовой плоскости, конечных приращений, гармонической линеаризации, кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик, линеаризации уравнений в окрестности точки статического равновесия путем разложения в ряд Тэйлора. Причем некоторые из этих методов могут быть реализованы в стандартных программных продуктах и приложениях, которые позволяют использовать для расчетов переходных процессов в электроприводе персональные компьютеры.

Первые два метода используются для анализа переходных процессов в существенно нелинейных системах в большом. Метод фазовой плоскости является графоаналитическим методом, применимым для анализа систем не выше второго порядка. Метод конечных приращений является простейшим методом численного решения дифференциальных уравнений. Метод гармонической линеаризации является эффективным для решения задач анализа колебательных процессов в электроприводе — либо вынужденных периодическим возмущением, либо являющихся автоколебаниями.

Метод кусочно-линейной аппроксимации дает возможность аналитического исследования процессов в электроприводах, дифференциальные уравнения которых не содержат про-

изведений переменных, а нелинейные характеристики удовлетворительно линеаризуются двумя — тремя отрезками прямых.

Этот метод иногда используется при анализе динамических нагрузок в системе с зазором, при анализе характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в режиме динамического торможения с самовозбуждением, при анализе характеристик асинхронного двигателя при питании от источника тока. В тех случаях, когда в математическое описание входят произведения переменных, линеаризация его производится разложением в ряд Тэйлора, как, например, это иногда применяется при анализе динамических свойств двигателя с последовательным возбуждением и асинхронного двигателя.

При использовании кусочно-линейной аппроксимации и линеаризации анализ переходных процессов ведется путем решения линейных дифференциальных уравнений либо классическим, либо операторными методами. Более удобен для анализа режимов классический метод.

Основные тенденции в развитии автоматизированного электропривода определяют расширение области применения и повышение эффективности метода линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений в сочетании с использованием возможностей вычислительной техники.

Замена реальных нелинейных характеристик объекта линейными приводит к меньшим погрешностям в расчетах переходных процессов, а в статических характеристиках влияние нелинейностей объекта может быть неразличимым.

При питании от сети скольжение асинхронного двигателя изменяется в широких пределах и нелинейности системы настолько значительны, что линеаризация их затруднена. Тенденция к расширению области применения частотно-управляемого асинхронного электропривода создает более благоприятные условия для линеаризации его математического описания: область абсолютных скольжений сужается и не выходит за пределы рабочего участка механической характери-

стики, обеспечивается работа при постоянном потоке и т. п.

Однако возможности линейризации остаются ограниченными, и при необходимости учета особенностей, вносимых вентильными преобразователями (пульсации напряжений, условия коммутации токов и т. п.), приходится неизбежно прибегать к использованию вычислительной техники.

При анализе физических особенностей электромеханических систем часто применяемым средством остается линейризация исходного нелинейного математического описания на базе кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик и разложения в ряд Тэйлора. Полученная обобщенная структура разомкнутой системы электропривода с линейной (линеаризованной) механической характеристикой положена в основу рассмотрения электромеханических переходных процессов двигателей независимого возбуждения и асинхронных двигателей в пределах рабочего участка их механической характеристики. Основой для изучения динамических свойств синхронного нерегулируемого электропривода иногда является линеаризованная структурная схема.

Анализ переходных процессов на основе обобщенной структурной схемы электропривода с линейной механической характеристикой дает достаточные представления о переходных процессах двигателей постоянного тока с независимым (а при линейризации и с последовательным) возбуждением и асинхронных двигателей с фазным ротором. Особенности переходных процессов короткозамкнутых асинхронных двигателей требуют дополнительного рассмотрения.

Самой современной тенденцией в развитии методов расчета и анализа переходных процессов в электроприводах является широкое применение персональных компьютеров для решения всех классов задач и выполнения всех видов анализа.

Как говорилось выше, электромагнитные переходные процессы при постоянном насыщении или при ненасыщенной магнитной цепи электрической машины описываются системой

линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которой не вызывает затруднений. При учете изменения насыщения магнитной цепи дифференциальные уравнения становятся нелинейными и решаются численными методами. Такие уравнения могут быть записаны как в дифференциальной, так и в операторной форме. Совпадая по существу, они решаются по-разному. Линейные дифференциальные уравнения при малом числе уравнений в системе решаются методом редукции системы с помощью дифференцирования и исключения. При большом числе уравнений используется метод сведения неоднородной системы уравнений к однородной. Решение уравнений в дифференциальной форме записи называется классическим методом.

Операторный метод исчисления базируется на специальном интегральном преобразовании функции вещественной переменной, позволяющем заменить интегральные операции над этими функциями алгебраическими операциями над их интегральными преобразованиями. В результате удается значительно упростить решение. В операторном исчислении обычно используется преобразование Карсона-Хевисайда [1].

Метод замены переменных довольно хорошо разработан и широко представлен в литературе. Этому способствовали работы российских и зарубежных ученых И.П. Копылова [2, 3, 4, 5], Б. Адкинса [6], А.В. Иванова-Смоленского [7, 8], В. Лайона [9], Г.А. Сипайлова и А.В. Лооса [10] и др.

В первых работах по созданию математических моделей для исследования переходных процессов в электроприводах мгновенные значения токов фаз статора и ротора заменяются токами в ортогональной системе координат, неподвижной относительно ротора. Анализ проводился для идеализированной машины.

Существует метод получения дифференциальных уравнений, основанный на идеализированной модели обобщенной электрической машины (машины Г. Крона). Такая модель сво-

дит задачу к теории цепей с рассмотрением собственных и взаимных индуктивностей между обмотками. Достоинство этого метода в том, что к модели применимы линейные преобразования координат, с помощью которых перемещающиеся линейные цепи заменяются эквивалентными статическими. Дальнейшее развитие этого метода позволило создать более совершенные модели. Модель обобщенного электромеханического преобразования энергии, реализующая идеи Г. Крона, позволяет записать уравнения практически для любой электрической машины.

В работе [11] разработан универсальный метод анализа установившихся и переходных процессов, который позволяет исследовать любые режимы работы всех типов электрических машин. Метод основан на оригинальном способе приведения систем дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами к расширенной системе уравнений с постоянными коэффициентами. Этот метод можно назвать методом унифицированных элементарных переменных. Метод позволяет учитывать действие произвольного спектра пространственных гармоник. Показано, что такое приведение для несимметричных машин возможно только на основе многоэтапных преобразований и в том случае, если $\omega = const$.

Координатное представление векторных переменных в уравнениях электромагнитных процессов в электроприводах является общепринятым. В зависимости от особенностей конкретной задачи применяются прямоугольные, косоугольные, полярные и другие системы координат. Известны также и инвариантные формы представления электромагнитных процессов в двигателе, основанные на тензорной методологии. Выбор той или иной системы координат, очевидно, не влияет на физические процессы, протекающие в машине, а является лишь способом их описания. Из этого следует, что уравнения электромагнитных процессов могут быть записаны безотносительно к какой-либо системе координат или одновременно во всех

координатных системах. В установившемся режиме работы двигателя векторные переменные определенным образом ориентированы друг относительно друга. Длина векторов и угол между ними постоянны. В переходном режиме постоянная ориентация векторов нарушается. Между двумя установившимися режимами длина векторов и углы между ними являются функциями времени. Предполагается, что переходной процесс от одной ориентации векторов к другой не требует для своего математического описания введения какой-либо системы координат. Таким образом, задача сводится к нахождению дифференциальных уравнений, в которые в качестве переменных входили бы только модули векторов и углы между ними.

Сакае Ямамура предложил спирально-векторный метод (СВ-метод) анализа электромагнитных переходных процессов в электрических цепях и машинах переменного тока. Этот метод дает очень хорошие результаты и является продуктивным в широких областях электротехники. СВ-метод позволяет унифицировать выражения для переменных величин при анализе электрических цепей и таким образом создает единую теорию электрических цепей. Более того, СВ-метод упрощает и облегчает решение уравнений цепи по сравнению с известным методом мгновенных значений, а по трудоемкости приближается к методу комплексных величин. Этот метод позволяет сразу получить общее решение уравнений цепи, содержащее установившиеся и переходные составляющие. Автором разработано семь теорем, обеспечивающих работоспособность СВ-метода. Спиральный вектор является экспоненциальной функцией времени с комплексным коэффициентом при аргументе

$$i = A \cdot e^{(\lambda + j\omega)t}. \quad (6)$$

На комплексной плоскости эта функция изображается спиралью. При $\lambda = 0$ получаем окружность, соответствующую установившемуся режиму цепи, при $\omega = 0$ имеем затухающий процесс, а при $\lambda = \omega = 0$ — установившийся режим в цепи постоянного тока. Таким образом, СВ-метод может описывать

как установившиеся, так и переходные процессы в цепях переменного и постоянного тока. В работе [12] автор приводит работоспособную математическую модель АД, используемого в качестве регулируемого двигателя, полученную при использовании СВ-метода.

В публикации [13] предлагается эффективный метод расчета электромагнитных процессов в электроприводах. Системы дифференциальных уравнений, описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в электрических машинах, могут оказаться «жесткими», т. е. содержать в решении «быстрые» и «медленные» компоненты. Жесткость системы может быть связана и с определенным сочетанием параметров машины или их изменением в различных режимах. Эффективность этого метода достигается применением формул дифференцирования назад (ФДН) при решении жестких систем уравнений для электрических контуров обмоток и использованием расщепления линейного оператора для обеспечения сходимости итераций.

В работе [14] предлагается использовать локальные ряды Фурье (F-преобразование) для численного расчета «жестких» систем дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы. Это делается на основании того, что любой непериодический процесс может быть представлен на произвольно выбранном интервале рядом Фурье, что подразумевает его периодизацию за пределами этого интервала. Применение F-преобразования позволяет в аналитическом виде сформировать из системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами систему уравнений в конечных разностях и тем самым привести исходные уравнения к виду, используемому при проведении численных расчетов.

Для численного решения дифференциальных уравнений с применением стандартных программных продуктов на пер-

сональных компьютерах в основном используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

С развитием измерительного оборудования, например с появлением различных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и так называемых «виртуальных осциллографов», развиваются и экспериментальные методы исследования переходных процессов в ОАД.

Электромеханические процессы в электроприводах можно исследовать также методами, в которых используется теорема Умова-Пойтинга, уравнения Максвелла, то есть полевыми методами. Однако эти методы сложны, и с их помощью целесообразно изучать конкретные режимы работы, где использование постоянных параметров и неучет нелинейностей приводит к значительным ошибкам в расчетах и анализе.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Изменения управляющего или возмущающего воздействия вызывают в механической части электропривода переходные процессы, в течение которых скорости движения связанных масс изменяются от начальных значений, определяемых начальными условиями, к установившимся значениям, заданным новыми воздействиями на систему. Рассмотрим переходные процессы в механической части электропривода, представленной жестким механическим звеном.

Допустим, начальная скорость равна нулю: $\omega_{нач} = 0$, а к ротору двигателя в момент времени $t = 0$ прикладывается электромагнитный момент двигателя, изменяющийся по экспоненциальному закону с постоянной времени T (рис. 6.):

$$M = \Delta M e^{-t/T} + M_C. \quad (7)$$

Решив уравнение движения электропривода относительно дифференциала скорости, получим

$$d\omega = \varepsilon \cdot dt, \quad (8)$$

где ε — ускорение масс механической части.

Проинтегрируем обе части полученного равенства при заданном законе изменения движущего момента, имеем

$$\int_0^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M - M_C}{J} dt = \int_0^t \varepsilon_{нач} e^{-t/T} dt. \quad (9)$$

В результате получим

$$\omega = \varepsilon_{нач} \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (9a)$$

где $\varepsilon_{нач} = (d\omega/dt)_{нач} = (M_{нач} - M_C)/J = \Delta M/J$ — начальное ускорение; $M_{нач} = \Delta M + M_C$ — начальный момент двигателя.

На рис. 6. построены характеристики $M=f(t)$ и $\omega = \varepsilon_{нач} \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T})$.

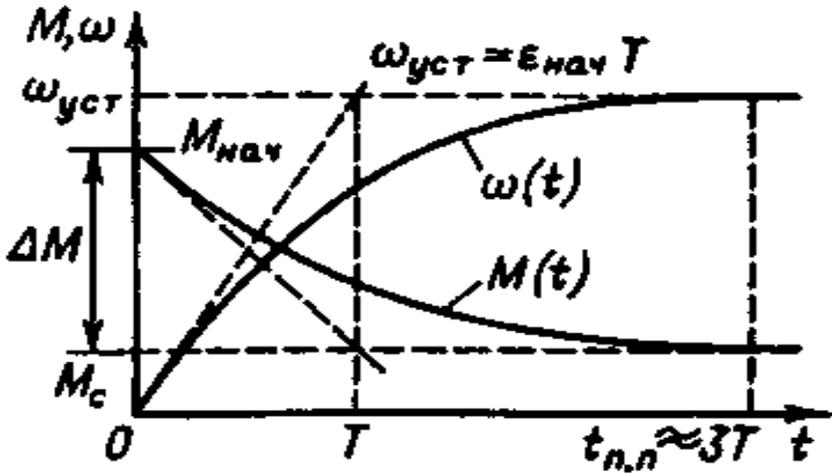


Рис. 6. Переходной процесс пуска электропривода при экспоненциальной зависимости момента от времени

Скорость нарастает по экспоненциальному закону от нуля до установившегося значения $\omega_{уст} = \epsilon_{нач} \cdot T$ с ускорением, уменьшающимся по мере возрастания скорости, в связи с уменьшением момента $M - M_c$, которому ускорение пропорционально. Все это соответствует переходному процессу пуска электропривода до скорости $\omega_{уст}$. Время переходного процесса теоретически равно бесконечности, а практически процесс можно считать закончившимся в соответствии со свойством экспоненты через время $t_{нп} = (3..4)T$. Как видно из расчетных данных, переходный процесс заканчивается с точностью до 5 % за $3T$ и с точностью до 2 % за $4T$.

Рассмотрим условия движения электропривода при постоянных моментах двигателя и сопротивления. В результате

интегрирования $\int_{\omega_{нач}}^{\omega} d\omega = \int_0^1 \varepsilon \cdot dt$ получим известную формулу

равномерно ускоренного движения:

$$\omega = \omega_{нач} + \varepsilon \cdot t. \quad (9б)$$

Далее определим время переходного процесса t_{nn} изменения скорости от $\omega_{нач}$ до $\omega_{кон}$:

$$\begin{aligned} t_{n.n} &= (\omega_{кон} - \omega_{нач}) / \varepsilon = \\ &= J_{\Sigma} (\omega_{кон} - \omega_{нач}) / (M - M_C). \end{aligned} \quad (10)$$

При $M=M_C$, $\varepsilon=0$ электропривод сохраняет состояние покоя ($\omega_{нач}=0$) или равномерного движения ($\omega=\omega_{нач}=const$) до тех пор, пока равенство $M=M_C$ не будет нарушено.

На рис. 7, а показан случай, когда при $t=0$, $M=M_C$ имеет место состояние покоя ($\omega_{нач}=0$). В момент $t=0$ момент двигателя скачком увеличивается до значения $M=M_1 > M_C$ и электропривод сразу переходит в режим равномерно ускоренного движения с ускорением $\varepsilon_1 = (M_1 - M_C) / J_{\Sigma}$. Если оставить момент двигателя неизменным ($M=M_1=const$), этот режим будет длиться сколь угодно долго, а скорость неограниченно возрастать. На практике при достижении электроприводом требуемой скорости обеспечивается снижение момента двигателя до $M=M_C$, ускорение скачком уменьшается до нуля и наступает статический установившийся режим при $\omega=\omega_{кон}$, как показано на рис. 7,а. Следовательно, в данном случае имеет место переходный процесс изменения скорости от $\omega_{нач}$ до $\omega_{кон}$, который обеспечивается соответствующими изменениями момента двигателя.

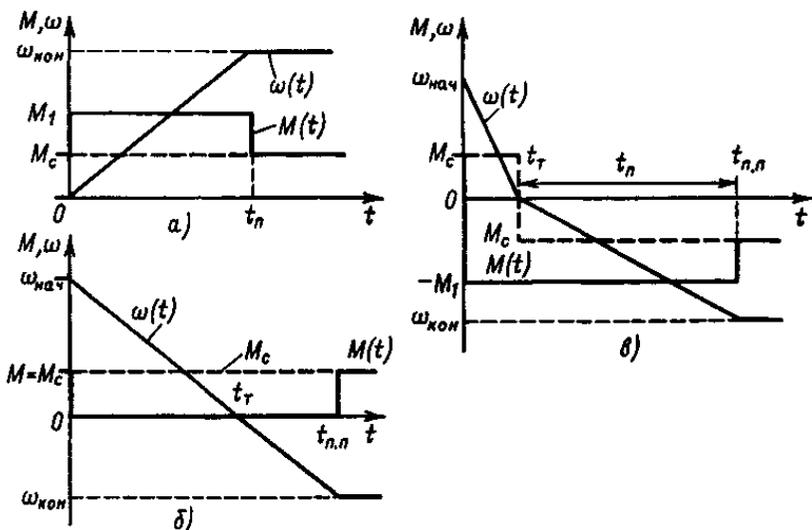


Рис. 7. Переходные процессы электропривода
при $M = const$ и $M_C = const$

При прочих равных условиях на изменения скорости электропривода существенное влияние оказывает характер момента сопротивления. Пусть система нагружена активным моментом M_C , обусловленным, например, весом поднимаемого груза, и работает в установившемся режиме подъема груза с постоянной скоростью при $M = M_C$.

Если в момент времени $t=0$ уменьшить момент двигателя до нуля, под действием момента M_C привод станет замедляться, при этом $\varepsilon = (-M_C)/J_\Sigma$. Скорость в данном случае будет изменяться по закону (рис. 7,б)

$$\omega = \omega_{нач} - (M_C / J_\Sigma) \cdot t. \quad (11)$$

Через время торможения $t_T = J_{\Sigma} \omega_{нач} / M_C$ скорость двигателя становится равной нулю, но активный момент сохраняет свое значение, и двигатель начинает ускоряться в противоположном направлении, двигаясь с возрастающей по абсолютному значению скоростью. Если изменений не произойдет, скорость может возрасти до недопустимых значений, опасных для двигателя и механизма. Поэтому отключение двигателя от сети для механизмов с активной нагрузкой представляет опасность, и такие механизмы обязательно снабжаются механическим тормозом, который автоматически затормаживает привод после отключения двигателя от сети.

На рис. 7,б показан переходный процесс реверса электропривода от $\omega_{нач}$ до $\omega_{кон} = -\omega_{нач}$ под действием активного момента M_C . В момент времени t_{III} , когда достигается требуемое значение скорости $\omega_{кон}$, момент двигателя скачком увеличивается от нуля до $M = M_C$ и наступает статический режим работы с $\omega_{кон} = const$.

На рис. 7,в представлен процесс реверса электропривода при реактивном моменте M_C от начальной скорости $\omega_{нач}$ одного направления до конечной скорости $\omega_{кон}$ противоположного знака. В момент времени $t=0$ момент двигателя скачком изменяется от $M = M_C$ до $M = -M_I$ и происходит замедление системы по закону

$$\omega = \omega_{нач} - (M_I + M_C)t / J_{\Sigma} = \omega_{нач} - \varepsilon_T t. \quad (12)$$

Время торможения электропривода определяется как

$$t_T = J_{\Sigma} (-\omega_{нач}) / (-M_I - M_C) = \omega_{нач} / \varepsilon_T. \quad (13)$$

При $t > t_T$ скорость двигателя под действием момента $M = -M_I$ меняет свой знак, а это вызывает изменение направле-

ния реактивной нагрузки M_C на противоположное ($-M_C$). В следствие чего ускорение уменьшается скачком по абсолютному значению.

При пуске в обратном направлении скорость изменяется следующим образом:

$$\omega = -(M - M_C)t / J_{\Sigma}. \quad (14)$$

Время пуска до скорости $\omega = -\omega_{\text{кон}}$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} t_{\text{П}} &= J_{\Sigma} (-\omega_{\text{кон}}) / (-M_I + M_C) = \\ &= \omega_{\text{кон}} / \varepsilon_{\text{П}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для перехода к статическому режиму при скорости $\omega = -\omega_{\text{кон}}$ момент двигателя должен скачком уменьшиться до значения $M = -M_C$. Характеристики $M(t)$ и $\omega(t)$, соответствующие такому переходному процессу, представлены на рис. 7,в.

Рассмотренные выше случаи позволяют сделать **вывод** о том, что при постоянстве статического момента сопротивления закон изменения скорости привода в переходных процессах определяется характером изменения во времени момента двигателя. Для получения экспоненциальной кривой скорости $\omega(t)$ при пуске необходимо обеспечить экспоненциальную зависимость момента от времени (рис. 6). Для получения равномерно ускоренного процесса пуска необходимо формировать прямоугольный закон изменения момента двигателя от времени (рис. 7,а) и т. п.

Формирование требуемых законов движения электропривода обеспечивается формированием соответствующих законов изменения от времени электромагнитного момента двигателя.

Уравнение движения жесткого приведенного механического звена электропривода позволяет в наиболее простой и наглядной форме анализировать условия движения привода. Если известен характер изменения момента двигателя и приве-

денного момента нагрузки, с помощью уравнения движения электропривода можно установить качественный характер кривой $\omega(t)$, не прибегая к решению этого уравнения. На рис. 8,а показаны вентиляторная нагрузка $M_C(\omega)$ и постоянный момент двигателя $M - M_{Cном} = const$. В соответствии с уравнением движения привод будет двигаться с ускорением

$$\varepsilon = \frac{M_{Cном} - \Delta M_{\Sigma} - (M_{Cном} - \Delta M_E) (\omega / \omega_{в.ном})^2}{J_{\Sigma}}, \quad (16)$$

где ΔM_{Σ} — суммарный момент потерь на трение в агрегате;
 $M_{Cном}$ — номинальный момент статической нагрузки, соответствующий номинальной скорости вентилятора $\omega_{в.ном}$.

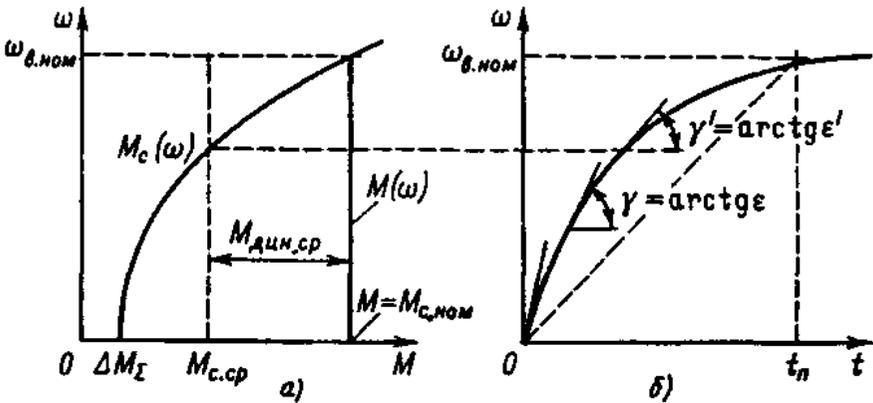


Рис. 8. Переходные процессы при пуске вентилятора

Так как $\varepsilon = d\omega/dt$, то (16) при каждом значении скорости определяет тангенс угла наклона касательной к кривой $\omega(t)$ в данной точке. В соответствии с (16) ускорение монотонно убывает от начального значения

$$\varepsilon_{нач} = (M_{Cном} - \Delta M_{\Sigma}) / J_{\Sigma} \quad (17)$$

до конечного $\varepsilon_{кон}=0$.

