

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

Л. В. Веппер, М. Н. Погуляев

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

ПРАКТИКУМ

**по дисциплине «Релейно-контакторные системы
управления и защиты автоматизированных
электроприводов» для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

**В двух частях
Часть 2**

Гомель 2012

УДК 62-83-52(075.8)
ББК 31.291я73
В30

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 28.11.2011 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *О. Г. Широков*

Веппер, Л. В.
В30 Расчет мощности электроприводов : практикум по дисциплине «Релейно-контакторные системы управления и защиты автоматизированных электроприводов» для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения. В 2 ч. Ч. 2 / Л. В. Веппер, М. Н. Погуляев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 40 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Изложены основные методы расчета и выбора электродвигателей для различных режимов работы.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 62-83-52(075.8)
ББК 31.291я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

1. Общие положения

Исходными данными для правильного расчета мощности и выбора типа электропривода являются технологические и конструктивные требования, которые возникают в связи с эффективным использованием производственных механизмов, а именно обеспечения высокой производительности, надежности и точности их работы. Так как одним из главных элементов электропривода, определяющим в значительной степени его технические и экономические показатели, является электродвигатель, то прежде всего рассмотрим вопросы расчета мощности электродвигателей, работающих в различных режимах.

Применение двигателей недостаточной мощности может вызвать нарушение в нормальной работе механизма, понижение его производительности, аварию и выход из строя двигателя. Использование же двигателя завышенной мощности приводит к неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению электрических показателей электропривода, уменьшению КПД двигателя, а в установках переменного тока, кроме того, ухудшению коэффициента мощности, что в свою очередь влияет на непроизводительную загрузку преобразовательного устройства и распределительной сети. Кроме как по мощности, нужно еще правильно выбрать двигатель по исполнению, т. е. по степени защиты (защищенный, закрытый, взрывозащищенный), по способу охлаждения (самовентилируемый, с естественным охлаждением, с независимой или принудительной вентиляцией) и по климатическому исполнению (для умеренного, тропического, холодного климата и т. п.). Это можно сделать, зная назначение электропривода и условия, в которых ему придется работать. От правильного выбора двигателя по исполнению существенным образом зависит надежность его работы. В то же время необоснованный выбор, например, закрытого двигателя вместо защищенного приводит к увеличению капитальных затрат и утяжелению конструкции. Выбор двигателя по способу охлаждения особенно важен для регулируемых электроприводов, так как неправильный выбор в этом случае может привести к значительному завышению установленной мощности двигателя, т. е. к увеличению капитальных затрат, утяжелению конструкции и к

резкому снижению КПД и коэффициента мощности (для переменного тока).

Если учитывать огромное число механизмов в народном хозяйстве, значение правильного расчета мощности электродвигателей и выбора их по исполнению очень велико.

Выбор мощности электродвигателя обуславливается характером изменения статической нагрузки на его валу, а также условиями протекания переходных процессов в электроприводе.

В отношении характера изменения статического момента производственные механизмы могут быть разделены на следующие группы:

Первая группа. Механизмы, у которых статический момент остается постоянным, не зависящим от скорости. К этим механизмам относятся шахтный подъемник с уравновешенным канатом, прокатный стан, механизмы подъема мостового крана, лифт, механизмы, основная работа которых связана с преодолением сил трения, например механизмы подачи металлорежущих станков и т. п.:

$$M_c = \text{const} \quad (1.1)$$

Однако значение этого момента, оставаясь независимым от скорости, может меняться в широких пределах.

Вторая группа. Механизмы, статический момент которых зависит от угловой скорости, например центробежный вентилятор, центрифуга, дымосос, центробежный насос и т. п.:

$$M_c = M_0 + k\omega^2 \quad (1.2)$$

где M_0 — момент холостого хода механизма.

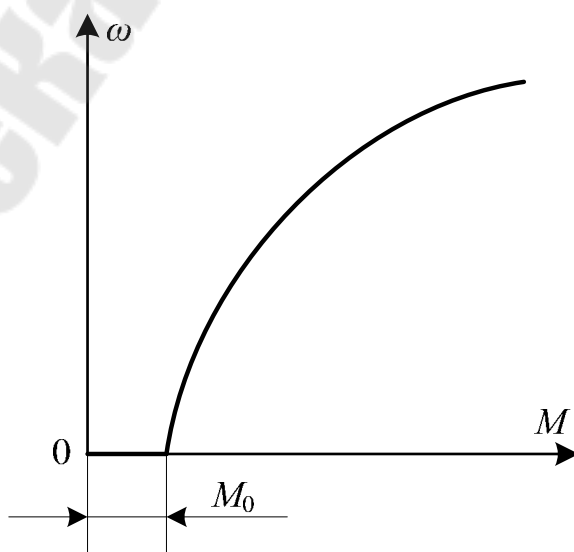


Рис. 1.1 Механическая характеристика центробежных механизмов (II группа механизмов).

Характеристика таких механизмов представлена на рис. 1.1.

К этой же группе могут быть отнесены тяговые транспортные механизмы, главные приводы металлорежущих станков и т. п., для которых характерным является постоянство мощности нагрузки, т. е. $P=M\omega = \text{const}$.

Третья группа. Механизмы, у которых статический момент зависит от пути. Сюда относятся устройства с кривошипными передачами, где нагрузки изменяются в зависимости от угла поворота кривошипа φ (рис.1.2),—это ножницы для разрезания металла, поворотные столы с мальтийским крестом, прессы, поршневые компрессоры, шахтные подъемники с неуравновешенным канатом и т.п. Для этой группы механизмов справедливо при указании области (задания функции) уравнение(рис.1.2)

$$M_c = M_0 + M_A \sin \varphi, \quad (1.3)$$

где M_0 , M_A — соответственно момент холостого хода механизма и максимальный момент.

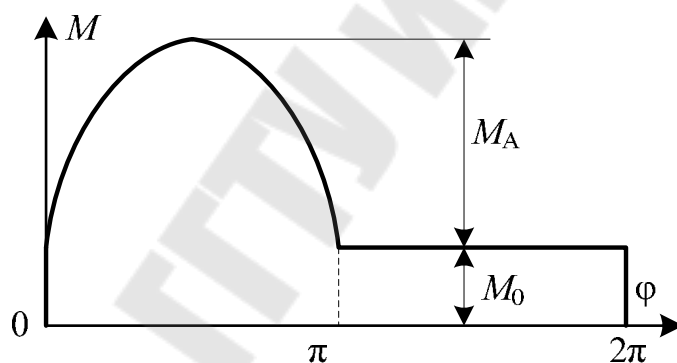


Рис. 1.2. Механическая характеристика кривошипных механизмов (III группа механизмов).

Другим примером механизмов этой группы может служить механизм копания роторного экскаватора.

Четвертая группа. В эту группу входят механизмы, у которых статический момент зависит от скорости и пути. Здесь примером может служить гребной винт судовой установки. Для установившейся скорости движения судна момент сопротивления на валу двигателя гребного винта пропорционален квадрату угловой скорости двигателя (кривая 1 на рис.1.3). При задании команды на реверсирование винта судно продолжает вначале двигаться в том же направлении, и момент сопротивления, зависящий от скорости движения судна, оказывается не пропорциональным в этот период квадрату угловой скорости винта. Результирующая статическая

характеристика имеет сложную форму и показана для разных установившихся скоростей движения судна на рис.1.3 (кривая 2—для меньшей скорости движения судна, 3 — для большей). В этом случае момент на валу гребного винта зависит от скорости движения судна, а поскольку судно тормозится, т. е. скорость движения снижается, то, следовательно, момент зависит и от пути, пройденного судном и винтом (эти пути разные), и от угловой скорости самого винта. К этой группе относятся также рулевые устройства.

Пятая группа. Сюда можно отнести механизмы, у которых статический момент характеризуется случайным изменением во времени. Это, например, камнедробилки, шаровые мельницы в цементной промышленности и т. п.

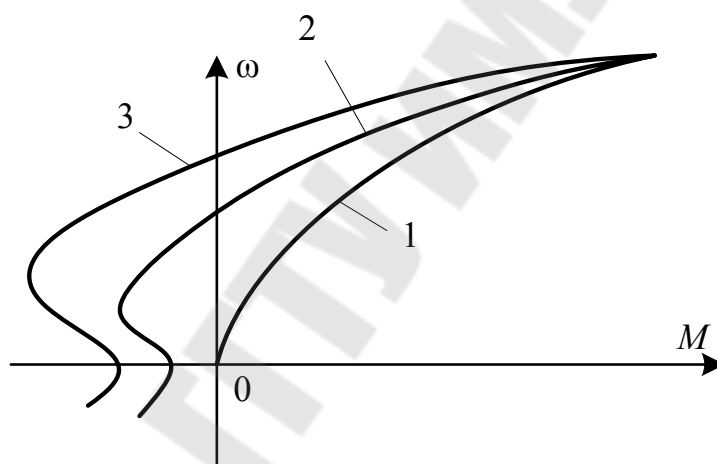


Рис. 1.3. Механическая характеристика гребного винта (IV группа механизмов).

Приведенные характеристики производственных механизмов позволяют оценить, какую нагрузку будет нести двигатель в установившемся режиме при различных угловых скоростях, которые необходимо задавать механизму с целью регулирования его производительности в соответствии с изменяющимися технологическими условиями.

Однако нагрузка на валу электропривода изменяется не только в связи с регулированием скорости механизма, но и вследствие изменения режима работы механизма или из-за зависимости момента нагрузки от пути, т. е. от времени. Например, в клети прокатного стана в течение одного пропуска металла через валки момент прокатки, обусловленный объемом деформируемого металла и

давлением, практически остается постоянным. Однако момент прокатки от пропуска к пропуску изменяется, и переменной оказывается также длительность пропусков. Нагрузка в течение времени прокатки одного слитка меняется, а затем полностью повторяется при возобновлении прокатки следующего слитка.

Изменение момента нагрузки и угловой скорости во времени характерно для весьма большого числа механизмов, называемых механизмами циклического действия. Это изменение статического момента и угловой скорости от времени обычно представляют в виде графиков.

Графическое изображение зависимости статического момента механизма, приведенного к валу двигателя, от времени $M_c = f(t)$ называют **нагрузочной диаграммой** механизма.

Графическое изображение зависимости скорости исполнительного органа механизма (в виде угловой скорости, приведенной к валу двигателя) от времени $\omega = f(t)$ называют **диаграммой скорости электропривода** (или механизма).

