

В. П. АНДРЕЕВ и Ю. А. САБИНИН

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. П. АНДРЕЕВ и Ю. А. САБИНИН

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Допущено
Главным управлением политехнических
и машиностроительных вузов
Министерства Высшего образования СССР
в качестве учебного пособия
для энергетических и электротехнических
высших учебных заведений и факультетов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются основные сведения по теории электропривода и рассматривается комплекс вопросов, относящихся к выбору и практическому применению электроприводов различных систем.

Книга предназначается в качестве учебного пособия для студентов электротехнических и энергетических вузов и может служить практическим руководством для инженеров-электриков, работающих в области промышленного электропривода.

Авторы: Владимир Петрович Андреев
и Юрий Алексеевич Сабинин
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Редактор В. В. Рудаков

Технические редакторы А. А. Забродина и Л. Я. Медведев

Сдано в производство 17/X—56 г.

Подписано к печати 3/XII—56 г.

T-11817.

Печ. л. 45,9

Уч.-изд. л. 46,0

84×108¹/₁₆

Тираж 22 000 экз.

Цена в переплете № 5 17 р. 10 к., в переплете № 7 17 р. 60 к.

Заказ 1559

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный электропривод мыслим не иначе, как автоматизированный. Поэтому предлагаемую книгу, в которой рассматривается современный электропривод, точнее было бы назвать «Основы автоматизированного электропривода». Учитывая, однако, что по учебным планам высших технических учебных заведений соответствующая дисциплина сохраняет прежнее название — «Основы электропривода», это же название оставлено и за настоящей книгой.

Основной тенденцией в развитии производственных и технологических процессов в настоящее время является борьба за повышение производительности за счет увеличения скоростей движения рабочих органов машин-орудий и усилий, действующих на них. Это обстоятельство повысило требования к электроприводу и в свою очередь побудило авторов уделить в книге больше внимания вопросам расчета и анализа переходных процессов электроприводов, а также вопросам построения нагрузочных диаграмм и регулирования скорости.

Ограниченный объем книги лишил авторов возможности включить в нее численные примеры, иллюстрирующие теоретическое изложение. Поэтому в целях облегчения усвоения со-

державшегося в книге материала и его практического использования каждый раздел заканчивается указаниями порядка расчета.

Содержание настоящей книги соответствует программе курса «Основы электропривода», утвержденной Министерством высшего образования СССР для соответствующих специальностей политехнических, энергетических и электротехнических высших учебных заведений.

При написании книги авторами был использован богатый научный и методический опыт кафедры «Электрооборудование промышленных предприятий» и работы доктора технических наук профессора В. К. Полова, основателя этой кафедры.

В. П. Андреевым написаны главы первая, вторая, третья, пятая и седьмая, Ю. А. Сабининым — четвертая, шестая, восьмая, девятая и десятая.

Авторы с признательностью встретят критику и предложения, которые могли бы быть использованы в случае переиздания настоящей книги. Письма просьба направлять по адресу: Ленинград 41, Марсово поле 1, Л. О. Госэнергоиздата.

Авторы

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава первая

Введение

1-1. Понятие об электроприводе и его автоматизации	Стр. 7
1-2. Краткая история развития отечественного электропривода	8

Глава вторая

Механические характеристики электродвигателей

2-1. Общие замечания	10
2-2. Относительные единицы	11
2-3. Механические характеристики двигателя постоянного тока	12
2-4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при $\Phi = \text{const}$	13
2-5. Механические характеристики двигателя независимого возбуждения при ослабленном магнитном потоке	28
2-6. Механические характеристики двигателя независимого возбуждения при шунтировании якоря	31
2-7. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения	35
2-8. Сложные искусственные схемы включения двигателя последовательного возбуждения	45
2-9. Механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения	50
2-10. Механические характеристики системы генератор-двигатель	53
2-11. Механические характеристики системы генератор-двигатель с трехобмоточным генератором	55
2-12. Механические характеристики системы генератор-двигатель с машинами последовательного возбуждения	62
2-13. Механические характеристики системы генератор-двигатель с генератором смешанного и двигателем последовательного возбуждения	64
2-14. Механические характеристики асинхронных двигателей	67
2-15. Механические характеристики асинхронных двигателей при симметричных режимах	74
2-16. Тормозные режимы асинхронных двигателей	80
2-17. Механические характеристики асинхронных двигателей при несимметричных режимах	91
2-18. Механические характеристики двухдвигательного привода	96
2-19. Механические характеристики синхронных двигателей	98

2-20. Принцип действия и устройство трехфазного коллекторного двигателя с питанием со стороны ротора	102
2-21. Механические характеристики трехфазного коллекторного двигателя с питанием со стороны ротора	104

Глава третья

Основы динамики электропривода

3-1. Уравнение движения электропривода	108
3-2. Приведение статических моментов и усилий	112
3-3. Приведение маховых масс к одной оси	116
3-4. Экспериментальное определение моментов инерции	116
3-5. Приведение масс, движущихся поступательно, к вращательному движению и обратно	119
3-6. Определение приведенных моментов инерции и усилий в механизме с кривошипной передачей	120
3-7. Учет потерь в передачах	124
3-8. Время пуска и торможения электропривода	129
3-9. Угол поворота вала двигателя за время пуска и торможения	132
3-10. Потери энергии при пуске электропривода	133
3-11. Потери энергии при торможении электродвигателей	135
3-12. Выбор номинальной скорости вращения электродвигателя	137

Глава четвертая

Переходные режимы электроприводов

4-1. Практическое значение изучения переходных режимов и нагрузочных диаграмм электроприводов	141
4-2. Особенности рассмотрения переходных режимов	143
4-3. Характер статического момента различных рабочих машин	144
4-4. Основные понятия об устойчивости работы электрифицированного агрегата	146
4-5. Механические переходные режимы электропривода с линейной механической характеристикой при постоянном статическом моменте	149
4-6. Пусковой режим электропривода с линейной механической характеристикой при $M_c = \text{const}$	153
4-7. Тормозные режимы электропривода с линейной механической характеристикой при $M_c = \text{const}$	155
4-8. Механические переходные режимы электропривода с линейной механической характеристикой при статическом моменте, зависящем от скорости	158

