

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
1 Сокращения и обозначения	11
2 Что такое электропривод	18
2.1 Структура электропривода	18
2.2 Преобразование энергии в электроприводе	19
2.3 Моделирование в электроприводе	22
2.4 Дополнительная литература к разделу 2.....	30
3 Электропривод постоянного тока	31
3.1 Двигатель постоянного тока	31
3.2 Параметры движения ДПТ	36
3.3 Немного об автоматическом регулировании.....	37
3.4 Подчинённое регулирование	38
3.5 Алгоритм цифрового ПИ-регулятора	45
3.6 Силовой преобразователь	47
3.7 Синтез контура тока ДПТ	50
3.8 Дополнительная литература к разделу 3.....	55
4 Системы координат	57
4.1 Трёхфазные двигатели и система координат ABC	57
4.2 Неподвижная декартова система координат $\alpha\beta$	62
4.3 Вращающаяся декартова система координат XY	64
4.4 Преобразования координат $ABC \Rightarrow dq$ и $dq \Rightarrow ABC$	65
4.5 Преобразования координат $ABC \Rightarrow dq0$ и $dq0 \Rightarrow ABC$	66
5 ШИМ в электроприводе переменного тока	68
5.1 Синусоидальная ШИМ	71
5.2 ШИМ с полным использованием напряжения	73
5.2.1 Алгоритм <i>min-max</i>	74

5.2.2	Прерывистая ШИМ.....	77
5.3	Векторные алгоритмы ШИМ.....	80
5.4	Дополнительная литература к разделу 5	87
6	Автоматизированный синхронный электропривод ...	88
6.1	СДПМ с синусоидальной ЭДС	89
6.1.1	Конструкция двигателя.....	89
6.1.2	Векторная диаграмма СДПМ	89
6.1.3	Уравнения равновесия статора	92
6.1.4	Момент СДПМ	93
6.1.5	Модель СДПМ в системе dq	95
6.1.6	СДПМ с неявнополюсным ротором	99
6.1.7	Постоянные момента и противо-ЭДС.....	100
6.1.8	Управление моментом неявнополюсного СДПМ ..	101
6.1.9	Управление скоростью СДПМ	104
6.1.10	Управление положением СДПМ.....	105
6.1.11	Управление с ослаблением поля	109
6.1.12	Генераторный режим неявнополюсного СДПМ	121
6.2	СДПМ с трапецеидальной ЭДС	123
6.2.1	Математическое описание процессов в двигателе	123
6.2.2	Модель СДПМ с трапецеидальной ЭДС.....	127
6.2.3	Управление моментом, скоростью и положением	129
6.3	Способы управления СД с различной формой ЭДС	131
6.4	Потери энергии в синхронных двигателях.....	138
6.5	Шаговый электропривод	141
6.5.1	Конструкция и принцип работы ШД.....	142
6.5.2	Математическое описание ШД и ГШД.....	148
6.5.3	Модель ГШД.....	152
6.5.4	Поочерёдное управление (шаговое управление) ..	154
6.5.5	Управление с перекрытием фаз (шаговое)	155

6.5.6	Полушаговый режим	155
6.5.7	Режим дробления шага и управление скоростью ..	156
6.5.8	Динамика вращения и устойчивость ШД	157
6.6	Дополнительная литература к разделу 6.....	158
7	Асинхронный электропривод.....	160
7.1	Асинхронная электрическая машина.....	160
7.2	Математическое описание асинхронной машины	162
7.2.1	Схема замещения АД.....	162
7.2.2	Уравнения равновесия статора.....	165
7.2.3	Уравнения равновесия ротора	167
7.2.4	Уравнение момента.....	168
7.3	Модель электромагнитных процессов АД.....	169
7.3.1	Модель процессов в ненасыщенной машине.....	169
7.3.2	Модель процессов в машине с учётом насыщения	171
7.4	Модель АД.....	175
7.5	Старт-стопный режим работы АД	176
7.6	Частотное (скалярное) управление АД	178
7.7	Векторное управление АД.....	181
7.7.1	Синтез системы управления моментом	181
7.7.2	Выбор потокосцепления ротора	187
7.7.3	Учёт насыщения	189
7.7.4	Зона сохранения момента.....	191
7.7.5	Зона сохранения мощности	196
7.7.6	Система двухзонного регулирования момента	199
7.7.7	Управление скоростью и положением АД.....	201
7.8	Управление АД в «треугольнике»	201
7.9	Генераторный режим АД.....	202
7.10	Дополнительная литература к разделу 7	203