2. Нагрев и охлаждение двигателя.

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность. Лучшему использованию двигателя способствует также более совершенная система его охлаждения.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, делятся на следующие основные классы нагревостойкости.

Изоляция класса А. К этому классу относятся хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага, волокнистые материалы из целлюлозы и шелка, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик. Допустимая предельная температура 105 °С. В настоящее время электрические двигатели с изоляцией класса А практически не изготавливают. Такую изоляцию имеют двигатели постоянного тока серии П мощностью до 2,2 кВт и асинхронные двигатели серий А, АО до 6-го габарита включительно, АК.

Изоляция класса Е. Этот класс включает синтетические эмали (для изоляции проводов) на основе полиэфирных эпоксидных и

подобных им смол, синтетические органические пленки и т.п., синтетические материалы. Допустимая предельная температура нагрева 120 °С. Эта изоляция имеет небольшое применение в двигателях малой мощности. В основном двигатели изготавливают с изоляцией классов В и F.

Изоляция класса В. К этому классу относятся слюда, асбест, стеклянное волокно и другие неорганические материалы со связывающими материалами органического происхождения. Допустимая предельная температура нагрева 130 °С. Эти материалы применяются в двигателях серий 2П с высотой оси вращения до 120 мм включительно; 4А с высотой оси вращения до 132 мм. Применялись в старых сериях П мощностью от 3,2 до 14 кВт и в компенсированных двигателях мощностью 100—400 кВт; АО свыше 6-го габарита; А2 и АК2 мощностью от 400 до 1250 кВт.

Изоляция класса F. Этот класс включает те же материалы, что и для класса В, но сочетающиеся с синтетическими связующими и пропитывающими составами, модифицированными кремнийорганическими соединениями. Допустимая предельная температура нагрева 155 °С. Такую изоляцию имеют двигатели серий: 4А с высотой оси вращения свыше 132 мм, 2П с высотой оси вращения свыше 225 мм; МТФ, МТКФ; старых серий П мощностью свыше 14 кВт.

Изоляция класса H. К этому классу относятся те же материалы, что и для класса В, но в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами. Допустимая предельная температура 180 °С. Эта изоляция применяется для двигателей с частыми пусками и реверсами, а также при высокой температуре окружающей среды, например, для двигателей, предназначенных для грузоподъемных машин, в том числе металлургических. Такую изоляцию имеют двигатели серий МТН, МТКН, Д.

Изоляция класса С. Этот класс включает слюду, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые с неорганическими связующими составами или без связующих составов. Допустимая предельная температура более 180 °С. Нагревостойкость этих материалов не используется полностью в современном электромашиностроении, поэтому предельная температура нагрева для этого класса не установлена.

Соблюдение установленных ограничений по допустимой температуре нагрева обеспечивает срок службы изоляции

электрических машин для новых серий двигателей 15— 20 лет (например, двигатели серии 4А — 15 лет, серии Д — 20 лет). Превышение допустимых температур ведет к разрушению изоляции обмоток и к сокращению срока эксплуатации двигателя. Так, для изоляции класса А превышение допустимой температуры нагрева на 8—10 °С сокращает срок службы изоляции вдвое.

Пределные температуры обмоток двигателей с изоляцией различных классов достигаются при номинальной нагрузке и температуре окружающей (охлаждающей) среды 40 °С и при высоте над уровнем моря до 1000 м. При температуре меньше 40 °С двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной нагрузки (для изоляции класса А превышение номинальной нагрузки не допускается). При большей температуре окружающей среды и высоте над уровнем моря выше 1000 м нагрузка двигателя должна быть снижена относительно номинального значения. Степень снижения (или увеличения) нагрузки зависит, кроме температуры окружающей среды и высоты, еще от класса изоляции, режима работы двигателя и соотношения постоянных и переменных потерь. Ориентировочно для высоты до 1000 м при повышении температуры среды до 45°С рекомендуемое снижение тока нагрузки составляет от 2 до 7 %, при температуре 50 °С — от 4 до 15 %, при 60 °С — от 10 до 30 %. Увеличивать нагрузку сверх номинальной при температуре среды ниже 40 °С (за исключением аварийных случаев) не рекомендуется, так как разница между средней и максимальной температурой (наиболее нагретой части обмотки) возрастает примерно пропорционально квадрату коэффициента нагрузки, что может привести к появлению опасных пиковых температур; кроме того, устанавливаемый срок службы двигателя учитывает естественные колебания температуры окружающей среды, что находит отражение в отказе от нормирования допустимой температуры обмоток двигателя.

Для двигателей нормируется не допустимая температура обмотки и других частей машины, а **допустимое превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды.**

В реальных условиях вследствие теплоотдачи двигателя за время T_n превышение температуры двигателя достигнет значения $\tau =$

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-1}) = 0,632 \tau_y \quad (2.1)$$

где $T_n=C/A$ – постоянная времени нагрева двигателя(время, в течении которого превышение температуры от $\tau=0$ достигло бы установившегося значения τ_y при $Q=const$ и отсутствии теплоотдачи в окружающую среду; $\tau_y=Q/A$ – установившееся значение превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды; C – теп- лоемкость двигателя; A – теплоотдача двигателя; Q – количество теплоты (мощность потерь в двигателе), выделяемое двигателем в единицу времени.

Действительная кривая нагрева несколько отличается от экспоненты. В начале процесса нагрева повышение температуры двигателя идет быстрее, чем по теоретической кривой, и лишь начиная с $\tau = (0,5 \div 0,6) \tau_y$ до $\tau = \tau_y$ действительная кривая приближается к экспоненциальной. Поэтому определение постоянной времени нагрева на начальном участке по методу касательной может привести к значительной ошибке.

У самовентилируемых двигателей открытого исполнения малой и средней мощности постоянная времени составляет около 1 ч, у двигателей закрытого типа большой мощности — 3—4 ч. При отключении самовентилируемого двигателя и его остановке постоянная времени охлаждения T_0 оказывается значительно больше, чем нагрева T_n . Это объясняется тем, что при остановке самовентилируемого двигателя уменьшается его теплоотдача. Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе)

$$\beta_0=A_0/A, \quad (2.2)$$

где A_0, A – теплоотдача соответственно при неподвижном двигателе и номинальной угловой скорости.

Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей различного исполнения приведены ниже:

Исполнение двигателя.....	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией.....	1
Закрытый без принудительного охлаждения....	0,95 — 0,98
Закрытый самовентилируемый.....	0,45—0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25—0,35

Время нагрева двигателя до установившейся температуры равно бесконечности. Практически нагрев двигателя можно считать законченным, когда превышение температуры его достигнет значения

$(0,95—0,98) \tau_y$ соответственно через время от начала нагрева, равное $(3—4)T_n$.

3. Классификация режимов работы электроприводов

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов, которые классифицируются на восемь режимов с условными обозначениями от $S1$ до $S8$, что позволяет более точно рассчитывать мощность двигателя.

1. *Продолжительным номинальным режимом работы ($S1$)* электрической машины называется режим работы ее при неизменной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех частей ее достигают установившихся значений (рис. 3.1, где P , ΔP , Θ — соответственно мощность на валу двигателя, мощность потерь и температура).

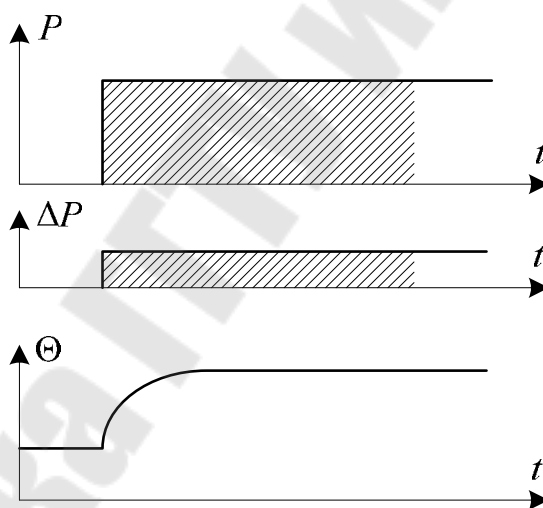


Рис. 3.1. Зависимости мощности P на валу двигателя, мощности потерь ΔP и температуры Θ от времени в продолжительном номинальном режиме работы ($S1$).

2. *Кратковременным номинальным режимом работы ($S2$)* называется режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины; при этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры машины могли достигнуть установившихся значений, а периоды остановки настолько длительны, что все части ее охлаждаются до температуры окружающей среды (рис.3.2). В этом

режиме рекомендуются продолжительности рабочего периода: 10, 30, 60 и 90 мин.

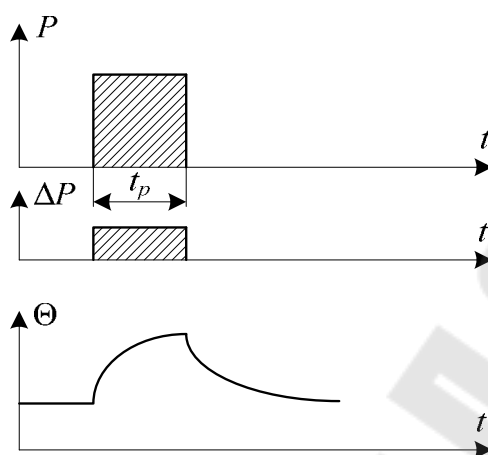


Рис.3.2 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для кратковременного режима(S2).

3. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения машины (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений.

В этом режиме работы (рис.3.3) продолжительность цикла не превышает 10 мин, и режим характеризуется относительной продолжительностью включения, $ПВ\% = 15, 25, 40$ и 60% которая определяется по формуле:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

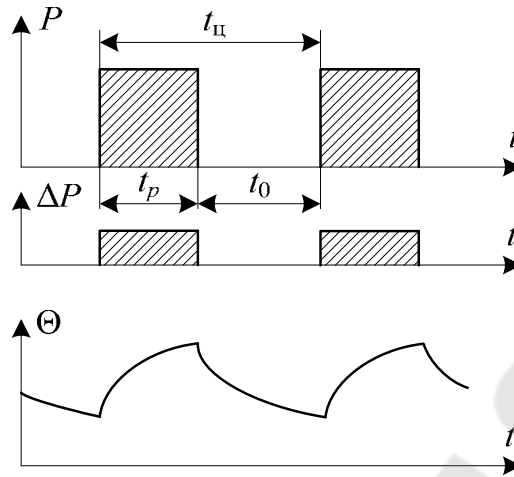


Рис. 3.3 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для повторно-кратковременного режима (S3).