4-9.	Основные методы графического и графоаналитического интегрирования уравнения движения привода. Принцип пропорций	161
4-10.	Переходные режимы электропривода с линейной характеристикой при статическом моменте, зависящем от пути	166
4-11.	Переходные режимы электропривода с линейной механической характеристикой при статическом моменте, зависящем от скорости и пути $M_c = f(v, a)$	173
4-12.	Переходные режимы электропривода с линейной механической характеристикой при статическом моменте, зависящем от времени	174
4-13.	Механические переходные режимы электроприводов с двигателями постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения при $M_c = \text{const}$ и $M_c = f(v)$	177
4-14.	Механические переходные режимы электроприводов с двигателями последовательного и смешанного возбуждения при $M_c = f(a)$ и $M_c = f(v, a)$	179
4-15.	Расчет переходных режимов при переменном моменте инерции	181
4-16.	Электромеханические переходные режимы электроприводов с двигателями постоянного тока независимого возбуждения при $M_c = \text{const}$	184
4-17.	Динамическое падение скорости двигателя независимого возбуждения при ударной нагрузке и способы его уменьшения	192
4-18.	Электромеханические переходные режимы приводов с двигателями последовательного и смешанного возбуждения	195
4-19.	Переходные процессы в цепи обмотки возбуждения. Форсированное изменение тока возбуждения генераторов и двигателей	197
4-20.	Переходные режимы системы генератор-двигатель	204
4-21.	Процесс пуска двигателя в системе генератор-двигатель	208
4-22.	Торможение и реверс двигателя в системе генератор-двигатель	210
4-23.	Переходные режимы в квадратичной системе генератор-двигатель	213
4-24.	Экспериментальное определение параметров электропривода	215
4-25.	Графоаналитические методы исследования переходных режимов в цепях возбуждения машин постоянного тока	219
4-26.	Графоаналитические методы исследования электромеханических переходных режимов приводов постоянного тока	224
4-27.	Переходные режимы электроприводов с асинхронными двигателями	236
4-28.	Аналитическое рассмотрение переходных режимов электроприводов с асинхронными двигателями при $M_c = 0$	238
4-29.	Аналитическое рассмотрение переходных режимов электроприводов с асинхронными двигателями при $M_c = \text{const}$	240
4-30.	Потери энергии при переходных режимах в цепях ротора и статора асинхронного двигателя	244
4-31.	Динамическое торможение электроприводов с асинхронными двигателями	246
4-32.	Переходные режимы приводов с синхронными двигателями	247

4-33. Переходные режимы приводов с синхронными двигателями, связанные с изменением статической нагрузки	248
4-34. Пуск синхронного двигателя	254
4-35. Торможение синхронного двигателя	256

Глава пятая

Выбор мощности электродвигателя

5-1. Основания выбора мощности электродвигателя	257
5-2. Нагревание и охлаждение электродвигателя	260
5-3. Постоянная нагрева	264
5-4. Определение повышения температуры электрической машины	267
5-5. Классификация режимов работы электроприводов	268
5-6. Выбор мощности двигателя при длительном режиме работы	269
5-7. Расчет мощности двигателя для длительного режима переменной нагрузки по методу средних потерь	270
5-8. Определение потерь и коэффициента полезного действия электродвигателя	273
5-9. Определение мощности двигателя по методу эквивалентного тока	274
5-10. Метод эквивалентного момента	278
5-11. Метод эквивалентной мощности	279
5-12. Выбор мощности двигателя для кратковременного режима работы	280
5-13. Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременной работы	283
5-14. Допустимое число включений в час двигателей с короткозамкнутым ротором при повторно-кратковременном режиме работы	290

Глава шестая

Нагрузочные диаграммы электроприводов

6-1. Нагрузочные диаграммы привода и рабочей машины	292
6-2. Предварительный выбор двигателя	293
6-3. Упрощенное построение нагрузочных диаграмм	294
6-4. Нагрузочные диаграммы электропривода с линейной механической характеристикой при пиковой нагрузке	296
6-5. Выбор оптимального значения электромеханической постоянной и момента инерции системы привод-рабочая машина	299
6-6. Расчет привода при регулярной пиковой нагрузке	301
6-7. Привод с жидкостным автоматическим ограничителем тока	304
6-8. Привод с контакторным автоматическим ограничителем тока	307

Глава седьмая

Регулирование скорости электроприводов

7-1. Требования к регулируемому приводу . . .	310
7-2. Классификация методов регулирования скорости вращения электроприводов . . .	313
7-3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением . .	313
7-4. Регулирование скорости двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением	316

7-5. Регулирование скорости изменением напряжения подводимого к якору двигателя постоянного тока	318
7-6. Система согласного-встречного включения	318
7-7. Система генератор-двигатель	319
7-8. Электромашинные усилители	321
7-9. Многообмоточный регулирующий возбудитель	323
7-10. Электромашинный усилитель с самовозбуждением	324
7-11. Двухкаскадный электромашинный усилитель с самовозбуждением	330
7-12. Электромашинный усилитель с поперечным полем	332
7-13. Схемы включения ЭМУ с поперечным полем	336
7-14. Ионный электропривод	344
7-15. Механические характеристики ионного электропривода	345
7-16. Коэффициент мощности ионного привода	349
7-17. Обратные связи ионного электропривода	350
7-18. Техничко-экономические показатели ионного электропривода	352
7-19. Области применения ионного электропривода	353
7-20. Регулирование скорости электродвигателей переменного тока	354
7-21. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением активного сопротивления в цепи ротора	354
7-22. Регулирование скорости изменением индуктивного сопротивления в цепи статора	355
7-23. Регулирование скорости асинхронных двигателей переключением обмоток на различное число пар полюсов	357
7-24. Импульсное регулирование скорости вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	361
7-25. Регулирование скорости асинхронных двигателей изменением частоты питающей сети	363
7-26. Каскадные установки асинхронных двигателей с коллекторными машинами	367
7-27. Каскад асинхронного двигателя с машиной постоянного тока	371
7-28. Каскад асинхронного двигателя и машины постоянного тока с двигатель-генераторным преобразователем	374
7-29. Каскад асинхронного двигателя и машины постоянного тока с ионным преобразователем	375
7-30. Каскадное соединение асинхронного двигателя с компенсированной коллекторной машиной с возбуждением со стороны статора (каскад Шербиуса)	376
7-31. Перспективы применения каскадных установок	379

