

Двигатель для электропривода —

выбор мощности, вида, типа и метода управления

В мире ежегодно выпускается порядка семи миллиардов электродвигателей. Они потребляют около 70% общего количества произведенной электроэнергии. Поэтому в настоящее время остро стоит задача оптимального управления электродвигателями не только с технологической точки зрения, но и с точки зрения экономии электроэнергии. Цель данной работы — показать читателю, как правильно выбрать мощность, вид, тип и метод управления двигателя для электропривода.

**Вячеслав Драчков
Максим Иванов**

ims2001@inbox.ru

Работа двигателя, как и любого электромеханизма, сопровождается потерями части электроэнергии, которая превращается в тепловую, и, соответственно, двигатель нагревается. При этом мощность потерь ΔP определяется как:

$$\Delta P = P [(1/\eta) - 1], \tag{1}$$

где P — мощность на валу двигателя; Δ — коэффициент полезного действия (КПД) двигателя.

Отсюда следует, что с ростом нагрузки температура двигателя и его изоляции возрастает и может достигнуть недопустимых значений.

Температура двигателя определяется не только нагрузкой, она зависит и от температуры окружающей среды. При расчетах температуру окружающей среды принимают равной 40 °С. Разность между температурами двигателя и окружающей среды называют температурой перегрева τ . Так, например, для изоляции класса «А» (пропитанные волокнистые материалы) допустимая температура перегрева 65 °С. В процессе работы двигателя часть теплоты идет на его нагревание, а часть излучается в окружающее пространство. Когда температура двигателя достигает определенного значения, процесс нагревания прекращается, и вся теплота, выделяющаяся в двигателе, излучается в окружающее пространство. Установившаяся температура перегрева определяется по формуле:

$$\tau_{уст} = \Delta P / A, \tag{2}$$

где A — коэффициент теплоотдачи, Вт/град. Изменение температуры двигателя при его нагревании и охлаждении происходит по экспоненте:

- при нагревании

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right), \tag{3}$$

- при охлаждении

$$\tau = \tau_{нач} \times e^{-\frac{t}{T_{охл}}}, \tag{4}$$

где $\tau_{нач}$ — начальная температура перегрева; $T_{охл} = C / A_{охл}$ — постоянная времени охлаждения двигателя (здесь C — теплоемкость двигателя, Вт·с/град); $A_{охл}$ — постоянный конструктивный коэффициент.

На рис. 1 приведены кривые нагревания и охлаждения, соответствующие приведенным экспоненциальным формулам.

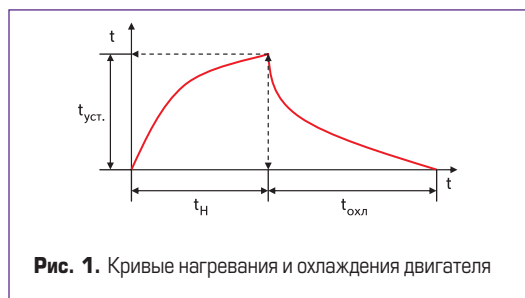


Рис. 1. Кривые нагревания и охлаждения двигателя

Практически нагревание двигателя заканчивается через время $t_H = (3 - 5) T_H$, а охлаждение — через время $t_{охл} = (3 - 5) T_{охл}$. Скорость охлаждения зависит от способа вентиляции и ее интенсивности. В двигателях с самовентиляцией условия охлаждения значительно хуже, чем в двигателях с принудительным охлаждением. Поэтому $T_{охл}$ в двигателях с самовентиляцией в 2–3 раза больше T_H .

Оптимальный выбор мощности электродвигателя для привода должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Надежность в работе.
2. Возможность работоспособного состояния в различных условиях.
3. Экономичность в эксплуатации.

При использовании двигателя большей мощности, чем это предусматривается условиями эксплуа-

тации, появляются энергии — это обуславливает дополнительные капитальные вложения, увеличение массы и габаритов двигателя. Особенно это неприемлемо для бортовых электроприводов.

При установке электродвигателя с меньшей мощностью снижается производительность электропривода, и его работа становится менее надежной. В этом случае сам электродвигатель может быть поврежден.