где t_p — время работы; t_0 — время паузы; $t_{\text{ц}}$ — время цикла.

Пусковые потери в этом режиме практически не оказывают влияния на превышение температуры частей машины.

4. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы с частыми пусками (S4)* называется режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. В этом режиме пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Здесь остановка двигателя после его отключения осуществляется путем выбега либо посредством механического торможения, так что при отключении двигателя дополнительного нагрева его обмоток не происходит (рис.3.4). Данный режим характеризуется относительной продолжительностью включения, числом пусков в час и коэффициентом инерции привода. Относительная продолжительность включения, определяется по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{п}} + t_p}{t_{\text{п}} + t_p + t_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Нормируемые значения $\text{ПВ}_{\%} = 15, 25, 40$ и 60 %. Нормируемое число пусков в час — 30, 60, 120 и 240 минут.

Коэффициент инерции — это отношение суммарного приведенного к валу двигателя момента инерции привода (сумма

момента инерции приводимого механизма и момента инерции якоря или ротора двигателя) к моменту инерции якоря (ротора) двигателя:

$$FI = J_{\Sigma} / J_p \quad (3.3)$$

Нормированные значения коэффициента инерции: 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10.

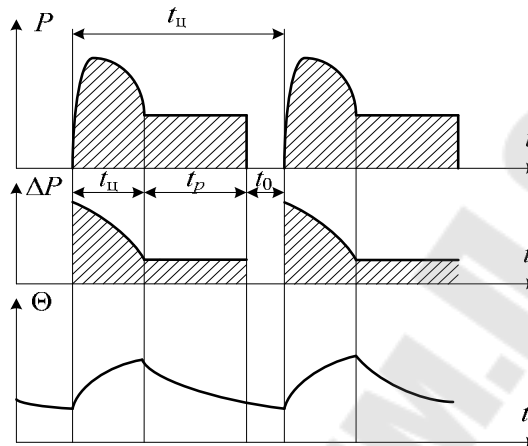


Рис. 3.4 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для повторно-кратковременного режима с частыми пусками (S4).

5. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы с частыми пусками и электрическим торможением (S5)* называется режим, при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис.3.5). В этом режиме потери пусковые и при электрическом торможении оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения, числом пусков в час и коэффициентом инерции.

Относительная продолжительность включения:

$$ПВ = \frac{t_{\pi} + t_p + t_{\tau}}{t_{\pi} + t_p + t_0 + t_{\tau}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Нормированные значения ПВ, числа пусков в час и коэффициентов инерции такие же, как и в режиме S4, исключая значения $FI=6,3$ и 10 и включая дополнительное значение $FI=2$.

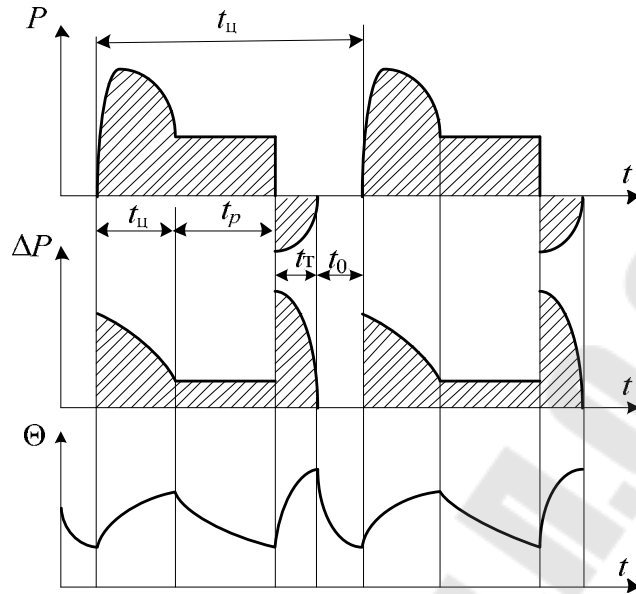


Рис.3.5 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для повторно-кратковременного режима с частыми пусками и электрическим торможением (S5).

6. *Перебегающим номинальным режимом работы (S6)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается, причем как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис.3.6). Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 мин.

Относительная продолжительность нагрузки, %

$$\text{ПН}\% = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

где $t_{x.x}$ — время холостого хода.

Нормируемые значения $\text{ПН}\% = 15, 25, 40$ и 60% .

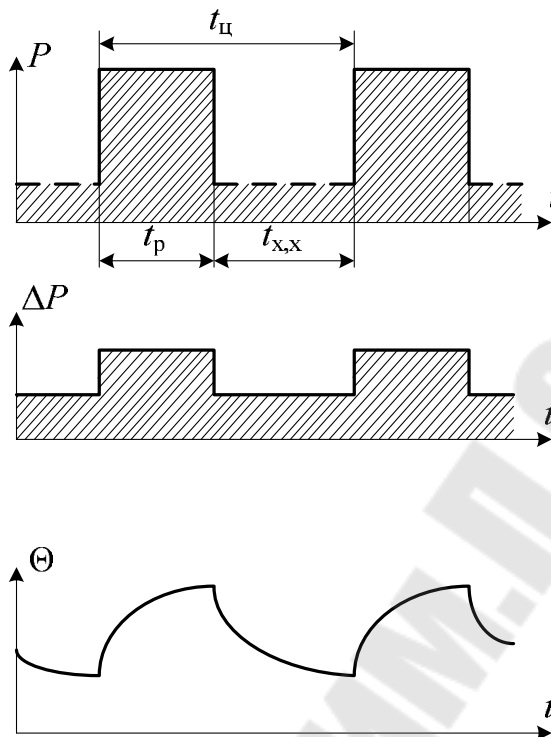


Рис. 3.6 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для перемежающегося режима (S6).

7. *Перемежающимся номинальным режимом работы с частыми реверсами (S7)* называется режим, при котором периоды реверса чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки, причем периоды последней не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис.3.7). В этом режиме потери при реверсировании оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины, которая работает без остановки, находясь постоянно под напряжением. Данный режим характеризуется числом реверсов в час (30, 60, 120 и 240) и коэффициентом инерции (как для S5).

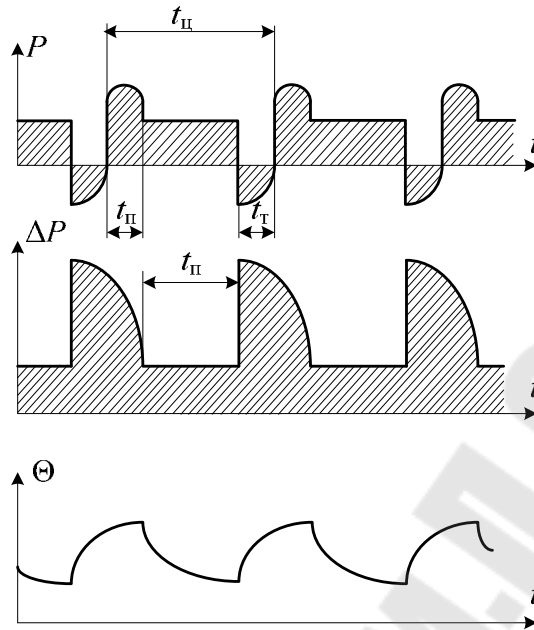


Рис. 3.7 Зависимости P , ΔP и Θ от времени для перемежающегося режима с частыми реверсами (S7).

8. *Перемежающимся номинальным режимом работы с двумя или более угловыми скоростями (S8)* называется режим, при котором периоды с одной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости при соответствующей этой угловой скорости нагрузке. Периоды нагрузки на каждой из угловых скоростей не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис. 3.8). В этом режиме потери при переходе с одной угловой скорости на другую оказывают существенное влияние на превышения температуры частей машины.

Данный режим с двумя или более угловыми скоростями характеризуется числом циклов в час, коэффициентом инерции и относительной продолжительностью нагрузки на отдельных ступенях, определяемой по формулам

$$\text{ПН}_{1\%} = \frac{t_{\pi} + t_{p1}}{t_{\pi} + t_{p1} + t_{\tau1} + t_{p2} + t_{\tau2} + t_{p3}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

$$\text{ПН}_{2\%} = \frac{t_{\pi} + t_{p2}}{t_{\pi} + t_{p1} + t_{\tau1} + t_{p2} + t_{\tau2} + t_{p3}} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

$$\text{ПН}_{3\%} = \frac{t_{\pi} + t_{p3}}{t_{\pi} + t_{p1} + t_{\tau1} + t_{p2} + t_{\tau2} + t_{p3}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — время работы на каждой угловой скорости; $t_{т1}, t_{т2}$ — время электрического торможения; $t_{п}$ — время пуска.

Нормированные значения числа циклов в час: 30, 60, 120, 240; коэффициента инерции: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.

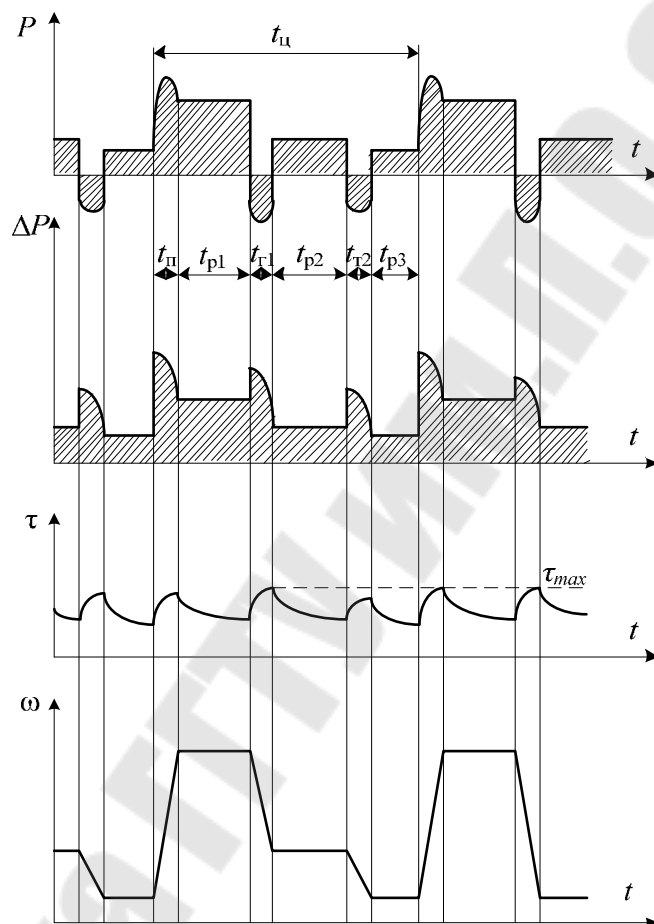


Рис. 3.8 Зависимости P , ΔP , τ и ω от времени для перемежающегося режима с двумя и более скоростями реверсами (S8).