Глава восьмая

Синхронное вращение электродвигателей

8-1. Работа двигателей на общий вал	380
8-2. Системы синхронного вращения	382
8-3. Система синхронного вращения со вспомогательными синхронными машинами	383
8-4. Система синхронного вращения со вспомогательными асинхронными машинами	384
8-5. Синхронизация вращения асинхронных двигателей посредством включения роторных цепей на общий реостат	391
8-6. Предварительная синхронизация системы синхронного вращения по однофазной схеме. Переходные процессы в системе синхронного вращения	396
8-7. Синхронизация хода коллекторных двигателей постоянного и переменного тока	398
8-8. Двухдвигательный привод с асинхронными двигателями с поворотным статором	399
8-9. Системы дистанционной передачи угла поворота	401

Глава девятая

Электроприводы с автоматическим регулированием

9-1. Применение регуляторов в приводах исполнительных механизмов	405
9-2. Структура систем регулирования	406
9-3. Основные принципы работы регуляторов	407
9-4. Примеры регуляторов напряжения и скорости	412
9-5. Системы согласованного вращения	415
9-6. Особенности работы многодвигательного привода по системе генератор-двигатель при поддержании требуемого соотношения скоростей воздействием на ток возбуждения двигателя	419
9-7. Системы согласованного вращения с регуляторами, воздействующими на напряжение, подводимое к якору двигателя	421
9-8. Автоматическое регулирование натяжения при намотке ленточного материала	423
9-9. Анализ работы электроприводов с автоматическим регулированием	426
9-10. Понятие о следящем приводе	427
9-11. Основы динамики следящего привода	430

Глава десятая

Основные задачи проектирования электроприводов и выбор типа привода

10-1. Последовательность проектирования электропривода	438
10-2. Выбор рода тока и типа привода	437
10-3. Выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока	439
Литература	443

ГЛАВА ПЕРВАЯ ВВЕДЕНИЕ

1-1. Понятие об электроприводе и его автоматизации

Основным условием роста производительности труда и увеличения социалистического производства является обеспечение постоянного технического прогресса.

Тяжелой индустрии принадлежит ведущая роль в создании материально-производственной базы коммунизма. Она составляет прочный фундамент всего народного хозяйства и источник неуклонного роста благосостояния советского народа.

Машиностроение — сердцевина индустрии. От темпов развития машиностроения в значительной степени зависят дальнейший технический прогресс, повышение технического уровня всей промышленности, механизация и автоматизация производственных процессов, успешное решение задач неуклонного повышения производительности труда и дальнейшего подъема всех отраслей народного хозяйства.

Техническое совершенство производственного механизма и осуществляемого им технологического процесса в значительной мере определяются совершенством соответствующего электропривода и степенью автоматизации последнего на электрической основе.

Автоматизированный электропривод — комплекс электрических машин, аппаратов и систем управления, в котором электродвигатели связаны конструктивно в одно целое с исполнительным механизмом. Параметры отдельных элементов электропривода должны быть выбраны таким образом, чтобы была обеспечена возможность выполнения требуемого производственного процесса.

Развитие автоматизированного электропривода проходило отдельными этапами.

Начальная стадия развития электропривода состояла в совершенствовании его составных элементов: электродвигателей, аппаратуры управления двигателем и передаточных

звеньев между двигателем и исполнительным механизмом. Основной тенденцией этого этапа являлось разукрупнение электропривода: замена одного централизованного электропривода рядом отдельных, по своим характеристикам наиболее полно соответствующих требованиям производственных механизмов.

Подобное разукрупнение вызывало расчленение машины-орудия на ряд узлов, приводимых в движение отдельными электродвигателями. Следствием этого явилось приближение электродвигателей к рабочим органам машины. При этом приближение или даже непосредственная связь отдельных двигателей с соответствующими рабочими узлами машины давали большое упрощение кинематической схемы машины-орудия. Естественно, что упрощение кинематики машины-орудия за счет перехода от группового или даже от одиночного привода к многодвигательному обуславливал значительное усложнение как самого электропривода, так и систем управления им.

Комплекс, состоящий из отдельных рабочих узлов производственной машины, органически связанных с соответствующими электроприводами и объединенный общим производственным процессом, носит название электрифицированного агрегата.

Процесс развития автоматизации электроприводов может быть разбит на два основных этапа. К первому этапу необходимо отнести создание устройств автоматического управления в узком смысле этого понятия, а именно устройств, предназначенных для выполнения операций управления собственно электроприводом. Они включают операции пуска, торможения, реверса, изменения скорости, остановки механизма в заданной точке пути.

Вторым этапом является разработка и внедрение устройств автоматического управления и регулирования, назначение которых заключается в обеспечении определенных условий

протекания рабочего процесса: поддержание неизменной или изменяющейся по заданному графику скорости отдельных звеньев рабочей машины или их соотношений, обеспечение требуемого технологического режима. При этом следует отметить, что системы автоматического управления на начальном этапе в основном были контактно-релейные. Наоборот, системы управления, получающие распространение в настоящее время, являются системами непрерывного управления, в которых широко используется ионно-электронная, магнитная и другая бесконтактная аппаратура. В системах автоматического управления при их полной автоматизации находят применение устройства автоматического контроля, защиты и сигнализации.

1-2. Краткая история развития отечественного электропривода

Создание Б. С. Якоби первого электродвигателя постоянного тока на принципе вращательного движения в 1834 г. и использование этого двигателя для приведения в движение катера в 1838 г. являются датами создания первого промышленного образца электропривода. Несовершенство самого двигателя и неэкономичность гальванической батареи, питавшей двигатель, были причинами, не позволившими данной системе в то время найти практического применения. Работы Б. С. Якоби в области создания электропривода впоследствии были продолжены рядом изобретателей.

Несмотря на настойчивые искания и успешные работы русских ученых и изобретателей в области развития электротехники и электропривода, их идеи не смогли получить широкого применения в условиях капиталистической России.