Электродвигатель необходимо выбирать так, чтобы его мощность использовалась как можно интенсивнее. Во время работы двигатель не должен нагреваться до предельно допустимой температуры, в крайнем случае, на очень непродолжительное время. Кроме того, двигатель должен нормально работать при возможных временных перегрузках и развивать пусковой момент на валу такой, какой требуется для нормального функционирования исполнительного механизма.

В соответствии с этим мощность двигателя выбирается в большинстве случаев на основании условий нагревания до предельно допустимой температуры. Производится так называемый выбор мощности по нагреву. Затем осуществляется проверка соответствия перегрузочной способности двигателя условиям пуска машины и временным перегрузкам. Иногда, при большой кратковременной перегрузке, приходится выбирать двигатель исходя из требуемой максимальной мощности. В подобных условиях максимальная мощность двигателя длительное время, как правило, не используется.

Выбор мощности для привода с продолжительным режимом работы при постоянной или незначительно меняющейся нагрузке на валу довольно прост. В этом случае мощность двигателя должна быть равна мощности нагрузки, а проверки на перегрев и перегрузку во время работы электропривода не нужны (это объясняется изначально определенными условиями работы электродвигателя). В то же время необходимо проверить, достаточен ли пусковой момент на валу двигателя для пусковых условий данной электрической машины.

Мощность продолжительной нагрузки определяется на основании проверенных практикой теоретических расчетов.

Рассмотрим конкретный пример. Например, мощность двигателя для вентилятора в кабине экипажа можно определить как

$$P = (V\Delta p) / (1000\eta_{вен}\eta_{пер}), \text{ кВт}, \quad (5)$$

где V — количество нагнетаемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; Δp — перепад давления, Па; $\eta_{вен}$ — коэффициент полезного действия (КПД) вентилятора (у крыльчатых вентиляторов он равен 0,2–0,35); $\eta_{пер}$ — КПД передачи от двигателя к крыльчатке вентилятора.

В приведенной формуле произведение $V\Delta p$ представляет собой полезную мощность вентилятора, а 1000 — коэффициент для перевода мощности в киловатты.

В инженерных расчетах для определения мощности электродвигателя привода при продолжительной его работе используют элект-

рические (полученные экспериментальным путем) формулы, проверенные длительной практикой.

При кратковременном, повторно-кратковременном и продолжительном с переменной нагрузкой режимах работы электропривода важно знать закон изменения во времени превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Электрическая машина с точки зрения нагревания представляет собой весьма сложное тело. Тем не менее, при инженерных расчетах, не требующих большой точности, можно считать электрическую машину однородным телом.

Это дает возможность применить к ней упрощенное уравнение нагревания

$$Q_0 dt = CdV + HVdt, \quad (6)$$

где C — теплоемкость электрической машины; H — теплоотдача машины; Q_0 — теплота, выделяемая в машине в единицу времени.

Рассмотрим два крайних случая:

$$t = \infty \text{ и } t = 0.$$

При $t = \infty$ получим:

$$Q_0 dt = HV_{max} dt. \quad (7)$$

Отсюда $V_{max} = Q_0 / H$, на основании чего получаем $V_{max} dt = (C / H) dV + V dt$.

Решая это уравнение методом разделения переменных, получаем

$$Ae^{-t/\tau} = V_{max} - V, \quad (8)$$

где $\tau = C / H$ — постоянная времени нагрева машины, определяемая экспериментально.

При $t = 0$ начальное превышение температуры будет $V = V_0$, на основании чего постоянная $A = V_{max} - V_0$, а закон нарастания превышения температуры машины будет иметь вид

$$V = V_{max} - (V_{max} - V_0) e^{-t/\tau}. \quad (9)$$

Таким образом, превышение температуры машины V над температурой окружающей среды возрастает по показательному закону, стремясь к значению V_{max} . Значение начального превышения температуры V_0 лишь изменяет скорость нарастания температуры, что не влияет на характер процесса (рис. 2).