4. Выбор мощности и типа электродвигателя

4.1. Режим S1 (нагрузка длительная неизменная)

Номинальная мощность электродвигателя P_n выбирается по мощности статической нагрузки P_c на валу по формуле

$$P_n = \frac{k \cdot P_c}{z_n} \quad (4.1)$$

где z_n – КПД передачи; k – коэффициент запаса. ($k=(1,05 - 1,1)$ – мощность электродвигателя > 5 кВт; $k=(1,3 - 1,4)$ – мощность электродвигателя $1 - 5$ кВт; $k=(1,7 - 2,0)$ – мощность электродвигателя до 1 кВт.)

Выбранный двигатель проверяют по пусковому и критическому моментам.

При температуре окружающей среды от 40 до 75°C, номинальную мощность электродвигателя следует увеличить на 1-2% на каждый градус сверх +40 °C (стандартная температура окружающей среды берётся +40°C). При температуре от 0 до +40°C электродвигатель можно перегружать на 0,75% на каждый градус ниже +40°C.

Пример 4.1: Мощность нагрузки равна $P_{\text{нагр}}=100$ кВт. Как измениться необходимая мощность электродвигателя при повышении и понижении температуры окружающей среды?

Решение: при увеличении температуры окружающей среды на 1°C свыше 40 °C (стандартная температура) мощность электродвигателя следует увеличить на 1.5%.

$$P_{\text{НДВ}_{1,5\%}} = \frac{100}{100\%} \cdot 1,5\% = 1,5 \text{ кВт.}$$

При повышении температуры окружающей среды на 10 °C мощность электродвигателя необходимо увеличить на

$$P_{\text{НДВ}_{10^\circ\text{C}}} = P_{\text{НДВ}_{1,5\%}} \cdot 10 = 1,5 \cdot 10 = 15 \text{ кВт.}$$

При понижении температуры окружающей среды на 1°C ниже 40°C мощность электродвигателя следует уменьшить на 0,75 %.

$$P_{\text{НДВ}_{0,75\%}} = \frac{100}{100\%} \cdot 0,75\% = 0,75 \text{ кВт}$$

При понижении температуры окружающей среды на 10°C мощность электродвигателя необходимо уменьшить на

$$P_{\text{НДВ}_{10^\circ\text{C}}} = P_{\text{НДВ}_{0,75\%}} \cdot 10 = 0,75 \cdot 10 = 7,5 \text{ кВт}$$

По результатам расчетов составляем таблицу.

Таблица 4.1

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$P_{\text{ндв}}, \text{кВт}$	70	77,5	85	92,5	100	115	130	145	160

Если электродвигатель выбирается по методу средних потерь $DP_{\text{ср}} \leq DP_{\text{ндв}}$ и температура окружающей среды отличается от стандартной (40°C), то условие выбора запишется

$$DP_{\text{ср}} \leq DP_{\text{ндв}} \left(\frac{I_{\text{доп}} - I_{\text{окр}}}{I_{\text{доп}} - 40^\circ\text{C}} \right), \quad (4.2)$$

где $I_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; $I_{\text{доп}}$ – допустимая температура двигателя (зависит от класса изоляции обмотки)

Пример 4.2: Потери мощности в электродвигателе составляют $\Delta P_{\text{ндв}} = 10$ кВт, температура окружающей среды $I_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$, класс изоляции обмотки В ($I_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C}$).

Определить средние потери $P_{\text{ср}}$

Решение: средние потери определим по формуле (4.2)

$$DP_{\text{ср}} \leq P_{\text{ндв}} \cdot \left(\frac{I_{\text{доп}} - I_{\text{окр}}}{I_{\text{доп}} - 40^\circ\text{C}} \right) = 10 \cdot \left(\frac{115 - 20}{115 - 40} \right) = 12,66 \text{ кВт.}$$

4.2. Режим S6 (длительный режим с переменной нагрузкой)

Длительным режимом работы электродвигателя называют режим, когда за время работы двигатель нагревается до установившейся температуры, а за время паузы не успевает остыть до температуры окружающей среды.

Выбор электродвигателя по наибольшей мощности нагрузки вызывает его недоиспользование при остальных нагрузках, что приводит к снижению энергетических и экономических показателей (КПД, коэффициента мощности, удельного расхода электроэнергии). Выбор по минимальной нагрузке вызовет его перегрузку и быстрое изнашивание.

Выбор мощности электродвигателя по средней нагрузке $P_{\text{ср}} = (P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_k t_k) / (t_1 + t_2 + \dots + t_k)$ также неверен, так как

средняя ордината на нагрузочной диаграмме не учитывает квадратичную зависимость потерь мощности в электродвигателе от тока. Лишь при небольших колебаниях нагрузки (до 50%) электродвигатель можно выбирать по средней мощности.

Поэтому для более точного определения мощности электродвигателя пользуются одним из двух методов:

а) метод средних потерь;

б) метод эквивалентных(среднеквадратичных) величин I_3, M_3, P_3 .

а) *Метод средних потерь.*

Предварительно выбирают номинальную мощность электродвигателя по средней мощности

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_k t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k} \quad (4.3)$$

с учётом коэффициента запаса $k=(1,1 - 1,3)$, то есть по расчетной мощности

$$P_{\text{расч}} = k \cdot P_{\text{ср}} \quad (4.4)$$

Коэффициент k учитывает пропорциональность тепловых потерь в электродвигателе не среднему, а среднеквадратичному току.

Затем для каждого участка нагрузки определяются потери мощности для различных нагрузок P_1, P_2, \dots, P_k

$$\Delta P_1 = \frac{P_1(1 - z_1)}{z_1}, \Delta P_2 = \frac{P_2(1 - z_2)}{z_2}, \dots, \Delta P_k = \frac{P_k(1 - z_k)}{z_k}, \quad (4.5)$$

где P_1, P_2, \dots, P_k – мощности на валу двигателя согласно нагрузочному графику, z_1, z_2, \dots, z_k – КПД двигателя при данной нагрузке.

Значение КПД электродвигателя при различных нагрузках определяют по кривой $z = f(P)$. В каталогах и справочниках иногда даётся значение КПД при частичных загрузках двигателя k_3 на 25, 50, 75 и 100%, по которым можно построить кривую $z = f(k_3)$.

Если указанные данные отсутствуют, то значение КПД при частичной загрузке можно определить по формулам:

I способ:

$$z_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{z_n} - 1\right) \cdot b}$$

(4.6)

II способ:

$$z_k = 1 - (1 - z_n)^{\frac{b+k_3^2}{(b+1) \cdot k_3}}, \quad (4.7)$$

где z_n – номинальный КПД двигателя, $b = \frac{k_3 + \frac{a}{k_3}}{1 + a}$, $k_3 = \frac{P_k}{P_n} \approx \frac{I_k}{I_n}$ – коэффициент загрузки, $P_k(I_k)$, $P_n(I_n)$ – мощности (токи) электродвигателя при частичной (по нагрузочной диаграмме для различных t_1, t_2, \dots, t_k) и номинальной нагрузках, a – отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке (при $n_0=750, 1500$ и 3000 об/мин $\langle a \rangle$ соответственно равно: 1,0; 1,6; 2,0 или может быть выбрано из таблицы 4.2)

Таблица 4.2

Значения коэффициентов потерь для различных электродвигателей.

Тип электродвигателя	Коэффициент потерь, α	
	Тихоходные двигатели ($n < 1000$ об/мин)	Быстроходные двигатели ($n > 1000$ об/мин)
Асинхронные двигатели общего назначения	0,5	0,7
Постоянного тока параллельного возбуждения	1	1,5
Постоянного тока последовательного возбуждения	0,5	0,9
Синхронные двигатели	1	2,0

Задаются несколькими частичными нагрузками двигателя, находят значения z_k и P_k , затем строят график зависимости $z_k = f(P_k)$, по которому определяют z_k для любого значения нагрузки P_k на валу двигателя.

Рассчитываются средние потери мощности по формуле

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_k t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k} \quad (4.8)$$

Определяются номинальные потери по формуле

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{н}})}{\alpha_{\text{н}}}$$

Электродвигатель будет выбран правильно при соблюдении условия

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{н}}$$

Однако следует иметь в виду, что формула (4.8) для метода средних потерь справедлива для двигателей с самовентиляцией, работающих с постоянной скоростью, близкой к номинальной, а также для двигателей с принудительной вентиляцией.

При выборе двигателей с самовентиляцией с переменной скоростью в формулу (4.8) следует внести поправочные коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения двигателя в период паузы, пуска и торможения.

б) Метод эквивалентных величин I_3 , M_3 , P_3 .

Метод эквивалентного тока основан на замене действительного изменяющегося тока в электродвигателе таким эквивалентным током, который вызывал бы те же потери, что и действительный ток.

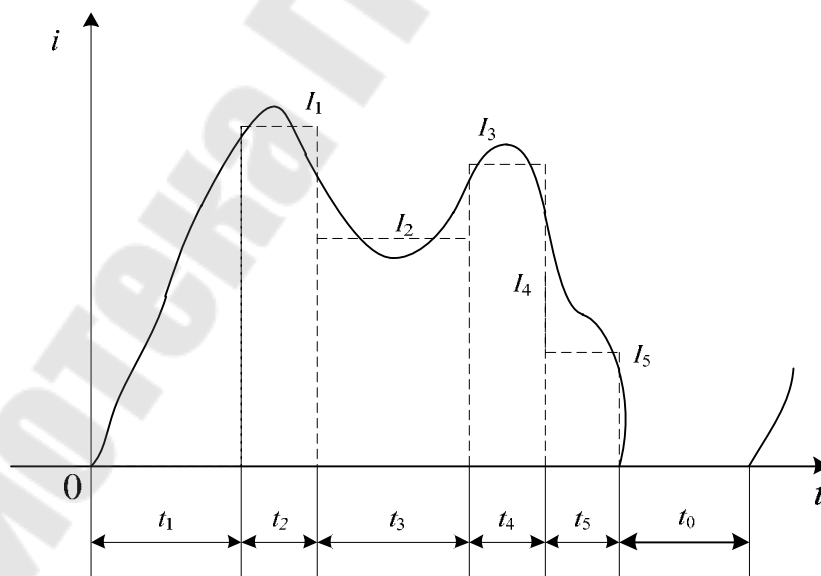


Рис. 4.1. Нагрузочная диаграмма

Если токовая нагрузочная диаграмма $i = f(t)$ имеет криволинейный характер (рис. 4.1), то её разбивают на

прямолинейные участки и находят эквивалентный ток на каждом участке.