Такой закономерности качественно соответствует кривая $\omega(t)$, приведенная на рис. 8,б. Количественной оценкой может служить ориентировочное значение времени пуска электропривода. Его можно вычислить, заменив кривую $MC(\omega)$ постоянным моментом нагрузки, равным среднему значению $MC(\omega)=M_{Ccp}$, как показано на рис. 8,а. При этом удастся оценить среднее ускорение и далее определить ориентировочное время пуска:

$$\varepsilon_{cp} = (M_{Cном} - M_{Ccp}) / J_E; \quad (18)$$

$$t_{II} \approx \omega_{в.ном} / \varepsilon_{cp}. \quad (19)$$

Если имеется экспериментальная осциллограмма $\omega=f(t)$ для пуска двигателя вентилятора (рис. 8,б) и известен момент двигателя $M = M_{Cном} = const$, то по осциллограмме при разных значениях ω можно определить соответствующие значения ускорения ε и с помощью (16) вычислить механическую характеристику вентилятора $MC(\omega)$, показанную на рис. 8,а.

В современных условиях, когда инженер может решать задачи любой сложности с помощью вычислительной техники, умение производить подобные оценочные расчеты приобретает особое значение. Такие оценки помогают в условиях наладки и эксплуатации оперативно анализировать работу электропривода, а при проектировании и исследовании электроприводов контролировать и правильно понимать физическую суть математических результатов, выдаваемых компьютером.

5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

5.1. Электромеханические переходные процессы электропривода с линейной механической характеристикой при $\omega_0 = const$

Анализ динамических свойств обобщенной разомкнутой электромеханической системы с упругой механической связью, структура которой показана на рис. 9 и 10, позволяет при рассмотрении электромеханических переходных процессов сосредоточить внимание на характере переходных процессов электропривода при жестких механических связях, приняв $c/2 = \infty$ [15].

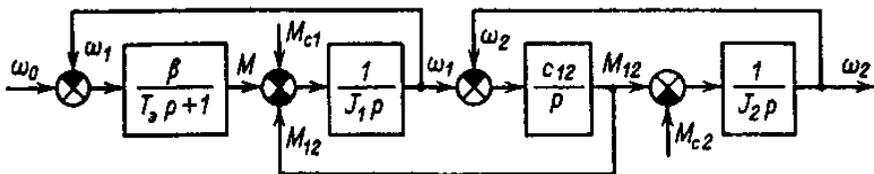


Рис. 9. Структурная схема обобщенной системы электропривода с двигателем, обладающим линейной механической характеристикой

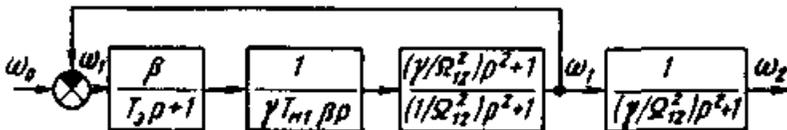


Рис. 10. Преобразованная структурная схема двухмассовой упругой системы

В соответствующей этому условию структурной схеме электропривода с линейной механической характеристикой (см. рис. 11) скорость идеального холостого хода ω_0 является обобщенным управляющим воздействием. Значения ω_0 для электропривода постоянного тока определяются приложенным к якорной цепи напряжением $u_{я}$, а для асинхронного электропривода — частотой тока статора f_1 .

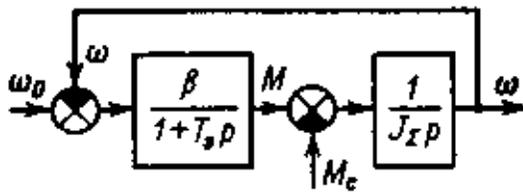


Рис. 11. Структурная схема электропривода с линейной механической характеристикой при $c_{12} = \infty$

В широко применяемых электроприводах, получающих питание от сети, электромеханические переходные процессы протекают при неизменном напряжении $u_{я}$ или частоте f_1 , т.е. при $\omega_0 = const$.

Переходные процессы электропривода при этом могут быть вызваны:

- 1) включением двигателя, при этом ω_0 скачком изменяется от нуля до $\omega_{0ном}$ (режим пуска);
- 2) изменением знака $\omega_{0ном}$ скачком (режим торможения противовключением, реверс);
- 3) отключением двигателя от сети и включением по схеме динамического торможения, при котором ω_0 скачком

уменьшается от $\omega_{\text{ном}}$ до нуля (режим динамического торможения);

4) изменением сопротивления якорной R_{Σ} или роторной $R'_{2\Sigma}$ цепи двигателя при $M_C = \text{const}$ (изменение скорости электропривода);

5) изменением нагрузки на валу двигателя (скачок нагрузки).

Так как переходные процессы при пуске и торможении должны протекать при ограниченных значениях тока двигателя, то при $\omega = \text{const}$ в силовую цепь вводятся добавочные резисторы $R_{\text{я.доб}}$ для двигателей постоянного тока и $R_{2\text{доб}}$ для асинхронных двигателей, при этом влияние электромагнитной инерции снижается и при достаточно большом сопротивлении добавочного резистора можно приближенно при расчете переходных процессов принимать $T_{\text{Э}} = 0$. Необходимость учета электромагнитной инерции ($T_{\text{Э}} \neq 0$) обычно возникает при расчете переходных процессов, когда добавочные резисторы отсутствуют и двигатель работает на естественной характеристике.

Получим общее решение дифференциального уравнения системы при $T_{\text{Э}} \neq 0$ и ненулевых начальных условиях. Электромеханические переходные процессы в рассматриваемой системе описываются уравнением механической характеристики и уравнением движения электропривода при $c_{12} = \infty$:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) - T_{\text{Э}} \frac{dM}{dt}; M - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (20)$$

Решив второе уравнение (20) относительно момента M и подставив это выражение в первое, получим дифференциальное уравнение системы, решенное относительно скорости:

$$T\partial T_M \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = \omega_C. \quad (21)$$

Аналогично получим дифференциальное уравнение системы, решенное относительно момента:

$$T\partial T_M \frac{d^2M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_C. \quad (22)$$

Если $m = T_M/T\partial < 4$, то

$$p_{1,2} = -(1/2T\partial) \pm j\sqrt{(1/T\partial T_M) - (1/2T\partial)^2} = -a \pm j\Omega_p, \quad (23)$$

при этом общее решение уравнения (21) следует искать в виде

$$\omega = \omega_C + e^{-\alpha t} (A \cos \Omega_p t + B \sin \Omega_p t). \quad (24)$$

Уравнения для определения коэффициентов A и B можно получить, подставив в (24) следующие начальные условия:

$$t = 0; (\omega)_0 = \omega_{нач}; (d\omega/dt)_0 = (M_{нач} - M_C)/J_\Sigma, \quad (25)$$

тогда

$$\omega_{нач} = \omega_C + A; (M_{нач} - M_C)/J_\Sigma = -aA + \Omega_p B. \quad (26)$$

Определив A и B и подставив их выражения в (24), получим решение дифференциального уравнения (21) в виде

$$\omega = \omega_C + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{нач} - \omega_C) \cos \Omega_p t + \frac{(M_{нач} - M_C) + J_\Sigma \alpha (\omega_{нач} - \omega_C)}{J_\Sigma \Omega_p} \sin \Omega_p t \right]. \quad (27)$$

При $m < 4$ общее решение уравнения (22) следует искать в виде

$$M = M_C + e^{-\alpha t} (C \cos \Omega_p t + D \sin \Omega_p t). \quad (28)$$

Для нахождения коэффициентов C и D необходимо определить начальное значение производной момента $(dM/dt)_0$, полагая $(M)_0 = M_{нач}$. В соответствии с первым уравнением си-

стемы (20) при $(\omega)_0 = \omega_{нач}$ имеем

$$M_{нач} = \beta(\omega_0 - \omega_{нач}) - T\mathcal{E}(dM/dt)_0, \quad (29)$$

откуда

$$(dM/dt)_0 = (\beta\Delta\omega_{нач} - M_{нач})/T\mathcal{E}, \quad (30)$$

где $\Delta\omega_{нач} = \omega_0 - \omega_{нач}$.

Полученные начальные условия при подстановке в (28) дают уравнения для определения C и D :

$$\begin{aligned} M_{нач} &= M_C + C; \\ (\beta\Delta\omega_{нач} - M_{нач})/T\mathcal{E} &= -\alpha C + \Omega_p D. \end{aligned} \quad (31)$$

Решив эти уравнения относительно C и D и подставив решения в (28), получим

$$\begin{aligned} M &= M_C + e^{-\alpha t} \left[(M_{нач} - M_C) \cos \Omega_p t + \right. \\ &+ \left. \frac{\beta\Delta\omega_{нач} - M_{нач}(1 - \alpha T\mathcal{E}) - \alpha T\mathcal{E} M_C}{T\mathcal{E} \Omega_p} \sin \Omega_p t \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

Если $m > 4$, то $p_1 = -\alpha_1$ и $p_2 = -\alpha_2$. В этом случае общее решение уравнения (21) должно быть записано так:

$$\omega = \omega_C + A' e^{-\alpha_1 t} + B' e^{-\alpha_2 t}. \quad (33)$$

Значения коэффициентов A' и B' определяются аналогично определению A и B в (24) при тех же начальных условиях. Определив A' и B' и подставив их в (33), получим

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_C - \left[\frac{\alpha_2(\omega_{нач} - \omega_C)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{нач} - M_C}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \right] e^{-\alpha_1 t} - \\ &- \frac{(M_C - M_{нач}) - \alpha_1 J_\Sigma(\omega_{нач} - \omega_C)}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} e^{-\alpha_2 t}. \end{aligned} \quad (33a)$$

Таким же образом при $m > 4$ получается общее решение (22):

$$M = M_C - \left[\frac{\alpha_2 (M_{нач} - M_C)}{\alpha_1 - \alpha_2} - \frac{M_{нач} - \beta \Delta \omega_{нач}}{T \mathcal{E} (\alpha_1 - \alpha_2)} \right] e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_{нач} - \beta \Delta \omega_{нач}) - \alpha_1 T \mathcal{E} (M_{нач} - M_C)}{T \mathcal{E} (\alpha_1 - \alpha_2)} e^{-\alpha_2 t}. \quad (34)$$

Полученные решения позволяют рассчитывать все перечисленные выше переходные процессы при $\omega_0 = const$ при любых начальных условиях и сочетаниях параметров, если $m < 4$ и $m > 4$. В трех редких случаях, когда $m = 4$ и $p_1 = p_2 = -\alpha$, решения уравнений (21) и (24) следует искать в виде

$$\omega = \omega_C + e^{-\alpha t} (A'' + B'' t), \quad (35)$$

$$M = M_C + e^{-\alpha t} (C'' + D'' t)$$

и определять неопределенные коэффициенты A'' , B'' , C'' и D'' по тем же начальным условиям, что и рассмотренные ранее.

Используем полученные решения для анализа конкретных переходных процессов в разомкнутой системе электропривода с линейной механической характеристикой. Учет влияния электромагнитной инерции требуется при работе электропривода на естественной механической характеристике. Для многих механизмов значительный интерес представляет оценка падения скорости электропривода, обусловленного ударным приложением нагрузки. Рассмотрим этот режим.

5.1.1. Электромеханические переходные процессы электропривода, обусловленные ударным приложением нагрузки

На рис. 12,а представлена естественная механическая характеристика двигателя 1. Пусть двигатель работает в статическом режиме $M = M_{C.нач}$, $\omega = \omega_{C.нач}$, причем $m < 4$. В момент времени $t=0$ нагрузка скачком увеличивается от $M_{C.нач}$ до M_C .

Так как предшествующий режим был установившимся, в (27) и (32) $M_{нач} = M_{C.нач}$ и $\omega_{нач} = \omega_{C.нач}$.

Учтем, что при этом

$$(M_{C.нач} - M_C) / (\omega_{C.нач} - \omega_C) = -\beta, \quad (36)$$

$$T_M = J_\Sigma / \beta, \quad (37)$$

тогда уравнение (27) примет вид

$$\omega = \omega_C + (\omega_{C.нач} - \omega_C) e^{-\alpha t} \left(\cos \Omega_p t + \frac{\alpha T_M - 1}{\Omega_p T_M} \sin \Omega_p t \right). \quad (38)$$

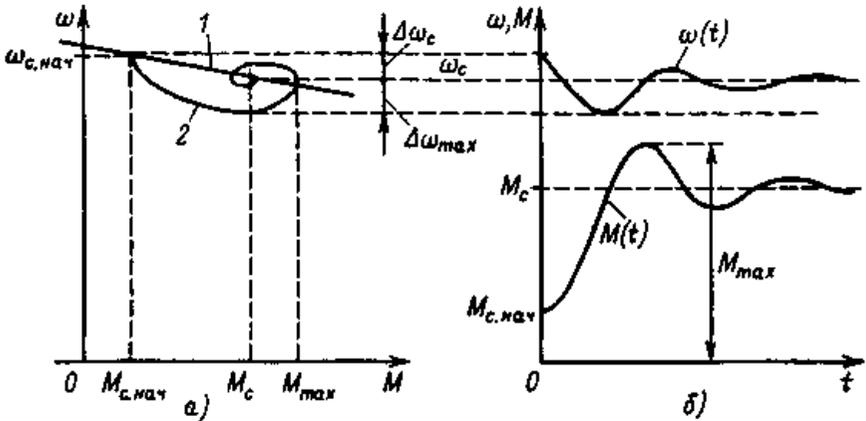


Рис. 12. Переходные процессы при приложении нагрузки

При записи уравнения (32) для рассматриваемого режима нужно учесть, что при $M_{нач} = \beta \Delta \omega_{нач}$ в соответствии с (30) $(dM/dt)_{t=0} = 0$:

$$M = M_C + (M_{C.нач} - M_C) e^{-\alpha t} \left(\cos \Omega_p t + \frac{\alpha}{\Omega_p} \sin \Omega_p t \right). \quad (39)$$

Общий характер процесса при этом определяется отно-

шением постоянных времени t и для $t=1$ иллюстрируется зависимостями ω , $M = f(t)$, приведенными на рис. 12,б. Физические особенности процесса удобно проследить, сопоставляя естественную характеристику 1 с построенной с помощью графиков на рис. 12,б динамической механической характеристикой для рассматриваемого процесса 2 (рис. 12,а). При возрастании скачком момента нагрузки происходит процесс снижения скорости, вызывающий, в свою очередь, рост тока и момента двигателя. Но вследствие наличия индуктивности рассеяния нарастание момента двигателя идет медленнее, а скорость снижается в большей степени, чем это определяется статической характеристикой 1. Поэтому при возрастании момента до $M=M_C$ скорость $\omega < \omega_C$, что влечет за собой дальнейший рост момента до M_{max} . Колебания затухают, и после двух-трех их периодов достигается установившийся режим $M=M_C$, $\omega = \omega_C$.

Максимальное динамическое падение скорости $\Delta\omega_{max}$ при этом превышает статическое падение $\Delta\omega_C$ в тем большей степени, чем больше жесткость статической характеристики и чем больше $TЭ$. Отклонения скорости от требуемого значения из-за электромагнитной инерции существенно увеличиваются, что для механизмов с ударной нагрузкой в ряде случаев по условиям технологии является неблагоприятным. Увеличение модуля динамической жесткости в широком диапазоне частот влечет за собой уменьшение динамического перепада скорости при ударном приложении нагрузки. Если предшествующий режим не является установившимся, пользоваться для расчета уравнениями (38) и (39) недопустимо, так как для этого случая решения имеют вид (27) и (32).

Во всех случаях, когда электропривод работает на реостатных характеристиках, можно принимать $TЭ=0$, при этом электропривод с линейной механической характеристикой

представляет собой апериодическое звено с постоянной времени T_M . Уравнения переходного процесса для этих условий получим с помощью (34) и (38), положив в них $\alpha_1 = \alpha = -1/T_M$ и $\alpha_2 = \infty$:

$$\omega = \omega_C + (\omega_{нач} - \omega_C)e^{-t/T_M}; \quad (40)$$

$$M = M_C + (M_{нач} - M_C)e^{-t/T_M}. \quad (41)$$

Графики переходного процесса, соответствующие (40) и (41), представлены на рис. 13.

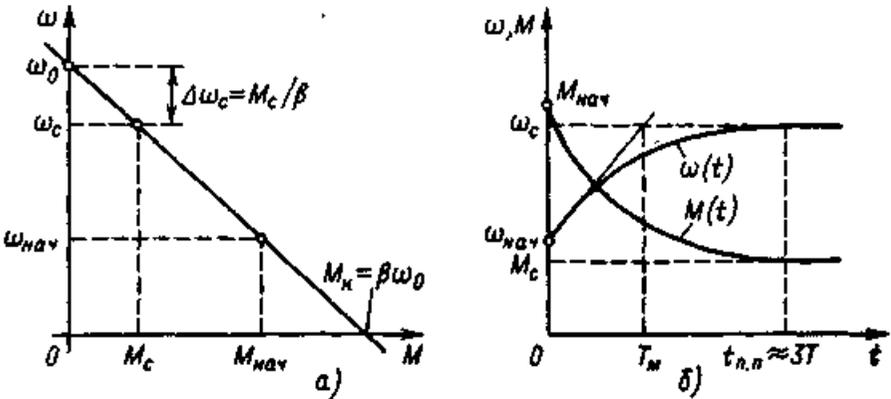


Рис. 13. Механическая характеристика (а) и переходные процессы электропривода (б) при $TЭ=0$

Если продифференцировать уравнение (40), можно получить зависимость ускорения электропривода от времени

$$\varepsilon = \varepsilon_{нач}e^{-t/T_M}, \quad (42)$$

где $\varepsilon_{нач} = (\omega_C - \omega_{нач})/T_M$ — начальное ускорение электропривода.

Рассматривая рис. 13,а и б, видим, что уменьшение ускорения по мере возрастания скорости, определяемое (42), объясняется непрерывным уменьшением динамического момента $M_{дин} = M - MC$ от начального значения $M_{дин.нач} = M_{нач} - MC$ до нуля по мере возрастания скорости от $\omega_{нач}$ до ω_C . Если бы динамический момент в переходном процессе оставался равным начальному $M_{дин.нач} = const$, скорость ω изменялась бы по линейному закону, как показано на рис. 13,б тонкой касательной к начальной точке кривой $\omega(t)$. При этом время переходного процесса было бы равно электромеханической постоянной времени электропривода T_M . Практически время переходного процесса $t_{mn} = (3 \div 4)T_M$, когда $\omega = (0,95 \div 0,98)\omega_{уст}$.

5.1.2. Электромеханические переходные процессы при пуске

Рассмотрим с помощью полученных уравнений процесс реостатного пуска электропривода с линейной механической характеристикой, предположив, что система управления электроприводом в процессе пуска обеспечивает автоматическое переключение ступеней пускового реостата таким образом, что начальное и конечное значения момента двигателя остаются неизменными (рис. 14,а).

В начальный момент пуска в силовую цепь введено полное сопротивление пускового реостата, которое ограничивает пусковой момент значением M_I (пусковая характеристика 1). При увеличении скорости до значения $\omega_{кон1}$ выводится первая ступень пускового реостата, момент вновь возрастает до M_I , продолжается пуск по характеристике 2 и т. д.

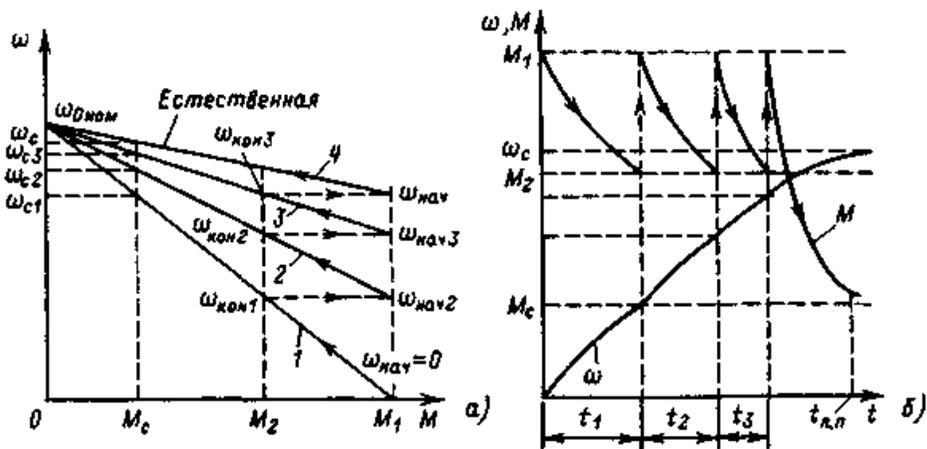


Рис. 14. Реостатный пуск электропривода с линейной механической характеристикой

С учетом (40) и (41) движение электропривода на каждой ступени можно характеризовать соотношениями:

$$\omega_i = \omega_{Ci} + (\omega_{\text{нач}i} - \omega_{Ci}) e^{-t/TMi}; \quad (43)$$

$$M_i = M_{Ci} + (M_{\text{нач}i} - M_{Ci}) e^{-t/TMi}, \quad (44)$$

где

$$TM = J\Sigma/\beta_i, \quad (45)$$

где β_i — модуль жесткости i -й пусковой механической характеристики.

Зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ для рассматриваемого процесса пуска приведены на рис. 14,б.

Время работы на каждой пусковой характеристике можно определить, подставив в (43) или (44) значения $\omega_{\text{кон}i}$ или соответственно $M_{\text{кон}i} = M_2$ и решив полученные показательные уравнения относительно времени:

$$t_i = T_{Mi} Ln \frac{\omega_{Ci} - \omega_{начi}}{\omega_{Ci} - \omega_{конi}}; \quad (46)$$

$$t_i = T_{Mi} Ln \frac{M_1 - M_C}{M_2 - M_C}. \quad (47)$$

По мере увеличения скорости и перехода от ступени к ступени добавочное сопротивление $R_{Я.доб}$ или $R_{2.доб}$ уменьшается и модуль жесткости увеличивается. Это приводит к постепенному уменьшению продолжительности работы на пусковых ступенях, как это видно из рис. 14.

5.1.3. Электромеханические переходные процессы при реверсе

На переходный процесс реверса электропривода оказывает влияние характер статического момента. Если реверс осуществляется при активном моменте, то система электропривода остается линейной и зависимости ω , $M=f(t)$ описываются уравнениями (40) и (41) во всем диапазоне изменения скорости. Механические характеристики, соответствующие рассматриваемому процессу, показаны на рис. 15,а. Здесь прямая 1 является характеристикой, с которой электропривод работал в предшествующем режиме. Если считать предшествующий режим установившимся, эта характеристика определяет начальную скорость при реверсе $\omega_{нач}$, соответствующую моменту M_C . Для осуществления реверса на якоре двигателя постоянного тока скачком меняется полярность напряжения $u_{я}$ или на статоре асинхронного двигателя изменяется чередование фаз, а в силовую цепь двигателя для ограничения тока вводятся добавочные резисторы (характеристика 2).

Характер изменения скорости во времени определяется уравнением (40) при подстановке в это выражение значения установившейся скорости с противоположным знаком:

$$\omega = -\omega_C + (\omega_{нач} + \omega_C)e^{-t/T_M} \quad (48)$$

Зависимость момента от времени, полученная из уравнения (41), в данном случае примет вид

$$M = M_C - (M_1 + M_C)e^{-t/T_M} \quad (49)$$

Графики ω , $M=f(t)$, соответствующие (48) и (49), представлены на рис. 15,б сплошными кривыми 1 и 2.

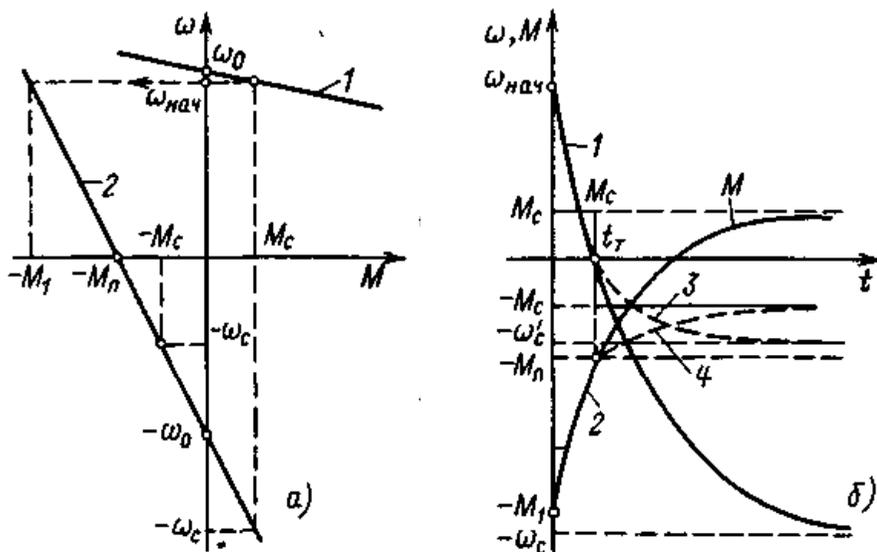


Рис. 15. Механическая характеристика (а) и переходные процессы (б) при реверсе

Видим, что при рассмотренном процессе реверса установившаяся скорость $-\omega_C$ значительно превышает скорость идеального холостого хода и что длительность процесса могла бы быть сокращена путем постепенного выведения ступеней реостата. Поэтому обычно используется лишь первая часть рассмотренного процесса — торможение противовключением

до скорости $\omega=0$, а затем следует реостатный пуск до естественной характеристики, аналогичный рассмотренному выше. В случаях, когда торможение противовключением используется для останова электропривода, двигатель при скорости $\omega=0$ отключается от сети.

Реактивный момент нагрузки при переходе скорости через нуль изменяет знак (рис 15,а). Поэтому до $\omega=0$ процесс торможения протекает так же, как и при активном моменте, и изображается сплошными кривыми $\omega(t)$ и $M(t)$ на рис 15,б. При изменении направления вращения реактивный момент изменяет знак, и процесс пуска в этом направлении описывается уравнениями (40) и (41) при других значениях начальной и установившейся скорости ($\omega_{нач}=0$; $\omega_C=-\omega'_C$), а также начального и установившегося момента ($M_{нач}=-M\Pi$; $M_C=-M_C$):

$$\omega = -\omega'_C \left(1 - e^{-t/T_M} \right); \quad (50)$$

$$M = -M_C \left(1 - e^{-t/T_M} \right). \quad (51)$$

Зависимости ω , $M=f(t)$ для пуска в противоположную сторону представлены на рис. 15,б штриховыми линиями 3 и 4. Заметим, что при переходе через нуль скорости динамический момент скачком изменяется от значения

$$M_{ДИН}(-0) = -(M\Pi + M_C) \quad (52)$$

до значения

$$M_{ДИН}(+0) = -(M\Pi - M_C), \quad (53)$$

что влечет за собой соответствующее изменение ускорения электропривода. Этим объясняется излом в зависимостях ω , $M=f(t)$ при $\omega=0$, хорошо видный на рис. 15,б (переход от сплошных к штриховым линиям 3 и 4).

5.1.4. Электромеханические переходные процессы

в режиме динамического торможения

Рассмотрим переходной процесс динамического торможения при $T_3=0$. Для осуществления этого режима двигатель отключается от сети и включается по схеме динамического торможения, причем в силовую цепь вводится резистор. Для двигателя постоянного тока этот резистор должен обеспечить ограничение тока допустимым по условиям коммутации значением, а для асинхронного двигателя выбирается из условия получения требуемого момента при переключении M_1 .

Соответствующие механические характеристики представлены на рис. 16,а. Модуль жесткости статической характеристики при динамическом торможении можно определить по отношению приращения момента к приращению скорости, например $\beta=M_1/\omega_{нач}$. Вычислив соответствующее значение $T_M=J\mathcal{L}/\beta$ и подставив в уравнение (40) установившееся значение скорости $-\omega_C$, определяемое, как показано на рис. 16,а активным моментом нагрузки M_C , получим выражения, совпадающие по форме с (48) и (49) Графики переходного процесса приведены на рис. 16,б, причем при активном моменте нагрузки двигатель под действием нагрузки разгоняется в обратном направлении до скорости $-\omega_C$, а при реактивном останавливается.

Анализ переходных процессов пуска и торможения в электроприводах, получающих питание от сети ($\omega_0=const$), показывает, что все полученные зависимости $\omega(t)$, $M(t)$ существенно отличаются от рассмотренных выше оптимальных по тем или иным критериям.

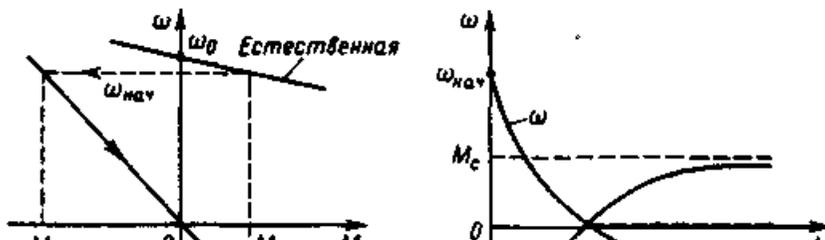


Рис. 16. Механическая характеристика (а) и переходные процессы (б) при динамическом торможении

Близкую к оптимальной по быстродействию кривую $\omega(t)$ можно получить при реостатном пуске, если выбрать число пусковых ступеней достаточно большим. Повысить плавность нагружения упругой системы можно путем введения предварительных пусковых и тормозных ступеней с существенно меньшим начальным моментом, чем M_1 . Таким способом часто пользуются в различных подъемно-транспортных машинах в целях уменьшения рывков при выборе слабины канатов и ударов в передачах при выборе зазоров. Но без применения автоматического регулирования момента или ускорения получить процессы, близкие к оптимальным, в большинстве случаев не удастся.

5.2. Электромеханические переходные процессы электропривода с линейной механической характеристикой при $\omega_0=f(t)$

В замкнутых системах регулируемого электропривода имеется возможность формировать переходные процессы, достаточно близкие к оптимальным, путем плавного изменения напряжения, подведенного к якорю двигателя постоянного тока, или частоты тока, протекающего по обмоткам статора асинхронного двигателя. Такие переходные процессы протекают при $\omega_0=f(t)$. Проанализируем их характерные особенности. Эти особенности можно проследить, задавшись линейным законом изменения управляющего воздействия ω_0 во времени:

$$\omega_0(t) = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t. \quad (54)$$

Если подставить (54) в правую часть уравнения (21), последнее можно представить в виде

$$T_{\Sigma} T_M d^2 \omega / dt^2 + T_M d\omega / dt + \omega = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t - \Delta\omega_C, \quad (55)$$

где

$$\Delta\omega_C = M C / \beta. \quad (56)$$

Для большей наглядности анализа примем, что соотношение постоянных $m > 2$, а при этом влияние электромагнитной инерции незначительно сказывается на характере рассматриваемых переходных процессов благодаря плавности изменений управляющего воздействия.

При $T_{\Sigma} \approx 0$ выражение (55) упрощается:

$$T_M d\omega / dt + \omega = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t - \Delta\omega_C. \quad (57)$$

Нужно решить полученное дифференциальное уравнение с правой частью, линейно зависящей от времени. Найдем частное решение, соответствующее установившемуся динамическому режиму, который наступает после затухания свободных составляющих. Общий характер движения для этого ре-

жима определяется правой частью (57), поэтому частное решение следует искать в виде

$$\omega = a + bt, \quad (58)$$

где a и b — неопределенные коэффициенты.

Подставив (58) в (57), получим

$$bT_M + a + bt = \omega_{нач} + \varepsilon_0 t - \Delta\omega_C, \quad (59)$$

откуда выразим a и b :

$$a = \omega_{нач} - \Delta\omega_C - \varepsilon_0 T_M; b = \varepsilon_0. \quad (60)$$

Общее решение (57) будем искать в виде ($p1 = -1/T_M$)

$$\omega = \omega_{нач} - \Delta\omega_C - \varepsilon_0 T_M + \varepsilon_0 t + Ae^{-t/T_M}. \quad (61)$$

Коэффициент A определяем исходя из начальных условий: при $t=0$, $\omega = \omega_{нач}$.

В результате получим

$$\omega = \varepsilon_0 T_M + (\omega_{нач} - \Delta\omega_C - \varepsilon_0 T_M)(1 - e^{-t/T_M}) + \varepsilon_0 t + \omega_{нач} e^{-t/T_M}. \quad (62)$$

Дифференциальное уравнение системы, разрешенное относительно момента двигателя при $T_{\Sigma} \approx 0$, имеет вид

$$T_M \frac{dM}{dt} + M = M_C + J_{\Sigma} \varepsilon_0 = M_C + \beta \varepsilon_0 T_M. \quad (63)$$

Запишем окончательное решение (62) при $M_{t=0} = M_{нач}$, не повторяя аналогичных промежуточных выкладок:

$$M = M_C + \beta \varepsilon_0 T_M + (M_{нач} - M_C - \beta \varepsilon_0 T_M) e^{-t/T_M}. \quad (64)$$

Примерный вид кривых $\omega(t)$, $M(t)$, соответствующих (62) и (64), для случая, когда предшествующий режим работы был неустановившимся и $M_C \neq 0$, показан на рис. 17. На рисунке хорошо видна основная закономерность — линейный закон

изменения управляющего воздействия определяет, за исключением начального участка, равномерно ускоренное изменение скорости с ускорением, пропорциональным темпу нарастания напряжения $u_{я}$ или частоты $f1$. Длительность переходного начального участка зависит от электромеханической постоянной T_M , причем при $T_{Э}=0$ момент нарастает до значения $M_{пуст}$ за время примерно равное $3T_M$. При колебательном характере процесса, обусловленном $T_{Э} \neq 0$, это время несколько уменьшается.

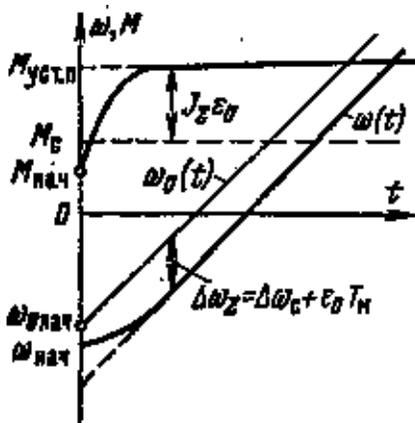


Рис. 17. Переходный процесс при линейном нарастании управляющего воздействия при $T_{Э}$

После затухания свободной составляющей скорость нарастает по линейному закону, отставая от кривой $\omega \cdot t$ на значение равное $\Delta\omega_{\Sigma} = \Delta\omega_{С} + \epsilon\theta T_M$. Задаваемый на входе системы закон изменения скорости воспроизводится с ошибкой, которая в установившемся процессе складывается из ошибки, равной статическому падению скорости $\Delta\omega_{С} = M_{С} / \beta$, и ошибки, рав-

ной динамическому падению $\Delta\omega_{ДИН}=J_{\Sigma}\cdot\varepsilon_0/\beta$. Эти ошибки определяются по статической механической характеристике полным моментом двигателя $M_C + J_{\Sigma}\cdot\varepsilon_0$. Для двигателя постоянного тока величина $\Delta\omega_{\Sigma}$ пропорциональна падению напряжения в якорной цепи от полного тока:

$$\Delta\omega_{\Sigma} = (M_C + J_{\Sigma}\varepsilon_0) / \beta = (I_C + I_{ДИН}) R_{Я\Sigma} / c. \quad (65)$$

Увеличение модуля жесткости статической механической характеристики влечет за собой соответствующее уменьшение отклонения кривой $\omega(t)$ от заданной $\omega_0(t)$.

Воспользуемся полученными общими выражениями зависимостей ω , $M(t)$ (62) и (64) для анализа конкретных переходных процессов электропривода с линейной механической характеристикой.

При пуске электропривода путем плавного подъема управляющего воздействия от нуля до установившегося значения существенное влияние на переходный процесс оказывает характер момента нагрузки.

Если нагрузка представляет собой реактивный момент, переходный процесс пуска распадается на два участка, соответствующих нелинейности этой нагрузки. На первом этапе возрастание $\omega_0 = \varepsilon_0 t$ вызывает линейное возрастание момента короткого замыкания двигателя по закону

$$M_{КЗ} = \beta\omega_0 = \beta\varepsilon_0 t, \quad (66)$$

но до тех пор, пока $M_{КЗ} < M_C$, скорость остается равной нулю, так как электропривод заторможен реактивной нагрузкой. Первый этап заканчивается при $M_{КЗ} = M_C$. Это условие позволяет с помощью (66) определить время запаздывания начала движения:

$$t_{\exists} = M_C / \beta\varepsilon_0 = \Delta\omega_C / \varepsilon_0. \quad (67)$$

На втором этапе движение электропривода определяется (61) и (63) при условиях: $\omega_{нач} = \Delta\omega_C$; $\omega_{нач} = 0$; $M_{нач} = M_C$;

$$\omega = \varepsilon_0 t - \varepsilon_0 T_M (1 - e^{-t/T_M}), \quad (68)$$

$$M = M + \beta \varepsilon_0 T_M (1 - e^{-t/T_M}). \quad (69)$$

Каждому текущему значению ω_0 соответствует определенная механическая характеристика двигателя. Как показано на рис. 18,а, в исходном положении двигатель имел характеристику динамического торможения 1, в конце первого этапа $\omega_0 = \Delta\omega_C$, что определяет характеристику 2. Момент двигателя на первом этапе нарастал при $\omega_0 = 0$ до значения M_C , как показано участком динамической характеристики (кривая 3 на рис. 18,а, совпадающим с осью абсцисс от 0 до $M = M_C$). Соответствующие зависимости $M(t)$ и $\omega(t) = 0$ для первого этапа переходного процесса показаны на рис. 18,б на участке $0 < t < t_3$.

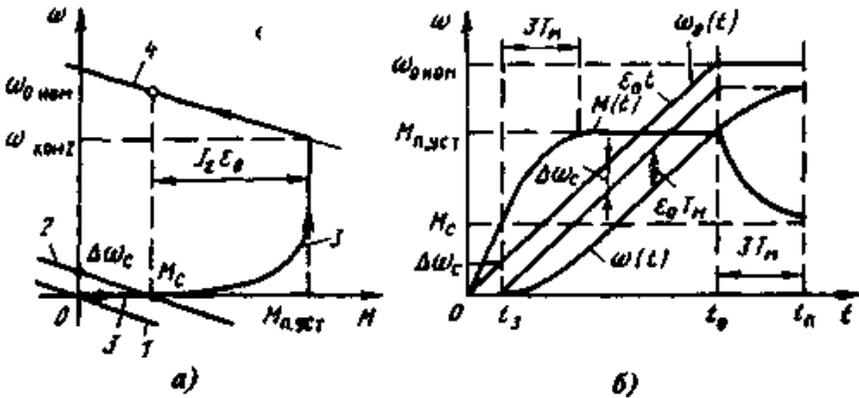


Рис. 18. Механические характеристики (а) и графики переходного процесса пуска (б) при $\omega_0 = \varepsilon_0 t$

Для второго этапа начало отсчета времени в (68) и (69) в точке $t=t_3$. Перенеся начало координат в эту точку, построим соответствующие (61) прямую $\varepsilon_0(t-t_3)$ и кривую $\omega(t-t_3)$, отстоящую от нее на $\varepsilon_0 T_M$. Кривая $\varepsilon_0(t-t_3)$ отстоит от кривой $\omega_0 = \varepsilon_0 t$ по вертикали на отрезок $\Delta\omega_C$, что определяет суммарный перепад скорости $\Delta\omega_\Sigma = \Delta\omega_C + \varepsilon_0 T_M$. В соответствии с (69) момент двигателя на этом этапе нарастает от $M = M_C$ до $M_{П.уст} = M_C + \beta \varepsilon_0 T_M$ по экспоненте за время $3T_M$. Зависимости ω , $M = f(t)$, соответствующие второму этапу переходного процесса, позволяют построить динамическую механическую характеристику 3 на рис. 18,а в пределах от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_{кон2}$, где $\omega_{кон2}$ — конечная скорость на втором этапе.

Второй этап заканчивается в момент времени t_0 , когда управляющее воздействие достигает требуемого установившегося значения и его дальнейший рост должен быть прекращен. Двигатель при этом выходит на естественную характеристику 4, и в дальнейшем имеет место процесс, описываемый уравнениями (40) и (41) при соответствующих начальных условиях. Как было выше установлено, скорость на этом участке нарастает по экспоненте, а момент уменьшается по тому же закону, стремясь к M_C (рис 18,б). Общее время переходного процесса составляет

$$t_{nn} = t_0 + 3T_M. \quad (70)$$

Обычно $t_0 \gg T_M$, поэтому время переходного процесса определяется временем нарастания напряжения на якоре или частоты тока статора до установившегося значения ($t_{III} = t_0$).

Рассмотрим процесс реверса электропривода путем плавного изменения управляющего воздействия, при котором

скорость идеального холостого хода изменяется по закону

$$\omega_0 = \omega_{0ном} - \varepsilon_0 t \quad (71)$$

от $\omega_{0нач} = \omega_{0ном}$ до $\omega_{0кон} = -\omega_{0ном}$.

Если момент активный, то определить начальное и конечное значения скорости можно по механическим характеристикам 1 и 2, представленным на рис. 19.,а.

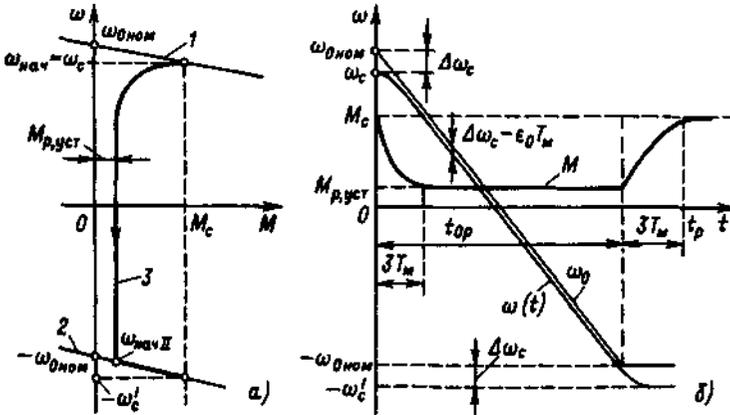


Рис. 19. Механические характеристики (а) и графики переходного процесса (б) при реверсе с активным моментом

Подставляя в (62) и (64) значения $\omega_{0нач} = \omega_{0ном}$; $\omega_{нач} = \omega_c$; $M_{нач} = M_c$ и учитывая, что ускорение ε_0 в (71) отрицательно, получаем

$$\omega = \omega_c e^{-t/T_M} - \varepsilon_0 t + \quad (72)$$

$$+ (\omega_{0ном} - \Delta\omega_c + \varepsilon_0 T_M) (1 - e^{-t/T_M});$$

$$M = M_c - \beta \varepsilon_0 T_M (1 - e^{-t/T_M}). \quad (73)$$

Формулы (72) и (73) определяют характер изменения

скорости и момента на первом этапе реверса, который заканчивается в момент t_{0p} когда скорость ω_0 достигает установившегося значения $-\omega_{0ном}$. Соответствующие графические зависимости $\omega(t)$, $M(t)$ представлены на рис. 19,б.

Так как в этом процессе ускорение отрицательно, динамический момент $J\Sigma\varepsilon_0$ отрицателен и суммарный установившийся момент при реверсе $M_{Pуст}$ определяется разностью $(M_C - \beta\varepsilon_0 T_M)$. Следовательно ошибка, с которой скорость ω следует за изменением ω_0 , уменьшается $\Delta\omega\Sigma = \Delta\omega_C - \varepsilon_0 T_M$. В зависимости от M_C , ε_0 и T_M она может быть равной нулю ($\Delta\omega_C = \varepsilon_0 T_M$) или изменять свой знак ($\Delta\omega_C < \varepsilon_0 T_M$), при этом и момент двигателя M также становится равным нулю или изменяет знак.

Если $\Delta\omega\Sigma > 0$, т. е. $M_C > |J\Sigma\varepsilon_0|$, двигатель в процессе снижения скорости продолжает работать в двигательном режиме, а при изменении знака скорости переходит в тормозной режим с тем же моментом $M = M_{Pуст}$. При $\Delta\omega\Sigma < 0$ и $M_C < |J\Sigma\varepsilon_0|$ двигатель при снижении скорости работает в тормозном режиме, а при пуске в противоположном направлении переходит в двигательный режим.

Значение момента $M_{Pуст} = M_C - J\Sigma\varepsilon_0 = M_C - \beta\varepsilon_0 T_M$ определяет при $t = t_0$ в конце процесса нарастания ω_0 до значения $-\omega_{0ном}$ начальное значение скорости $\Delta\omega_{нач. II}$ для заключительного второго этапа реверса.

Динамическая механическая характеристика, соответствующая первому (основному) этапу реверса, показана на рис. 19,а (кривая 3).

Второй, заключительный этап реверса протекает при $\omega = -\omega_{ном} = const$ и определяется соотношениями (40) и (41). На этом этапе момент двигателя нарастает до $M = M_C$ по экспоненте с постоянной T_M , а скорость плавно увеличивается в соответствии с механической характеристикой 2 (рис. 19,а) до установившегося значения $-\omega'_C$. Длительность этого процесса примерно равна $3T_M$, что обычно составляет небольшую долю общего времени реверса $t = t_0 + 3T_M$, которое определяется, главным образом, временем t_0 реверсирования управляющего воздействия.

Более сложный вид имеет характер процесса реверса при реактивном моменте нагрузки. Рассмотрим этот процесс, причем для конкретизации физических представлений будем иметь в виду электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, электромеханические характеристики которого 1 и 2, соответствующие началу и концу процесса, приведены на рис. 20,а. На рис 20,б показана характеристика $u_{Я} = U_{ном} - c \mathcal{E} t$ (прямая 1). В процессе замедления закон движения электропривода тот же, что и в случае активной нагрузки. Начальная разность между напряжением на якоре $u_{Я}$ и ЭДС двигателя $E_C = c \cdot \omega_C$, равная падению напряжения на сопротивлении якоря от статического тока $I_C R_{Я\Sigma}$, уменьшается до значения, равного падению напряжения от установившегося тока при реверсе $I_{P_{уст}} = M_{P_{уст}}/c$. Ток якоря при этом соответственно уменьшается от начального значения I_C до $I_{P_{уст}}$ и затем остается постоянным до скорости, равной нулю. Зависимости ЭДС двигателя $\mathcal{E}(t)$ и $i_{Я}(t)$ также приведены на рис. 20,б (кри-

вые 2 и 3), причем разность между напряжением и ЭДС при $TЯ=0$ пропорциональна току якоря.

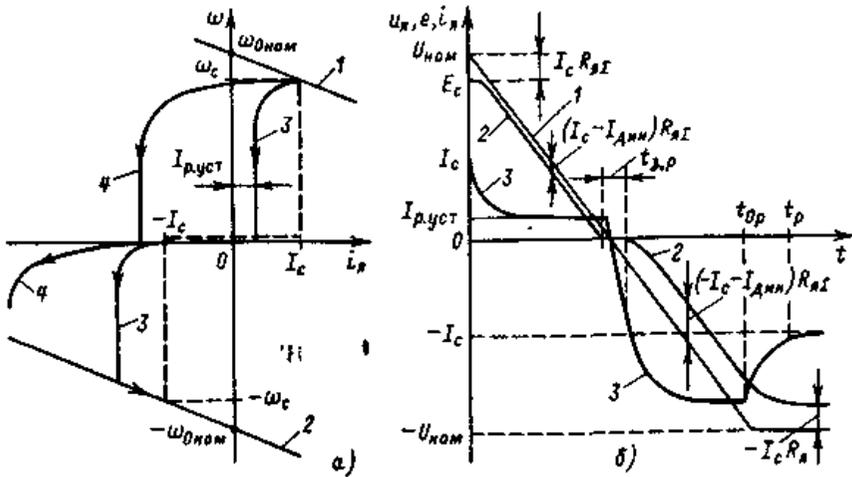


Рис. 20. Электромеханические характеристики (а) и графики переходного процесса (б) при реверсе с реактивным моментом

В момент прохождения скорости через нуль реактивный момент нагрузки изменяется скачком от M_C до $-M_C$. Для того чтобы начался пуск в противоположном направлении, необходимо изменение знака тока и увеличение его по модулю до значений, превышающих модуль статического тока. Появляется пауза в движении, аналогичная времени запаздывания на рис. 18,б, которую обозначим $t_{зр}$.

В течение этой паузы ток якоря нарастает по линейному закону: $i_Я = I_{р.уст} - c\varepsilon_0 t / R_Я\Sigma$, а скорость $\omega=0$. Пауза заканчивается, когда ток якоря достигает значения $i_Я=-i_C$.

Определяем время запаздывания:

$$t_{зр} = (I_{р.уст} + I_C) R_Я\Sigma / c\varepsilon_0. \quad (74)$$

В дальнейшем пуск в обратном направлении протекает аналогично рассмотренному выше. Показанные на рис. 20,б графики $uЯ(t)$, $\varepsilon(t)$ и $iЯ(t)$ для этой части процесса (кривые 1-3) в другом масштабе повторяют пропорциональные им графики $\omega\omega(t)$, $\omega(t)$ и $M(t)$, представленные на рис. 18,б. Динамическая электромеханическая характеристика, соответствующая процессу реверса с реактивным моментом нагрузки, построена на рис. 20,а (кривая 3).

Если увеличивать темп изменения напряжения du/dt , то вследствие роста динамического тока при торможении ток $i_{P_{уст}} = i_C - i_{ДИН}$ вначале уменьшается до нуля, а затем меняет знак, при этом время запаздывания t_{3p} в соответствии с (74) уменьшается и при $i_{P_{уст}} = -i_C$ становится равным нулю. Из уравнения движения $(-M - M_C) = J \Sigma \varepsilon_0$ можно определить значение ε_{01} , соответствующее этому условию:

$$\varepsilon_{01} = -2M_C / J \Sigma = -2M_C / \beta T_M. \quad (75)$$

Если $|\varepsilon_0| > |\varepsilon_{01}|$, то процесс изменения скорости при реверсе является непрерывным и влияние реактивного момента сказывается лишь на изменении скачком ускорения при переходе скорости через нуль. Динамическая механическая характеристика двигателя, соответствующая таким условиям, представлена на рис 20,а (кривая 4).

Рассмотренные переходные процессы дают возможность сделать общий вывод о том, что закон изменения напряжения $uЯ$ для электропривода постоянного тока или частоты $f1$ для электропривода переменного тока определяет характер изменения скорости в переходном процессе с тем большей точностью, чем меньше электромеханическая постоянная времени T_M . Этот вывод справедлив не только для линейного закона

изменения управляющего воздействия, но и при более сложных зависимостях $\omega(t)$. В качестве примера оценим характер изменения скорости (или пропорциональной ей ЭДС двигателя) в переходном процессе пуска электропривода постоянного тока при $M_C=0$, если приложенное к якорю напряжение нарастает не по линейному, а по экспоненциальному закону

$$u_{Я} = U_{НОМ} (1 - e^{-t/T_{ИП}}), \quad (76)$$

где $T_{ИП}$ — постоянная времени источника питания, причем будем считать, что $T_{ИП} \gg T_M$.

Зависимость $u_{Я}(t)$, соответствующая (4.81), представлена на рис. 21 (кривая 1). Начальная часть этой кривой близка к прямой 2, соответствующей неизменному значению $du_{Я}/dt = (du_{Я}/dt)_{нач} = const$:

$$(du_{Я}/dt)_{нач} = U_{НОМ}/T_{ИП} = c\varepsilon_0'. \quad (77)$$

Если бы напряжение нарастало по закону $u_{Я} = c\varepsilon_0't$, ток якоря стремился бы к значению $I'_{max} = J_{\Sigma}\varepsilon_0'/c = \beta T_M \varepsilon_0'/c$ по экспоненте с постоянной T_M , как это было установлено ранее (кривая 3). Однако темп нарастания напряжения в действительности (кривая 1) непрерывно уменьшается с постоянной $T_{ИП}$:

$$du_{Я}/dt = (U_{НОМ}/T_{ИП}) e^{-t/T_{ИП}}. \quad (78)$$

Поэтому после достижения максимума

$$I''_{max} = J_{\Sigma}\varepsilon''_0/c, \quad (79)$$

где ε''_0 — величина, пропорциональная du/dt при $t=t_{max}$, ток начинает снижаться по закону, близкому к (78) (кривая 3').

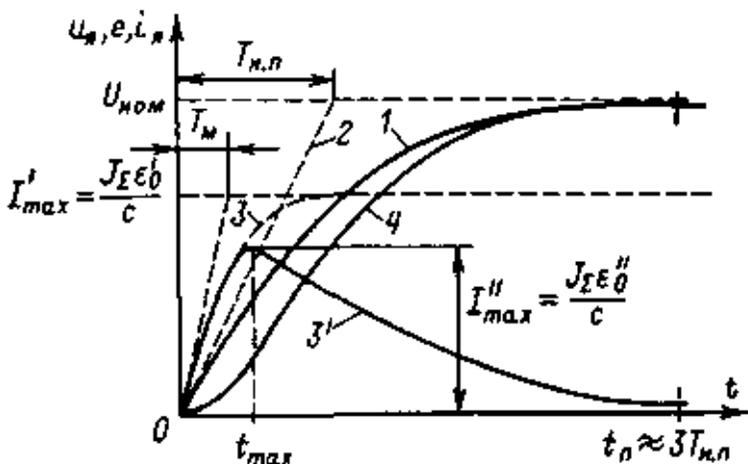


Рис. 21. Переходные процессы электропривода при экспоненциальном изменении $u_{Я}$

Электродвижущая сила двигателя e изменяется по кривой 4, отличаясь в каждый момент времени от $u_{Я}$ на значение падения напряжения в цепи якоря при данном токе. Нетрудно видеть, что чем меньше T_M , тем меньше падение напряжения при данном динамическом токе, тем ближе кривая 4 к кривой 1.

Так как

$$u_{Я} = e + i_{Я} R_{Я\Sigma}, \quad (80)$$

производная напряжения связана с производной ЭДС двигателя соотношением

$$du_{Я} / dt = de / dt + R_{Я\Sigma} di_{Я} / dt, \quad (81)$$

а в момент $t = t_{max}$ имеем, что $di/dt = 0$, поэтому справедливы равенства

$$du_{Я} / dt = (de / dt), \quad (82)$$

$$\varepsilon'' = (d\omega_0 / dt)_{t=t_{max}} = (d\omega / dt)_{t=t_{min}}. \quad (83)$$

Максимум динамического тока определяется выражени-

ем $I''_{max} = J_{\Sigma} \varepsilon''_0 / c$. Так как $\varepsilon''_0 < \varepsilon'_0$, максимум тока I''_{max} меньше, чем установившийся динамический ток при начальном темпе нарастания напряжения, причем разница увеличивается с возрастанием T_M . Это понятно, так как с возрастанием T_M увеличивается время достижения максимума t_{max} и ε''_0 уменьшается. Если T_M стремится к 0, то I_{max} стремится к I'_{max} , а t_{max} стремится к 0 и кривая $\varepsilon(t)$ сливается с кривой $u_{Я}(t)$.

Значения t_{max} и $M_{max} = c I''_{max}$ можно определить, решив дифференциальные уравнения (55) и (62) при экспоненциальном законе изменения $\omega\theta(t)$. В результате решения получаются следующие формулы для расчета:

$$t_{max} = \frac{T_{ИП} T_M}{T_{ИП} - T_M} \ln \left(\frac{\omega_0}{\omega_C} \right)^{[(T_{ИП} - T_M) / T_M]} \times \frac{T_{ИП}}{T_M}; \quad (84)$$

$$M_{max} = \beta (\omega_{0ном} - \Delta\omega_C) \left(\frac{T_M}{T_{ИП}} \right)^{[T_{ИП} / (T_{ИП} - T_M)]} + \quad (85)$$

+ M_C .

Из (85) можно определить зависимость максимального ускорения электропривода при пуске:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\beta}{J_{\Sigma}} (\omega_{0ном} - \Delta\omega_C) \left(\frac{T_M}{T_{ИП}} \right)^{[T_{ИП} / (T_{ИП} - T_M)]}. \quad (86)$$

Так как $\Delta\omega_C < \omega_{0ном}$, максимальное ускорение при пуске определяется темпом нарастания управляющего воздействия, который характеризуется $T_{ИП}$ и мало зависит от нагрузки электропривода M_C . Эта же особенность характерна и для процессов при линейной зависимости $\omega\theta$. В частности, рассматривая рис. 20,б, можно установить, что хотя в процессе

реверса реактивный момент изменился от $+M_C$ до $-M_C$, ускорение как при торможении, так и при пуске в обратном направлении устанавливается равным $-\varepsilon$.

Это свойство особенно ценно в тех случаях, когда к электроприводу предъявляются жесткие требования в отношении ограничения ускорений и оптимальные переходные процессы имеют вид, показанный на рис. 3,а. Сравнивая рис. 3,б с рис. 4, можно убедиться, что процессы при линейном нарастании ускорения получаются близкими к оптимальным по быстродействию при ограничении ускорений и рывка.

Возможность получения оптимального характера переходных процессов путем формирования соответствующей зависимости $\omega(t)$ широко используется для управления электроприводами.

5.3. Переходные процессы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Проведенный анализ переходных процессов электропривода с линейной механической характеристикой справедлив и для электропривода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АД КЗ), если в переходном процессе абсолютное скольжение $S_a < S_k$ и двигатель работает в области рабочего участка механической характеристики. Такие условия имеют место при питании двигателя от управляемого преобразователя частоты. Если двигатель питается от сети, условие $S_a < S_k$ выполняется только при переходных процессах, вызванных изменением нагрузки M_C . В переходных процессах пуска, реверса и торможения скольжение меняется в широких пределах и линеаризованной структурной схемой электропривода пользоваться нельзя.

Большинство простых и дешевых асинхронных электроприводов с короткозамкнутыми двигателями, имеющих самое широкое распространение, пускается путем включения в сеть, и нелинейность механической характеристики этих двигателей проявляется полностью, так же как и в режимах торможения противовключением или динамического торможения. При пуске и реверсе двигателя поток машин изменяется в широких пределах и на характер переходных процессов оказывает существенное влияние электромагнитная инерция двигателя. Влияние нелинейности механической характеристики и электромагнитной инерции определяет необходимость особого рассмотрения переходных процессов короткозамкнутого двигателя.

С учетом электромагнитной инерции движение асинхронного электропривода в переходном процессе пуска путем включения на сеть можно описать, воспользовавшись уравнениями механической характеристики в комплексной форме в

осях произвольной системы ортогональных координат u, v , вращающихся относительно неподвижного статора со скоростью ω_k , и уравнением движения механической части в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_2}{dt} + j\omega_k (L_1 \bar{i}_1 + L_{12} \bar{i}_2); \\ 0 = R_2 \bar{i}_2 + L_2 \frac{d\bar{i}_2}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_1}{dt} + j(\omega_k - \omega_{эл})(L_2 \bar{i}_2 + L_{12} \bar{i}_1); \\ M = p_n L_{12} \operatorname{Im}(\bar{i}_1 \bar{i}_2'^*); \\ M - M_C = J \Sigma \frac{d\omega}{dt}. \end{array} \right. \quad (87)$$

Аналитическое решение этой нелинейной системы уравнений в общем случае вызывает затруднения, поэтому анализ электромеханических переходных процессов с учетом электромагнитной инерции следует вести с помощью персональных компьютеров. Но оценить влияние электромагнитной инерции в общем удается при анализе процесса включения двигателя на сеть при неизменной скорости ротора $\omega_0 = \text{const}$. Применительно к процессу пуска рассмотрим электромагнитный переходный процесс, возникающий на начальном этапе, когда скорость двигателя еще не успела существенно измениться и можно приближенно принять $\omega_{эл} = 0$. Анализировать такой процесс удобнее всего в осях α, β , принимая $\omega_k = 0$. Так как скорость неизменна, изменения векторов токов \bar{i}_1 и \bar{i}_2' определяются первыми двумя уравнениями системы (87), которые при этих условиях можно записать в виде:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}'_2}{dt}; \\ 0 = R'_2 \bar{i}'_2 + L'_2 \frac{d\bar{i}'_2}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_1}{dt}. \end{cases} \quad (88)$$

Переходя к изображениям переменных по Карсону при нулевых начальных условиях, а также учитывая, что синусоидальное напряжение сети, представленное вектором \bar{u}_1 , имеет изображение, которое запишется как

$$\bar{u}_1 = U_{1max} e^{j\omega_{0эл} t} = U_{1max} p / (p - j\omega_{0эл}), \quad (89)$$

получаем

$$\begin{cases} (R_1 + L_1 p) \bar{i}_1(p) + L_{12} p \bar{i}'_2(p) = U_{1max} p / (p - j\omega_{0эл}); \\ (R'_2 + L'_2 p) \bar{i}'_2(p) + L_{12} p \bar{i}_1(p) = 0. \end{cases} \quad (90)$$

Решив (90) относительно векторов тока $\bar{i}_1(p)$ и $\bar{i}'_2(p)$, получим их изображения:

$$\begin{aligned} \bar{i}_1(p) &= \\ &= \frac{U_{1max} p (R'_2 + L'_2 p)}{(p - j\omega_{0эл}) \left[(L_1 L'_2 - L_{12}^2) p^2 + \right.} \\ &\quad \left. + (R_1 L'_2 + R'_2 L_1) p + R_1 R'_2 \right]}; \end{aligned} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} \bar{i}'_2(p) &= \\ &= \frac{U_{1max} L_{12} p^2}{(p - j\omega_{0эл}) \left[(L_1 L'_2 - L_{12}^2) p^2 + \right.} \\ &\quad \left. + (R_1 L'_2 + R'_2 L_1) p + R_1 R'_2 \right]}. \end{aligned} \quad (92)$$

Характер изменения свободных составляющих и их затухание определяются корнями p_1 и p_2 характеристического

уравнения (корень знаменателя $p_0=j\omega_{эл}$ определяет установившийся режим, так как относится к изображению напряжения):

$$p_{1,2} = -\frac{R_1\dot{L}'_2 + R'_2L_1}{2(L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2)} \pm \sqrt{\left[\frac{R_1\dot{L}'_2 + R'_2L_1}{2(L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2)}\right]^2 - \frac{R_1R'_2}{L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2}}. \quad (93)$$

Если (93) представить в виде

$$p_{1,2} = -\frac{R_1\dot{L}'_2 + R'_2L_1}{2(L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2)} \pm \sqrt{\frac{(R_1\dot{L}'_2 + R'_2L_1)^2 + 4R_1R'_2L_{12}^2}{2(L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2)^2}}, \quad (94)$$

то можно установить, что в рассматриваемом случае, когда $\omega_{эл}=0$, система имеет отрицательные различные действительные корни. Для оценки корней упрощаем (94), учитывая, что $R_1\dot{L}'_2 \approx R'_2L_1$ и $R_1 \approx R'_2$, тогда

$$p_{1,2} = -R'_2(L_1 \mp L_{12}) / (L_1\dot{L}'_2 - L_{12}^2)^2. \quad (95)$$

Выражаем в (95) L_1 , \dot{L}'_2 и L_{12} через индуктивные сопротивления асинхронного двигателя x_1 , x'_2 , x_μ и, учитывая, что $x_\mu \gg x_1$ и $x_\mu \gg x'_2$, получаем:

$$p_1 = -\omega_{эл}S_k x_1 / (x_1 + x_\mu) = -\alpha_1; \quad (96)$$

$$p_2 = -\omega_{эл}S_k (x_1 + 2x_\mu) / (x_1 + x_\mu) = -\alpha_2, \quad (97)$$

где

$$S_k = R'_2 / (x_1 + x'_2). \quad (98)$$

Сравнивая (96) и (97), можно заключить, что коэффициент затухания α_1 значительно меньше коэффициента затухания α_2 — их отношение можно оценить значением $x_1/2x_\mu$.

Находим оригиналы токов, обозначая $p_1 = -\alpha_1$ и $p_2 = -\alpha_2$, имея в виду их точные значения, определяемые из (93) и (94):

$$\bar{i}_1(t) = \frac{U_{1max}}{L_1 L_2' - L_{12}^2} \times \left[\begin{aligned} & \frac{(R_2' + jL_2' \omega_{0эл}) e^{j\omega_{0эл} t}}{(\alpha_1 + j\omega_{0эл})(\alpha_2 + j\omega_{0эл})} + \\ & \frac{(R_2' - \alpha_1 L_2) e^{-\alpha_1 t}}{(\alpha_1 + j\omega_{0эл})(\alpha_1 - \alpha_2)} + \\ & \frac{(R_2' - \alpha_2 L_2') e^{-\alpha_2 t}}{(\alpha_2 + j\omega_{0эл})(\alpha_1 - \alpha_2)} \end{aligned} \right], \quad (99)$$

$$i_2'(t) = -\frac{U_{1max} L_{12}}{L_1 L_2' - L_{12}^2} \times \left[\begin{aligned} & \frac{j\omega_{0эл} e^{j\omega_{0эл} t}}{(\alpha_1 + j\omega_{0эл})(\alpha_2 + j\omega_{0эл})} + \\ & \frac{\alpha_1 e^{-\alpha_1 t}}{(\alpha_1 + j\omega_{0эл})(\alpha_2 - \alpha_1)} + \\ & \frac{\alpha_2 e^{-\alpha_2 t}}{(\alpha_2 + j\omega_{0эл})(\alpha_1 - \alpha_2)} \end{aligned} \right]. \quad (100)$$

Видим, что вектор каждого тока содержит кроме установившейся составляющей, изменяющейся с частотой $\omega_{0эл}$, две переходные составляющие, имеющие апериодический характер и затухающие с коэффициентами затухания α_1 и α_2 . Для вычисления момента двигателя по третьему уравнению системы (87) необходимо определить комплексно-сопряженный вектор тока ротора:

$$\bar{i}_2'^*(t) = -\frac{U_{1max}L_{12}}{L_1L_2' - L_{12}^2} \left[\begin{aligned} & \frac{-j\omega_{0эл}e^{-j\omega_{0эл}t}}{(\alpha_1 - j\omega_{0эл})(\alpha_2 - j\omega_{0эл})} + \\ & + \frac{\alpha_1 e^{-\alpha_1 t}}{(\alpha_1 - j\omega_{0эл})(\alpha_2 - \alpha_1)} + \\ & + \frac{\alpha_2 e^{-\alpha_2 t}}{(\alpha_2 - j\omega_{0эл})(\alpha_1 - \alpha_2)} \end{aligned} \right]. \quad (101)$$

Подставив (99) и (101) в указанное уравнение, можно определить составляющие электромагнитного момента, обусловленные взаимодействием составляющих токов.

Определим установившееся значение пускового момента $M_{П.уст}$, пропорциональное мнимой части произведения первых членов (99) и (101):

$$\begin{aligned} M_{П.уст} &= p\Pi L_{12} \operatorname{Im}(\bar{i}_{1уст} \bar{i}_{2уст}'^*) = \\ &= \frac{p\Pi U_{1max}^2 L_{12}^2}{L_1 L_2' - L_{12}^2} \operatorname{Im} \left[\frac{jR_2' \omega_{0эл} + \omega_{0эл}^2 L_{12}}{(\alpha_1^2 + \omega_{0эл}^2)(\alpha_2^2 + \omega_{0эл}^2)} \right]. \end{aligned} \quad (102)$$

С учетом того, что амплитуда напряжения двухфазной модели связана с амплитудой трехфазного напряжения согласующим коэффициентом $\sqrt{2/3}$, имеем

$$U_{1max} = \sqrt{3U_{1max}(3\phi)/2} = \sqrt{3}U_1, \quad (103)$$

выразив в (102) индуктивности через индуктивные сопротивления, получим

$$M_{П.уст} = \left[\frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0(x_1 + x_2' + x_1 x_2' / x_\mu)(\alpha_1^2 / \omega_{0эл}^2 + 1)(\alpha_2^2 / \omega_{0эл}^2 + 1)} \right]. \quad (104)$$

Если в (104) подставить выражения α_1 и α_2 из (93) и (94) и выполнить некоторые преобразования с учетом малости x_1 , x_2 в сравнении с x_μ , можно получить значение пускового момента:

$$M_{Пуск} = \frac{2M_k(1+aS_k)}{1/S_k + S_k + 2aS_k}, \quad (105)$$

где $a = R_1 / R_2 \Sigma$.

Так как процедура получения составляющих момента понятна, опустив промежуточные выкладки, приведем полное выражение пускового момента в виде

$$\frac{M_{II}(t)}{M_{Пуск}} = 1 + e^{-(a_1+a_2)t} - (e^{-a_1t} + e^{-a_2t}) \cos \omega_{0эл}t - \frac{1 + a_1a_2 / \omega_{0эл}^2}{a_2 / \omega_{0эл} - a_1 / \omega_{0эл}} (e^{-a_1t} - e^{-a_2t}) \sin \omega_{0эл}t. \quad (106)$$

Видим, что из девяти возможных составляющих момента, определяемых сочетаниями произведений составляющих токов (99) и (101), в (106) присутствуют семь составляющих, если учесть, что апериодическая составляющая представляет собой сумму моментов, определяемых произведениями апериодических составляющих токов с разными коэффициентами затухания. Можно показать, что произведение составляющих (99) и (101) с одинаковыми коэффициентами затухания не содержит мнимой части и момента не создает. Периодические составляющие (106) обусловлены взаимодействием затухающих апериодических составляющих с принужденными токами, поэтому имеют угловую частоту колебаний $\omega_{0эл}$.

Как было показано, $\alpha_1 \ll \alpha_2$, поэтому характер изменения момента определяется, главным образом, переменными составляющими момента, затухающими с коэффициентом α_1 .

Логарифмический декремент для этих составляющих можно оценить с помощью (96):

$$\lambda = 2\pi\alpha / \Omega = 2\pi S_k x_I / (x_I + x_{II}), \quad (107)$$

так как $\Omega = \omega \omega_{эл}$.

Известно, что x_I меньше $x_I + x_{II}$ на порядок, а $S_k = 0.1 \neq 0.5$, поэтому логарифмический декремент для колебательной составляющей равен десятым долям единицы. Это означает, что за время затухания совершаются десятки колебаний периодической составляющей, которая суммируется с установившимся значением и порождает пики пускового момента, превышающие статический пусковой момент в несколько раз.

Вывод:

— электромагнитная инерция асинхронного двигателя ограничивает темп нарастания момента, так как исключает возможность его нарастания до $M_{Пуст}$ скачком;

— электромагнитная инерция асинхронного двигателя существенно ухудшает характер процесса пуска, вызывая большие и многократно повторяющиеся пики нагрузки, ускоряющие износ двигателя и механического оборудования.

Анализ зависимости коэффициентов затухания от скорости ротора показывает, что коэффициент затухания α_1 при $\omega \neq 0$ с возрастанием скорости вначале увеличивается незначительно, а затем все быстрее до значения, равного примерно $\alpha_2 / 2$ при $\omega = 0$. Коэффициент α_2 при этом уменьшается примерно в 2 раза, и зависимости $\alpha_1, \alpha_2 = f(\omega / \omega_0)$ имеют примерно вид, показанный на рис. 22. Поэтому в процессе пуска в связи с возрастанием скорости затухание колебаний момента, возникших в первый момент пуска в соответствии с (106), увеличивается вначале медленно, а при $\omega > 0,5 \omega_0$ весьма быстро.