При различных значениях продолжительной нагрузки одной и той же машины в диа-

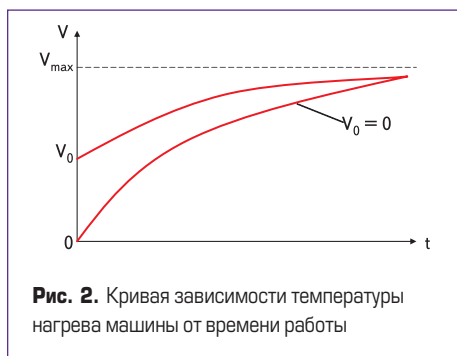


Рис. 2. Кривая зависимости температуры нагрева машины от времени работы

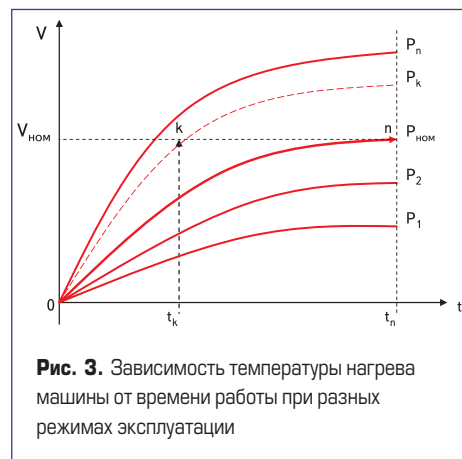


Рис. 3. Зависимость температуры нагрева машины от времени работы при разных режимах эксплуатации

пазоне мощностей электродвигателя ($P_1, P_2, \dots, P_{ном}, \dots, P_k, \dots, P_n$) графики $V(t)$ будут отличаться лишь ординатами (рис. 3).

Наибольшее допустимое для данной машины превышение температуры равно $V_{ном}$. Прямая, параллельная оси абсцисс $V_{ном}$ пересекает в разных точках кривые $V(t)$, соответствующие различным значениям нагрузки электродвигателя.

Абсцисса точки пересечения определяет тот промежуток времени t_k , в течение которого мощность двигателя может быть временно равна мощности P_k , представляющей собой перегрузку по отношению к его номинальной мощности в продолжительном режиме работы. Кривая нагревания, асимптотически приближающаяся к $V_{ном}$ через промежуток времени t_n , соответствует номинальной мощности электродвигателя $P_{ном}$. При нагрузках, меньших $P_{ном}$ мощность двигателя используется не полностью. Однако, если двигатель загружается до номинальной мощности только на относительно короткое время, то по сути он тоже используется не на полную мощность. Целесообразно его кратковременно перегрузить, и чем меньше продолжительность работы, тем больше должна быть эта перегрузка. Предел повышения нагрузки двигателя по мере уменьшения продолжительности включения определяется мгновенной перегрузочной мощностью двигателя, зависящей от его электромагнитных, механических и коммутационных свойств (максимального момента мощности на валу асинхронного двигателя, условий коммутации щеточно-коллекторного узла у машин постоянного тока и т. п.).

При повторно-кратковременном режиме электродвигатель попеременно то нагревается, то охлаждается. Изменение его температуры в течение времени каждого цикла «включение/выключение» зависит от предыдущего теплового состояния.

График зависимости нагревания и охлаждения машины от времени в подобных условиях показан на рис. 4.

Конечное превышение температуры каждой части этого цикла является начальным превышением температуры для последующей части цикла. Если во время той или иной части цикла наступает заметное изменение условий охлаждения электрической машины (остановка двигателя или существенное изменение частоты вращения ротора), то это изменяет значение постоянной времени нагрева маши-