8	Активный выпрямитель в электроприводе	205
9	Датчики и измерения в электроприводе	212
9.1	Измерение тока	212
9.2	Измерение напряжения	219
9.3	Измерение положения и скорости	220
9.3.1	Оптические датчики положения (энкодеры)	221
9.3.2	Вращающиеся трансформаторы (СКВТ)	224
9.3.3	Магнитные датчики положения	228
9.3.4	Индуктивные датчики положения	229
9.3.5	ДПР в БДПТ	229
9.4	Дополнительная литература к разделу 9	230
10	ПОСЛЕСЛОВИЕ (наболело).....	231
11	Вместо списка литературы	234
12	«Аз, Буки, Веди» электроприводчика.....	238

*Время разбрасывать камни, и время
собирать камни; ...*

*время искать, и время терять;
время сберегать, и время бросать;*

*время раздирать, и время шить;
время молчать, и время говорить ...*

книга Екклесиаста

ПРЕДИСЛОВИЕ

В прошлом российская, а затем советская школа электропривода занимала ведущее положение в мире.

Однако в 70-е годы прошлого века наметившееся отставание в цифровой и силовой электронике вызвало застой в практике, отразившийся, в свою очередь, и на развитии теории.

В период перестройки ситуация усугубилась до предела. Мощнейшие НИИ, занимавшиеся вопросами электропривода, просто перестали существовать. Молодые энергичные специалисты разбрелись кто куда – кто-то оказался на местном рынке у прилавка с турецкими «шмотками», кто-то (кому повезло) двинул в бурно развивавшуюся тогда банковскую сферу, а тот, кому «повезло ещё больше», собрал чемоданы и рванул к дальним берегам. Маститые профессора и академики остались «сиротами» – практически без работы и учеников. Нарушилась связь поколений.

В это же время в 80-90-х годах теория и практика электропривода в Европе, Японии и США пережили бурный рост и добились мирового господства. К нам хлынул поток прекрасной современной преобразовательной техники, управление которой осуществлялось на основе новейшей теории.

Все ещё живые тогда отрасли (коммуналка, пищевая, добывающая) перешли на зарубежные электроприводы. Даже военная промышленность начала их применять.

В начале двухтысячных на российском рынке появились корейские, тайваньские и китайские электроприводы и преобразователи, достаточно хорошие для своей цены. Область общепромышленных приводов

и сейчас полностью забита импортом. Причём наши приткие коммерсанты научились лихо переклеивать наклейки и выдавать чужую продукцию за свою...

Слава Богу, последним ковчегом электропривода в отечестве оставалась вузовская наука – но мертва теория без практики. В результате мы получили существенное отставание от мирового уровня и в том, и в другом.

Однако отдельные анклавы отечественных разработчиков (их можно пересчитать по пальцам), несмотря ни на что, продолжали попытки разработки и производства своих электроприводов.

В результате те, кто выжил, потихоньку начали работать в области специализированных электроприводов для ядерной энергетики, транспорта и военной промышленности.

В последнее время ощущается острый дефицит специалистов-приводчиков, прежде всего – разработчиков новой современной техники. Задач сейчас много – людей нет.

Вузы готовят в основном очень слабых специалистов (вернее, неспециалистов).

Существующие вузовские учебники фундаментальны, так как стоят на мощной основе российской и советской школ электропривода, и в этом их сила, но есть и немалые проблемы.

Вот, с нашей точки зрения, некоторые из них:

1) Подмена учебника монографией или книгой, тяготеющей к монографии по научности и трудности восприятия

Современные авторитетные электроприводчики немолоды, им за семьдесят. И сами они учились на очень хороших русских книгах. Некоторым из них преподавали профессора, которые сами учились ещё в царское время.

Но смогли ли авторитетные авторы в полной мере перенять способность рассказывать о сложном просто и интересно? Имеют ли современные учебники такую же дидактическую выверенность и полноту отражения достижений науки и техники, востребованных на практике? Например, как в курсе лекций профессора А. А. Эйхенвальда по электричеству, изданному в 1913 году (А. А. Эйхенвальдъ. Электричество. Курс лекцій. Второе издание. Москва: Типолитография т-ва И. Н. Кушнеревъ и К – 1913).

Этот вопрос остаётся риторическим. А его возникновение может свидетельствовать о некоторой проблеме с дидактической скрупулёзностью.