Вывод: число колебаний момента за время пуска тем больше, чем меньше ускорение электропривода, т. е. увеличивается при возрастании момента инерции механизма и статической нагрузки.

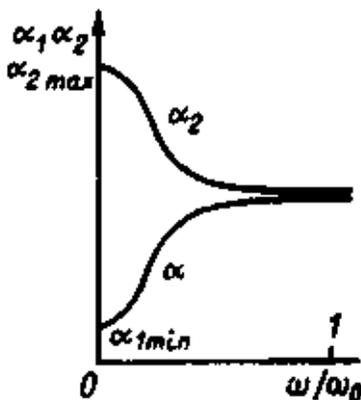


Рис. 22. Зависимости $\alpha_1, \alpha_2 = f(\omega/\omega_0)$

К моменту перехода на устойчивый участок статической характеристики ($S < S_k$) колебания, возникшие при включении двигателя, как правило, затухают. В этом случае дальнейший процесс увеличения скорости двигателя до ω протекает в соответствии с линеаризованной механической характеристикой двигателя, а характер переходного процесса определяется отношением постоянных времени T_M и T_Δ .

Переходный процесс пуска асинхронного двигателя при $m \approx 1$ и $M_C = 0$ представлен кривыми $\omega, M = f(t)$ на рис. 23,а. Эти кривые иллюстрируют отмеченные особенности влияния электромагнитных переходных процессов. Производная момента $(dM/dt)_{нач} \neq 0$, но имеет весьма большие значения, так как время нарастания пускового момента до максимума $M_{II\max}$ меньше

периода переменного тока. Возникновение свободных составляющих тока приводит к появлению пиков момента, значительно превышающих значения по статической характеристике. В этом можно убедиться, сравнив приведенные на рис. 23,б статическую 1 и динамическую 2 механические характеристики для этого процесса. Еще более значительные пики момента имеют место при реверсе двигателя с незатухшим полем.

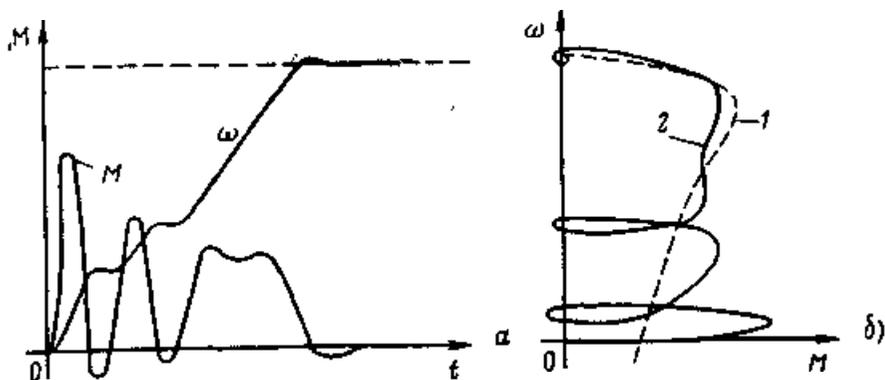


Рис. 23. Переходной процесс пуска (а) и механические характеристики (б) АД КЗ

Рассмотренные особенности переходных процессов электропривода с АД КЗ относятся к числу его существенных недостатков и обычно снижают надежность его работы по сравнению с той надежностью, которую можно было бы ожидать при его конструктивной простоте. Поэтому уделялось много внимания проблеме борьбы с переходными составляющими тока и момента. Установлено, что существенное снижение этих составляющих достигается при ограничении темпа нарастания амплитуды напряжения, приложенного к двигателю при пуске. Влияние электромагнитной инерции оказывается минимальным при пуске электропривода путем плавного повышения частоты при условии ограничения абсолютного

скольжения значениями, соответствующими рабочему участку механических характеристик при $S < S_k$.

При этом механические характеристики линеаризуются в широком диапазоне изменения скорости и переходные процессы имеют характер, рассмотренный и показанный выше. На практике для оценок длительности переходных процессов пуска или реверса иногда достаточно использовать статическую характеристику двигателя и уравнение движения. Такие оценки бывают полезны при моделировании системы на персональном компьютере и для контроля правильности результатов моделирования. Но обычно для этой цели предпочтительны приближенные графоаналитические методы.

Простейшим способом является применение метода конечных приращений. На участке изменения скорости $\Delta\omega_i = (\omega_{i\text{кон}} - \omega_{i\text{нач}})$ при достаточной малости $\Delta\omega_i$ момент двигателя M_i и нелинейно зависящий от скорости момент нагрузки M_{Ci} могут быть приняты равными средним значениям M_{Cpi} и M_{Cspi} на этих участках (рис. 24,а). Тогда в соответствии с уравнением движения время Δt_i , за которое скорость изменяется на $\Delta\omega_i$, определяется по формуле

$$\Delta t_i = J \sum \Delta\omega_i / (M_{Cpi} - M_{Cspi}) = J \sum \Delta\omega_i / M_{ДИИi}. \quad (108)$$

Вычисляя для каждого из показанных на рис. 24,а участков, начиная с первого, и суммируя при переходе от интервала к интервалу $\Delta\omega_i$ и Δt_i , можно построить кривую $\omega(t)$, как это выполнено на рис. 24,б. Полное время пуска $t_{II} = \sum \Delta t_i$. При известной зависимости $\omega(t)$ зависимость $M(t)$ определяется с помощью статической механической характеристики. Точность этого метода возрастает при уменьшении Δt_i . Для ориентировочных расчетов времени пуска во многих случаях доста-

точно принять $\Delta\omega = \omega_C$ и найти среднее значение пускового момента:

$$M_{Пср} = (M_k + M_{II}) / 2. \quad (109)$$

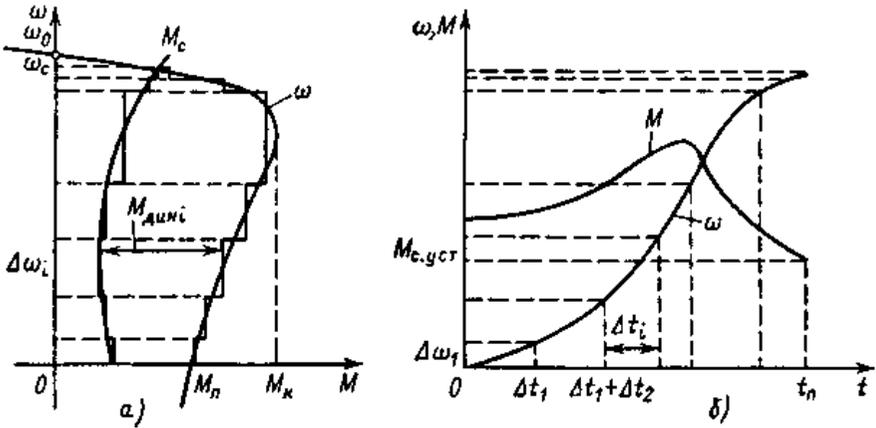


Рис. 24. К расчету переходного процесса пуска АД КЗ

Тогда время пуска при $M_C = const$ вычисляется без промежуточных расчетов:

$$t_{II} = J \sum \omega_C / (M_{Пср} - M_C). \quad (110)$$

Аналогично можно вычислить время торможения противовключением, приняв $M_{Tср} \approx (M_{нач} + M_{II}) / 2$:

$$t_T = J \sum \omega_{нач} / (M_{Tср} - M_C). \quad (111)$$

5.4. Переходные процессы электропривода с синхронным двигателем

При работе в синхронном режиме переходные процессы синхронного электропривода могут быть вызваны изменениями управляющих воздействий и возмущениями в механической части. Управляющими воздействиями являются напряжения на обмотках статора u_1 , частота f_1 и пропорциональная ей угловая скорость поля ω_0 , напряжение $u_в$, приложенное к обмотке возбуждения. Возмущающими воздействиями в механической части являются моменты нагрузки, изменения которых вызываются технологическими причинами.

При питании двигателя от сети его пуск осуществляется в асинхронном режиме с помощью предусмотренной для этой цели на роторе короткозамкнутой пусковой (демпферной) обмотки. В этом режиме электропривод ускоряется до подсинхронной скорости $\omega_{вх}$, при которой обмотка возбуждения включается на постоянное напряжение $u_в$ и происходит процесс втягивания двигателя в синхронизм. Переходные процессы, протекающие при вхождении двигателя в синхронизм, имеют важное практическое значение, и их особенности необходимо в дальнейшем проанализировать.

Напряжение u_{1max} и частота f_1 при питании от сети могут изменяться лишь в связи с колебаниями напряжения и частоты сети, обусловленными изменениями ее нагрузки. Эти колебания ограничены действующими нормами и стандартом на качество электроэнергии, поэтому они невелики и в данном случае могут не учитываться.

Анализ переходных процессов, возникающих при изменениях напряжения возбуждения обмотки ротора $u_в$, представляет интерес в тех случаях, когда предусматривается автомати-

ческое регулирование тока возбуждения для изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$ двигателя.

Основными возмущениями при питании от сети следует считать возможные изменения нагрузки электропривода. При ударном характере нагрузки, в процессах приложения и снятия нагрузки и в процессах втягивания в синхронизм динамические свойства синхронного электропривода проявляются достаточно полно, и на их рассмотрении здесь необходимо сосредоточить основное внимание. Электромагнитная связь возбужденного ротора с полем статора аналогична упругой механической связи. Влияние этой связи на динамику синхронного электропривода можно проанализировать при представлении механической части жестким приведенным звеном с помощью структурной схемы на рис. 25, полученной при $c_{12} = \infty$, и линеаризации угловой характеристики двигателя. Эта схема при отсутствии у двигателя демпферной обмотки ($\beta = 0$) преобразуется в схему, показанную на рис. 26.

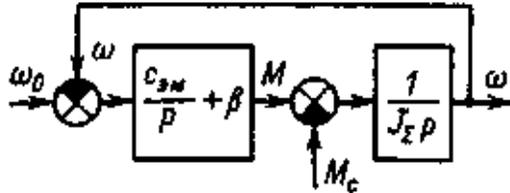


Рис. 25. Структурная схема синхронного электропривода при линеаризации

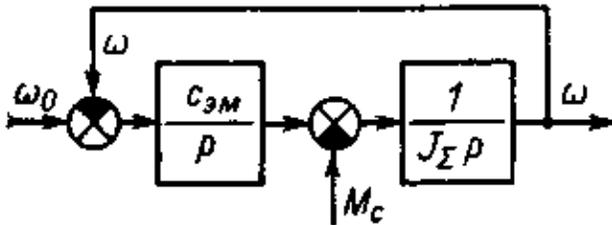


Рис. 26. Структурная схема синхронного электропривода без демпферной обмотки

Из рисунка видно, что при жестких механических связях синхронный электропривод без демпферной обмотки неработоспособен. Действительно, два интегрирующих звена, охваченных жесткой отрицательной обратной связью, как известно из теории автоматического управления, образуют недемпфированную колебательную систему с передаточной функцией

$$W_{\omega}(p) = \frac{1}{(1/\Omega_{\text{ЭМ}}^2)p^2 + 1} \quad (112)$$

и частотой свободных колебаний равной

$$\Omega_{\text{ЭМ}} = \sqrt{c_{\text{ЭМ}}/J_{\Sigma}}. \quad (113)$$

Демпферная обмотка создает асинхронный момент, который обеспечивает затухание колебаний в системе. В соответствии с рис. 25 при этом

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{(1/T_M \Omega_{\text{ЭМ}}^2)p + 1}{(1/\Omega_{\text{ЭМ}}^2)p^2 + (1/T_M \Omega_{\text{ЭМ}}^2)p + 1}, \quad (114)$$

где $T_M = J_{\Sigma}/\beta$ — электромеханическая постоянная времени.

Передаточная функция электропривода по возмущению M_C может быть также определена по структурной схеме рис. 25 и представлена в виде

$$W'_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = \frac{p}{\beta(T_M p^2 + p + T_M \Omega_{\text{ЭМ}}^2)}. \quad (115)$$

В ряде случаев представляет интерес передаточная функция синхронного электропривода, в которой выходной переменной является угол $\theta = \varphi_0 - \varphi$, или что то же синхронная составляющая момента двигателя $M_{\text{син}} \approx c_{\text{ЭМ}}\theta$.

Эту передаточную функцию получаем из (115), учитывая, что при $\omega_0 = 0$, $\omega = -\Delta\omega$ и θ есть интеграл от $\Delta\omega$ по времени:

$$\theta = -\Delta\omega(p)/p. \quad (116)$$

Следовательно, функция (115) может быть представлена в виде

$$W'_{\theta}(p) = -\frac{\theta(p)}{M_C(p)} = \frac{\Delta\omega(p)}{pM_C(p)} = \frac{1}{\beta(T_M p^2 + p + T_M \Omega_{ЭМ}^2)}. \quad (117)$$

Соответствующая амплитудно-фазовая характеристика

$$W'_{\theta}(p) = \frac{T_M(\Omega_{ЭМ}^2 - \Omega^2) - j\Omega}{\beta[T_M^2(\Omega_{ЭМ}^2 - \Omega^2)^2 + \Omega^2]}. \quad (118)$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$A'_{\theta}(\Omega) = \frac{1}{\beta\sqrt{T_M^2(\Omega_{ЭМ}^2 - \Omega^2)^2 + \Omega^2}}. \quad (119)$$

Фазо-частотная характеристика

$$\Psi'_{\theta}(\Omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\Omega}{T_M(\Omega_{ЭМ}^2 - \Omega^2)}. \quad (120)$$

Если известно, что момент нагрузки электропривода изменяется по закону $M_C = M_{Cmax} \sin \Omega t$, с помощью (119) и (120) можно определить зависимость угла θ от времени в виде

$$\theta = \theta_{max} \sin(\Omega t + \Psi'_{\theta}), \quad (121)$$

где

$$\theta = \Delta M_{Cmax} A'_{\theta}(\Omega). \quad (122)$$

Рассматривая полученные зависимости, можно установить, что они соответствуют колебательному звену с коэффициентом затухания, определяемым электромеханической постоянной. Следовательно, при данном J_{Σ} колебательность определяется модулем жесткости асинхронной механической характеристики β . Чем больше модуль жесткости, тем меньше

при колебаниях нагрузки M_C амплитуда колебаний синхронной составляющей момента, тем меньше резонансное усиление колебаний при частоте, близкой частоте свободных колебаний $\Omega_{эм}$.

Сравнение соответствующих передаточных функций показывает, что электропривод с синхронным двигателем эквивалентен асинхронному электроприводу с упругой механической связью при бесконечно большой массе механизма. Роль упругой механической связи при этом выполняют силы электромагнитного взаимодействия между полями ротора и статора.

Структурная схема рис. 25 и соответствующие ей передаточные функции синхронного электропривода при принятых допущениях могут быть использованы для анализа переходных процессов при приложении и снятии нагрузки. Дифференциальное уравнение системы относительно скорости двигателя ω можно записать с помощью (114):

$$\frac{1}{\Omega_{эм}^2} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{1}{T_M \Omega_{эм}^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{T_M \Omega_{эм}^2} \frac{d\omega_0}{dt} + \omega_0. \quad (123)$$

При питании от сети $\omega_0 = const$, $d\omega_0/dt = 0$. Уравнение (123) при этом имеет вид

$$\frac{1}{\Omega_{эм}^2} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{1}{T_M \Omega_{эм}^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0. \quad (124)$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_M} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_M^2} - \Omega_{эм}^2}. \quad (125)$$

Если $\Omega_{эм} > T_M/2$, корни являются комплексно-сопряженными:

$$p_1 = -\frac{1}{2T_M} + j \sqrt{\Omega_{эм}^2 - \frac{1}{4T_M^2}}. \quad (126)$$

$$p_2 = -\frac{1}{2T_M} - j \sqrt{\Omega_{эм}^2 - \frac{1}{4T_M^2}}. \quad (127)$$

Следовательно, решение (123) необходимо искать в виде

$$\omega = \omega_0 + e^{-at} (A \cos \Omega_p t + B \sin \Omega_p t). \quad (128)$$

Значения коэффициентов A и B могут быть определены с помощью начальных условий: при $t=0$ имеем

$$(\omega)_0 = \omega_{нач}, \quad (129)$$

$$(d\omega/dt)_0 = (M_{нач} - M_C) / J_\Sigma, \quad (130)$$

причем

$$M_{нач} = c_{эм} \theta_{нач} + \beta (\omega_0 - \omega_{нач}) = c_{эм} \theta_{нач} + \beta \omega_0 S_{нач}, \quad (131)$$

где $\theta_{нач}$ и $S_{нач}$ — значение угла и скорости при $t=0$.

Подставив начальные условия в (128), получим уравнения для определения коэффициентов:

$$\omega_{нач} = \omega_0 + A; \quad (132)$$

$$(M_{нач} - M_C) / J_\Sigma = -\alpha A + \Omega_p B. \quad (133)$$

Откуда

$$\begin{cases} A = -(\omega_0 - \omega_{нач}); \\ B = \frac{M_{нач} - M_C}{J_\Sigma \Omega_p} - \frac{\alpha}{\Omega_p} (\omega_0 - \omega_{нач}). \end{cases} \quad (134)$$

Подставив значения коэффициентов A и B в (128), получим решение уравнения (124) в виде

$$\omega = \omega_0 - (\omega_0 - \omega_{нач}) e^{-\alpha t} \times \left\{ \cos \Omega_p t - \left[\frac{M_{нач} - M_C}{J_{\Sigma} \Omega_p (\omega_0 - \omega_{нач})} - \frac{\alpha}{\Omega_p} \right] \sin \Omega_p t \right\}. \quad (135)$$

Для получения уравнения системы относительно момента двигателя M определим по структурной схеме рис. 25 передаточную функцию:

$$W'_M(p) = \frac{M(p)}{M_C(p)} = \frac{(1/T_M \Omega_{\Sigma M}^2)p + 1}{(1/\Omega_{\Sigma M}^2)p^2 + (1/T_M \Omega_{\Sigma M}^2)p + 1}. \quad (136)$$

Откуда

$$\frac{1}{\Omega_{\Sigma M}^2} \frac{d^2 M}{dt^2} + \frac{1}{T_M \Omega_{\Sigma M}^2} \frac{dM}{dt} + M = \frac{1}{T_M \Omega_{\Sigma M}^2} \frac{dM_C}{dt} + M_C. \quad (137)$$

При изменениях момента скачком при $t > 0$, $M_C = const$. Соответственно для рассматриваемых процессов уравнение имеет вид

$$\frac{1}{\Omega_{\Sigma M}^2} \frac{d^2 M}{dt^2} + \frac{1}{T_M \Omega_{\Sigma M}^2} \frac{dM}{dt} + M = M_C. \quad (138)$$

Решение (138) будем искать в виде

$$M = M_C + e^{-\alpha t} (C \cos \Omega_p t + D \sin \Omega_p t). \quad (139)$$

Значения C и D определяются по начальным условиям аналогично выполненному ранее расчету. С помощью уравнения механической характеристики найдем производную момента:

$$dM/dt = c_{\Sigma M}(\omega_0 - \omega_{нач}) - \beta(d\omega/dt). \quad (140)$$

При $t=0$, $M_0 = M_{нач}$, а производная момента $(dM/dt)_0$ вычисляется с помощью (140):

$$\begin{aligned} (dM/dt)_0 &= c_{ЭМ}(\omega_0 - \omega_{нач}) - \beta(M_{нач} - M_C)/J_{\Sigma} = \\ &= c_{ЭМ}(\omega_0 - \omega_{нач}) - (M_{нач} - M_C)/T_M. \end{aligned} \quad (141)$$

Определив с помощью начальных условий C и D , получим решение $M(t)$ в виде:

$$\begin{aligned} M &= M_C + (M_{нач} - M_C)e^{-at} \times \\ &\times \left\{ \cos \Omega_p t + \left[\frac{c_{ЭМ}(\omega_0 - \omega_{нач})}{\Omega_p(M_{нач} - M_C)} - \frac{1}{\Omega_p T_M} + \frac{a}{\Omega_p} \right] \times \sin \Omega_p t \right\}. \end{aligned} \quad (142)$$

Полученные решения (135) и (142) свидетельствуют о том, что при изменениях нагрузки скачком скорость синхронного электропривода совершает затухающие колебания относительно скорости поля, а его момент колеблется относительно момента M_C , постепенно затухая с коэффициентом затухания α . Максимум момента и динамическое падение скорости при этом возрастают при увеличении скачка нагрузки и при увеличении начального отклонения скорости ω от ω_0 . Эти же показатели при прочих равных условиях уменьшаются при увеличении коэффициента затухания α . Как следует из (125), коэффициент затухания возрастает при увеличении жесткости асинхронной механической характеристики β , т.е. при уменьшении T_M . При $T_M < \Omega_{ЭМ}/2$ демпфирование обеспечивает аperiodический характер процессов. Однако практически эффект демпфирования ухудшается влиянием электромагнитной инерции на асинхронную составляющую момента $M_{ас}$, которая при выводе уравнений не была учтена ($T_{Э}=0$). Уравнение (142) получено при линеаризации угловой характеристики двигателя, поэтому оно даст удовлетворительные оценки показателей пере-

ходного процесса только при $M \leq M = \lambda M_{ном}$. Наличие демпферной обмотки позволяет осуществлять пуск синхронного двигателя путем прямого включения его на напряжение сети. Пусковые характеристики показаны на рис. 27.

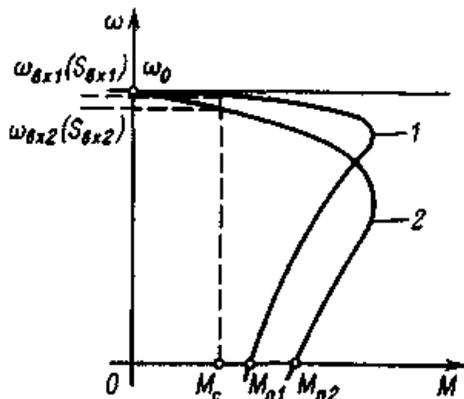


Рис. 27. Пусковые механические характеристики синхронного двигателя

Характеристика 1 соответствует относительно небольшому сопротивлению демпферной обмотки, при этом критическое скольжение мало, что увеличивает жесткость рабочего участка механической характеристики и уменьшает пусковой момент $M_{п1}$. Характеристика 2 соответствует повышенному сопротивлению этой обмотки, поэтому имеет сниженную жесткость рабочего участка, но больший пусковой момент $M_{п2}$. С точки зрения условий асинхронного пуска двигателя до подсинхронной скорости $\omega_{вх}$, которой соответствует скольжение $S_{вх}$, предпочтительна характеристика 2, особенно при значительной нагрузке на валу. При достижении двигателем подсинхронной скорости $\omega_{вх}$ в цепь обмотки возбуждения подается постоянный ток, магнитный поток возрастает до номиналь-

ного значения и наступает второй этап пуска — втягивание двигателя в синхронизм. Строгий анализ этого режима осложняется протекающими электромагнитными процессами. В первом приближении для оценки условий втягивания в синхронизм можно воспользоваться уравнениями (135) и (142). Для удобства анализа этого процесса решение системы уравнений синхронного электропривода при допущениях, соответствующих (117), получают относительно угла θ , изменения которого при втягивании в синхронизм заслуживают особого внимания. В отклонениях от точки статического равновесия это решение имеет следующий вид:

$$\Delta\theta = e^{-\alpha t} \sqrt{\Delta\theta_{нач}^2 + \frac{(\omega_0 S_{\text{вх}} + \alpha \Delta\theta_{нач})^2}{\Omega_p^2}} \sin(\Omega_p t + \psi_{\Delta\theta}), \quad (143)$$

где

$$\psi_{\Delta\theta} = \arctg \frac{\Delta\theta_{нач} \Omega_p}{\omega_0 S_{\text{вх}} + \alpha \Delta\theta_{нач}}. \quad (144)$$

При одной и той же нагрузке статическая характеристика 2 на рис. 27 обеспечивает меньшую начальную скорость при втягивании в синхронизм. Соответственно при этом $S_{\text{вх}2} > S_{\text{вх}1}$ и амплитуда колебаний угла $\Delta\theta_{\text{max}}$ в (143) получается большей. С ростом $S_{\text{вх}}$ условия втягивания в синхронизм ухудшаются и при больших $S_{\text{вх}}$ синхронизация может оказаться невозможной. Более благоприятные условия втягивания в синхронизм обеспечиваются жесткой механической характеристикой 1. Практически пусковая обмотка рассчитывается так, чтобы обеспечивались удовлетворительные условия пуска при заданном максимальном значении нагрузки $M_{C\text{max}}$, а значения входного скольжения лежали в допустимых пределах $S_{\text{вх}} = 0,03 \div 0,05$.

6. ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

На практике задача правильного определения требуемой мощности электропривода и выбора двигателей, обладающих достаточной мощностью и перегрузочной способностью, имеет важное значение. Ограничения, накладываемые на процессы электромеханического преобразования энергии по условиям нагрева, условиям коммутации тока на коллекторах машин постоянного тока, по максимальному моменту двигателей переменного тока, при выборе двигателей обязательно должны учитываться.

Ошибки в сторону занижения требуемой мощности электропривода снижают надежность его работы и при неблагоприятных условиях вызывают ускоренный износ изоляции и выход двигателей из строя. Ошибки в сторону запаса также влекут за собой издержки, связанные с нерациональным использованием дорогостоящего оборудования, ухудшением энергетических показателей недогруженных двигателей и увеличением динамических нагрузок механизмов. Поэтому от правильности выбора двигателей при проектировании существенно зависит производительность, надежность и экономичность приводимых в движение машин.

В данной главе исследуются тепловые переходные процессы и нагрев двигателей, который при работе электропривода определяется тепловыделением, обусловленным потерями энергии в элементах конструкции двигателей — обмотках, магнитопроводах, коллекторах и т. п. Изложенные выше сведения о переходных процессах работы электроприводов используются в данной главе для определения потерь энергии в переходных процессах.

6.1 Потери энергии в установившихся режимах работы электропривода

Энергию, необходимую для совершения рабочим органом механизма полезной работы, электропривод в общем случае потребляет из сети. Прохождение потока энергии от сети к рабочему органу механизма сопровождается потерями энергии во всех элементах электропривода. Протекание токов в силовой цепи и в цепи возбуждения двигателя вызывает потери электрической энергии в активных сопротивлениях; изменения магнитного потока являются причиной потерь в магнитной цепи двигателя, обусловленных вихревыми токами и гистерезисом. Силы трения, а также сопротивление движению, создаваемое самовентиляцией двигателя, вызывают механические потери двигателя, а силы трения в передачах — механические потери в кинематической цепи.

Необходимость расчета потерь энергии при проектировании и в эксплуатации обусловлена тем, что определение непроизводительных расходов энергии является важнейшей характеристикой экономичности работы механизма и их анализ — основа поиска путей энергосбережения. Другая, не менее важная для практики, задача достоверной оценки потерь энергии при работе двигателя связана с выбором двигателей по мощности при проектировании, определением их загрузки по нагреву в эксплуатации.

Для управления электроприводом в его силовые цепи и цепи возбуждения могут вводиться активные внешние сопротивления либо другие элементы, например реакторы, обладающие активным сопротивлением. Это учтено в представленной на рис. 28 схеме, где показаны три варианта привода производственного механизма, для каждого из которых необходимо проанализировать потери энергии в установившихся режимах работы на основе соответствующих расчетных соотношений

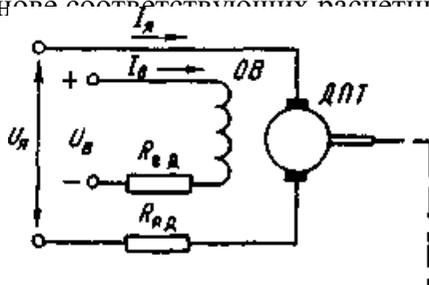


Рис. 28. Варианты привода производственного механизма

Суммарную мощность потерь в рассматриваемом электроприводе с учетом вышесказанного можно в общем виде записать так:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{ДВ\Sigma} + \Delta P_{МЕХ\Sigma} = \\ &= \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i + \Delta P_{СТ} + \Delta P_{МЕХДВ} + \sum_{j=1}^k \Delta P_{МЕХj} ; \end{aligned} \quad (145)$$

где $\Delta P_{ДВ\Sigma}$ — мощность потерь энергии в двигателе и его электрических цепях;

$\Delta P_{МЕХ\Sigma}$ — мощность потерь в механизме;

I_i, R_i — ток и сопротивление i -го элемента;

$\Delta P_{СТ}$ — потери в стали двигателя;

$\Delta P_{МЕХДВ}$ — механические потери двигателя;

$\Delta P_{МЕХj}$ — мощность потерь в j -м механическом элементе.

Проанализируем потери в трех показанных на рис. 28 видах двигателей. При этом напомним, что потери в электрических машинах принято делить на постоянные ΔP_C и переменные ΔP_V :

$$\Delta P_{ДВ\Sigma} = \Delta P_C + \Delta P_V. \quad (146)$$

Переменные потери двигателя обусловлены протеканием токов по сопротивлениям силовой цепи, они непосредственно связаны с нагрузкой двигателя. Остальные потери могут изменяться при работе двигателя, но либо полностью не зависят от нагрузки, либо эта зависимость не является явно выраженной, поэтому их условно относят к постоянным потерям. Рассмотрим эти составляющие потерь для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Постоянные потери двигателя:

$$\Delta P_C = \Delta P_B + \Delta P_{СТ} + \Delta P_{МЕХДВ}. \quad (147)$$

Мощность потерь на возбуждение:

$$\Delta P_B = I_B^2 (R_B + R_{ВД}) = U_B I_B, \quad (148)$$

где U_B — напряжение, приложенное к цепи возбуждения;

I_B — ток возбуждения.

Мощность потерь на возбуждение максимальна при работе на естественной характеристике при $\Phi = \Phi_{НОМ}$. В режимах работы с ослабленным полем она снижается при $U_B = U_{В.НОМ} = const$ пропорционально току I_B , причем мощность потерь в меди обмотки снижается пропорционально квадрату тока возбуждения.

Потери в стали электрической машины зависят от квадрата индукции и от частоты перемагничивания магнитопровода в степени 1,3:

$$\Delta P_{СТ} = \Delta P_{СТ.НОМ} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{НОМ}} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^{1,3}. \quad (149)$$

В установившихся режимах поток Φ постоянен, поэтому потери имеют место только во вращающемся якоре, частота перемагничивания стали которого пропорциональна угловой скорости двигателя. При $\Phi = \Phi_{НОМ} = const$ потери в стали зависят только от скорости, в режимах ослабления поля изменяются в меньшей степени, так как увеличение скорости происходит за счет снижения потока двигателя. Изменения нагрузки двигателя влияют на потери в стали вследствие изменений скорости двигателя и влияния реакции якоря. Момент механических потерь двигателя $\Delta P_{МЕХ.ДВ}$ содержит составляющие сухого трения в подшипниках и вентиляторного момента (рис. 29., а). Если, как показано на рисунке, принять его постоянным и равным среднему значению, получим

$$\Delta P_{МЕХ.ДВ} = \Delta P_{МЕХ.ДВ.НОМ} \frac{\omega}{\omega_{НОМ}}. \quad (150)$$

Переменные потери двигателя:

$$\Delta P_V = I_{Я}^2 (R_{Я\Sigma} + R_{ЯД}). \quad (151)$$

Суммируя уравнения (148), (149), (150), получаем полные потери в двигателе и его электрических цепях:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ДВ} = I_B^2 (R_B + R_{ВД}) + \Delta P_{СТ.НОМ} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{НОМ}} \right)^2 \times \\ \times \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^{1,3} + \Delta P_{МЕХ.ДВ.НОМ} \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} + \\ + I_{Я}^2 (R_{Я\Sigma} + R_{ЯД}). \end{aligned} \quad (152)$$

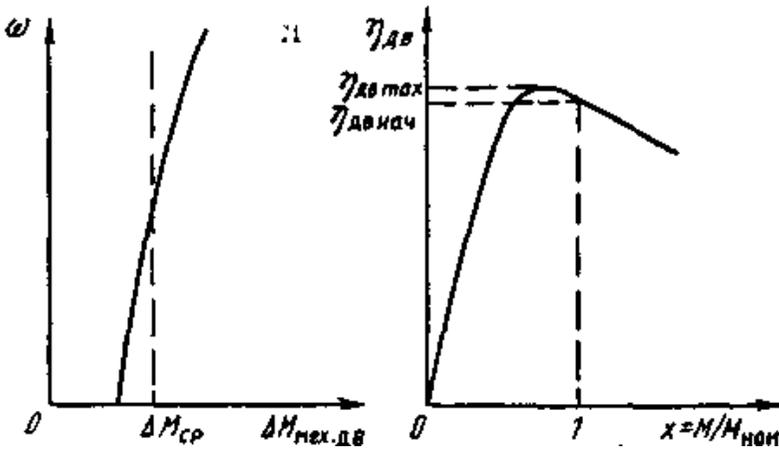


Рис. 29. Характеристика момента потерь (а) и КПД двигателя (б)

При расчетах, имеющих целью проверку двигателя по нагреву, необходимо учитывать только греющие потери $\Delta P_{ДВ.ГР}$, выделяющиеся непосредственно в двигателе.

За вычетом потерь во внешних добавочных сопротивлениях получим:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ДВ.ГР} = & I_B^2 R_B + \Delta P_{СТ.НОМ} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{НОМ}} \right)^2 \times \\ & \times \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^{1,3} + \Delta P_{МЕХ.ДВ.НОМ} \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} + \\ & + \Delta P_{V.НОМ} \left(\frac{I_{Я}}{I_{Я.НОМ}} \right)^2, \end{aligned} \quad (153)$$

где $\Delta P_{V.НОМ}$ — переменные потери двигателя при работе в номинальном режиме.

Соотношения (152) и (153) справедливы и для двигателя со смешанным возбуждением, если в них принять, что I_B — ток обмотки независимого возбуждения.

Для двигателя с последовательным возбуждением в этих формулах следует принимать $I_B = 0$, так как $R_{Я\Sigma}$ включает в себя сопротивление последовательной обмотки возбуждения, и при расчетах иметь в виду, что поток двигателя в этом случае определяется током якоря $\Phi(I_{Я})$.

Для асинхронного двигателя частота перемагничивания стали статора есть частота приложенного к статору напряжения, а для ротора пропорциональна скольжению. Поэтому постоянные потери АД можно рассчитать по формуле (154).

Первое слагаемое приближенно учитывает потери от протекания тока намагничивания по цепи статора, условно выделенные из общих потерь, пропорциональных квадрату тока статора. Потери $\Delta P_{1.СТ.НОМ}$ представляют собой потери в стали статора в номинальном режиме. Исходя из примерного равенства объемов стали статора и ротора при $S=1$ принято $\Delta P_{2.СТ.НОМ} = \Delta P_{1.СТ.НОМ}$.

$$\begin{aligned}
\Delta P_C &= 3I_{10}^2 \left(\frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 (R_1 + R_{1.ДВ}) + \\
&+ \Delta P_{1.СТ.HOM} \left(\frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 \times \\
&\times \left(\frac{f_1}{f_{1.HOM}} \right)^{1,3} (1 + S^{1,3}) + \Delta P_{МЕХ.ДВ.HOM} \frac{\omega}{\omega_{HOM}},
\end{aligned} \tag{154}$$

где I_{10} — ток холостого хода двигателя.

Переменные потери асинхронного двигателя:

$$\begin{aligned}
\Delta P_V &= 3I_1^2 (R_1 + R_{1.ДВ}) + 3I_2^2 (R_2' + R_{2'.ДВ}) = \\
&= 3I_2^2 (R_2' + R_{2'.ДВ}) \left[1 + \frac{R_1 + R_{1,Д}}{R_2' + R_{2',Д}} \right] = \\
&= M\omega_0 S \left[1 + \frac{R_1 + R_{1,Д}}{R_2' + R_{2',Д}} \right].
\end{aligned} \tag{155}$$

Здесь приближенно принято $I_1 = I_2'$, так как потери от тока холостого хода уже условно учтены в постоянных потерях.

Полные потери асинхронного двигателя (156) получим суммированием (154) и (155).

Греющие потери асинхронного двигателя имеют вид (157).

Для синхронного двигателя по аналогии с асинхронным двигателем, положив $S=0$, можно записать уравнение (158).

При проверке двигателя по нагреву греющие потери определяются (158) при $R_{ВД} = R_{1,Д} = 0$.

$$\begin{aligned}
\Delta P_{ДВ.Σ} &= 3I_{10}^2 \left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 (R_1 + R_{1,Д}) + \\
&+ \Delta P_{МЕХ.ДВ.HOM} \frac{\omega}{\omega_{HOM}} + \\
&+ \Delta P_{1.СТ.HOM} \cdot \left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1,HOM}} \right)^{1,3} (1 + S^{1,3}) + \\
&+ \Delta P_{МЕХ.ДВ.HOM} \frac{\omega}{\omega_{HOM}} + M\omega_0 S \left(1 + \frac{R_1 + R_{1,Д}}{R'_2 + R'_{2,Д}} \right).
\end{aligned} \tag{156}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{ДВ.ГР} &= 3I_{10}^2 R_1 \left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 + \\
&+ \Delta P_{1.СТ.HOM} \cdot \left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.HOM}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1,HOM}} \right)^{1,3} (1 + S^{1,3}) + \\
&+ \Delta P_{МЕХ.ДВ.HOM} \frac{\omega}{\omega_{HOM}} + M\omega_0 \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right).
\end{aligned} \tag{157}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{ДВ.Σ} &= I_B^2 (R_B + R_{ДВ}) + \\
&+ \Delta P_{1.СТ.HOM} \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_{HOM}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1,HOM}} \right)^{1,3} + \\
&+ \Delta P_{МЕХ.ДВ.HOM} \frac{\omega}{\omega_{HOM}} + 3I_1^2 (R_1 + R_{1,Д}).
\end{aligned} \tag{158}$$

Приведенные соотношения дают возможность рассчитывать потери энергии в двигателе для проверки его условий работы по нагреву. На практике расчеты потерь даже в представленном упрощенном виде могут вызвать затруднения в

связи с отсутствием всех данных и характеристик.

При необходимости определения энергетических показателей электропривода полные потери мощности в двигателе и его цепях позволяют рассчитать КПД двигателя:

$$\eta_{ДВ} = \frac{M\omega}{M\omega + \Delta P_{ДВ.\Sigma}}. \quad (159)$$

Если принять, что электромагнитный момент пропорционален току силовой цепи, зависимость КПД от коэффициента загрузки двигателя $\chi = M/M_{НОМ}$ можно представить более наглядно ($\omega = \omega_{НОМ}$, добавочные сопротивления отсутствуют):

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_{НОМ} \cdot \chi}{P_{НОМ} \cdot \chi + \Delta P_C + P_{V.НОМ} \cdot \chi^2}. \quad (160)$$

Зависимость $\eta = f(\chi)$ нелинейна и имеет максимум при $\chi_{опт} = \sqrt{\Delta P_C / \Delta P_{V.НОМ}}$. В этом можно убедиться, воспользовавшись известным способом определения экстремума функции. Максимальное значение КПД:

$$\eta_{ДВ.МАХ} = \frac{P_{НОМ}}{P_{НОМ} + 2\sqrt{\Delta P_C P_{V.НОМ}}}. \quad (161)$$

При $\Delta P_C = P_{V.НОМ}$ максимум КПД соответствует номинальной нагрузке двигателя. Обычно постоянные потери относительно меньше, $\chi_{опт} < 1$, чем обеспечивается сохранение высокого КПД в широком диапазоне изменения загрузки двигателя (см. рис. 29,б).

Полные потери энергии в электроприводе в соответствии с (146) включают в себя суммарные потери в передаточном устройстве и движущихся элементах механизма.

Момент трения в передачах и механизме зависит от полезной нагрузки передач, как показано на рис. 30,а, где $\Delta M_{МЕХО}$ есть момент трения покоя.

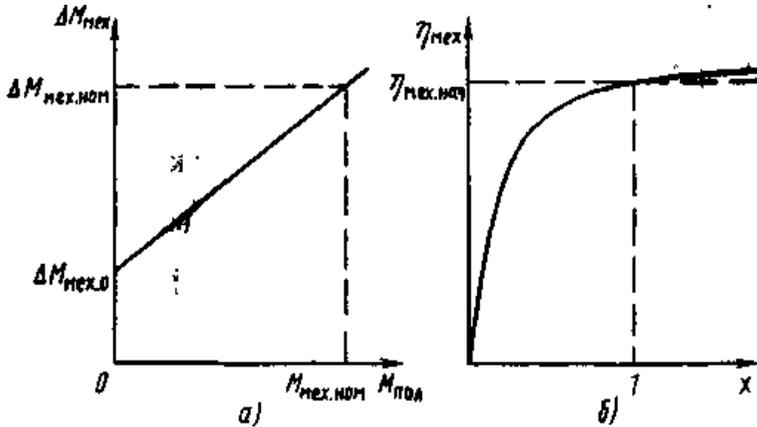


Рис. 30. Характеристика момента потерь (а) и КПД (б) механической части электропривода

С учетом этой зависимости мощность потерь в механизме можно представить так:

$$\Delta P_{MECH\Sigma} = \Delta P_{MECH.0} \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} + (\Delta P_{MECH.НОМ} - \Delta P_{MECH.0}) \frac{M_{НОМ} \omega}{M_{MECH.НОМ} \omega_{НОМ}}, \quad (162)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{MECH.0} &= \Delta M_{MECH.0} \times \omega_{НОМ}; \\ \Delta P_{MECH.НОМ} &= \Delta M_{MECH.НОМ} \times \omega_{НОМ}. \end{aligned} \quad (163)$$

Вывод: в механической части потери можно разделить на постоянные и переменные и определить КПД механизма.

При $\omega = \omega_{НОМ}$:

$$\eta_{MEH} = \frac{P'_{НОМ} \chi}{P'_{НОМ} \chi + \Delta P_{MEH.0} + (\Delta P_{MEH.НОМ} - \Delta P_{MEH.0}) \chi}. \quad (164)$$

Эта зависимость также нелинейна, но пропорциональность переменных потерь коэффициенту загрузки определяет монотонное возрастание КПД при возрастании полезной нагрузки. И здесь относительное уменьшение постоянных потерь расширяет пределы изменения нагрузки, в которых КПД близок к номинальному (рис. 30,б).

Экономичность работы электромеханической системы определяет КПД электропривода:

$$\eta_{ЭП} = \eta_{ДВ} \eta_{MEH}. \quad (165)$$

Рассмотренные зависимости $\eta_{ДВ}$ и η_{MEH} от загрузки электропривода позволяют убедиться в том, что значительный запас при выборе двигателя по мощности и недоиспользование его в эксплуатации ухудшает энергетические показатели привода и механизма.

6.2. Потери энергии в переходных режимах работы электропривода

Технологические процессы множества производственных механизмов имеют циклический характер, определяющий необходимость частых пусков, реверсов и торможений электропривода. В переходных процессах реализуются динамические нагрузки, увеличивающие момент двигателя до значений, ограниченных допустимой кратковременной перегрузкой двигателя, которые вызывают значительный рост мощности потерь и увеличение интегральных потерь энергии за время цикла работы. Существенные динамические нагрузки, действующие в течение значительной части общего времени цикла, во многих случаях вносят основную долю тепла, выделяющегося в двигателе, и оказывают на его нагрев определяющее влияние. Для количественного учета влияния переходных процессов электропривода на нагрев двигателя требуется расчет тепловыделения в двигателе за время переходных процессов. В общем случае для решения этой задачи необходимо рассчитать переходный процесс и получить зависимости $M(t)$, $i(t)$, $\Phi(t)$, $\omega(t)$, $f_1(t)$ и т. д. Расчет мощности потерь в двигателе и его цепях $\Delta P_{ДВ\Sigma}(t)$ или $\Delta P_{ДВ.ГР}(t)$ при наличии этих зависимостей может быть с приемлемой точностью произведен по формулам, приведенным в разделе 6.1.

Определим энергию потерь в двигателе и его цепях за время переходного процесса

$$\Delta A_{\Sigma.П.П.} = \int_0^{t_{ПП}} \Delta P_{ДВ\Sigma}(t) dt, \quad (165)$$

и тепловыделение в двигателе

$$\Delta A_{ГР.ПП} = \int_0^{t_{ПП}} \Delta P_{ДВ.ГР}(t) dt . \quad (166)$$

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением мощность потерь в якорной цепи, выделяющаяся в переходном процессе, определяется уравнение баланса мощностей в этом режиме, при этом электромагнитной инерцией пренебрегаем:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ЯЦ} &= I_{Я}^2 R_{Я\Sigma} = U_{Я} I_{Я} - E I_{Я} = \\ &= C I_{Я} (\omega_0 - \omega) = M \omega_0 S, \end{aligned} \quad (167)$$

где $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ — относительный перепад скорости.

Мощность потерь, выделяющихся в переходном процессе в роторной цепи асинхронного двигателя, может быть представлена той же формулой:

$$\Delta P_{2\Sigma} = 3 I_2'^2 R_2' \Sigma = M \omega_0 S , \quad (168)$$

где $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ — скольжение двигателя.

Энергия потерь, выделившаяся за время переходного процесса в якорной цепи двигателя постоянного тока или в роторной цепи асинхронного двигателя, может быть определена и более удобными путем:

$$\Delta A_{ЯЦ.ПП} = \Delta A_{2\Sigma.ПП} = \int_0^{t_{ПП}} M \omega_0 S dt . \quad (169)$$

Из основного уравнения движения при $M_C = 0$ получим

$$M = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} . \quad (170)$$

Произведем замену переменной ω на S :

$$\omega = \omega_0 (1 - S); \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{dS}{dt} . \quad (171)$$

Тогда

$$M = -J_{\Sigma} \omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (172)$$

Подставив это выражение в (169), получим

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} = - \int_0^{t_{\text{ПП}}} J_{\Sigma} \omega_0 S dS = \int_{S_{\text{НАЧ}}}^{S_{\text{КОН}}} J_{\Sigma} \omega_0^2 S dS, \quad (173)$$

где

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} = \Delta A_{\text{ЯЦПП}} = \Delta A_{2\Sigma\text{ПП}}. \quad (174)$$

Отсюда энергия, выделяющаяся в соответствующей силовой цепи за время переходного процесса вхолостую:

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.О.П}} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(S_{\text{НАЧ}}^2 - S_{\text{КОН}}^2 \right). \quad (175)$$

Для процесса пуска вхолостую $S_{\text{НАЧ}} = 1$, $S_{\text{КОН}} = 0$.

При этом

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} = W_K. \quad (176)$$

Проанализировав полученные выражения, делаем **вывод**: потери энергии, выделяющиеся за время пуска вхолостую в силовой цепи двигателя, мощность потерь в которой пропорциональна относительному перепаду скорости или скольжению, численно равны кинетической энергии, которую за время пуска приобретают движущиеся массы привода.

Для торможения электропривода противовключением ($S_{\text{НАЧ}} = 2$, $S_{\text{КОН}} = 0$) имеем

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.Т.П}} = 3\Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} = 3W_K. \quad (177)$$

Для процесса реверса ($S_{\text{НАЧ}} = 2$, $S_{\text{КОН}} = 0$):

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.РЕВ.}} = \Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} + \Delta A_{\text{ЭЛ.Т.П}} = 4W_K. \quad (178)$$

Для процесса динамического торможения ($S_{\text{НАЧ}} = 1$, $S_{\text{КОН}} = 0$):

$$\Delta A_{\text{ЭЛ.Д.Т}} = \Delta A_{\text{ЭЛ.ПП}} = W_K. \quad (179)$$

Рассмотрим пуск вхолостую асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

На рис. 31 представлена механическая характеристика двигателя с двойной беличьей клеткой.