Для участков, имеющих вид треугольника (первый участок) ток определяется по формуле

$$I_{\text{э1}} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

Для участков, имеющих вид трапеции (пятый участок), ток равен

$$I_{\text{э5}} = \sqrt{\frac{I_4^2 + I_4 I_5 + I_5^2}{3}} \quad (4.10)$$

Вычисленные по этим формулам токи подставляются в общее выражение для эквивалентного тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (4.11)$$

Для заданной нагрузочной диаграммы формула имеет вид

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{\text{э1}}^2 t_1 + I_1^2 t_2 + I_2^2 t_3 + I_3^2 t_4 + I_{\text{э5}}^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}$$

Двигатель выбирают из условия $I_n \geq I_{\text{э}}$, а затем проверяют его по перегрузочной способности

$$I_n \geq \frac{I_{\text{макс}}}{\lambda_I},$$

где $I_{\text{макс}}$ – максимальный ток по нагрузочной диаграмме; λ_I – перегрузочная способность двигателя по току.

Если в рассматриваемый цикл работы входят пауза, пуск и торможение электродвигателя, то, учитывая ухудшение условий охлаждения для этих режимов формула эквивалентного тока имеет вид

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{\text{э1}}^2 t_1 + I_1^2 t_2 + I_2^2 t_3 + I_3^2 t_4 + I_{\text{э5}}^2 t_5}{v_{\text{п}} t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + v_{\text{т}} t_5 + v_0 t_0}} \quad (4.12)$$

где t_1, t_5, t_0 – время, соответственно, пуска, торможения, паузы; v_0 – коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи электродвигателя в неподвижном состоянии ($v_0 = 0,9 - 1$ – для электродвигателей закрытых, без наружного охлаждения или с принудительной вентиляцией; $v_0 = 0,45 - 0,55$ – закрытый электродвигатель, с наружным охлаждением от собственного вентилятора на валу; $v_0 = 0,25 - 0,35$ – защищённый

электродвигатель, с самовентиляцией; $v_{\text{п}} = v_{\text{т}} = \frac{1 + v_0}{2}$ – коэффициент, учитывающий ухудшение охлаждения электродвигателя при пуске и торможении).

Метод эквивалентного момента можно получить простым преобразованием метода эквивалентного тока. Если $M = kI\Phi$, то при постоянном магнитном потоке $M \equiv I$ (пропорционально). Однако это справедливо для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения при отсутствии регулирования магнитного потока, и приблизительно справедливо для асинхронных двигателей, за исключением пускового и тормозного режимов короткозамкнутых двигателей. Указанная пропорциональность нарушается для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, так как у них $M \equiv I^2$. Следовательно эквивалентный момент равен

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (4.13)$$

Правильно выбранный электродвигатель должен удовлетворять условию $M_{\text{н}} \geq M_{\text{э}}$.

Метод эквивалентной мощности. Если электродвигатель имеет жёсткую характеристику $n \approx \text{const}$, то $P \approx kM$ (k – коэффициент пропорциональности, так как $P = \omega M$). Следовательно эквивалентная мощность равна

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (4.14)$$

Правильность выбора проверяется из условия $P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}}$.

Этот метод ещё более ограничен, так как необходимо ещё и постоянство скорости.

Пример 4.3: По заданной нагрузочной диаграмме $P = f(t)$ выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, если $n_0 = 1500$ об/мин. На диаграмме дано изменение полезной мощности электродвигателя.

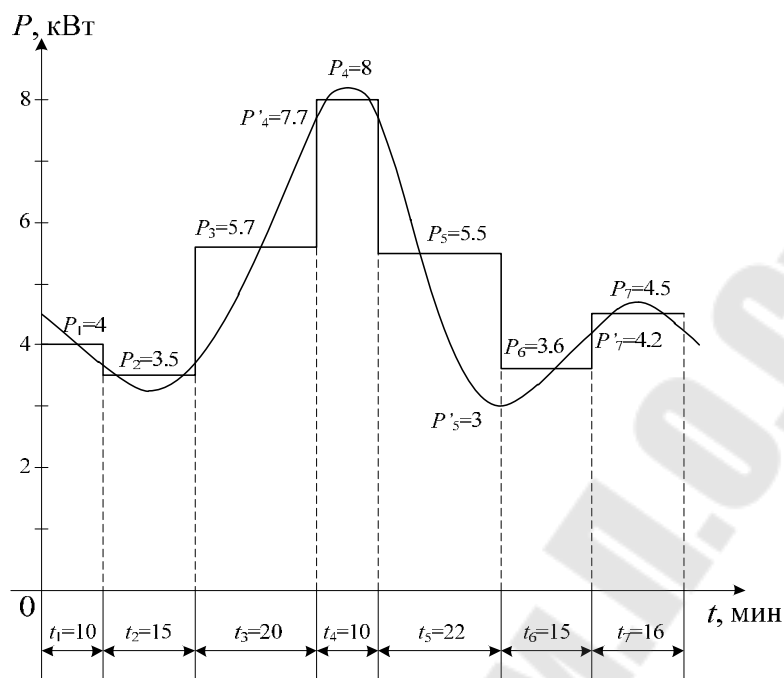


Рис. 4.2. Нагрузочная диаграмма $P = f(t)$

Решение:

Заменяем плавную кривую ступенчатой диаграммой. Задачу решим двумя способами.

I способ. Метод средних потерь.

1. На участках 3 и 6 – трапеция, эквивалентную мощность на этих участках определим по формуле (4.10)

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_2^2 + P_2 P_4' + (P_4')^2}{3}} = \sqrt{\frac{3,5^2 + 3,5 \cdot 7,7 + 7,7^2}{3}} = 5,7 \text{ кВт};$$

$$P_6 = \sqrt{\frac{(P_5')^2 + P_5' P_7' + (P_7')^2}{3}} = \sqrt{\frac{3^2 + 3 \cdot 4,2 + 4,2^2}{3}} = 3,6 \text{ кВт}.$$

2. Вычисляем среднюю мощность (4.3)

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4 + P_5 t_5 + P_6 t_6 + P_7 t_7}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7} =$$

$$= \frac{4 \cdot 10 + 3,5 \cdot 15 + 5,7 \cdot 20 + 8 \cdot 10 + 5,5 \cdot 22 + 3,6 \cdot 15 + 4,5 \cdot 16}{10 + 15 + 20 + 10 + 22 + 15 + 16} = 4,94 \text{ кВт}$$

3. Расчётная мощность электродвигателя (4.4)

$$P_{\text{расч}} = k \cdot P_{\text{ср}} = 1,1 \cdot 4,94 = 5,43 \text{ кВт}$$

По каталогу выбираем электродвигатель 4A112M4 мощностью $P_{\text{н}} = 5,5 \text{ кВт}$, $n_{\text{н}} = 1450 \text{ об/мин}$, $\eta_{\text{н}} = 0,85$.

4. Находим номинальные потери мощности в электродвигателе (4.5)

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}(1 - z_{\text{н}})}{z_{\text{н}}} = \frac{5,5(1 - 0,85)}{0,85} = 0,97 \text{ кВт.}$$

5. Определяем потери мощности для каждого участка

Участок 1: коэффициент нагрузки $k_3 = \frac{P_1}{P_{\text{н}}} = \frac{4}{5,5} = 0,73$;

$$\text{КПД (см. (4.6)) } z_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{z_{\text{н}}} - 1\right) \cdot b} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,85} - 1\right) \cdot 1,124} = 0,835,$$

$$\text{где } b = \frac{k_3 + \frac{a}{k_3}}{1 + a} = \frac{0,73 + \frac{1,6}{0,73}}{1 + 1,6} = 1,124; \quad a = 1,6 \text{ для } n_1 = 1500 \text{ об/мин.}$$

Потери мощности

$$\Delta P_1 = \frac{P_1(1 - z_1)}{z_1} = \frac{4(1 - 0,835)}{0,835} = 0,79 \text{ кВт}$$

Остальные расчёты сведём в таблицу:

Номер участка	1	2	3	4	5	6	7
P , кВт	4	3,5	5,7	8	5,5	3,6	4,5
k_3	0,73	0,636	1,036	1,45	1	0,655	0,818
$\eta_{\text{х}}$	0,835	0,824	0,851	0,852	0,85	0,826	0,842
ΔP , кВт	0,79	0,748	0,998	1,387	0,971	0,757	0,847
t , мин	10	15	20	10	22	15	16

6. Находим средние потери (4.8)

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_7 t_7}{t_1 + t_2 + \dots + t_7} = \frac{0,79 \cdot 10 + 0,748 \cdot 15 + 0,998 \cdot 20 + 1,387 \cdot 10 + 0,971 \cdot 22 + 0,757 \cdot 15 + 0,847 \cdot 16}{10 + 15 + 20 + 10 + 22 + 15 + 16} = \frac{99,219}{108} = 0,918 \text{ кВт}$$

7. Проверка: так как $\Delta P_{\text{ср}} = 0,918 < \Delta P_{\text{н}} = 0,97$, значит электродвигатель выбран правильно.

II способ: Метод эквивалентной мощности.

1. Определяем эквивалентную мощность по (4.14)

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_7^2 t_7}{t_1 + t_2 + \dots + t_7}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4^2 \cdot 10 + 3,5^2 \cdot 15 + 5,7^2 \cdot 20 + 8,2^2 \cdot 10 + 5,5^2 \cdot 22 + 3,6^2 \cdot 15 + 4,5^2 \cdot 16}{10 + 15 + 20 + 10 + 22 + 15 + 16}} = 5,1 \text{ кВт}$$

2. Выбираем по каталогу электродвигатель 4А112М4

$$P_H = 5,5 \text{ кВт}, n_H = 1450 \text{ об/мин.}, \frac{M_K}{M_H} = 2,2$$

3. Проверяем электродвигатель по перегрузочной способности:

$$\text{номинальный момент } M_H = \frac{9550 P_H}{n_H} = \frac{9550 \cdot 5,5}{1450} = 36,2 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

максимальный (критический) момент электродвигателя

$$M_K = 2,2 M_H = 2,2 \cdot 36,2 = 79,64 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

максимальный (наибольший) момент из графика нагрузки (это момент M_4 , соответствующий мощности $P_4 = 8 \text{ кВт}$).

Считаем, что механическая характеристика на рабочем участке линейна, тогда справедливо равенство

$$\frac{n_0 - n_H}{n_0 - n_4} = \frac{P_H}{P_4}, \text{ откуда}$$

$$n_4 = n_0 - \frac{P_4 (n_0 - n_H)}{P_H} = 1500 - \frac{8(1500 - 1450)}{5,5} = 1427 \text{ об/мин, тогда}$$

$$M_4 = \frac{9550 \cdot P_4}{n_4} = \frac{9550 \cdot 8}{1427} = 53,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Двигатель по перегрузочной способности выбран правильно, так как $M_K = 79,64 > M_4 = 53,5$.

С учётом снижения напряжения на 10% перегревоочная способность двигателя

$$\lambda_{\text{доп.дв}} = \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 \frac{M_K}{M_H} = 0,9^2 \frac{M_K}{M_H} = 0,81 \cdot 2,2 = 1,78$$

Перегрузочная способность по моменту, которой требует максимальная нагрузка

$$\lambda_{\text{нагр}} = \frac{M_4}{M_H} = \frac{53,5}{36,2} = 1,47$$

Так как $\lambda_{\text{доп.дв}} > \lambda_{\text{нагр}}$, то электродвигатель выбран правильно.

4.3. Режим S2 (кратковременная нагрузка)

За время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы он охлаждается до температуры окружающей среды.

а). Электродвигатели, предназначенные для кратковременного режима

Промышленность выпускает для такого режима специальные электродвигатели, имеющие большую перегрузочную способность и рассчитанные на работу со стандартным временем $t_{\text{рст}}$: 15, 30, 60, 90 минут.

Если нагрузка в течении работы изменяется и время t_p отличается от $t_{\text{рст}}$ (рис.4.3), то рассчитываются эквивалентные величины, которые приводятся к стандартному значению продолжительности кратковременной работы $t_{\text{рст}}$, ближайшему к реальному значению t_p .

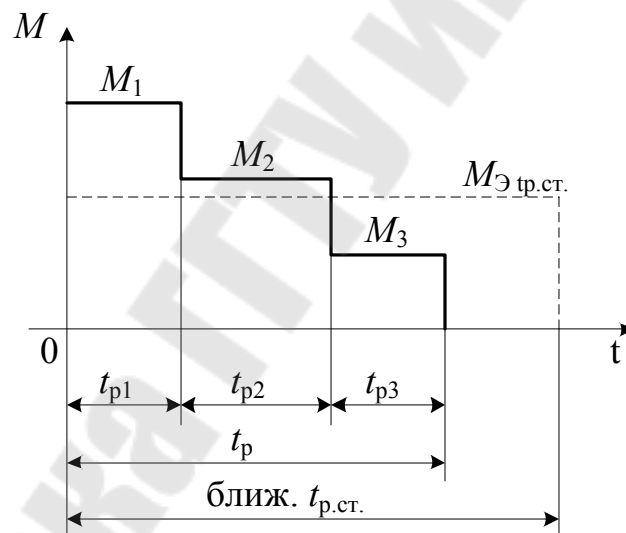


Рис. 4.3. Нагрузочная диаграмма

При выборе электродвигателя должно соблюдаться следующее условие

$$M_{\text{э}t_{\text{рст}}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{p1} + M_2^2 t_{p2} + M_3^2 t_{p3}}{t_{\text{рст}}}} \leq M_{\text{НОМ}t_{\text{рст}}} ; \quad (4.15)$$

$$P_{\text{э}t_{\text{рст}}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3}}{t_{\text{рст}}}} \leq P_{\text{НОМ}t_{\text{рст}}} . \quad (4.16)$$

где $M_{\text{э}t_{\text{рст}}}$ и $P_{\text{э}t_{\text{рст}}}$ – эквивалентные значения момента и мощности за время работы t_p , приведенные к ближайшему стандартному значению $t_{\text{рст}}$; $M_{\text{ном}t_{\text{рст}}}$, $P_{\text{ном}t_{\text{рст}}}$ – номинальные значения момента и мощности, соответствующие продолжительности кратковременной работы $t_{\text{рст}}$.

Когда нагрузка в течение времени t_p не изменяется, то

$$M_{\text{э}t_{\text{рст}}} = M \sqrt{\frac{t_p}{t_{\text{рст}}}} \quad \text{или} \quad P_{\text{э}t_{\text{рст}}} = P \sqrt{\frac{t_p}{t_{\text{рст}}}}, \quad (4.17)$$

Выбранный электродвигатель должен быть проверен по условиям пуска $M_{\text{пуск}} > M_1$ и перегрузочной способности $M_{\text{кр}} > M_{\text{сmax}} = M_1$ (для данной нагрузочной диаграммы).

Электродвигатели кратковременного режима выпускаются малыми сериями.

б). *Электродвигатели, предназначенные для длительного режима*

В этом случае номинальная мощность электродвигателя выбирается из условия

$$P_{\text{н}} \geq \frac{P_k}{k}, \quad (4.18)$$

где P_k – мощность кратковременного режима; k – коэффициент временно допустимой механической перегрузки (определяется по формуле $k = \sqrt{k_T}$); k_T – коэффициент временно допустимой тепловой перегрузки.

Коэффициент k_T находят по формуле

$$k_T = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_{\text{н}}}}}, \quad (4.19)$$

где t_k – длительность кратковременной работы; $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева.

При отсутствии данных о величине $T_{\text{н}}$ её можно определить: из графика $T = f(G)$ (рис. 4.4) или найти по графику на рисунке 4.5

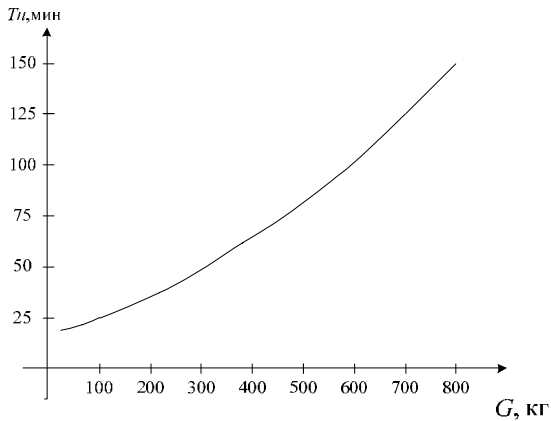


Рис. 4.4. Зависимость $T = f(G)$

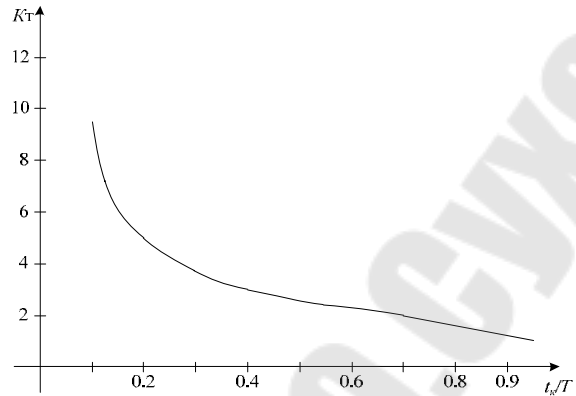


Рис.4.5. Зависимость $k_T = f(t_k / T)$

Ориентировочно постоянную времени нагрева T_H можно принять по табл.4.3.

Таблица 4.3

Постоянная времени нагрева электродвигателей

Типы электродвигателей	T_H , мин
АД открытого исполнения до 10 кВт.	20-30
АД обдуваемого закрытого типа до 10 кВт.	50-70
АД открытого исполнения несколько десятков кВт.	60-120
АД обдуваемые закрытого типа несколько десятков кВт.	120-240
Якорь ДПТ открытого исполнения диаметром 160-600 мм.	25-90
Якорь ДПТ краново-металлургической серии закрытого исполнения с диаметром 100-400 мм.	65-270
АД с короткозамкнутым ротором с самовентиляцией при диаметре ротора 105-140 мм.	11-22
АД с фазным ротором открытого исполнения при диаметре ротора 160-600 мм.	25-90

Затем электродвигатель проверяют по пусковым условиям.

Если время работы $t_{\text{раб}}$ незначительно и отношение $t_{\text{раб}} / T_H \leq 0,35$ (статическая нагрузка двигателя при этом составит $2,5P_{\text{ном}}$ и более), то электродвигатель следует выбирать только по перегрузочной способности и начальному пусковому моменту.

б) *Электродвигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима*

В этом случае считают, что длительность работы в 30 минут соответствует ПВ_%=15%, 60 минут – ПВ_%=25%, 90 минут – ПВ_%=40%.

Пример 4.4 : Электродвигатель работает в режиме кратковременной работы по графику $P(t)$ (Рис.4.6). Выбрать электродвигатель различных режимов работы.

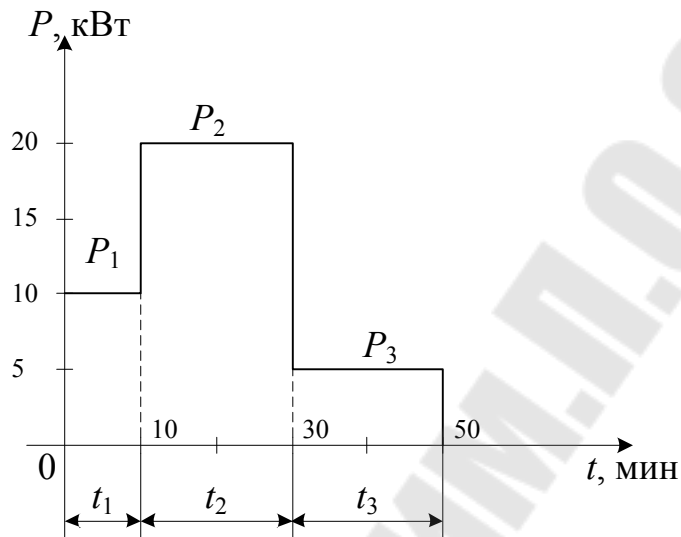


Рис.4.6 Нагрузочная диаграмма.