Учебник должен быть суммой дидактических единиц (рассматриваемых объектов и вопросов их функционирования) и дидактических подходов (разжевать так, чтобы было понятно). Причём должна присутствовать ясная структура книги, связь между разделами, отсутствие «белых пятен» в передаваемых знаниях и т.п. На деле нередко нам под видом учебника предлагают труды, тяготеющие к монографии.

Ярким примером этого является книга, отражающая современные схемы и методы управления электропривода, – учебник Г. Г. Соколовского, 2006. Назвать эту книгу учебником для нынешнего студента трудно. Для того чтобы студент смог подойти к прочтению этой книги, сначала он должен ознакомиться с «Основами электропривода». Но если студент не смог одолеть книгу Соколовского, то даже и думать нечего браться за насыщенные теорией современного матанализа книги, написанные белорусским ученым Б. И. Фираго или профессором А. Б. Виноградовым – автором, совмещающим в себе и учёного, и опытного практика электропривода.

Как исключение из этого правила можно отметить выигрывающий в дидактике учебник Г. Б. Онищенко «Электрический привод», который действительно учит и освещает те вопросы, которые нельзя обойти в электроприводе.

2) Отставание содержания учебников от современного положения дел, от уровня развития современной техники

Из рассмотрения часто выпадают новейшие технические устройства и методы. Это нетрудно объяснить почтенным возрастом авторов учебников.

3) Изоляционизм

Нередко авторы учебников игнорируют зарубежные издания, не переведённые на русский язык. А ведь нам надо бы, как учил классик, «обогащать свою память знанием всех тех богатств, которые выработало человечество». Тем более что в целом мы подотстали.

4) Отсутствие ориентирования учебников на практику разработки нового

В лучшем случае наши учебники готовят специалистов, способных с пониманием эксплуатировать уже готовые электроприводы и не учат создавать новое.

В качестве исключения из этого правила можно отметить, пожалуй, только учебники А. Б. Виноградова и А. С. Анучина. Это и

немудрено, так как кроме научной деятельности эти специалисты ведут серьёзные практические работы и являются ведущими разработчиками в нашей области.

5) Парадоксы терминологии

В процессе исторического развития накопились некоторые противоречия в терминах, которые понимаются специалистами по-разному и сбивают с толку начинающих.

Например, бесколлекторный двигатель постоянного тока – это вообще не двигатель. А о том, что такое «вентильный двигатель», специалисты спорят вплоть до перехода на ненормативную лексику.

Создавая данный **АНТИУЧЕБНИК**, авторы пытались преодолеть указанные выше проблемы.

Он написан теми, кто выжил в электроприводе в девяностые: практиком, который учился не по учебникам, и представителем вузовской науки.

Мы пытаемся максимально просто дать азы теории и приблизить её к практике.

Что получилось – судить читателям.

Благодарим наших учителей в науке, практике и жизни: д.т.н., заслуженного деятеля науки РФ Г. Б. Онищенко, д. т. н., заслуженного деятеля науки РФ Г. Г. Соколовского, д. т. н. В. Г. Яцука, д. т. н. В.А. Мищенко, профессора В. С. Гутникова, заслуженного деятеля науки РФ, профессора Ю. П. Коськина, профессора А. Г. Микерова, профессора С. Г. Германа-Галкина ... и всех, кто не бросил отечественный электропривод в непростые времена.

Во многом эта книжка появилась благодаря им.

Громадное спасибо техническому директору ООО «3В Сервис» Ф. И. Бауму за горячую поддержку идеи нашей работы и её воплощения в жизнь.

Особая благодарность доценту, к. т. н. А. Г. Лаврову, сделавшему ряд ценных замечаний к материалам, касающимся электродвигателей.

Это не коммерческий проект – это движение души.