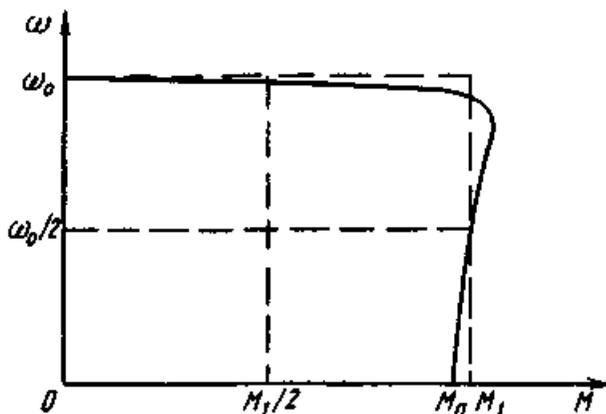


Рис. 31. Механическая характеристика асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

Эта характеристика обеспечивает практическое постоянство пускового момента двигателя и без существенной погрешности может быть аппроксимирована двумя прямыми, как показано на рисунке штриховыми линиями.

Процесс пуска вхолостую при этом будет равномерно ускоренным с ускорением

$$\varepsilon_{\text{ПП}} = \frac{M_1}{J_{\Sigma}} = \text{const}. \quad (180)$$

Время пуска составит

$$t_{\text{ПП}} = \frac{\omega_0}{\varepsilon_{\text{ПП}}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0}{M_1}. \quad (181)$$

Мощность потерь в роторной цепи при пуске:

$$\Delta A_{2\Pi} = \int_0^{t_{III}} (P_{12}(t) - P_2(t)) dt = \int_0^{t_{III}} (M_1 \omega_0 - M_1 \omega) dt. \quad (182)$$

На рис. 32 представлены зависимости $P_{12}(t) = M_1 \omega_0$, $P_2(t) = M_1 \omega$ в функции времени t . Мощность скольжения $\Delta P_2(t) = M_1(\omega_0 - \omega)$ показана вертикальной штриховкой.

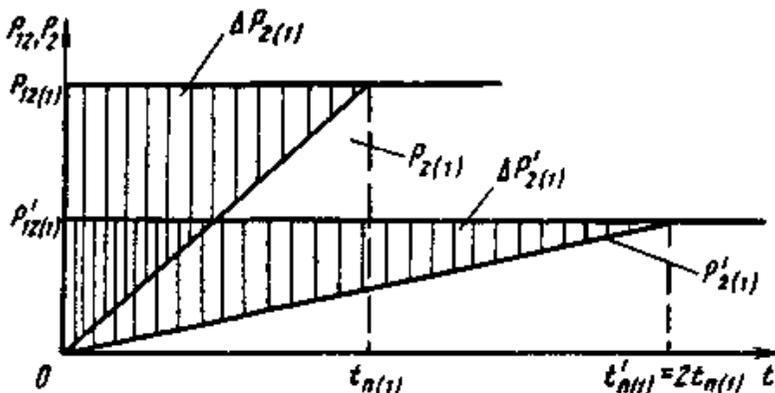


Рис. 32. Зависимости $P_{12}(t)$ и $P_2(t)$ при пуске асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

Интеграл по времени от мощности скольжения в соответствии с (182) пропорционален этой заштрихованной площади:

$$\Delta A_{12\Pi}(t) = \int_0^{t_{III}} M_1 \omega_0 dt = M_1 \omega_0 t_{III} = J_{\Sigma} \omega_0^2. \quad (183)$$

Электромагнитная энергия, переданная ротору (напомним, что потери в стали и механические потери отнесены выше к постоянным потерям и здесь не учитываются) за время пуска на рис. 32 пропорциональна площади прямоугольника

$P_{12}(1)t_{П(1)}$. Видим, что половина потребленной за время пуска энергии затрачена на увеличение запаса кинетической энергии в движущихся массах привода $J_{\Sigma}\omega^2/2$, а вторая половина выделилась в виде потерь скольжения на сопротивлениях роторной цепи $R'_{2\Sigma}$.

Момент двигателя, характер его изменения в переходном процессе в соответствии с (175) не влияют на потери энергии $\Delta A_{ЭЛ.П.П.}$. В инвариантности потерь относительно момента двигателя можно убедиться, предположив, что пуск происходит при сниженном вдвое пусковом моменте (см. рис. 31). При этом вдвое снижается электромагнитная мощность $P'_{12}(1)=0,5M_1\omega_0$, ускорение $\varepsilon'_{П(1)}=0,5M_1/J_{\Sigma}$ и вдвое увеличивается время пуска $t'_{П(1)}=2t_{П(1)}$. Зависимости $P'_{12}(1)$ и $P'_{2(1)}$, показанные на рис. 32, свидетельствуют о том, что потребление энергии и потери при этом не изменяются.

Рассматривая рисунок, убеждаемся в том, что потери энергии можно снизить только путем уменьшения мощности скольжения ΔP_2 при неизменном времени пуска ($M=M_1$). Допустим, что путем переключения обмоток фаз статора в асинхронном двигателе при пуске можно вдвое увеличить число пар полюсов, т.е. уменьшить вдвое скорость поля до $0,5\omega_0$. При этом электромагнитная мощность $P_{12}=P_{12(2)}=M_1(0,5\omega_0)$. За время пуска до скорости $0,5\omega_0$ потери энергии составят

$$\Delta A'_{2П(2)} = \frac{J_{\Sigma}(0,05\omega_0)^2}{2} = 0,25W_{К(1)}. \quad (184)$$

На втором участке пуска переключением обмотки синхронная скорость увеличивается до ω_0 . На этом участке $S_{НАЧ} = 0,5$, $S_{КОН} = 0$, поэтому в соответствии с (175)

$$\Delta A_{2\Pi}^{\text{ш}}(t) = \frac{J \Sigma \omega_0^2}{2} = (0.5^2 - 0) = 0.25 W_{K(1)}. \quad (185)$$

Суммарные потери за время ступенчатого пуска равны

$$\Delta A_{2\Pi}(2) = \Delta A_{2\Pi}^{\text{ш}}(2) + \Delta A_{2\Pi}^{\text{н}}(2) = 0.5 W_{K(1)}, \quad (186)$$

что вдвое меньше, чем при прямом пуске.

Эти потери на рис. 33. пропорциональны площади двух заштрихованных треугольников.

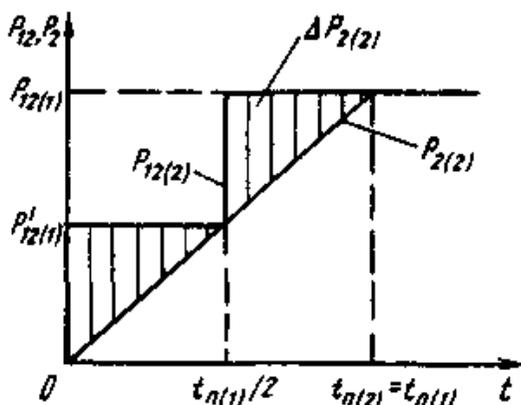


Рис. 33. Зависимости $P_{12}(t)$ и $P_2(t)$ при пуске асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

Существенное снижение потерь энергии достигнуто за счет соответствующего снижения мощности потерь скольжения $\Delta P_{2\text{MAX}}(2) = 0.5 \Delta P_{2\text{MAX}}(1)$ при $t_{\Pi}(2) = t_{\Pi}(1)$.

Использование ступенчатого пуска четырехскоростных АД КЗ, как можно убедиться из аналогичного расчета, снижает потери энергии при пуске вхолостую в 4 раза. Еще более эффективным путем является непрерывное управление скоростью идеального холостого хода электропривода. Рассмотрим это подробнее.

Если пренебречь электромагнитной инерцией, момент

двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя в пределах линейной части механической характеристики можно формировать в переходном процессе, управляя соответственно напряжением на якоре или частотой тока статора:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega). \quad (187)$$

В частности, можно осуществить пуск при $M=M_1=const$, если при $M_C=0$ сформировать следующий закон изменения ω_0 :

$$\omega_0 = \omega_{0.НАЧ} + \varepsilon_0 t = \frac{M_1}{\beta} + \frac{M_1}{J_\Sigma} t \quad \text{при } t \leq t_{П1}, \quad (188)$$

$$\omega_0 = \omega_{0.НОМ} = const \quad \text{при } t > t_{П1}, \quad (189)$$

где

$$t_{П1} = \frac{\omega_{0.НОМ}}{\varepsilon_0} = \frac{J_\Sigma \omega_{0.НОМ}}{M_1}. \quad (190)$$

Графики $P_{12}(t)$, $P_2(t)$, $M(t)$, соответствующие (188) и (189), представлены на рис. 34,а. Потери энергии за время пуска пропорциональны заштрихованной площади. При моменте M_1 , выбранном либо по допустимому ускорению $\varepsilon_{доп}$, либо по перегрузочной способности двигателя, это управление обеспечивает минимальные потери в цепи якоря или ротора за время пуска:

$$\begin{aligned} \Delta A_{ЯЦП} &= \Delta A_{2П} = M_1 \omega_{0.НАЧ} t_{П(1)} = \\ &= J_\Sigma \frac{\omega_{0.НОМ}^2}{2} \left(\frac{2\omega_{0.НАЧ}}{\omega_{0.НОМ}} \right). \end{aligned} \quad (191)$$

Видим, что потери в сравнении с потерями при прямом пуске снижаются в отношении $2\omega_{0.НАЧ}/\omega_{0.НОМ}$, которое в зависимости от мощности и типа двигателей лежит в пределах $0.1 \div 0.2$.

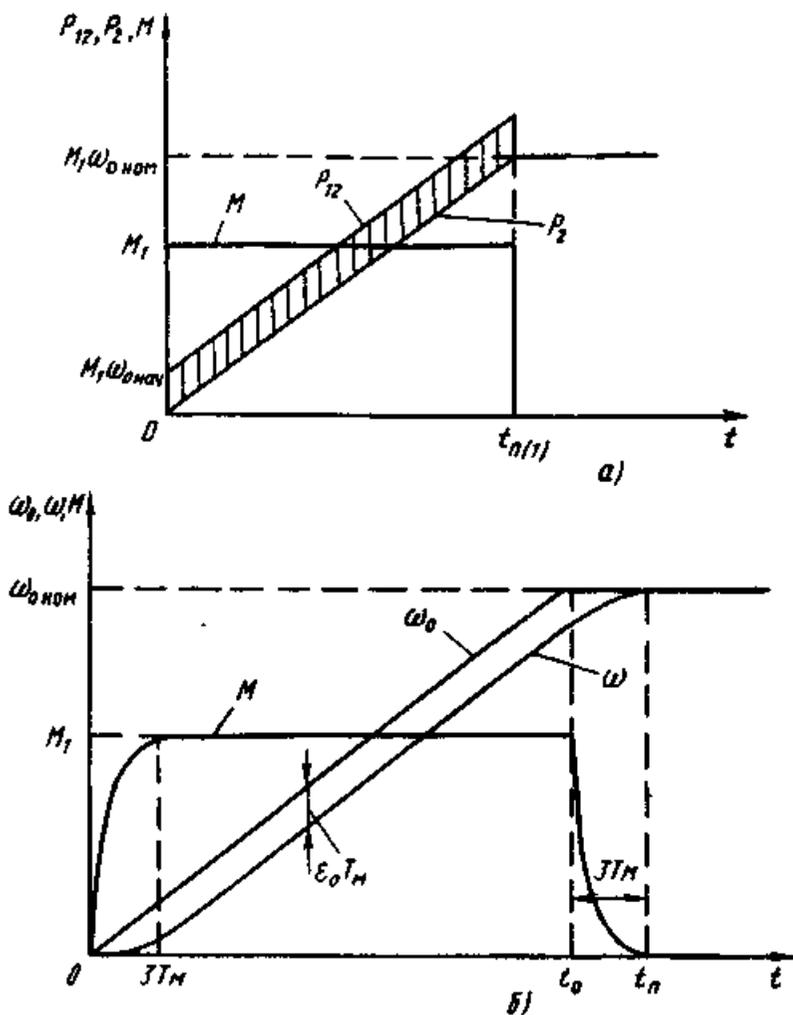


Рис. 34. Переходные процессы при частотном пуске асинхронного двигателя

На практике используют более простой способ управления — переходные процессы электропривода при линейном нарастании ω_0 , рассмотренные выше. Такой процесс пуска

вхолостую представлен на рис. 34,б. Здесь показаны зависимости $\omega(t)$, $\omega(t)$, $M(t)$.

При работе в пределах линейной части механической характеристики мощность потерь в цепи якоря или ротора двигателя определяется соотношением

$$\Delta P_{2\Pi} = M\omega_0 - M\omega = \frac{M^2}{\beta}. \quad (192)$$

С помощью формулы $M(t)$ для рассматриваемого переходного процесса (43) при $M=0$ определим потери энергии:

$$\begin{aligned} \Delta A_{2\Pi} &= \int_0^{t\Pi} \frac{M^2(t)}{\beta} dt + \int_{t_0}^{t\Pi} \frac{M^2(t)}{\beta} dt = \\ &= \int_0^{t_0} \frac{J_{\Sigma}^2 \varepsilon_0^2}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right)^2 dt + \int_0^{(3-4)T_M} \frac{J_{\Sigma}^2 \varepsilon_0^2}{\beta} e^{-\frac{2t}{T_M}} dt = \\ &= \frac{J_{\Sigma}^2 \varepsilon_0^2}{\beta} (t_0 - T_M) = \frac{J_{\Sigma} \omega_{0.HOM}^2}{2} \frac{2T_M}{t_0} = \\ &= \frac{J_{\Sigma} \omega_{0.HOM}^2}{2} \frac{2T_M}{t_0} \left(1 - \frac{T_M}{t_0} \right). \end{aligned} \quad (193)$$

При получении (193) учтено, что $t_0 \gg 4T_M$, а за время $4T_M$ функция e^{-t/T_M} уменьшается практически до нуля. Так как обычно $t_0 \gg 4T_M$, такой способ пуска также характерен минимальными потерями энергии.

Для сравнения (193) с (191) обозначим в (193):

$$\begin{cases} t_0 = t_{II}(1); \\ J_{\Sigma} \varepsilon_0 = M_I; \\ \frac{M_I}{\beta} = \omega_{0.HAЧ}. \end{cases} \quad (194)$$

Получим

$$\Delta A_{2II} = M_I \omega_{0.HAЧ} (t_{II}(1) - T_M). \quad (195)$$

Таким образом, (193) при $t_0 > T_M$ определяет практически те же потери, что и (191) при увеличении времени пуска на время $(3-4)T_M$.

Решение задачи определения потерь энергии в цепях якоря или ротора двигателя в переходных процессах при $M_C \neq 0$ приводит к громоздким, неудобным для практического использования расчетным соотношениям. Для оценки влияния статической нагрузки можно принять, что в сравнении с режимом переходного процесса при $M_C = 0$ переходный процесс под нагрузкой отличается длительностью.

При $M = M_I = const$ время пуска и торможения вхолостую

$$t_{ПО} = t_{ТО} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{M_I}. \quad (196)$$

Время пуска под нагрузкой ($\omega_C = \omega_0$)

$$t_{II} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{M_I - M_C}. \quad (197)$$

Время торможения под нагрузкой

$$t_T = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{|-M_I - M_C|}. \quad (198)$$

Потери энергии при пуске и торможении при $M_C \neq 0$ можно оценить так

$$\Delta A_{II} = \Delta A_{II0} \frac{t_{II}}{t_{II0}}, \Delta A_T = \Delta A_{T0} \frac{t_T}{t_{T0}}. \quad (199)$$

Полные потери энергии за время переходного процесса двигателя постоянного тока с независимым возбуждением включают в себя кроме переменных постоянные и механические потери:

$$\Delta A_{III\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(S_{НАЧ}^2 - S_{КОН}^2 \right) \frac{t_{III}}{t_{III0}} + \quad (200)$$

$$+ (\Delta P_C + \Delta P_{МЕХ}) \times t_{III}.$$

Если за время переходного процесса мощность постоянных потерь в двигателе ΔP_C и потерь в механизме $\Delta P_{МЕХ}$ изменяется существенно, в формулу (200) следует подставлять средние значения этих величин.

При определении полных потерь энергии за время переходного процесса асинхронного двигателя необходимо учитывать, что к переменным потерям здесь относятся и потери в статорной цепи двигателя. С учетом (155) можно записать

$$\Delta A_{III\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(S_{НАЧ}^2 - S_{КОН}^2 \right) \left(1 + \frac{R_{J\Sigma}}{R_{2\Sigma}'} \right) \frac{t_{III}}{t_{III0}} + \quad (201)$$

$$+ (\Delta P_C + \Delta P_{МЕХ}) \times t_{III}.$$

При реостатном пуске двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя с фазным ротором потери энергии, выделяющиеся в двигателе, существенно меньше полных потерь $\Delta A_{III\Sigma}$. Для двигателя постоянного тока

$$\Delta A_{II.GP} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \frac{t_{II}}{t_{II0}} \frac{R_{Я\Sigma}}{R_{Я\Sigma} + R_{ЯД}} + \Delta P_C t_{II}, \quad (202)$$

где R_{Σ} — среднее за время пуска внешнее добавочное сопротивление.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором:

$$\Delta A_{П.ГР} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 \Sigma} \right) \frac{t_{П}}{t_{П0}} \frac{R'_2}{R'_2 \Sigma} + \Delta P_C t_{П}. \quad (203)$$

Потери энергии за время переходного процесса, выделяющиеся непосредственно в двигателе, при реостатном управлении составляют лишь долю полных потерь $\Delta A_{ПП\Sigma}$, основная часть которых выносится из двигателя во внешние добавочные сопротивления.

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором или для асинхронного пуска синхронного двигателя потери, определяемые (201) за вычетом только потерь в механизме $\Delta P_{МЕХ} \times t_{ПП}$, являются греющими:

$$\Delta A_{ППГР} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(S_{НАЧ}^2 - S_{КОН}^2 \right) \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{t_{ПП}}{t_{ПП0}} + \Delta P_C t_{ПП}. \quad (204)$$

Введение добавочных сопротивлений в цепь статора при этом увеличивает полные потери, не снижая греющих.

Полученные соотношения и выполненный анализ потерь энергии в переходных процессах являются основой для выбора асинхронных короткозамкнутых двигателей и инженерной оценки энергопотребления.

6.3. Процессы нагревания и охлаждения электродвигателей

Потери энергии реализуются в виде тепла и вызывают нагревание тех частей электродвигателя, в которых выделяются, т. е. обмоток, коллектора, магнитопровода. Возрастание температуры этих частей благодаря теплопроводности вызывает передачу тепла остальным частям двигателя — идет процесс нагревания сложного неоднородного тела двигателя.

При превышении температурой двигателя температуры окружающей среды начинается процесс теплоотдачи в окружающую среду, интенсивность которого увеличивается пропорционально разности температур. Процесс нагревания заканчивается при температуре двигателя, когда все тепло, выделяющееся в двигателе, отдается в окружающую среду.

Отключение двигателя от сети прекращает тепловыделение в двигателе и наступает процесс постепенного отвода запасенного тепла в окружающую среду — идет процесс охлаждения двигателя, который прекращается после снижения температуры всех его частей до температуры окружающей среды.

Анализ процессов нагревания и охлаждения существенно осложняется неоднородностью двигателя, концентрацией тепловыделения в его отдельных частях и тепловой инерцией процессов нагревания, охлаждения и внутренней теплопередачи.

Поэтому в инженерной практике используют упрощенную тепловую модель двигателя как нагреваемого тела, которая основана на ряде допущений. Наиболее существенными из них являются:

- рассмотрение двигателя как однородной массы с бесконечно большой внутренней теплопроводностью;
- предположение пропорциональности теплоотдачи разности температур двигателя и окружающей среды;
- неучет изменений тепловыделения вследствие изменений сопротивления обмоток в процессах нагревания и

охлаждения.

С учетом сказанного уравнение теплового баланса двигателя можно записать так:

$$\Delta P_{ДВ.ГР} dt = A\tau \cdot dt + Cdt, \quad (205)$$

где A — коэффициент теплоотдачи, $Вт/°С$;

C — теплоемкость двигателя, $Дж/°С$;

$\tau = (t_s - t_0)$ — превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды, $°С$.

Здесь левая часть равенства — количество энергии, выделяющееся в двигателе за время dt ; первый член правой части — количество тепла, отдаваемое за то же время в окружающую среду; второй член правой части — часть тепла, за то же время поглощенная массой двигателя и увеличившая температуру двигателя на $d\tau$.

Разделив (205) на $(A \cdot dt)$, получим дифференциальное уравнение нагревания двигателя:

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{УСТ}, \quad (206)$$

где $T_H = C/A$ — постоянная нагревания, $с$.

Физический смысл постоянной времени нагрева T_H определяется как время, в течение которого двигатель нагрелся до установившегося превышения температуры при $\Delta P_{ДВ.ГР} = const$ и отсутствии теплоотдачи.

В установившемся режиме все тепло, выделяющееся в двигателе, отдается в окружающую среду:

$$\Delta P_{ДВ.ГР} = A\tau_{УСТ}. \quad (207)$$

Отсюда

$$\tau_{УСТ} = \frac{\Delta P_{ДВ.ГР}}{A}. \quad (208)$$

Корень характеристического уравнения $p_1 = -1/T_H$, решение (206) записывается в виде

$$\tau = \tau_{УСТ} + Be^{-\frac{t}{T_H}}. \quad (209)$$

Так как при $t=0$, $\tau = \tau_{НАЧ}$, $B = \tau_{НАЧ} - \tau_{УСТ}$, то имеем

$$\tau = \tau_{УСТ} + (\tau_{НАЧ} - \tau_{УСТ}) e^{-\frac{t}{T_H}}. \quad (210)$$

Зависимость $\tau = f(t)$ представлена на рис. 35. Там же показана кривая $t^0 = f(t)$, отличающаяся от $\tau = f(t)$ на значение постоянной температуры окружающей среды: $t^0 = \tau + t^0_{ос}$.

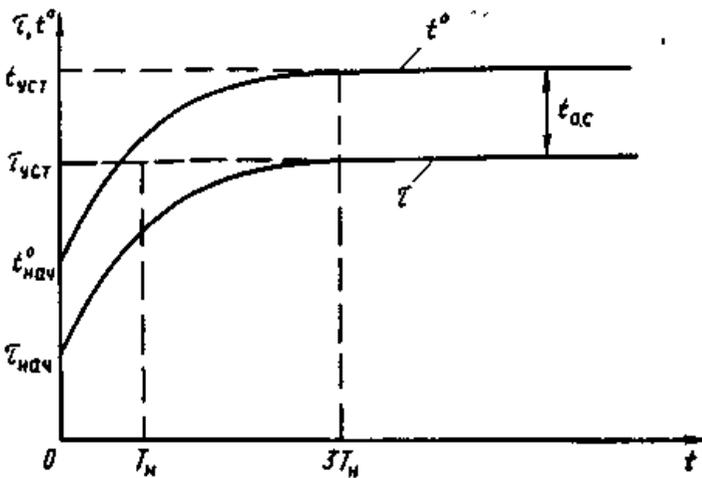


Рис. 35. Тепловые переходные процессы

Общее время переходного процесса нагревания двигателя составляет $(3-4)T_H$. Значения T_H изменяются в широких пределах: для двигателей небольшой мощности T_H составляет десятки минут, для мощных двигателей возрастает до нескольких часов. При отключении двигателя от сети в процессе охлаждения двигателя его превышение температуры изменяется по закону

$$\tau = \tau_{УСТ} e^{-\frac{t}{T_{ОХЛ}}} . \quad (211)$$

Длительность процессов охлаждения также составляет $(3-4) T_{ОХЛ}$, причем существенно зависит от условий охлаждения двигателя. Если двигатель имеет самовентиляцию, т. е. охлаждается вентилятором, установленным на его валу, то при отключении скорости двигателя и вентилятора становятся равными нулю, движение охлаждающего воздуха снижается до уровня, определяемого естественной вентиляцией. При этом $A_{ОХЛ} < A_H$, $T_{ОХЛ} > T_H$, время охлаждения существенно возрастает. Процессы нагревания и охлаждения такого двигателя представлены на рис. 36. Для двигателей с независимой вентиляцией, осуществляемой дополнительным двигателем, постоянно вращающим вентилятор, $A_{ОХЛ} = A_H$, $T_{ОХЛ} = T_H$. При этом продолжительность процессов нагревания и охлаждения двигателя одинакова.