Совершенно по-новому были поставлены вопросы электрификации народного хозяйства в молодой Советской республике. Глубокий марксистский анализ привел В. И. Ленина к заключению, что создание крупной машинной индустрии, как материальной основы социализма, может быть воплощено в социалистической реорганизации и технической реконструкции всего народного хозяйства на базе передовой техники и электрификации страны. В. И. Ленин указал, что основным звеном, решающим восстановление разрушенного хозяйства и обеспечивающим дальнейшее развитие производительных сил страны, строящей социализм, является глубокая и всесторонняя электрификация. Под непосредственным руководством В. И. Ленина был разработан план

ГОЭЛРО, план электрификации народного хозяйства. Этот план, справедливо названный «второй программой партии», более чем на полтора десятилетия определил направление развития всего народного хозяйства.

Реконструкция промышленности, реализация первого и последующих пятилетних планов индустриализации страны вызвали строительство многочисленных крупных предприятий в различных отраслях промышленности.

Ведущие заводы электропромышленности: завод «Электросила» имени С. М. Кирова, Харьковский. Электромеханический завод (ХЭМЗ) и «Динамо» имени С. М. Кирова наряду с изготовлением широкой номенклатуры электродвигателей освоили производство электроприводов для металлургической промышленности, бумажных машин, шахтного электрооборудования и целого ряда других сложных производств.

Резко возросшие потребности в разработке специализированных электроприводов привели к созданию ряда проектных и научно-исследовательских организаций: Гипромеза, Гипрошахта, Гипрохима, ГПИ Тяжпромэлектропроекта, ЦКБ «Электропривод», Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (ЭНИМС), Центрального научно-исследовательского института тяжелого машиностроения (ЦНИИТМАШ) и других.

Широкая научно-исследовательская работа в области электропривода и его автоматизации велась Институтом автоматики и телемеханики АН СССР, отраслевыми научно-исследовательскими учреждениями и высшими учебными заведениями — Московским Энергетическим, Ленинградским Политехническим, Ленинградским Электротехническим и другими институтами.

Непрерывное развитие и совершенствование электропривода в Советском Союзе имеет своим источником работы ученых нашей страны по созданию и совершенствованию теории электропривода как специальной отрасли прикладного знания. Наиболее ранней работой по теории электропривода является труд Д. А. Лачинова «Электромеханическая работа», опубликованная в 1880 г. На базе работ Д. А. Лачинова профессора Ленинградского электротехнического института П. Д. Войнаровский в 1900 г. и В. В. Дмитриев в 1903 г. выпустили литографированные пособия по курсу «Электрическая передача и распределение механической энергии», а в 1915 г. В. В. Дмитриев издал курс «Электрическое распределение механической энергии на фабриках и заводах».

Теория электропривода в современном ее понимании, выделившаяся в самостоятельную дисциплину, впервые была оформлена в трудах С. А. Ринкевича (1925, 1933 и 1938 гг.) и В. К. Попова (1932, 1939, 1945, 1951 гг.). Дальнейшее развитие теории электропривода получила в трудах В. С. Кулебакина, Р. Л. Аронова, Д. П. Морозова, А. Т. Голована, М. Г. Чиликина и др. Вопросы автоматического управления электроприводами развиты в трудах В. К. Попова, Д. В. Васильева, И. Н. Казанцева, В. А. Булгакова, А. Б. Челюсткина, Е. А. Розенмана, А. Я. Лернера, С. Н. Вешеневского и др.

Вопросы электропривода отдельных видов производственных механизмов освещены в трудах Д. П. Морозова, Н. П. Куницкого, Н. А. Тищенко (прокатные станы), В. И. Ильинского (механизмы доменного цеха), А. Т. Голована (кузнечно-прессовые машины), С. А. Пресса, Т. Н. Соколова (металлорежущие станки), Н. П. Куницкого, А. В. Фатеева (подъемно-транспортные механизмы), К. В. Урнова (полиграфические машины), П. К. Куликовского (машины целлюлозно-бумажной промышленности), Ф. Н. Шклярского, Б. В. Уманского, В. С. Тулина (горный электропривод), В. И. Полонского, В. М. Алексеева, Н. М. Хомякова (корабельные электроприводы).

За годы пятилеток народное хозяйство страны в больших размерах оснащалось новой техникой. Рост ведущей отрасли тяжелой индустрии — машиностроения — дал возможность

повысить уровень механизации тяжелых и трудоемких работ во всех отраслях промышленности. Однако в свете новых задач, поставленных перед нашей страной решениями XX съезда КПСС, достигнутый уровень механизации и автоматизации производства нельзя считать достаточным.

Директивами XX съезда партии по шестому пятилетнему плану предусматривается осуществить в больших размерах во всех отраслях промышленности комплексную механизацию основных и вспомогательных работ, внедрить в широких масштабах автоматизацию производственных процессов, перейти от автоматизации отдельных агрегатов и операций к автоматизации цехов, технологических процессов и созданию полностью автоматизированных предприятий.

Нашим ученым и инженерам предстоит разработать новые средства и системы автоматики на основе использования последних достижений физики, электроники и радиотехники. Это позволит обеспечить необходимое развитие работ по автоматизации и широко открыть дорогу к комплексной автоматизации производства.

Богатый практический опыт, накопленный многочисленным отрядом специалистов по автоматизированному электроприводу за последние пятилетки, дает гарантию, что они смогут успешно решить задачи, поставленные перед ними страной.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

2-1. Общие замечания

Правильный выбор электропривода является обязательным условием производительной и экономичной работы производственной машины. Электропривод должен обеспечивать наиболее благоприятное протекание как статических (установившихся), так и переходных режимов пуска, приема, сброса нагрузки и торможения исполнительного механизма. Протекание этих процессов в первую очередь определяется характером зависимости скорости вращения двигателя от развиваемого им момента.

Механической характеристикой электродвигателя называют зависимость $n = f(M)$ или $\omega = \varphi(M)$. Эти зависимости являются одним из основных критериев при выборе типа двигателя для исполнительного механизма и имеют важное значение для оценки электро-механических свойств электродвигателя.

Механические характеристики определяют-ся, с одной стороны, электро-механическими свойствами самого электродвигателя, а с другой — величинами сопротивлений и способом включения их в цепь электродвигателя.

Различают механические характеристики естественные и искусственные. Естественной механической характеристикой называют зависимость скорости двигателя от его момента, т. е. $n = f(M)$ или $\omega = \varphi(M)$ при номинальных параметрах питающей сети, нормальной схеме включения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепи двигателя. Так, естественная характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения представляет зависимость $n = f(M)$ при номинальных значениях напряжения и магнитного потока и при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря.