С наилучшими пожеланиями читателю,

инженер Ю. Н. Калачёв

к. т. н. Д. В. Самохвалов

1 Сокращения и обозначения

АД	– асинхронный двигатель
БДПТ	– бесконтактный двигатель постоянного тока
БКПС	– блок компенсации перекрёстных связей
Выч.фазы	– вычислитель фазового угла напряжений
ГШД	– гибридный шаговый двигатель
ДПР	– датчик положения ротора
ДПРО	– датчик положения рабочего органа
ДПТ	– двигатель постоянного тока
ДУ	– датчик угла (ротора или рабочего органа)
ЗПФ	– схема задержки переднего фронта
МДС	– магнитодвижущая сила
Напр.ШИМ	– ШИМ-сигналы напряжения
Огр. U	– ограничитель напряжения
ПИ-регулятор	– пропорционально-интегральный регулятор
САР	– система автоматического регулирования
СД	– синхронный двигатель
СДПМ	– синхронный двигатель с постоянными магнитами
Система упр.М	– система управления моментом
СРД	– синхронно-реактивный двигатель
СК	– система компенсации
М	– вращающий (крутящий) момент, измеряется в Нм
$M_{тр}$	– момент трения
M_c	– момент сопротивления
$M_{ст}$	– момент сухого трения
$M_{п}$	– максимальный момент двигателя
M_n	– номинальное значение момента электродвигателя
M_i	– момент шагового двигателя, создаваемый током обмоток
M_p	– зубцовый момента шагового двигателя
ФИД	– фотоимпульсный датчик
ФСМ	– формирователь сигналов модуляции
ШД	– шаговый двигатель
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция

ЭМП	– электромагнитные процессы
<i>PMSM</i>	– <i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> (СДПМ)
<i>BLDC</i>	– <i>BLDC-BrushLess Direct Current</i> (БДПТ)
A, B, C	– трёхфазная неподвижная система координат, оси которой направлены по осям катушек трёхфазной электрической машины
B	– индукция магнитного поля
C_{dc}	– ёмкость фильтрующего конденсатора звена постоянного тока
dq	– прямоугольная вращающаяся система координат, ось d которой сонаправлена с главной магнитной осью (с потоком ротора)
e	– мгновенное значение ЭДС
E	– действующее значение ЭДС
\vec{E}	– обобщённый вектор ЭДС, наводимой в фазах статора магнитным потоком вращающегося ротора
\vec{E}_L	– обобщённый вектор противо-ЭДС индуктивности обмотки статора
e_{1A}, e_{1B}, e_{1C}	– единичные функции формы ЭДС для фаз A, B, C
F_A, F_B, F_C	– магнитодвижущие силы фаз A, B, C
F	– сила в ньютонах
f	– частота тока (напряжения) в герцах
i	– мгновенное значение тока
I	– действующее значение тока
i_{set}	– сигнал задания тока
i_{fb}	– сигнал обратной связи по току
\vec{I}_S	– обобщённый вектор тока
I_S	– амплитуда фазного тока
i_A, i_B, i_C	– мгновенные значения фазных токов трёхфазной системы
i_α, i_β	– проекции обобщённого вектора тока на оси $\alpha\beta$
i_d, i_q	– проекции обобщённого вектора тока на оси dq
i_{sd}, i_{sq}	– проекции обобщённого вектора тока статора на оси dq
i_0	– ток нулевой последовательности

I_{Φ}	– действующее значение тока в фазе
i_{SqH}	– номинальный ток статора по оси q
$IGBT$	– биполярный транзистор с изолированным затвором
J	– момент инерции, измеряется в кгм^2
$k_{\text{ТР}}$	– коэффициент вязкого трения
k_e	– коэффициент ЭДС, $k_e = E / \omega_e$
k_D	– коэффициент демпфирования
k_p	– пропорциональный коэффициент ПИ-регулятора
k_i	– интегральный коэффициент ПИ-регулятора
k_M	– коэффициент момента. Коэффициент пропорциональности между вращающим моментом электрической машины и током статора.
L	– индуктивность
L_{Sd}, L_{Sq}	– индуктивности статора по осям d и q
L_{α}, L_{β}	– индуктивности по осям α и β
L_A, L_B, L_C	– индуктивность фаз
L_{AB}, L_{BC}, L_{CA}	– взаимные индуктивности фаз
l	– длина активной части проводника
N	– количество витков обмотки
P_e	– мгновенная электрическая мощность, потребляемая двигателем
P_{eA}	– мгновенная электрическая мощность катушки A
P_R	– потери в меди
P_{Fe}	– потери в стали (магнитные потери)
P_h	– потери на гистерезис
P_e	– потери на вихревые токи в магнитопроводе статора
P_{exc}	– избыточные магнитные потери
$P_{\text{ЭМ}}$	– электромагнитная мощность двигателя
$p = \frac{d}{dt}$	– оператор дифференцирования (оператор Лапласа)
R	– активное сопротивление
$R_{\text{огр}}$	– сопротивление ограничителя зарядного тока
R_{Γ}	– сопротивление гасителя энергии торможения