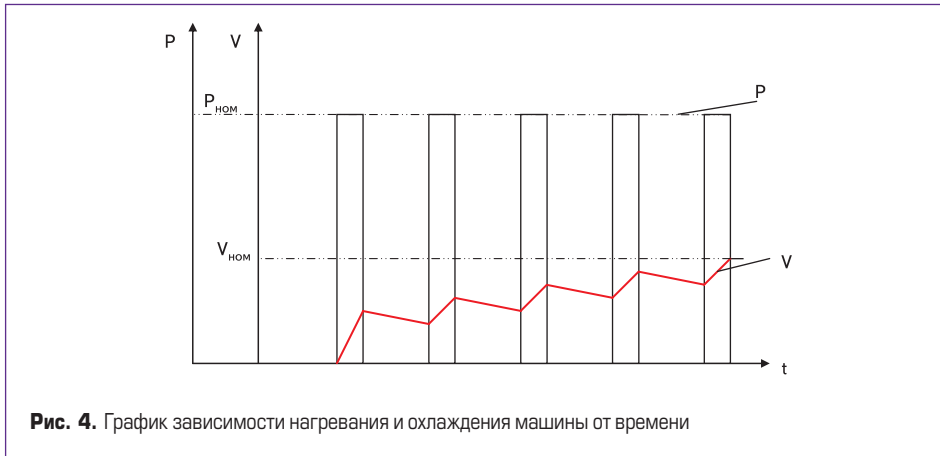


Рис. 4. График зависимости нагрева и охлаждения машины от времени

ны τ , что должно быть учтено при построении графиков.

Рассмотренные методы определения мощности электродвигателя по температурным условиям посредством построения графиков нагрева требуют значительной затраты времени и трудоемких аналитических расчетов. В то же время графический метод сам по себе содержит систематические ошибки и, в конце концов, не дает точных результатов. Графические методы приведены лишь для того, чтобы показать картину изменения нагрева двигателя при переменной нагрузке.

В большинстве случаев для такого выбора мощности электродвигателя применяются более простые, так называемые инженерные расчеты, в частности, эквивалентного тока. В основу метода эквивалентного тока положено допущение, что при переменной нагрузке двигателя его средние потери должны быть равны потерям при продолжительной (номинальной) нагрузке.

Как известно из теории электрических машин, мощность потерь двигателя складывается из постоянных $P_{пост}$ и переменных $P_{пер}$ мощностей. Мощность постоянных потерь равна сумме мощности потерь на трение, в магнитопроводе (у асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением), а также на возбуждение у синхронных двигателей и двигателей с параллельным возбуждением. Мощность переменных потерь можно считать пропорциональной квадрату рабочего тока I двигателя и сопротивлению соответствующей обмотки r , причем приближенно можно считать последнее постоянным. Если ток изменяется за соответствующие промежутки времени, то за все рабочее время $\Delta t = T$ суммарные потери энергии в двигателе будут равны

$$\Delta P_{\Sigma} = (P_{пост} + rI_1^2) t_1 + (P_{пост} + rI_2^2) t_2 + \dots + (P_{пост} + rI_k^2) t_k + \dots + (P_{пост} + rI_n^2) t_n \quad (10)$$

При переменной нагрузке эквивалентным током $I_{эк}$ за то же время работы электродвигателя T потери энергии в двигателе вычисляются по более простой формуле: (11)

$$\Delta P_{\Sigma}^{эк} = \sqrt{\frac{I_1^2 \times t_1 + I_2^2 \times t_2 + \dots + I_k^2 \times t_k + \dots + I_n^2 \times t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_k + \dots + t_n}} \quad (11)$$

Зная эквивалентный ток, номинальное напряжение и номинальный коэффициент мощности двигателя:

$$P_{ном} \geq U_{ном} I_{эк} \cos \varphi_{ном} \quad (12)$$

Метод эквивалентного тока можно применять лишь при условии постоянства мощности потерь в магнитопроводе и на трение, а также сопротивлений обмоток в течение всего рабочего времени T .

В ряде случаев условия нагрузки определяют непосредственный момент, требуемый от двигателя, а не ток. Тогда можно пользоваться методом эквивалентного момента: у всех электродвигателей вращающий момент на валу пропорционален произведению тока и магнитного потока. У двигателей переменного тока (синхронных и асинхронных) можно приближенно считать постоянным коэффициент мощности $\cos \varphi$.

При таких упрощениях можно вычислить вращающий момент:

$$M_{вр} = K_{вр} \times I, \quad (13)$$

где $K_{вр}$ — постоянная величина, откуда из приведенного выражения для эквивалентного тока $I_{эк}$ можно получить: (14).