Искусственная механическая характеристика двигателя — зависимость $n = f(M)$ при питании двигателя от сети с напряжением, от-

личным от номинального, наличии добавочных сопротивлений или при включении двигателя по специальным схемам.

Иногда механической характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость $n = \psi(I)$ или $\omega = \psi(I)$.

Механические характеристики различаются по степени изменения скорости двигателя при увеличении момента нагрузки.

Критериями для оценки характеристик могут служить их жесткость, равная отношению:

$$\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n}$$

или крутизна

$$\beta = \frac{\Delta n}{\Delta M}$$

Для определения жесткости механической характеристики и ее крутизны в относительных единицах необходимо падение скорости на рассматриваемом участке характеристики и соответствующее изменение момента брать в процентах или относительных единицах.

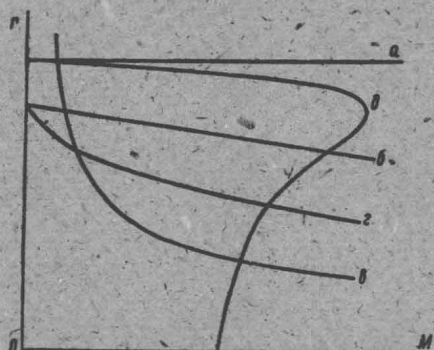
Все механические характеристики могут быть разбиты на следующие группы:

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика со строго постоянной скоростью вращения, например характеристика синхронного двигателя (фиг. 2-1, а); жесткость ее будет:

$$\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n} = \infty.$$

2. Жесткая характеристика со сравнительно небольшим падением скорости при возрастании момента; жесткость ее составляет $\alpha = 40 - 10$. К этой категории относятся характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения, асинхронных двигателей в своей линейной части и некоторых коллекторных (фиг. 2-1, б).

3. Мягкая характеристика с большим относительным падением скорости при увеличении



Фиг. 2-1. Различные виды механических характеристик электродвигателей:

а — абсолютно жесткая синхронного двигателя; б — жесткая двигателя постоянного тока независимого возбуждения; в — мягкая двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; г — мягкая двигателя постоянного тока смешанного возбуждения; д — асинхронная характеристика

момента. Жесткость ее может быть от $\alpha = 10$ и менее. Такими характеристиками обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, некоторые коллекторные двигатели переменного тока, двигатели постоянного тока независимого возбуждения с большим сопротивлением в цепи якоря, асинхронные с фазным ротором с большим добавочным сопротивлением во вторичной цепи (фиг. 2-1, в).

Асинхронная характеристика от синхронной скорости до точки, близкой к критическому скольжению, обладает жесткостью $\alpha = 92-90$; от точки критического скольжения до остановки и далее в сторону отрицательной скорости — мягкая с большим падением скорости (фиг. 2-1, г).

Выбор характеристики определяется требованиями производственного механизма. В частности, непрерывная холодная прокатка стальной ленты, производство бумаги, ротационная печать требуют очень жестких характеристик. Наоборот, некоторые подъемно-транспортные механизмы более производительнее работают с приводами, обладающими мягкими характеристиками.

2-2. Относительные единицы

При расчетах различного рода электроприводов часто бывает необходимо сравнивать и оценивать варианты, выполненные с двигателями, отличающимися по своим номинальным данным. Непосредственное сравнение полученных результатов не может служить объективным критерием преимуществ сравниваемых вариантов. При рассмотрении, например, процесса пуска двух двигателей постоянного тока

на различное номинальное напряжение сравнение значений пускового тока не позволит сделать заключение о том, где условия пуска будут легче. Также нельзя будет сделать заключение о величине сопротивлений на отдельных ступенях. Для устранения неопределенности в подобных случаях целесообразно вести расчеты не в абсолютных единицах (омах, амперах и т. д.), а в относительных отвлеченных единицах, называемых иногда долевыми, или в процентах. Использование относительных единиц делает ненужным переход от одних единиц к другим, от одних измерений к другим и позволяет с помощью специально построенных универсальных кривых непосредственно определять параметры двигателя, необходимые для получения желаемых характеристик.

Для выражения какой-нибудь величины в относительных единицах необходимо ее абсолютное значение отнести к аналогичной величине, принятой условно за единицу.

Выбор основных единиц вообще может быть произвольным, но обычно используются следующие:

- $U_{ном}$ — номинальное напряжение;
- $I_{ном}$ — номинальный ток;
- $M_{ном}$ — номинальный момент;
- $r_{ном}$ — номинальное сопротивление, равное частному, от деления номинального напряжения на номинальный ток двигателя;
- $n_{ном}$ — номинальная скорость вращения в об/мин.

Для синхронных и асинхронных двигателей за основную единицу скорости принимают n_0 — синхронную скорость. Аналогично для двигателей постоянного тока независимого возбуждения n_0 — скорость идеального холостого хода, при которой индуктированная э. д. с. равна напряжению сети.

В последующем изложении величины в относительных единицах будут изображаться малыми буквами греческого алфавита, относительные величины, выраженные в процентах, — теми же греческими буквами со знаком %. Таким образом, напряжение в относительных единицах будет:

$$u = \frac{U}{U_{ном}}; \quad (2-1)$$

напряжение в процентах будет:

$$u\% = \frac{U}{U_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2-1')$$

В асинхронных двигателях целесообразно различать два номинальных напряжения: линейное напряжение статора и э. д. с. ротора при неподвижном роторе.

Ток в относительных единицах.

$$i = \frac{I}{I_{ном}}, \quad (2-2)$$

или в процентах

$$i\% = \frac{I}{I_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2-2')$$

В соответствии с данным выше определением, номинальное сопротивление

$$r_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}. \quad (2-3)$$

Сопротивление в относительных единицах

$$r = \frac{r}{r_{ном}}, \quad (2-4)$$

или

$$r\% = \frac{r}{r_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2-4')$$

Относительное или процентное значение сопротивления может быть получено из соответствующих значений тока и напряжения:

$$r = \frac{r}{r_{ном}} = \frac{\frac{U}{I}}{\frac{U_{ном}}{I_{ном}}} = \frac{v}{i} \quad \text{или} \quad r\% = \frac{v\%}{i\%} \cdot 100\%. \quad (2-5)$$

Под номинальным сопротивлением ротора асинхронного двигателя понимается активное сопротивление каждой фазы роторной цепи, состоящее из активного сопротивления обмотки ротора и внешнего сопротивления, которое при номинальном напряжении и частоте на обмотках статора обусловит номинальный ток в обмотках неподвижного ротора. Полное номинальное сопротивление ротора для соединения обмоток звездой или эквивалентное приведенное к звезде в случае соединения треугольником будет:

$$z_{2ном} = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3}I_{2ном}}, \quad (2-6)$$

где $E_{2ном}$ — э. д. с. неподвижного ротора, а $I_{2ном}$ — номинальный ток ротора.