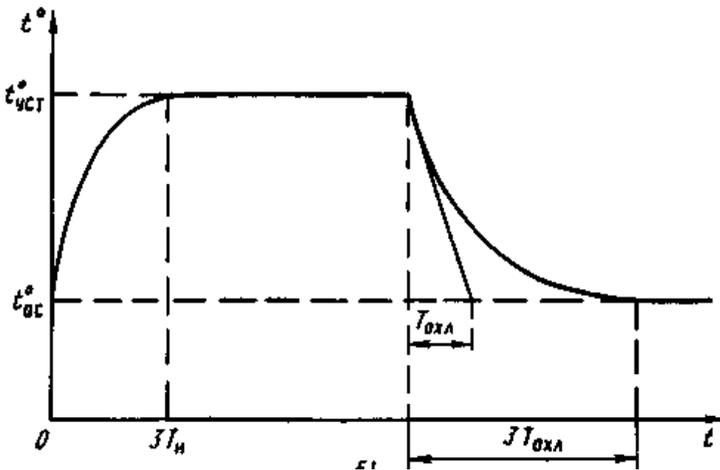


Рис. 36. Тепловые переходные процессы двигателя с самовентиляцией

Рассмотренные процессы соответствуют продолжительной работе двигателя с постоянной нагрузкой на валу и с постоянной скоростью. Это частный случай, характерный для значительной группы электроприводов конкретных производственных механизмов. Для широкого класса электроприводов характерна работа с переменной нагрузкой на валу, с частыми пусками и торможениями двигателя. Для таких механизмов тепловые процессы в двигателе протекают при изменяющемся во времени тепловыделении. Для расчета процессов нагревания и охлаждения при этих условиях необходимо определение закона изменения во времени потерь энергии, выделяющихся в двигателе, следовательно, решение уравнения (206) должно производиться при переменной правой части $\Delta P_{ДВ.ГР} = f(t)$. Определение этой зависимости производится на основе так называемых нагрузочных диаграмм электропривода.

6.4. Нагрузочные диаграммы электропривода

Известно, что нагрузка двигателя является основным фактором, определяющим потери энергии, выделяющиеся в двигателе при работе. В соответствии с основным уравнением движения она зависит от статической нагрузки и динамических моментов, обусловленных изменениями скорости электропривода:

$$M = M_C(t) + J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (212)$$

Нагрузочными диаграммами электропривода называются зависимости, определяющие его статические и полные нагрузки как функции времени в процессе работы. Различают два вида нагрузочных диаграмм.

Нагрузочной диаграммой исполнительного механизма называется зависимость момента статической нагрузки от времени $M_C = f(t)$, дополненная заданной тахограммой установившихся рабочих скоростей $\omega_3(t)$.

Нагрузочная диаграмма двигателя — зависимость момента двигателя от времени $M = f(t)$, соответствующая известной зависимости текущей скорости электропривода от времени $\omega(t)$.

Расчет нагрузочной диаграммы двигателя может быть произведен с помощью уравнения (212), если известны нагрузочная диаграмма исполнительного механизма, суммарный момент инерции электропривода J_{Σ} и зависимость $\omega(t)$. На первых этапах проектирования до выбора двигателя J_{Σ} и $\omega(t)$ не определены, поэтому основой предварительного выбора двигателей и расчета нагрузочных диаграмм двигателей являются нагрузочные диаграммы исполнительного механизма, рассчитываемые по техническому заданию на проектирование.

Нагрузочные диаграммы двигателя в сочетании с зависимостями $\omega(t)$ позволяют рассчитать токи, суммарное тепло-

выделение в двигателе $\Delta P_{ДВ.ГР} = f(t)$ и осуществить проверку правильности предварительного выбора двигателя.

Все многообразие производственных механизмов с точки зрения режимов работы электропривода можно разделить на две большие группы: механизмы непрерывного и механизмы циклического действия. Для электроприводов механизмов, относящихся к этим группам, характерны вполне определённые зависимости $M_C(t)$, $\omega(t)$ и в итоге определённые типовые нагрузочные диаграммы двигателей $M(t)$. На вид зависимостей $\omega(t)$ принципиальное влияние оказывает требование изменения направления движения механизма, в соответствии с которым различают нереверсивные и реверсивные электроприводы. Эта классификация при выборе двигателей по нагреву принципиального значения не имеет, но оказывает решающее влияние на проектирование системы управления электроприводом и поэтому ее следует учитывать.

Рассмотрим сначала нагрузочные диаграммы механизмов непрерывного действия. Примером механизма непрерывного действия, пуск которого осуществляется в начале смены, а отключение — в конце смены или после нескольких смен непрерывной работы, является вентилятор. Так как регулирование скорости не предусматривается, а нагрузка постоянна, нагрузочная диаграмма двигателя не отличается от нагрузочной диаграммы вентилятора: $M = M_C = const$ и $\omega = \omega_C = const$ (рис. 37, а). Аналогичный режим работы, например, для эскалатора метрополитена будет отличаться изменениями во времени статической нагрузки $M_C(t)$, обусловленной изменениями потока пассажиров. В соответствии с механической характеристикой двигателя

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) \quad (213)$$

изменения $M_C(t)$ будут вызывать изменения скорости и в переходных процессах динамические нагрузки будут оказывать

влияние на нагрузочную диаграмму двигателя.

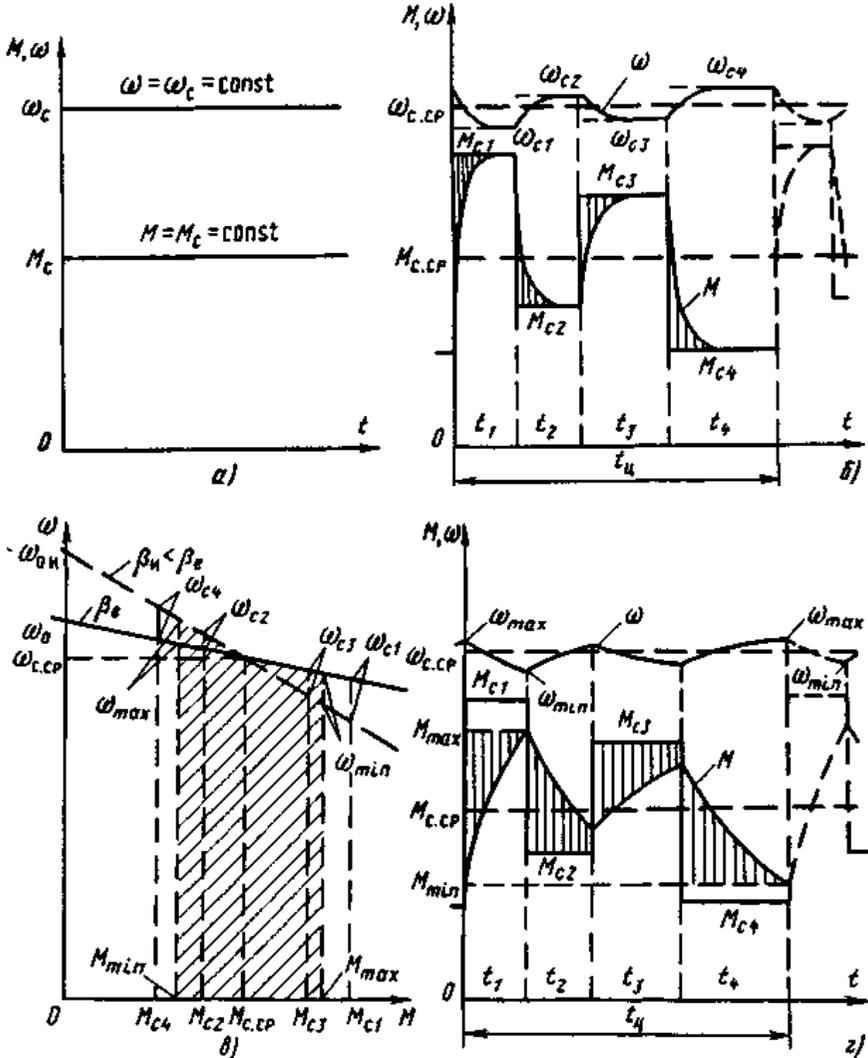


Рис. 37. Нагрузочные диаграммы при непрерывном режиме работы (а, б, г) и механические характеристики двигателя (в)

Степень этого влияния зависит от нагрузочной диа-

граммы исполнительного механизма $M_C(t)$ и от параметров электропривода.

Для анализа степени влияния динамических нагрузок механизмов непрерывного действия на нагрузочные диаграммы двигателей рассмотрим нагрузочную диаграмму механизма, представленную на рис. 37,б. Цикл работы механизма состоит из четырех участков работы t_1-t_4 с постоянным моментом нагрузки соответственно $M_{C1}-M_{C4}$, нагрузочная диаграмма исполнительного механизма $M_C(t)$ показана на рис. 37 тонкой сплошной линией, а заданная скорость $\omega_3 = \omega_{cp}$ — штриховой линией $\omega_{c.cp} = const$.

Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рис. 37,в, там же показаны нагрузки $M_{C1}-M_{C4}$. Вследствие ограниченной жесткости механической характеристики изменения нагрузки приводят к изменениям установившейся скорости электропривода. Переходный процесс при изменении нагрузки скачком и для i -го участка нагрузочной диаграммы можно при $T \approx 0$ представить уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= \omega_{Ci} + (\omega_{HAЧi} - \omega_{Ci}) e^{-\frac{t}{T_M}} \\ M_i &= M_{Ci} + (M_{HAЧi} - M_{Ci}) e^{-\frac{t}{T_M}} \end{aligned} \right\}, \quad (214)$$

причем отсчет времени для i -го участка ведется от $t=0$.

Анализируя систему уравнений (214), видим, что основное влияние на характер нагрузочной диаграммы двигателя при ступенчатом графике $M_C(t)$ оказывает в соответствии со свойством экспоненты соотношение длительности t_i приложения нагрузки M_{Ci} и электромеханической постоянной време-

ни $T_M = J\Sigma/\beta$.

Случай, когда $t_{i.min} > (3-4)T_M$, представлен на рис. 37,б — зависимости $M(t)$ и $\omega(t)$ изображены сплошными жирными линиями. Его характерной особенностью является достижение установившейся скорости ω_C на каждом из участков в соответствии с рис. 37,в. При этом динамические нагрузки, показанные на рис. 37,б вертикальной штриховкой, незначительно влияют на нагрев двигателя и проверку двигателя по перегрузочной способности можно производить по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма, так как $M_{max} = M_{Cmax}$.

Другие условия получаются, если $t_{i.min} < T_M$. Предположим, что увеличение T_M произошло вследствие соответствующего увеличения $J\Sigma$. Для рассматриваемой нагрузочной диаграммы механизма графики $M(t)$ и $\omega(t)$ при $t_{i.max} < T_M$ представлены на рис. 37,г. Видим, что большая механическая инерция привода является фактором, благоприятно влияющим на нагрузочную диаграмму двигателя. Нагрузочная диаграмма сглаживается, размах колебаний момента уменьшается и в пределе при $J\Sigma$ стремится к ∞ , M стремится к $M_{C.sp}$, ω стремится к $\omega_{C.sp}$. Так как $M_{max} < M_{Cmax}$, снижаются требования к перегрузочной способности двигателя, а сглаживание зависимости $M(t)$ обеспечивает снижение переменных потерь, пропорциональных квадрату момента (тока).

В технике рассматриваемый эффект используется в электроприводах механизмов, работающих с ударной нагрузкой на валу (прессы, ножницы для резки металла и т. п.). Для увеличения суммарного момента инерции в таких механизмах на промежуточном валу передач устанавливается маховик, соответственно такие электроприводы называются маховиковы-

ми. Запасенная на предшествующем этапе энергия в увеличенных за счет маховика инерционных массах привода при ударе реализуется в больших динамических нагрузках на рабочем органе за счет освобождающейся кинетической энергии при снижении скорости.

Из выражения $T_M = J\Sigma/\beta$ следует, что увеличение T_M может быть обеспечено соответствующим уменьшением жесткости механической характеристики. Если принять, что значение T_M на рис. 37,г получено не за счет увеличения $J\Sigma$, а за счет уменьшения β от β_e до β_u , как показано на рис. 37,в, то кривая $M(t)$ не претерпит изменений, сглаживание нагрузочной диаграммы двигателя реализуется при любом способе увеличения T_M одинаково. Но неравномерность хода, определяемая по кривой $\omega(t)$, должна существенно возрасти: при том же разбросе ΔM_{max} изменения скорости $\Delta\omega_{max}$ при $\beta=\beta_u$ в несколько раз больше, чем при $\beta=\beta_e$. Это естественно, так как при том же $J\Sigma$ реализовать те же требуемые для преодоления пиковой нагрузки изменения кинетической энергии можно только за счет увеличения $\Delta\omega_{max}$.

Рассмотрим нагрузочные диаграммы механизмов циклического действия. Их главной особенностью является наличие в рабочем цикле одного или нескольких пусков, реверсов, торможений. При этом в техническом задании на проектирование электропривода кроме данных, необходимых для расчета статических нагрузок, указываются исходные данные для расчета зависимости $\omega_3(t)$.

К их числу относятся:

- заданные перемещения на участках цикла работы;
- допустимое или требуемое ускорение ε_3 ;

— рабочая скорость ω ;

— время цикла $t_{Ц}$ или число циклов в час $N_{Ц}$.

Эти данные позволяют рассчитать зависимость $\omega_3(t)$ и построить нагрузочную диаграмму исполнительного механизма $M_C(t)$. В качестве примера на рис. 38 построены зависимости $M_C(t)$ и $\omega_3(t)$ для механизма циклического действия, цикл которого состоит из участка движения от места загрузки к месту выгрузки и участка возвращения к месту загрузки. Расчет нагрузочной диаграммы двигателя $M(t)$, показанной на этом рисунке, производится с помощью (212).

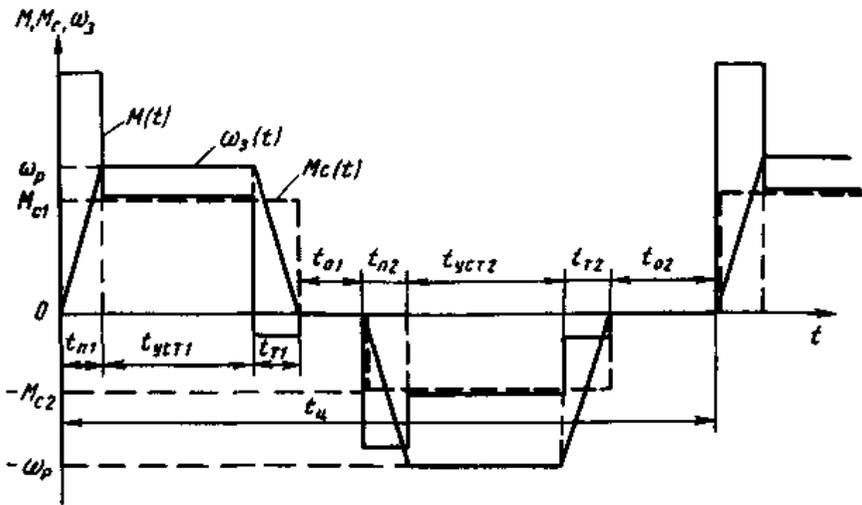


Рис. 38. Нагрузочная диаграмма электропривода циклического действия

В заключение необходимо еще раз отметить, что на первоначальном этапе проектирования электропривода до выбора двигателя расчет нагрузочной диаграммы двигателя невозможен, так как неизвестны некоторые параметры. На этом этапе осуществляют предварительный выбор двигателя по нагрузоч-

ной диаграмме исполнительного механизма, пытаются ориентировочно учесть влияние динамических нагрузок на требуемую мощность двигателя. Для механизмов непрерывного действия необходимо учитывать возможное выравнивание, сглаживание нагрузочной диаграммы двигателя и соответствующее снижение потерь в двигателе. Для механизмов циклического действия динамические нагрузки, как следует из рассмотрения рис. 38, увеличивают потери в двигателе и во многих случаях выбор двигателя по зависимости $MC(t)$ без оценки влияния динамических нагрузок недопустим.

Поэтому в сложных случаях процесс выбора двигателя осуществляется в три этапа:

- 1) по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма с грубой оценкой влияния динамических нагрузок осуществляют предварительный выбор двигателя;

- 2) для выбранного двигателя рассчитывают нагрузочную диаграмму двигателя и проверяют двигатель по нагреву;

- 3) если двигатель перегружен или недоиспользуется, по уточненной оценке влияния динамических нагрузок повторяют выбор и проверку вновь выбранного двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное назначение данного учебного пособия — закрепить у студентов базовые знания по динамике электропривода для последующего углубленного изучения специальных дисциплин, а также оказать им помощь в практическом применении теоретических знаний для выполнения реальных проектных расчетов автоматизированных электроприводов.

При пользовании учебным пособием необходимо иметь в виду, что оно не заменяет учебника, а лишь его дополняет, и для успешного решения задач динамики в автоматизированных электроприводах требуется систематическое изучение дисциплины и по основному учебнику [15] тоже.

Имея на руках подробный теоретический материал по теории переходных процессов, изучаемый в рамках дисциплин «Электрический привод» и «Теория электропривода», студент имеет возможность более тщательно готовиться к практическим и лабораторным занятиям, экзаменам и зачетам, а также использовать его при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Курсы «Электрический привод» и «Теория электропривода» охватывают все наиболее общие вопросы теории современного автоматизированного электропривода, активное освоение которых обеспечивает минимум основополагающих знаний, необходимых специалисту для быстрой адаптации к профессиональной деятельности во всех областях практического применения электропривода. Физические особенности сложных электромеханических систем, методы анализа их динамических свойств, вопросы выбора мощности двигателей сложны для восприятия, закрепления в памяти и свободного квалифицированного применения, поэтому активное освоение теории электропривода еще не наступает после завершения работы над данными курсами. Оно обеспечивается рационально организованным учебным процессом подготовки — и комплексом дис-

циплин общепрофессиональной подготовки, на которую курсы «Электрический привод» и «Теория электропривода» опираются, и комплексом специальных дисциплин.

Курсы «Теория электропривода» и «Электрический привод» в подготовке инженеров электроприводчиков имеет исключительно важное и основополагающее значение. Они дают достаточно полную информацию о состоянии, проблемах и направлениях развития современного автоматизированного электропривода, о технических возможностях, достоинствах и недостатках основных систем электропривода, широко используемых на практике.

Электропривод является сложной многокомпонентной электромеханической системой с широким многообразием областей и условий применения, поэтому процессы проектирования электроприводов представить однозначной схемой затруднительно.

При проектировании электроприводов выполняется комплекс исследований и разработок, в котором важное место занимает выбор системы электропривода, анализ и расчет переходных процессов, принятие основных схмотехнических и конструктивных решений, а также техническое и технико-экономическое обоснование выбора.

Выбор системы электропривода начинается с поиска технических решений, удовлетворяющих требованиям технического задания, из которых наиболее близкий к требованиям принимается для обоснования выбора системы электропривода в качестве прототипа. В общем случае для каждого варианта осуществляется выбор двигателя и всех элементов силовой цепи, разрабатывается схема управления, а затем проводятся исследования статических характеристик и переходных процессов, которые позволяют определить показатели точности, быстродействия, качества регулирования координат, определить производительность установки, а затем оценить энергетическую эффективность электропривода, качество энергопо-

требления и надежность его работы. Эти данные, дополненные расчетом массогабаритных и стоимостных показателей, и позволяют технико-экономическими расчетами обосновать выбор рационального проектного решения. Но во многих частных случаях процесс выбора системы электропривода может существенно упрощаться.

Из всего вышесказанного видно, что исследования переходных процессов при проектировании современных автоматизированных электроприводов занимают важное место. Следовательно, детальное изучение их теории в рамках курсов «Теория электропривода» и «Электрический привод» необходимо. Данное учебное пособие позволяет студентам получить необходимые знания по динамике автоматизированного электропривода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс): учебник / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высш. шк., 1987. – 287с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование асинхронных машин / И.П. Копылов, Ф.А. Мамедов, В.Я. Беспалов. – М.: Энергия, 1969. – 96 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
4. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии/ И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
5. Копылов И.П. Об уравнениях асинхронной машины в различных системах координат / И.П. Копылов, Р.В. Фильц, Я.Я. Яворский // Изв. Вузов. Сер. Электромеханика. – 1986. – № 3. – С.22–33.
6. Адкинс Б.А. Общая теория электрических машин / Б.А. Адкинс. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 272с.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
8. Иванов-Смоленский А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, В.А. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока / В. Лайон. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.
10. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): учеб. пособие / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высш. шк., 1980. – 176 с.
11. Ефименко Е.И. Аналитический метод исследования переходных и установившихся режимов машин переменного

тока / Е.И. Ефименко // Изв. АН СССР Сер. Энергетика и транспорт. – 1988. – № 2. – С. 16–25.

12. Сакае Ямамура Спирально-векторная теория электрических машин переменного тока / Ямамура Сакае // Электротехника. – 1996. – № 10. – С.7–15.

13. Птах Г.К. Эффективный метод расчета переходных процессов в электромеханических преобразователях / Г.К. Птах // Изв. Вузов. Сер. Электромеханика. – 2001. – № 4–5. – С.23–31.

14. Кузнецов В.А. Применение локальных рядов Фурье для расчета электромагнитных процессов в синхронных электрических машинах / В.А. Кузнецов, А.И. Федотов // Электротехника. – 1997. – № 4. – С. 34–37.

15. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Общие сведения о переходных процессах.	6
2 Требования к характеру протекания переходных процессов	9
3 Методы расчета переходных процессов.	16
4 Механические переходные процессы электропривода.	25
5 Электромеханические переходные процессы электропривода.	33
5.1 Электромеханические переходные процессы электропривода с линейной механической характеристикой при $\omega_0 = const$	33
5.1.1 Электромеханические переходные процессы электропривода, обусловленные ударным приложением нагрузки	38
5.1.2 Электромеханические переходные процессы при пуске	42
5.1.3 Электромеханические переходные процессы при реверсе.	44
5.1.4 Электромеханические переходные процессы в режиме динамического торможения.	47
5.2 Электромеханические переходные процессы электропривода с линейной механической характеристикой при $\omega_0 = f(t)$	49
5.3 Переходные процессы асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором	64
5.4 Переходные процессы электропривода с синхронным двигателем	76
6 Тепловые переходные процессы в электроприводе	86
6.1 Потери энергии в установившихся режимах работы электропривода.	87
6.2 Потери энергии в переходных режимах работы электропривода.	98

6.3 Процессы нагревания и охлаждения электро- двигателей	111
6.4 Нагрузочные диаграммы электропривода	116
Заключение	124
Библиографический список	127

Учебное издание

Тонн Дмитрий Александрович

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В авторской редакции

Выпускающий редактор И.В. Медведева

Компьютерный набор Д.А. Тонна

Подписано в печать 10.04.2007.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 8,1. Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 250 экз.

Зак. №

ГОУВПО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14