Далее по эквивалентному моменту и номинальной угловой скорости двигателя $\omega_{ном}$ рассчитывается номинальная мощность двигателя электропривода:

$$P_{ном} = M_{вр.эк} \times \omega_{ном} \quad (15)$$

Для повышения надежности работы электропривода рекомендуется проверить, достаточен ли максимальный момент M_{max} двигателя для того, чтобы удовлетворить условия при кратковременных возможных перегрузках данного привода. Иными словами, должно быть выполнено следующее условие: коэффициент перегрузки двигателя $\omega_{ном}$ должен быть по абсолютной величине больше отношения максимального момента M_{max} нагрузки к номинальному моменту двигателя, то есть

$$\lambda_{ном} > |M_{max} / M_{ном}|. \quad (16)$$

На этом выбор мощности двигателя может быть закончен.

Для электропривода, работающего при длительной постоянной нагрузке, задача выбора электродвигателя (постоянного тока, асинхронного, синхронного) относительно проста.

В электроприводах, не требующих регулирования скорости в широком диапазоне, рекомендуется применять синхронные двигатели. Поскольку современный синхронный двигатель запускается в ход так же быстро, как и асинхронный, при этом он экономичнее, а его габариты меньше, чем у асинхронного двигателя той же мощности (у синхронного двигателя выше коэффициент мощности $\cos \varphi$ и больше максимальный момент M_{max} на валу).

Несмотря на то, что у асинхронных двигателей последнего поколения можно достаточно эффективно регулировать скорость вращения и осуществлять реверс с необходимым для работы электропривода моментом, для этого необходимо применять специальные устройства управления.

При подборе двигателя необходимо сопоставить условия работы электропривода (диапазон регулировки частоты вращения, необходимость реверса, частые пуски, большие изменения нагрузки) с механическими характеристиками различных видов электродвигателей.

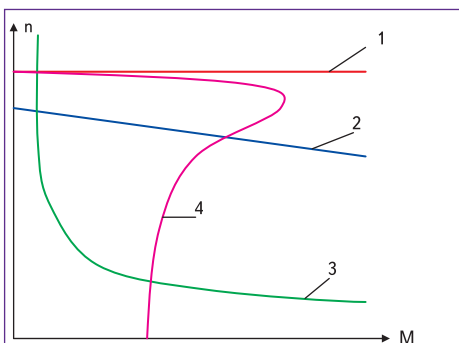
В электротехнике принято различать естественную и искусственную механические характеристики двигателя. Естественная характеристика двигателя (рабочим) условиям его включения, нормальной схеме соединений, а также отсутствию каких-либо добавочных элементов в цепях двигателя и соединения этих цепей по специальным схемам.

Важным критерием для оценки механических характеристик электродвигателя служит жесткость:

$$\lambda = \Delta M / \Delta n, \quad (17)$$

где ΔM — изменение момента на валу двигателя; Δn — изменение скорости вращения ротора двигателя.

В зависимости от значения жесткости принято делить механические характеристики на абсолютно жесткие, $\Delta n = 0, \lambda = \infty$ (такая характеристика свойственна синхронным двигателям), жесткие, у которых изменение частоты вращения мало $\lambda = 40 \dots 10$ (линейная часть характеристики асинхронного двигателя, характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением), мягкие с большим изменением частоты вращения, у которых $\lambda \leq 10$ (характеристика двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, искусственная характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором, искусственная характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением).



1 — абсолютно жесткая синхронного двигателя;
 2 — жесткая двигателя параллельного возбуждения;
 3 — мягкая двигателя последовательного возбуждения;
 4 — мягкая синхронного двигателя.

Рис. 5. Естественные механические характеристики различных видов двигателей

На рис. 5 представлены естественные механические характеристики различных видов двигателей.

Основанием для выбора вида двигателя зачастую являются требования к жесткости механической характеристики. Например, для подъемно-транспортных механизмов (кран-лебедка грузовых самолетов, лебедка подвески вертолета) желательна мягкая характеристика, а для механизма выпуска закрылков, предкрылков, тормозных щитков нужна очень жесткая характеристика.

При частых пусках и непостоянности нагрузки наиболее надежен, экономичен и прост в эксплуатации асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. При больших мощностях, если невозможно применить короткозамкнутый асинхронный двигатель, рекомендуется устанавливать асинхронный двигатель с фазным ротором.

Двигатель постоянного тока сложнее по конструкции, чем двигатель переменного тока (из-за наличия коллекторно-щеточного узла), стоит дороже, требует более тщательного ухода в эксплуатации и изнашивается быстрее. Однако в ряде случаев предпочтение отдается двигателю постоянного тока, который позволяет простыми средствами изменить частоту вращения электропривода в широких пределах.

Тип двигателя (его конструкция) выбирается в зависимости от условий окружающей среды. Необходимо учитывать принятие мер защиты окружающей среды от возможных искрообразований в двигателе (при наличии взрывоопасной атмосферы), а также самих двигателей от попадания в них влаги, пыли, химических веществ из окружающей среды.

Во многих случаях в авиационных и промышленных электроприводах возникает необходимость регулировки скорости вращения ротора двигателя.

Для регулировки частоты вращения двигателя существует два надежных метода:

1. Включение резисторов в цепи якорных обмоток ротора.
2. Переключение числа пар полюсов обмотки статора.

Применение первого метода рационально лишь при узких пределах регулирования при постоянстве момента на валу двигателя, а при-

менение второго обеспечивает только дискретное (ступенчатое) регулирование и на практике применяется в основном для маломощных приводов.

В настоящее время благодаря появлению мощных полупроводниковых приборов положение в этой области существенно изменилось. Современные электронные преобразователи дают возможность изменять в широком диапазоне частоту переменного тока, что позволяет плавно регулировать скорость вращения магнитного поля, а, следовательно, эффективно регулировать частоту вращения асинхронного и синхронного двигателей.

Так как же осуществляется управление двигателем электропривода? Управление электроприводами различного назначения может быть сведено к выполнению ряда основных операций — это пуск, торможение, реверсирование или стабилизация частоты вращения. В подавляющем большинстве случаев управление приводом осуществляется путем воздействия на электрический двигатель.

Статические свойства двигателей как объектов управления определяются семействами механических и регулировочных характеристик.

Механические характеристики определяют зависимость угловой скорости ω от развиваемого двигателем вращающего момента M_D :

$$\omega = f(M_D), \quad (18)$$

при некоторых постоянных значениях управляющего воздействия $x = \text{const}$.

Регулировочные характеристики определяются зависимостью $\omega = f(x)$ при $M_D = \text{const}$.

Рассмотрим наиболее применяемые методы управления авиационными и промышленными электроприводами.

Генераторный метод управления двигателями постоянного тока

При генераторном методе управление двигателем осуществляется путем изменения значения напряжения источника энергии, питающего электрический двигатель постоянного тока независимого возбуждения. В качестве источника энергии может быть использован как генератор постоянного тока, так и электромашинный усилитель (ЭМУ). В первом случае управление двигателем осуществляется по системе «генератор – двигатель» (Г – Д), известной также как *система Леонара*. Эта сис-

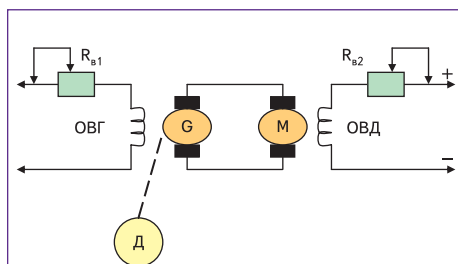


Рис. 6. Принципиальная схема генераторного метода управления двигателями постоянного тока

тема состоит из трех электрических машин: генератора Г, подключенного к зажимам якоря, управляемого двигателем (Д), вращающим генератор (рис. 6).

На рис. 6 приняты следующие обозначения: ОВГ — обмотка возбуждения генератора; ОВД — обмотка возбуждения двигателя; R_{g1} , R_{g2} — выносные регулировочные резисторы в цепях ОВГ и ОВД соответственно.

Во втором случае управление производится по системе «ЭМУ – двигатель» (ЭМУ – Д), которая также состоит из трех машин.

В обеих системах допускается использование двух ступеней управления. На первой ступени управление осуществляется при номинальном токе возбуждения двигателя путем воздействия на ток возбуждения генератора или ток в управляющей обмотке ЭМУ. Вторая ступень соответствует управлению двигателем путем изменения его тока возбуждения при номинальном режиме источника энергии (в системе «ЭМУ – Д» вторая ступень обычно не используется).

Вследствие хороших регулировочных свойств и энергетических соотношений на основе системы «Г – Д» созданы высокоэффективные системы управления, широко применяемые в радиолокационных установках, рулевых машинках автопилотов и т. п. В то же время необходимо отметить, что основные недостатки системы «Г – Д» — это сравнительно большие масса и габариты электрического привода.

Дискретный метод управления двигателями постоянного тока

При дискретном методе управление двигателем осуществляется путем периодического подключения цепи якоря двигателя к источнику питания. В этом случае используются двигатели с независимым возбуждением или с самовозбуждением от постоянных магнитов, а в качестве импульсных элементов, включающих и отключающих цепь якоря двигателя, — электронные схемы с широтно-импульсными модуляторами.

Простейшая схема импульсного управления двигателем при широтно-импульсной модуляции показана на рис. 7. Якорь двигателя М на время импульса подключается к источнику электрической энергии (ИЭЭ) через нормально замкнутые контакты НЗК-1 и НЗК-2, а в период паузы тормозится противовключением через нормально разомкнутые контакты НРК-1 и НРК-2.

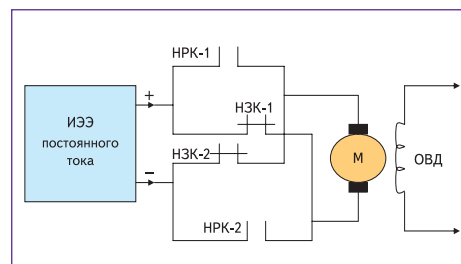


Рис. 7. Принципиальная схема дискретного метода управления двигателями постоянного тока

В данном электроприводе используется двигатель с независимой обмоткой возбуждения ОВД.

Такие системы управления применяются в большинстве случаев в следящих системах небольшой мощности: пилотажно-навигационных комплексах и радиотехнических системах.

В силовых электроприводах повышенной мощности часто для этих целей применяются управляемые диоды-тиристоры.

Основные факторы, которые обусловили широкое применение тиристорного электропривода в авиации, следующие:

- высокий КПД тиристорного преобразователя (0,95–0,97);
- относительно малые габариты и масса;
- незначительная мощность самих устройств управления.

Для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя тиристоры включаются в цепь статора или ротора. В первом случае

с их помощью можно регулировать амплитуду (фазное регулирование) или частоту (частотное регулирование) синусоидального напряжения на обмотках статора и, следовательно, вращающий момент на валу двигателя. Во втором случае можно изменять активное сопротивление цепи ротора и таким образом регулировать его частоту вращения.

Литература

1. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника / Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., переработанное. М.: Энергия, 2003.
2. Ломоносов В. Ю. и др. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Кудрявцев Г. Г. и др. Микропроцессоры в системах технического обслуживания средств связи и управления. М.: Радио и связь, 1999.
4. Бойцов В. А., Драчков В. Н. Электрооборудование воздушных судов и аэропортов. Ч. 2. Электротехническое оборудование аэропортов. СПб.: Академия ГА, 1994.
5. Бойцов В. А., Драчков В. Н. Электрооборудование воздушных судов и аэропортов. Ч. 1. Электрооборудование воздушных судов. СПб.: Академия ГА, 1994.
6. Тузов В. П. Электротехнические устройства летательных аппаратов / Учеб. пособие для неэлектрических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1997.
7. Драчков В. Н., Панферов В. В. Электротехника и электроника. Ч. 1. Электротехника / Учеб. пособие. СПб.: Академия ГА, 2006.
8. Драчков В. Н., Панферов В. В. Электротехника и электроника. Ч. 2. Электротехника / Учеб. пособие. СПб.: Академия ГА, 2004.