Асинхронные двигатели обычно имеют $x_2 \ll z_{2ном}$; в частности, для двигателей серии

МТ $x_2 \approx (0,1-0,05)z_{2ном}$. Поэтому практически можно принять $r_{2ном} \approx z_{2ном}$ или

$$r_{2ном} = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3}I_{2ном}} = \frac{E_{2ном}}{1,73I_{2ном}}. \quad (2-7)$$

Сопротивление обмотки фазы в случае соединения треугольником может быть найдено из соотношения:

$$r_{2\Delta} = \frac{1}{3} r_{2\lambda}.$$

Значение момента двигателя в относительных единицах равно:

$$\mu = \frac{M}{M_{ном}} \quad (2-8)$$

или

$$\mu\% = \frac{M}{M_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2-8')$$

Скорость вращения в относительных единицах равна:

$$v = \frac{n}{n_0}; \quad (2-9)$$

$$v\% = \frac{n}{n_0} \cdot 100\%. \quad (2-9')$$

Для двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения в качестве основной единицы принимают номинальную скорость $n_{ном}$:

$$v = \frac{n}{n_{ном}}; \quad (2-9)$$

$$v\% = \frac{n}{n_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2-9')$$

Скольжение асинхронного двигателя может быть выражено через скорость в относительных единицах:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - v \quad (2-10)$$

или

$$s\% = 100 - v\%. \quad (2-10')$$

2-3. Механические характеристики двигателя постоянного тока

Выше было указано, что характеристики двигателей должны выбираться в соответствии с требованиями производственного механизма. В тех случаях, когда естественные характеристики имеющихся типов двигателей не удовлетворяют предъявляемым требованиям, приходится получать искусственные характеристики путем изменения включения обмоток машины

сопротивлений и приложенного напряжения. К искусственным схемам приходится прибегать также для изменения скорости, для осуществления пуска и торможения и т. д.

Математическое выражение механической характеристики $n = f(M)$ двигателя постоянного тока может быть установлено с помощью уравнения равновесия электродвижущих сил в цепи якоря вращающегося двигателя и выражения развиваемого им электромагнитного момента:

$$U = E + I_a r \quad (2-11)$$

и

$$M = \frac{pN}{2\pi \cdot 9,81a} \Phi I_a [\kappa \Gamma \text{м}]. \quad (2-12)$$

Э. д. с. машины постоянного тока пропорциональна величине магнитного потока и скорости вращения якоря:

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi n [\text{в}]. \quad (2-13)$$

В выражениях (2-12) и (2-13)

- p — число пар полюсов двигателя;
- N — число активных проводников обмотки якоря;
- a — число параллельных ветвей обмотки якоря;
- Φ — магнитный поток одного полюса в вб;
- n — скорость вращения якоря в об/мин;
- I_a — ток якоря в а;
- r — сопротивление цепи якоря.

Для упрощения выражений (2-12) и (2-13) заменим входящие в них постоянные, определяемые конструктивными параметрами машины:

$$c_E = \frac{pN}{60a} \quad \text{и} \quad c_M = \frac{pN}{2\pi \cdot 9,81a} \quad (2-14)$$

Сравнивая значения коэффициентов c_E и c_M , видим, что

$$\frac{c_E}{c_M} = 1,03. \quad (2-14')$$

После подстановки коэффициентов c_E и c_M в (2-12) и (2-13) получим:

$$M = c_M \Phi I_a; \quad (2-12')$$

$$E = c_E \Phi n. \quad (2-13')$$

Из выражения (2-13') следует, что скорость вращения двигателя постоянного тока пропорциональна его э. д. с. и обратно пропорциональна величине магнитного потока:

$$n = \frac{E}{c_E \Phi}. \quad (2-15)$$

Ввиду того, что э. д. с. работающего под нагрузкой двигателя непосредственно измерить нельзя, целесообразно выразить ее через приложенное к двигателю напряжение и падение напряжения в цепи якоря

$$E = U - I_a r.$$

Подставляя значение э. д. с. в выражение скорости двигателя (2-15) и заменяя ток якоря через момент $I_a = \frac{M}{c_M \Phi}$, получим общее уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r}{c_E \Phi c_M \Phi} M. \quad (2-16)$$

2-4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при $\Phi = \text{const}$

При выводе аналитического выражения механической характеристики делают следующие допущения: напряжение питающей сети принимают постоянным и равным номинальному; влияние реакции якоря не учитывают, полагая, что машина — с добавочными полюсами и компенсационной обмоткой, т. е. считают магнитный поток постоянным; температура обмоток принимается неизменной и сопротивление их постоянным.

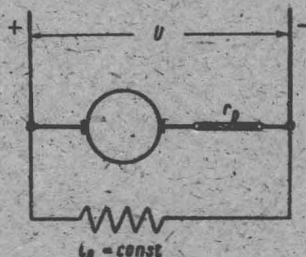
Схема включения в сеть двигателя независимого возбуждения приведена на фиг. 2-2.

Механическая характеристика, как это следует из общего уравнения (2-16), при $\Phi = \text{const}$ представляет собой в координатах n и M прямую линию:

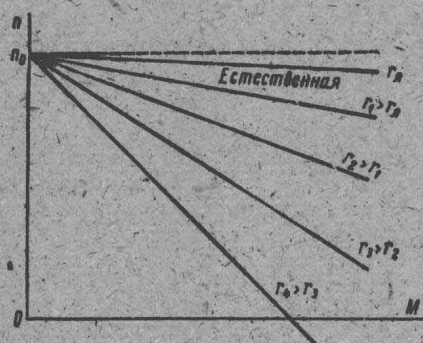
$$n = n_0 - \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi} M, \quad (2-17)$$

где $n_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$,

r_p — сопротивление реостата.