Решение:

1. Двигатель кратковременного режима

Так как $t_p = t_1 + t_2 + t_3 = 10 + 20 + 20 = 50$ минут отличается от стандартного [15, 30, 60, 90 минут] и нагрузка в течение работы изменяется, то для выбора электродвигателя воспользуемся формулой (4.16) и определим значение эквивалентной мощности, приведённое к ближайшему стандартному – 60 минут

$$P_{э\text{т}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3}}{t_{\text{рст}}}} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 10 + 20^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 20}{60}} = \sqrt{\frac{9500}{60}} = 12,58 \text{ кВт.}$$

Выбираем электродвигатель МТКФ 411–8, $P_{\text{н}} = 15$ кВт; $t_{\text{ст}} = 60$ мин; $I_{\text{н}} = 40$ А; $\eta_{\text{н}} = 80\%$; $I_{\text{п}} = 185$ А; $M_{\text{макс}} = 657$ Н·м, $M_{\text{п}} = 637$ Н·м, $J = 0,537$ кг·м², $m = 255$ кг.

Номинальный момент равен:

$$M_{\text{н}} = \frac{9550 \cdot P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = \frac{9550 \cdot 15}{695} = 206 \text{ Н·м.}$$

Для нагрузочной диаграммы определим $M_{\text{п}} = M_{(1)}$ и $M_{\text{макс}} = M_{(2)}$. Так как рабочие участки характеристики линейны, то

$$\frac{n_0 - n_H}{n_0 - n_{(1)}} = \frac{P_H}{P_{(1)}}, \rightarrow n_{(1)} = n_0 - \frac{P_{(1)}(n_0 - n_H)}{P_H} = 750 - \frac{10(750 - 695)}{15} = 715$$

об/мин;

$$n_{(2)} = n_0 - \frac{P_{(2)}(n_0 - n_H)}{P_H} = 750 - \frac{20(750 - 695)}{15} = 677 \text{ об/мин};$$

Определить моменты на первом и втором участках:

$$M_{(1)} = \frac{9550 \cdot P_{(1)}}{n_{(1)}} = \frac{9550 \cdot 10}{715} = 133,6 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{(2)} = \frac{9550 \cdot P_{(2)}}{n_{(2)}} = \frac{9550 \cdot 20}{677} = 282,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Двигатель проверим по условиям пуска и перегрузочной способности.

Так как $M_{ПДВ}=637 \text{ Н}\cdot\text{м} > M_{(1)}=133,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_{\text{макс}}=657 \text{ Н}\cdot\text{м} > M_{(2)}=282,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$, то выбранный электродвигатель подходит.

2. Электродвигатель длительного режима.

Определим эквивалентную мощность по формуле (4.14):

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{п1} + P_2^2 t_{п2} + P_3^2 t_{п3}}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 10 + 20^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 20}{10 + 20 + 20}} = \sqrt{\frac{9500}{50}} = 13,8 \text{ кВт}.$$

Номинальная мощность электродвигателя выбирается из условия (4.18)

$$P_H \geq \frac{P_э}{k}.$$

Для определения коэффициента временно допустимой механической перегрузки k вначале найдем постоянную времени нагрева T_H . Для этого предварительно выберем электродвигатель 4А180М8У3 с $n_0=750$ об/мин и $P_H=15$ кВт. и $m=195$ кг. и по рис.4.4 определим $T_H=40$ мин.

Затем по (4.19) определим коэффициент временно допустимой тепловой перегрузки:

$$k_T = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{50}{40}}} = 1,4.$$

Тогда $k = \sqrt{k_T} = \sqrt{1,4} = 1,18$.

Требуемая мощность электродвигателя

$$P_H \geq \frac{P_{\Sigma}}{k} = \frac{13,8}{1,18} = 11,7 \text{ кВт.}$$

По таблицам выбираем электродвигатель 4А160М8У3: $n_H=730$ об/мин; $P_H=11$ кВт; $\eta_H=87$ %; $\cos\varphi=0,75$; $\frac{M_{\text{макс}}}{M_H} = 2,2$; $\frac{M_{\text{п}}}{M_H} = 1,4$;

$$\frac{I_{\text{п}}}{I_H} = 6,0.$$

Для этого электродвигателя определим номинальный, пусковой и максимальный моменты:

$$M_H = \frac{9550 \cdot P_H}{n_H} = \frac{9550 \cdot 11}{730} = 143,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{п}} = 1,4M_H = 1,4 \cdot 143,9 = 201,4 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{макс}} = 2,2M_H = 2,2 \cdot 143,9 = 316,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Проверку правильности выбора по условию пуска и перегрузочной способности проведем аналогично п.1 (двигатель кратковременного режима)

$$n_{(1)} = n_0 - \frac{P_{(1)}(n_0 - n_H)}{P_H} = 750 - \frac{10(750 - 730)}{11} = 732 \text{ об/мин};$$

$$n_{(2)} = n_0 - \frac{P_{(2)}(n_0 - n_H)}{P_H} = 750 - \frac{20(750 - 730)}{11} = 714 \text{ об/мин};$$

$$\text{тогда } M_{(1)} = \frac{9550 \cdot P_{(1)}}{n_{(1)}} = \frac{9550 \cdot 10}{732} = 130,5 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{(2)} = \frac{9550 \cdot P_{(2)}}{n_{(2)}} = \frac{9550 \cdot 20}{714} = 267,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Проверим правильность выбора электродвигателя

$$M_{\text{пдв}}=201,4 \text{ Н}\cdot\text{м} > M_{(1)}=130,5 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{макс}}=316,6 \text{ Н}\cdot\text{м} > M_{(2)}=267,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Электродвигатель проходит по условию пуска и перегрузочной способности.

3. Двигатель повторно–кратковременного режима.

Определим эквивалентную мощность:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3}}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 10 + 20^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 20}{10 + 20 + 20}} = \sqrt{\frac{9500}{50}} = 13,8 \text{ кВт.}$$

Так как длительность работы 60 мин. соответствует ПВ₀=25% , то по таблице выбираем электродвигатель МТКФ 311–8 с ПВ₀=25%; $n_H=690$ об/мин; $P_H=13$ кВт; $\eta_H=78,5$ %; $M_{\text{макс}} = 500,3$ Н·м; $M_H = 461,1$ Н·м; $I_H = 150$ А, для которого определим номинальный момент:

$$M_H = \frac{9550 \cdot P_H}{n_H} = \frac{9550 \cdot 13}{690} = 180 \text{ Н·м;}$$

Проверка правильности выбора электродвигателя аналогична п.1.2.

$$n_{(1)} = 750 - \frac{10(750 - 690)}{13} = 703,8 \text{ об/мин;}$$

$$n_{(2)} = 750 - \frac{20(750 - 690)}{13} = 658 \text{ об/мин;}$$

$$M_{(1)} = \frac{9550 \cdot 10}{703,8} = 135,7 \text{ Н·м; } M_{(2)} = \frac{9550 \cdot 20}{658} = 290,3 \text{ Н·м.}$$

Двигатель подходит, так как

$$M_{\text{ПДВ}}=461,1 \text{ Н·м} > M_{(1)}=135,7 \text{ Н·м;}$$

$$M_{\text{макс}}=500,3 \text{ Н·м} > M_{(2)}=290,3 \text{ Н·м.}$$

4.4. Режим S3 (повторно–кратковременная нагрузка)

За время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы, в течение которого он отключён от сети, охладиться до температуры окружающей среды.

Режим повторно – кратковременный, если $t_u \leq 10$ минут.

а) Электродвигатель краново-металлургической серии рассчитанный на повторно–кратковременный режим.

Для данного режима целесообразно выбирать электродвигатели специально предназначенные для этого и рассчитанные на стандартные ПВ₀: 15, 25, 40, 60%.

Продолжительность цикла не должна превышать 10 минут, в противном случае электродвигатель выбирают, как для продолжительного режима.

По нагрузочной диаграмме выбирают мощность электродвигателя по методам средних потерь и эквивалентных величин.

Метод средних потерь.

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P_{п} t_{п} + \sum \Delta P_{y} t_{y} + \sum \Delta P_{т} t_{т} + \sum \Delta P_{0} t_{0}}{\alpha \cdot \sum t_{п} + \sum t_{y} + \sum t_{т} + \beta \cdot \sum t_{0}}, \quad (4.20)$$

где ΔP_{cp} – средние потери мощности в двигателе в течение цикла, кВт; $\Delta P_{п}, \Delta P_{т}$ – средние потери мощности в двигателе за время пуска $t_{п}$ и торможения $t_{т}$, кВт; ΔP_{y} – средние потери в двигателе за время работы t_{y} с установившейся скоростью, кВт; ΔP_{0} – потери за время паузы t_{0} при неподвижном двигателе; β – коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи двигателя при неподвижном состоянии. $\delta = \left(\frac{1+\nu}{2}\right)$ – коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи за время пуска и торможения.

Эта формула является универсальной как при применении двигателей длительного режима, так и для двигателей повторно–кратковременного режима по данным для ПВ=100%.

Определим средние потери в двигателе на установившейся скорости:

$$\Delta P_{y} = \Delta P_{н} \frac{y + I^2 * y}{y + 1}, \quad (4.21)$$

где $\Delta P_{н} = \frac{1 - z_{н}}{z_{н}}$ – номинальные потери двигателя; y – отношение постоянных потерь в электродвигателе к переменным при номинальной нагрузке, выбирается по таблице 4.4; $I * y$ – среднеквадратичный ток в долях номинального за время работы на установившейся скорости.

Таблица 4.4

Двигатели	y
Постоянного тока:	
Общепромышленные, параллельного возбуждения	1–1,5
Крановые	0,5–0,9
Переменного тока	
общепромышленные	0,5–0,7
крановые	0,4–1,0

Для определения $I * y$ необходима нагрузочная диаграмма $I = f(t)$, тогда

$$I * y = \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots / t_1 + t_2 + \dots}{I_H} = \frac{I_{\text{эу}}}{I_H}. \quad (4.22)$$

Средние потери мощности при пуске и торможении:

$$\Delta P_{\text{п}} = k \cdot \Delta P_{\text{пост.н}} + \Delta P_{\text{пер.н}} I_{*_{\text{э.п}}}^2; \quad (4.23)$$

$$\Delta P_{\text{т}} = k \cdot \Delta P_{\text{пост.н}} + \Delta P_{\text{пер.н}} I_{*_{\text{э.т}}}^2. \quad (4.24)$$

где $\Delta P_{\text{пост.н}} = \Delta P_{\text{н}} \frac{y}{y+1}$ – номинальные постоянные потери

мощности в двигателе, которые включают мощность, расходуемую на вентиляцию, трение в подшипниках и щёток о коллектор, гистерезис и вихревые токи в стали, нагрев параллельных обмоток возбуждения;

$\Delta P_{\text{пер.н}} = \frac{\Delta P_{\text{пост.н}}}{y} = \Delta P_{\text{н}} \cdot \frac{1}{y+1}$ – номинальные переменные потери,

которые включают потери в меди в обмотке якоря, включая последовательную обмотку возбуждения, в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя; $I_{*_{\text{э.п}}}$, $I_{*_{\text{э.т}}}$ – долевые значения эквивалентного тока при пуске и торможении по расчёту динамики

привода; $k = \frac{\Delta P_{\text{пост.трөг.}} + \Delta P_{\text{пост.н}}}{2\Delta P_{\text{пост.н}}}$ – коэффициент, учитывающий

средние постоянные потери мощности в процессе пуска или торможения в долях $\Delta P_{\text{пост.н}}$.

Коэффициент k можно принять по таблице 4.5

Таблица 4.5

Коэффициент k для различных электродвигателей

Типы двигателей	k
ДПТ общего применения параллельного и смешанного возбуждения	0,51-0,57
Крановые электродвигатели параллельного возбуждения	0,56-0,65
Крановые электродвигатели смешанного возбуждения	0,53-0,57
Крановые электродвигатели параллельного возбуждения	0,5
Асинхронные двигатели	1,5

Метод эквивалентных величин.

По нагрузочной диаграмме определяем эквивалентную величину тока, момента, мощности за один цикл без учёта времени паузы (I_s , M_s , P_s).

Затем по нагрузочной диаграмме определяем фактическую продолжительность включения

$$ПВ_{\%ф} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% \quad (4.25)$$

Если $ПВ_{\%ф}$ отличается от $ПВ_{\%ст}$ [15, 25, 40, 60%], то мощность электродвигателя необходимо выбрать по ближайшему стандартному значению, пересчитывая соответственно мощность электродвигателя по формуле

$$P_{ст} = P_э \sqrt{\frac{ПВ_{ф\%}}{ПВ_{ст\%}}} \quad (4.26)$$

Выбирается электродвигатель из условия $P_H \geq P_{ст}$.

Затем электродвигатель проверяют по перегрузочной способности и условиям пуска.

б). Электродвигатель длительного режима.

Если механизм приводится двигателем, рассчитанным на длительный режим, то при определении $I_э$, $M_э$, $P_э$ необходимо учитывать время паузы t_0 , а также коэффициенты α и β , учитывающие ухудшение охлаждения при разгоне, торможении и паузе.

Пример 4.5: Выбрать двигатель постоянного тока напряжением 220 В. по нагрузочной диаграмме (рис.4.5).

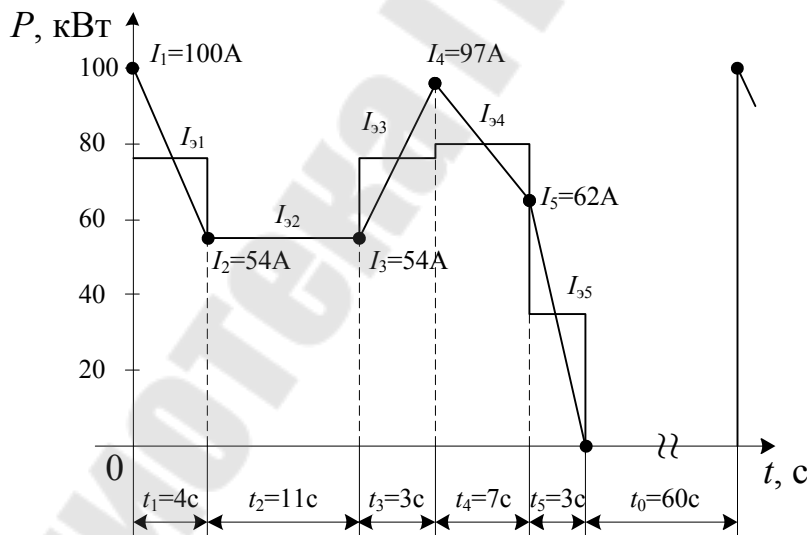


Рис.4.7 Нагрузочная диаграмма

Вариант 1. Выбираем электродвигатель краново-металлургической серии для повторно-кратковременного режима.

1. Определим фактическую относительную ПВ_ф (4.25):

$$\text{ПВ}_{\text{ф}} = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{28}{28 + 60} = 0,319$$

2. Эквивалентные токи на участках

$$I_{\text{э}1} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}} = \sqrt{\frac{100^2 + 100 \cdot 54 + 54^2}{3}} = 78,2 \text{ А};$$

$$I_{\text{э}2} = 54 \text{ А};$$

$$I_{\text{э}3} = \sqrt{\frac{I_3^2 + I_3 I_4 + I_4^2}{3}} = \sqrt{\frac{54^2 + 54 \cdot 97 + 97^2}{3}} = 76,2 \text{ А};$$

$$I_{\text{э}4} = \sqrt{\frac{I_4^2 + I_4 I_5 + I_5^2}{3}} = \sqrt{\frac{97^2 + 97 \cdot 62 + 62^2}{3}} = 80 \text{ А};$$

$$I_{\text{э}5} = \frac{I_5}{\sqrt{3}} = \frac{62}{\sqrt{3}} = 35,8 \text{ А}.$$

На основании этих расчетов график может быть заменён на прямоугольный.

3. Определим эквивалентный ток за рабочий период (β_n и $\beta_T=0,75$ по (4.12))

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{\text{э}1}^2 t_1 + I_{\text{э}2}^2 t_2 + I_{\text{э}3}^2 t_3 + I_{\text{э}4}^2 t_4 + I_{\text{э}5}^2 t_5}{\beta_n t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \beta_T t_5}} = \sqrt{\frac{78,2^2 \cdot 4 + 54^2 \cdot 11 + 76,2^2 \cdot 3 + 80^2 \cdot 7 + 35,8^2 \cdot 3}{0,75 \cdot 4 + 11 + 3 + 7 + 0,75 \cdot 3}} = 68,4 \text{ А}.$$

4. Выбираем двигатель серии ДП с ПВ_{ст}=0,25.

5. Фактический ток, пересчитанный на стандартную ПВ_{ст} :

$$I_{\text{нф}} = I_{\text{э}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{ф}}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}} = 68,4 \sqrt{\frac{0,319}{0,25}} = 77,3 \text{ А}.$$

6. Выбираем по каталогу двигатель постоянного тока параллельного возбуждения ДП-41: $U_{\text{н}}=220 \text{ В}$; ПВ_%=25%; $P_{\text{н}}=16 \text{ кВт}$; $I_{\text{н}}=85 \text{ А}$; $n_{\text{н}}=690 \text{ об/мин}$.

Вариант 2. Выбираем электродвигатель общепромышленного исполнения серии П с самовентиляцией для длительного режима.

Эквивалентный длительный ток (с учётом времени паузы t_0)

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{\text{э}1}^2 t_1 + I_{\text{э}2}^2 t_2 + I_{\text{э}3}^2 t_3 + I_{\text{э}4}^2 t_4 + I_{\text{э}5}^2 t_5}{\beta_n t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \beta_T t_5 + \beta_0 t_0}} = \sqrt{\frac{78,2^2 \cdot 4 + 54^2 \cdot 11 + 76,2^2 \cdot 3 + 80^2 \cdot 7 + 35,8^2 \cdot 3}{0,75 \cdot 4 + 11 + 3 + 7 + 0,75 \cdot 3 + 0,5 \cdot 60}} = 46,7$$

А.

Выберем электродвигатель П-71: $U_{\text{н}}=220 \text{ В}$; $P_{\text{н}}=8 \text{ кВт}$; $I_{\text{н}}=48,5 \text{ А}$; $n_{\text{н}}=750 \text{ об/мин}$.

Литература

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоиздат, 1998.
2. Кузнецов Б.В., Сацункевич М.Ф. Асинхронные электродвигатели и аппараты управления. – Мн.: Беларусь, 1982.
3. Сацункевич М.Ф. Электрические аппараты управления и защиты. – Мн.: Беларусь, 1984.
4. Кузнецов Б.В. Выбор электродвигателей к производственным механизмам. – Мн.: Беларусь, 1984.
5. Михеев Ю.А., Морозов Э.В. Электрический привод. – М.: Агропромиздат, 1988.
6. Электротехнический справочник /Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоиздат, 1981. – Т. 2.
7. Электротехнический справочник /Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоиздат, 1982. – Т. 3.– Кн. 2.
8. Кузнецов Б.В., Сацункевич М.Ф. Справочное пособие заводского электрика. – Мн.: Беларусь, 1978.
9. Автоматизированное управление электроприводами (Лабораторные работы) /Под ред. А.А. Сиротина. – М.: Высшая школа, 1978.
10. Васин В.М. Электрический привод – М.: Высшая школа, 1984.
11. Справочник по наладке электроустановок /Под ред. А.С. Дорофеюка. – М.: Энергия, 1976.
12. Хализев Г.П. Электропривод и основы управления. – М.: Высшая школа, 1968.
13. Хализев Г.П. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1977.
14. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
15. Крановое электрооборудование: Справочник /Под ред. А.А. Рабиновича. – М.: Энергия, 1979.

Содержание

1. Общие положения	3
2. Нагрев и охлаждение двигателя	7
3. Классификация режимов работы электроприводов	11
4. Выбор мощности и типа электродвигателя	19
4.1. Режим S1(нагрузка длительная неизменная)	19
4.2. Режим S6 (длительный режим с переменной нагрузкой)	20
4.3. Режим S2(кратковременная нагрузка)	29
4.4. Режим S3(повторно-кратковременная нагрузка)	34
Литература	40

Веппер Леонид Владимирович
Погуляев Михаил Николаевич

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Практикум
по дисциплине «Релейно-контакторные системы
управления и защиты автоматизированных
электроприводов» для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения

В двух частях
Часть 2

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 22.03.12.

Рег. № 5Е.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>