R_S	– активное сопротивление обмотки статора
R_ϕ	– активное сопротивление фазы
$R_{ш}$	– сопротивление токового шунта
S	– площадь
$SV PWM$	– векторная ШИМ
sign	– функция выделения знака
T_μ	– постоянная времени желаемой передаточной функции
$T_{Пр}(p)$	– постоянная времени преобразователя (управляемого источника напряжения), описываемого апериодическим звеном
$T_R = \frac{L}{R}$	– постоянная времени ротора ДПТ
$T_{ШИМ}$	– период ШИМ
T_+	– длительность подключения выхода к положительному полюсу звена постоянного тока при ШИМ
T_-	– длительность подключения выхода к отрицательному полюсу звена постоянного тока при ШИМ
t_ω	– время выхода на максимальную скорость
t_{61}, t_{62}, t_0	– временные интервалы (в секундах), на время которых происходит включение первого, второго и нулевого базовых векторов при векторной ШИМ
T_{61}, T_{62}, T_0	– части периода ШИМ, во время которых происходит включение первого, второго и нулевого базовых векторов при векторной ШИМ
T_{+A}, T_{+B}, T_{+C}	– время подключения фаз к положительному полюсу звена постоянного тока при векторной ШИМ
t_1, t_2, t_3	– промежуточные переменные в алгоритме векторной ШИМ <i>SV PWM</i>
$T_{обм}^\circ$	– температура обмотки двигателя
u	– мгновенное значение напряжения
u_A, u_B, u_C	– мгновенные значения фазных напряжений трёхфазной системы
U	– действующее значение напряжения
U_{61}, U_{62}	– величины проекций вектора на оси базовых векторов при векторной ШИМ
\vec{U}_S	– обобщённый вектор напряжения, образуемый мгновенными напряжениями фаз

$u_{Sa}, u_{S\beta}$	– проекции обобщённого вектора напряжения статора на оси dq
u_{Sd}, u_{Sq}	– проекции обобщённого вектора напряжения статора на оси $\alpha\beta$
U_{dc}	– напряжение звена постоянного тока
u_{\sin}, u_{\cos}	– выходные сигналы резольвера
$u_{Д\sin}, u_{Д\cos}$	– продетектированные сигналы резольвера
u_0	– напряжение нулевой последовательности (напряжение средней точки «звезды»)
u_{A0}, u_{B0}, u_{C0}	– напряжения фаз A, B, C , содержащие нулевую последовательность
$u_{A\phi}, u_{B\phi}, u_{C\phi}$	– фазные напряжения
u_3	– задание напряжения
U_{V6}	– величина базового вектора векторной ШИМ
$V1, V2, V3, V4, V5, V6$	– базовые неподвижные векторы, соответствующие определённым состояниям ключей инвертора
$V7, V8$	– нулевые базовые векторы
$W(p)$	– передаточная функция САР
$W_{\text{Per}}(p)$	– передаточная функция регулятора, определяющая алгоритм вычисления управляющего воздействия
$W_{\text{Пр}}(p)$	– передаточная функция преобразователя, реализующего вычисленное регулятором воздействие
$W_{\text{Op}}(p)$	– передаточная функция объекта регулирования
$W_{P\theta}(p)$	– передаточная функция регулятора положения
$W_{P\omega}(p)$	– передаточная функция регулятора скорости
$W_{Pi}(p)$	– передаточная функция регулятора тока (момента)
XY	– двухфазная прямоугольная система координат, вращающаяся с произвольно выбираемой скоростью
Z_p	– число пар полюсов двигателя
Z_ϕ	– активно-индуктивное сопротивление фазы
$\alpha\beta$	– двухфазная неподвижная прямоугольная система координат, ось α которой сонаправлена с осью A трёхфазной системы координат
α	– угловой шаг ротора шагового двигателя
α_s	– угловой шаг поля статора шагового двигателя