Фиг. 2-2. Схема включения двигателя независимого возбуждения



Фиг. 2-3. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, равен скорости вращения двигателя, когда его э. д. с. становится равной приложенному напряжению. Скорость n_0 называется скоростью идеального холостого хода. Теоретически она может иметь место при холостом ходе двигателя, когда электромагнитный момент равен нулю. Практически скорость идеального холостого хода может быть получена в случае действия на вал двигателя внешнего момента, преодолевающего неизбежные сопротивления — момент трения, вентиляционные потери и потери в стали.

Угловой коэффициент — тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс —

$$b = \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi}$$

определяется сопротивлением цепи якоря двигателя и величиной магнитного потока. Вводя n_0 и b в выражение (2-16), получим уравнение механической характеристики:

$$n = n_0 - bM. \quad (2-18)$$

Возрастание сопротивления в цепи якоря повышает угловой коэффициент прямой и делает характеристику более мягкой.

Механические характеристики двигателя независимого возбуждения для различных сопротивлений цепи якоря представлены на фиг. 2-3. Верхняя характеристика, соответствующая случаю отсутствия добавочного сопротивления в цепи якоря, носит название естественной; остальные характеристики с добавочным сопротивлением — искусственных.

Из выражений (2-16) и (2-17) видно, что все характеристики, независимо от величины

сопротивления цепи якоря, пересекаются в точке с координатами n_0 и $M = 0$.

Выражения для механической характеристики справедливы для электромагнитного момента. Момент на валу двигателя ввиду наличия трения в подшипниках, вентиляционных и потерь в стали, покрываемых с вала, в двигательном режиме будет всегда меньше электромагнитного, а именно:

$$M_a = M_{эм} - M_{тр} - M_{век} - M_{ст}.$$

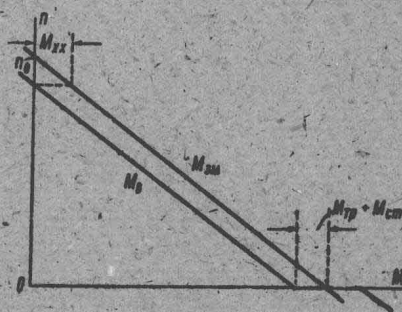
Наоборот, в тормозном режиме момент на валу двигателя за счет указанных выше потерь будет больше электромагнитного момента.

Таким образом, при изменении направления вращения зависимость $n = f(M_a)$ претерпевает разрыв. На фиг. 2-4 изображены механические характеристики $n = f(M_a)$ и $n = f(M_{эм})$.

Для устранения указанной неточности рекомендуется пользоваться электромагнитным моментом, а момент трения в подшипниках, вентиляционный и момент потерь в стали учитывать как добавочные слагаемые статической нагрузки на валу двигателя. Сумма моментов $M_{тр} + M_{век} + M_{ст}$ может быть определена по номинальным данным двигателя.

Ввиду того, что указанные моменты составляют 2—5% от номинального момента двигателя, практически возможно в ряде случаев ими пренебрегать, полагая $M_{эм} = M_a$.

Для построения механической характеристики двигателя независимого возбуждения достаточно знать две ее точки. В качестве таковых удобно пользоваться точкой идеального холостого хода и точкой номинального момента. Для нахождения этих точек необходимы номинальные (паспортные) данные двигателя и сопротивление обмотки якоря в горячем состоянии при 75°.



Фиг. 2-4. Влияние потерь на вид механической характеристики

По этим данным определяют э. д. с. двигателя при номинальной скорости и номинальном токе якоря:

$$E_{\text{ном}} = U - I_{\text{ном}} r_a = c_E \Phi n_{\text{ном}} \quad (2-19)$$

Из выражения (2-19) находим:

$$c_E \Phi = \frac{U - I_{\text{ном}} r_a}{n_{\text{ном}}} \quad (2-19')$$

С помощью выражения (2-17) можно установить связь между n_0 и $n_{\text{ном}}$ и определить скорость идеального холостого хода:

$$\frac{n_0}{n_{\text{ном}}} = \frac{U}{E_{\text{ном}}}$$

или

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U}{E_{\text{ном}}} \quad (2-20)$$

В качестве второй точки механической характеристики используем точку, отвечающую номинальной скорости и номинальному значению электромагнитного момента. Для этого по скорости n_0 определяем значение $c_E \Phi$ и с помощью соотношения (2-14') находим величину

$$c_M \Phi = \frac{c_E \Phi}{1,03} = \frac{U}{1,03 n_0}$$

Далее находим:

$$M_{\text{эм, ном}} = c_M \Phi I_{\text{ном}}$$

При использовании номинального момента на валу двигателя

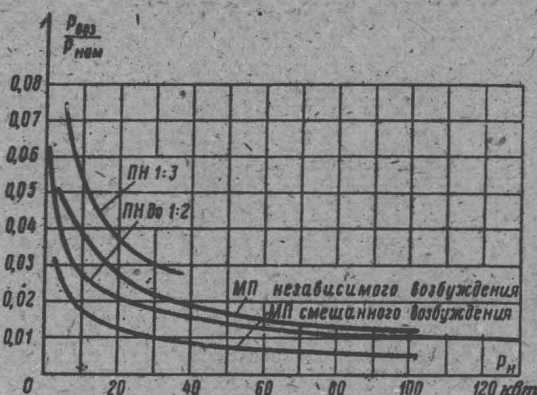
$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = 0,975 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} [\text{кгм}]$$

(мощность выражена в вт) будет допущена неточность, отмеченная выше.

Отсутствие в каталогах двигателей постоянного тока данных о величине сопротивления обмоток заставляет пользоваться приближенными способами определения этой величины.

Сопротивление обмоток цепи якоря — собственно якоря, добавочных полюсов и последовательной обмотки возбуждения — может быть определено по кривым зависимости сопротивления в относительных единицах от номинальной мощности [Л. 2-1].

На фиг. 2-5 приведены подобные кривые для двигателей краново-металлургического типа МП независимого, последовательного и смешанного возбуждения и для единой серии двигателей длительного режима типа ПН независимого возбуждения. С помощью кривых



Фиг. 2-5. Сопротивления обмоток двигателей постоянного тока типов МП и ПН при температуре 60°:

1 — сопротивление обмотки якоря двигателей типа ПН; 2 — сопротивление обмотки якоря и стабилизирующей обмотки двигателей типа ПН; 3 — сопротивление обмоток якоря двигателей типа МП независимого, последовательного и смешанного возбуждения; 4 — сопротивление обмотки возбуждения двигателей типа МП последовательного возбуждения; 5 — сопротивление последовательной обмотки двигателей типа МП смешанного возбуждения

фиг. 2-5: находят для соответствующей мощности и типа двигателя сопротивление в относительных единицах; умножив найденное значение на номинальное сопротивление, получают сопротивление обмотки в омах.

Сопротивление контакта коллектор — щетки можно определить, исходя из падения напряжения в них 2 в при номинальном токе двигателя. Для двигателей с номинальным напряжением 220 в это соответствует приблизительно $r_{\text{щ}} \approx 0,01 r_{\text{ном}}$.

В случае отсутствия зависимостей $r = f(P_{\text{ном}})$ сопротивление цепи якоря двигателя может быть определено приближенно по потерям в меди. Из курса электрических машин известно, что при нагрузке, соответствующей максимальному значению коэффициента полезного действия, потери переменные равны постоянным. Обычно для электрических машин $\eta_{\text{макс}}$ имеет место в интервале между $0,75 P_{\text{ном}}$ и $P_{\text{ном}}$. Поскольку вблизи максимума к. п. д. изменяется мало, приближенно можно считать, что $\eta_{\text{макс}}$ будет иметь место при $P_{\text{ном}}$. Полные потери при номинальной нагрузке равны разности мощности, потребляемой из сети и номинальной мощности на валу двигателя:

$$\Delta P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}$$

В этом случае номинальные потери в меди будут:

$$\Delta P_{\text{м ном}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{2} = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}}{2} = I_{\text{ном}}^2 r_a$$

откуда сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов будет равно:

$$r_{я\partial n} = \frac{U_{ном} I_{ном} - P_{ном}}{2I_{ном}^2} [ом]. \quad (2-21)$$

Аналогичные расчеты могут быть произведены с помощью номинального значения к. п. д. по формуле:

$$r_{я\partial n} = 0,5 (1 - \eta_{ном}) r_{ном} [ом]. \quad (2-22)$$

При известном n_0 сопротивление цепи якоря может быть определено с помощью выражения (2-20), а именно:

$$\frac{n_0}{n_{ном}} = \frac{U}{E_{ном}} = \frac{U}{U - I_{ном} r_{\partial}}$$

откуда

$$r_{\partial} = \frac{U}{I_{ном}} - \frac{U}{I_{ном}} \frac{n_{ном}}{n_0}$$

или

$$r_{\partial} = r_{ном} \left(1 - \frac{n_{ном}}{n_0} \right). \quad (2-23)$$

Для двигателей типа МП последовательного и смешанного возбуждения могут быть приняты следующие приближенные значения сопротивлений отдельных обмоток по отношению к сопротивлению всей якорной цепи:

	Последовательное	Смешанное
Обмотка якоря . . .	$r_{я} = 0,5 r_{\partial}$	$r_{я} = 0,5 r_{\partial}$
Добавочные полюса	$r_{\partial n} = 0,23 r_{\partial}$	$r_{\partial n} = 0,32 r_{\partial}$
Последовательная обмотка	$r_n = 0,27 r_{\partial}$	$r_n = 0,18 r_{\partial}$

а) Расчет пусковых сопротивлений

Механические характеристики двигателя независимого возбуждения дают возможность произвести расчет ступеней пускового сопротивления. Непосредственное включение неподвижного двигателя в сеть недопустимо, так как сопротивление обмотки якоря незначительно, и ток при этом может достигнуть 10—20-кратного значения номинального, что в свою очередь поведет к появлению кругового огня на коллекторе и выходу двигателя из строя.

Двигатели типа ПН независимого возбуждения допускают по условиям коммутации токи не более $2,5 I_{ном}$ при скоростях вращения от 0 до $n_{ном}$. Включением сопротивления последовательно с якорем можно ограничить пик тока любым заданным значением

$$I_{я\text{пуск}} = \frac{U}{r_{я} + r_p}$$

и получить необходимый момент.

По мере увеличения скорости растет его э. д. с. и соответственно уменьшается ток:

$$I_{я} = \frac{U - E}{r_{\partial} + r_p}$$

Одновременно с током уменьшается и момент, а следовательно, уменьшается интенсивность ускорения. Для поддержания постоянного ускорения привода уменьшают внешнее сопротивление r_p , отчего при данной э. д. с. возрастает ток и увеличивается момент, обуславливающий ускорение. Отметим, что чем больше ступеней имеет пусковое сопротивление, тем плавнее будет процесс ускорения привода. Однако с точки зрения уменьшения количества потребной аппаратуры и стоимости ее, а также для повышения надежности работы желательно число пусковых ступеней иметь минимальным.

При расчете пусковых сопротивлений пользуются искусственными механическими характеристиками $n = f(M)$ или, имея в виду, что двигатель независимого возбуждения работает при $\Phi = \text{const}$, часто используют зависимость $n = \varphi(I_{я})$, так как ток и момент пропорциональны друг другу.

Для получения пусковых механических характеристик (фиг. 2-6, а) строится естественная характеристика двигателя, на оси I наносятся значения тока статической нагрузки I_c , наибольшего тока при пуске I_{n1} и минимального I_{n2} , при достижении которого производится выключение первой и последующих ступеней пускового сопротивления.

Значения токов наибольшего и наименьшего выбираются: $I_{n1} = 2,0 + 2,5 I_{ном}$ и $I_{n2} = 1,2 + 1,5 I_c$. Значениям токов I_{n1} и I_{n2} соответствуют точки a и k .

Соединяя точки a и n_0 прямой, получим искусственную механическую характеристику двигателя при работе с полным пусковым сопротивлением. Ток двигателя в нижней части характеристики больше тока, соответствующего статическому моменту, и двигатель начнет ускоряться. По мере разгона двигателя ток якоря будет уменьшаться и мог бы достигнуть значения I_c . При этом разгон двигателя прекратился бы, а скорость была бы невелика (точка p). Во избежание этого при достижении током значения I_{n2} (точка b) пусковое сопротивление уменьшают настолько, чтобы при той же скорости вращения ток возрос снова до значения I_{n1} (точка c) и двигатель перешел на новую искусственную характеристику n_{0c} .