$\gamma\delta$	– двухфазная прямоугольная система координат, вращающаяся синхронно с ротором
λ	– мгновенная фаза (угол) фазного тока
ε	– угловое ускорение, рад/с ²
ε_0	– модуль углового ускорения движения по траектории
Ψ	– потокосцепление
$\vec{\Psi}_i$	– вектор потокосцепления поля, созданного током \vec{I}_S , с витками катушек статора
$-d\vec{\Psi}_i/dt$	– вектор ЭДС самоиндукции статора
$\vec{\Psi}_f$	– вектор потокосцепления ротора СДПМ с обмоткой статора, длина которого равна произведению потока ротора на число витков катушки одной фазы статора
$\vec{\Psi}_S$	– вектор потокосцепления статора
$\Psi_{S\alpha}, \Psi_{S\beta}$	– проекции вектора потокосцепления статора на оси $\alpha\beta$
$\vec{\Psi}_R$	– вектор потокосцепления ротора
Ψ_R	– модуль вектора потокосцепления ротора
Ψ_{Rd}, Ψ_{Rq}	– проекции вектора потокосцепления ротора на оси dq
$\Psi_{R\alpha}, \Psi_{R\beta}$	– проекции вектора потокосцепления ротора на оси $\alpha\beta$
$\vec{\Psi}_m$	– вектор потокосцепления намагничивания асинхронного двигателя
Ψ_m	– модуль вектора потокосцепления намагничивания асинхронного двигателя
Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C	– потокосцепления фаз
$\Psi_{fA}, \Psi_{fB}, \Psi_{fC}$	– потокосцепления, наводимые в фазах магнитом ротора
$\Delta\omega_{кр}$	– критическое скольжение АД (рад/с)
Δ	– ошибка регулирования САР
Δ_i	– ошибка регулирования в контуре тока
Δ_ω	– ошибка регулирования в контуре скорости
θ_0	– разность между реальным и заданным угловым положением перед началом движения

$\theta_{set}, \omega_{set},$ $\varepsilon_{set},$	– сигналы мгновенных заданий угла, скорости и ускорения
θ_{ω}	– угловое перемещение, при выходе на максимальную скорость
θ_e	– электрический фазный угол
θ_{fb}	– сигнал обратной связи по углу
ω_{fb}	– сигнал обратной связи по угловой механической частоте
ω_R	– угловая механическая частота
ω_e	– угловая электрическая частота (угловая частота токов и напряжений).
ω_0	– модуль максимальной скорости движения по траектории
ω_{δ}	– механическая частота, на которой начинается снижение максимального момента (базовая частота)
$\omega_{Rн}$	– номинальная механическая частота вращения
$\omega_{eн}$	– номинальное значение электрической частоты
ω_{max}	– максимальное значение электрической частоты

2 Что такое электропривод

Электропривод – это электромеханическая система, обеспечивающая движение физического объекта.

Электроприводы сейчас – кругом, начиная от электрической отвёртки и кончая гребным винтом атомного ледокола.

Наземные, воздушные и подводные роботы, гибридные и электрические автомобили, насосы, обеспечивающие водой и теплом каждый дом, станки с ЧПУ и многое другое, всё это – электропривод ...

2.1 Структура электропривода

В электроприводе в одном устройстве сконцентрировано очень многое: электромагнитные поля и преобразование энергии, точная аналоговая, сверхпроизводительная цифровая и мощная силовая электроника, датчики, системы управления, точная и мощная механика. Суть и взаимодействие всех этих разнородных сущностей должны быть ведомы инженеру-электроприводчику.

Ниже на Рис. 2.1 приведена общая структурная схема системы электропривода.

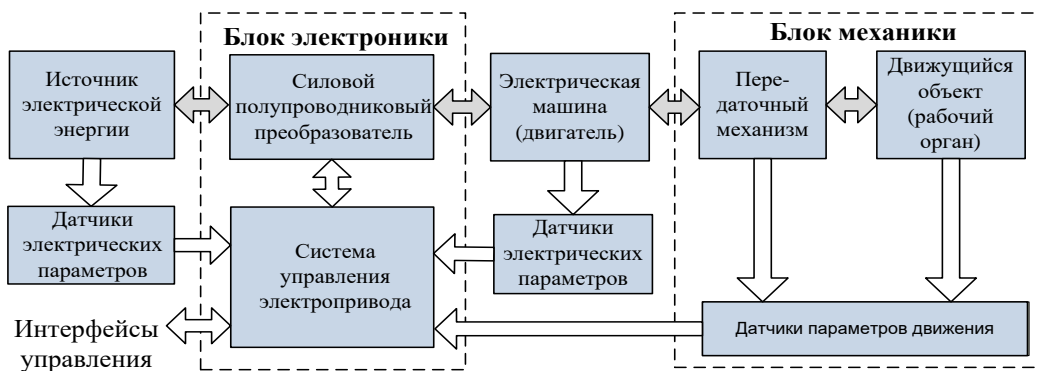


Рис. 2.1

Электрическая энергия преобразуется в электроприводе в энергию механического движения.

Блок электроники управляет параметрами этого движения. Например, для вращательного движения это:

- момент на валу двигателя или рабочего органа
- скорость вращения вала двигателя или рабочего органа
- положение вала двигателя или рабочего органа.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru