

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Ш**ирокое внедрение электрического привода во все отрасли промышленности и сельского хозяйства, а также всевозрастающие требования к статическим и динамическим характеристикам электропривода предъявляют повышенные требования к эксплуатирующему персоналу и профессиональной подготовке студентов, которые в своей предстоящей деятельности будут заниматься электрическим приводом. Важное место в этой подготовке занимает курсовое и дипломное проектирование, где студент закрепляет полученные теоретические знания и приобретает практические навыки расчета мощности электропривода и выбора схемы управления им в зависимости от технологических требований и конструктивных особенностей производственного механизма. Рекомендации по проектированию электропривода приводятся в нескольких разделах данного учебного пособия.

Учебное пособие построено таким образом, чтобы студент, изучающий материал, ознакомился с основными положениями определения мощности электродвигателя, режимом его работы, технологическими и конструктивными особенностями механизма, способами управления электроприводом и схемными решениями реализации этих способов.

Так, в первой главе приведены основные положения методики расчета мощности электродвигателей силовых электроприводов металорежущих станков, во второй главе аналогичный материал рассмотрен применительно

к подъемно-транспортным устройствам. В третьей главе изложены сведения по методике расчета установок, технологический процесс которых связан с прессованием, в четвертой главе приведены методы расчета электроприводов насосных установок. Вопросы определения мощности электродвигателей для различных механизмов машин, предназначенных для землеройных работ, рассмотрены в пятой главе. В этих пяти главах приводятся примеры, облегчающие усвоение предлагаемого материала.

В шестой главе рассмотрены динамические свойства электроприводов с учетом особенностей механической части производственных механизмов. Методам расчета статических характеристик регулируемых электроприводов переменного и постоянного тока, а также их сравнительной оценке посвящена седьмая глава. И, наконец, в заключительной главе применительно к ранее изложенным технологическим требованиям и конструктивным особенностям механизмов рассмотрены современные системы управления электроприводами переменного и постоянного тока.

В учебном пособии приведены приложения, которые будут полезны студенты при выполнении учебного проектирования.

# 1

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

### 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**В**ажную роль в современном производстве играют металлорежущие станки. В связи с этим большое значение имеет правильный выбор электродвигателя для приводов этих станков, так как завышение мощности на несколько киловатт приведет к большому перерасходу энергии в масштабах страны, что в настоящих условиях обернется снижением конкурентоспособности станков из-за большего расхода энергии при прочих равных параметрах станка.

Металлорежущие станки могут быть классифицированы по различным признакам [1]:

1) в зависимости от технологического процесса, определяющего способ обработки, формы образуемой поверхности, характера движения, вида инструмента и заготовки станки подразделяют на группы, основными из которых являются станки строгальные, токарные, фрезерные, сверлильно-расточные, шлифовальные;

2) по степени универсальности различают универсальные, специализированные и специальные станки;

3) универсальные станки (общего назначения) используются для обработки деталей широкой номенклатуры, ограниченной лишь предельными габаритами, набором инструмента и технологическими операциями;

4) специализированные станки используются для обработки однотипных деталей (труб, муфт, коленчатых валов и др.) в определенном диапазоне размеров.

Специальные станки применяют для обработки одной определенной детали, реже — нескольких однотипных деталей.

По степени точности обработки станки делят на пять классов:

1) нормальной точности (Н); к этому классу относятся большинство универсальных станков;

2) повышенной точности (П); при изготовлении станков этого класса на базе станков нормальной точности предъявляются повышенные требования к точности обработки ответственных деталей, качеству сборки и регулировки станка;

3) высокой точности (В), достигаемой за счет специальной конструкции отдельных узлов, высоких требований к точности изготовления деталей, качеству сборки и регулировки станка в целом;

4) особо высокой точности (А), при изготовлении которых предъявляются еще более жесткие требования, чем при изготовлении станков класса В;

5) особо точные (прецзионные) станки (С).

Для обеспечения точности работы станков классов В, А и С необходимым условием является поддержание в производственных помещениях значений температуры и влажности постоянными и автоматически регулируемыми.

По степени автоматизации различают механизированные и автоматизированные станки (автоматы и полуавтоматы):

1) механизированный станок имеет одну автоматизированную операцию (например, зажим заготовки или поставка инструмента);

2) автомат, осуществляя обработку, производит все рабочие и вспомогательные движения цикла технологической операции и повторяет их без участия человека;

3) полуавтомат — станок, работающий с автоматическим циклом, для повторения которого требуется вмешательство человека (снятие детали и установка новой заготовки).

По расположению шпинделя станки делятся на горизонтальные, вертикальные, наклонные и комбинированные.

В зависимости от габаритов и массы обрабатываемой детали различают станки нормальные (до 1 т), крупные

(до 30 т), тяжелые (до 100 т), особо тяжелые или уникальные (более 100 т).

Обработка изделий на металлорежущих станках — это приданье заготовке поверхности необходимой формы и необходимых размеров путем перемещения режущей кромки инструмента относительно заготовки или, наоборот, заготовки относительно режущей кромки инструмента. Требуемое относительное перемещение создается сочетанием движений инструмента и заготовки. Это движение называется основным (рабочим). Его разделяют на главное движение, за счет которого инструмент производит резание детали, и движение подачи, обусловливающее перемещение инструмента или обрабатываемой детали для снятия нового слоя металла. Главное движение и движение подачи могут быть вращательными и поступательными и совершаться как заготовкой, так и инструментом.

Технологические условия нагрузки характеризуются зависимостью мощности или момента нагрузки от скорости механизма. Некоторые механизмы, например главный привод токарного станка, требуют регулирования скорости почти во всем диапазоне регулирования при постоянной мощности; другие, например приводы подач, — при постоянном моменте; третьи, такие как главный привод продольно-строгального станка, в одной части диапазона регулирования — при постоянной мощности, в другой части — при постоянном моменте.

## 1.2. СТРОГАЛЬНЫЕ СТАНКИ

В группу строгальных станков входят поперечно-строгальные, продольно-строгальные и долбежные станки. Характерная особенность строгальных станков — возвратно-поступательное перемещение резца или детали с режимом строгания при прямом ходе и осуществление прерывистой поперечной подачи после каждого одинарного или двойного хода резца или детали [2].

Общий вид продольно-строгального станка приведен на рисунке 1.1. На этих станках обрабатываемое изделие 1 закрепляют на столе 2, совершающем возвратно-

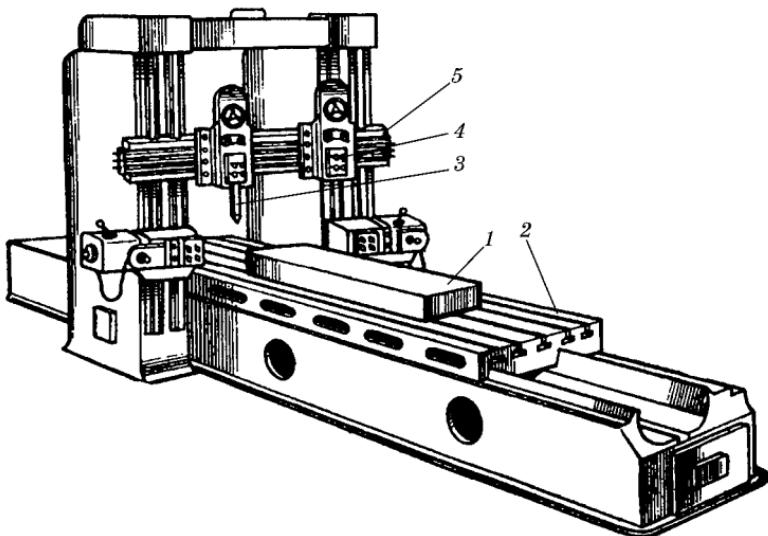


Рис. 1.1

Общий вид продольно-строгального станка:

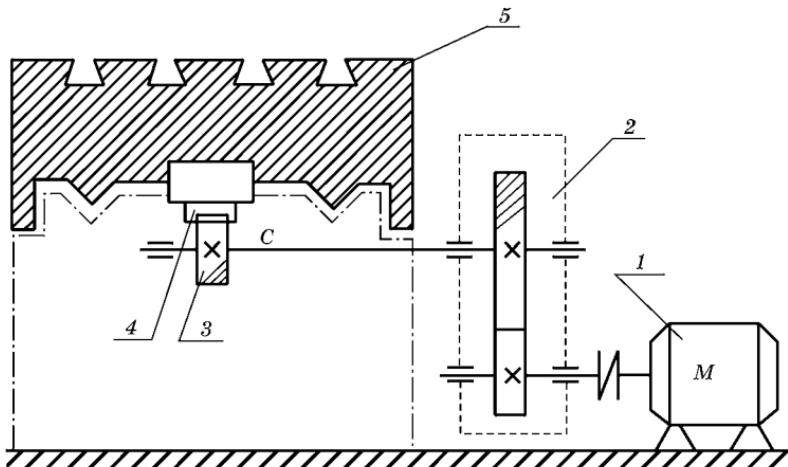
1 — обрабатываемое изделие; 2 — стол; 3 — резец; 4 — суппорт; 5 — траверса.

поступательное движение, а резец 3, закрепленный на вертикальном суппорте 4, установленном на траверсе 5, остается неподвижным. Процесс строгания производится при прямом рабочем ходе стола, а при обратном ходе резец поднимается. После каждого обратного хода стола резец перемещается в поперечном направлении, обеспечивая поперечную подачу. Продольное перемещение стола при рабочем ходе является главным движением, привод — главным приводом станка, перемещение резца — движением подачи. Вспомогательными движениями являются быстрые перемещения траверсы и суппортов станка, подъем резца при обратном ходе стола и наладочные операции.

На продольно-строгальных станках осуществляется строгание больших деталей. Такие станки выпускаются разных размеров с длиной стола 1,5...12 м. В зависимости от длины стола различают: станки небольших размеров — при длине стола  $L_{ст}$  до 3...4 м с тяговым усилием  $F_{тяг} \leq 30...50$  кН, средних размеров — при  $L_{ст} \leq 5$  м,  $F_{тяг} = 50...70$  кН, и тяжелые станки — с  $L_{ст} > 5$  м,  $F_{тяг} > 70$  кН [2].

### Кинематическая схема

Кинематическая схема продольно-строгального станка приведена на рисунке 1.2. Движение от электродвигателя  $M$  (поз. 1) через редуктор  $2$  и вал с жесткостью упругой деформации  $C$  передается на шестерню  $3$ , связанную с реечной шестерней  $4$ , осуществляющей возвратно-поступательное движение стола  $5$ .



**Рис. 1.2**

Кинематическая схема продольно-строгального станка:  
1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3, 4 — шестерня; 5 — стол.

#### 1.2.1. Технологический процесс обработки детали

Скорость перемещения стола относительно резца при рабочем ходе называют скоростью резания. Она зависит от вида обработки и материала изделия. Различают черновую и чистовую обработку детали, которые отличаются скоростью и глубиной резания.

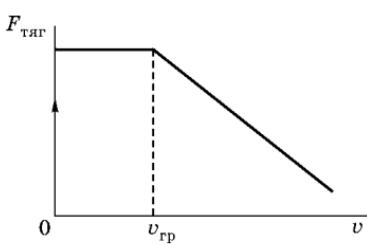
Врезание резца в изделие и выход из него производится на пониженных скоростях ( $2\dots15$  м/мин). Допускается наименьшая скорость прямого хода  $V_{\min}$  до  $4\dots6$  м/мин. Максимальная скорость резания  $V_{\max}$  не превосходит  $75\dots120$  м/мин. Скорость обратного хода  $V_{\text{обр}}$  находится в пределах  $15\dots120$  м/мин. Отношение скоростей обратного и рабочего ходов характеризуется коэффициентом  $K_3$ .

При строгании подачу  $s$  и глубину резания  $t$  принимают в зависимости от вида обработки:

1)  $s_1 = 1 \dots 7$  мм/двойной ход,  $t_1 = 6 \dots 30$  мм — для черновой обработки;

2)  $s_2 = 10 \dots 30$  мм/двойной ход,  $t_2 = 0,05 \dots 0,3$  мм — для чистовой обработки [3].

Технологические условия нагрузки характеризуются зависимостью мощности или момента нагрузки от скорости. В главном приводе продольно-строгального станка регулирование скорости осуществляется частично при постоянстве мощности, а частично — при постоянстве момента (рис. 1.3).



**Рис. 1.3**  
График нагрузки главного привода продольно-строгального станка

До граничной скорости  $V_{\text{гр}}$  регулирование осуществляется при постоянстве момента, а выше  $V_{\text{гр}}$ , когда тяговое усилие падает, мощность резания остается постоянной.

Значение граничной скорости определяется механической прочностью станка.

Глубина резания зависит от припуска на обработку.

Припуск всегда экономичнее удалять за один рабочий ход. Глубина резания существенно влияет на силы резания и при обработке заготовок малой жесткости, корпусных деталей и т. д. Необходимо стремиться к небольшим силам резания. Силы резания также влияют на точность и параметры качества обрабатываемой поверхности. При удалении повышенных припусков и обработке на станках небольшой мощности припуск разбивают на две части, а иногда и больше.

В главных электроприводах металорежущих станков полезным является усилие резания. Оно зависит от режимов резания (глубины, подачи, скорости), материала обрабатываемого изделия и режущих свойств инструмента. На продольно-строгальных станках двигатель должен развивать, кроме того, дополнительное усилие, преодолевающее усилие трения в направляющих стола. Общая нагрузка на

приводе в установившемся режиме при резании определяется тяговым усилием, равным сумме усилий резания и трения. На холостом ходу оно равно только усилию трения.

Нагрузочная диаграмма рабочего механизма не учитывает динамические нагрузки в переходных процессах. Для механизмов, рассчитанных на работу в длительном режиме S1 или с редкими пусками (торможениями), влияние динамических нагрузок учитывается коэффициентом запаса  $K_{\text{зап}}$  при определении расчетной мощности двигателя. Однако в механизмах с возвратно-поступательным движением, которые характеризуются повторяющимися циклами с частотой до 1200...1800 циклов в час, необходимо учитывать возникающие в переходных процессах дополнительные нагрузки. Для этого следует найти величины динамических моментов (усилий), зависящих от суммарного момента инерции  $J_{\text{сум}}$  привода и допустимых ускорений  $a_{\text{доп}}$ .

В переходных процессах пуск и реверсирование двигателя выполняют с максимальным быстродействием и допустимыми динамическими нагрузками в передачах редуктора. Допустимое ускорение  $a_{\text{доп}}$  принимают в пределах от 0,8 до 1 м/с<sup>2</sup>. Скорость резания  $V_{\text{рез}}$ , м/мин, рассчитывается по формуле [4]

$$V_{\text{рез}} = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v, \quad (1.1)$$

где  $T$  — стойкость резца, мин;  $t$  — глубина резания, мм;  $s$  — подача (поперечная) резца, мм/дв. ход;  $K_v$  — поправочный коэффициент (усредненное значение  $K_v=0,85$ );  $C_v$ ,  $m$ ,  $x$ ,  $y$  — коэффициент и показатели степени, выбираемые по таблице 1.1 в зависимости от режима резания.

Затем по эмпирической формуле рассчитывается сила резания  $F_z$ , Н:

$$F_z = 10C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V_{\text{рез}}^n \cdot K_p, \quad (1.2)$$

где  $V_{\text{рез}}$  — скорость резания, вычисленная по (1.1), м/мин;  $K_p$  — поправочный коэффициент (усредненно  $K_p=1,1$ );  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $n$  — коэффициенты и показатели степени, выбираемые по таблице 1.2 в зависимости от режима резания.

Нагрузка привода при прямом ходе стола определяется тяговым усилием, которое находится как сумма составляющих усилия резания и усилия трения, действующего при движении стола в направляющих:

$$F_{\text{тяг}} = F_z + F_{\text{тр}} = F_z + K_{\text{тр}} \cdot [F_y + g \cdot (m_{\text{ст}} + m_{\text{дет}})], \quad (1.3)$$

где  $F_{\text{тяг}}$  — тяговое усилие, Н;  $F_y$  — вертикальная составляющая силы резания, Н,  $F_y = 0,4F_z$ ;  $K_{\text{тр}}$  — коэффициент трения,  $K_{\text{тр}} = 0,05 \dots 0,08$ ;  $g$  — ускорение свободного падения.

Таблица 1.1

**Значения коэффициента и показателей степени  
в формуле определения скорости строгания**

Материал обработки	Подача, мм/ дв. ход	Коэффициент и показатели степени			
		$C_v$	$x$	$y$	$m$
Углеродистая сталь	До 0,3	420	0,15	0,2	0,2
	0,3...0,7	350		0,35	
	Более 0,7	320		0,45	
Серый чугун	До 0,4	292	0,15	0,2	0,2
	Более 0,4	243		0,4	
Ковкий чугун	До 0,4	317	0,15	0,2	0,2
	Более 0,4	215		0,4	
Медные сплавы	До 0,2	270	0,12	0,25	0,23
	Более 0,2	182		0,3	
Алюминиевые сплавы и силумин	До 0,2	485	0,12	0,25	0,28
	Более 0,2	328		0,5	

Таблица 1.2

**Значения коэффициента и показателей степени  
в формуле определения силы резания**

Материал обработки	Материал резца	Подача, мм/дв. ход	Коэффициент и показатели степени			
			$C_p$	$x$	$y$	$n$
Углеродистая сталь	Тв. сплав	—	300	1	0,75	-0,15...0
	Быстрореж. сталь	—	200			
Серый чугун	—	До 0,4	92	1	0,75	0
	—	Более 0,4	158		1	
Ковкий чугун	—	—	81	1	0,75	0
Медные сплавы	—	—	55	1	0,66	0
Алюминиевые сплавы и силумин	—	—	40	1	0,75	0

падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $m_{\text{ст}}$  — масса движущейся части стола, кг;  $m_{\text{дет}}$  — масса детали (максимальная), кг.

При обратном ходе стола резец поднимается, и на привод действует только усилие трения:

$$F_{\text{ox}} = F_{\text{тр}} = K_{\text{тр}} [F_y + g \cdot (m_{\text{ст}} + m_{\text{дет}})], \quad (1.4)$$

где  $F_{\text{ox}}$  — усилие при обратном ходе стола, Н.

### 1.2.2. Требования к электроприводу

Привод должен обеспечивать большой врачающий момент при малых скоростях обработки (черновая обработка).

Привод должен быть реверсивным с малым временем переходных процессов, малой колебательностью и малым перерегулированием. Скорость должна регулироваться в зависимости от вида обработки. В установившихся режимах электропривод должен обеспечивать жесткие механические характеристики во всем диапазоне регулирования скорости с изменением скорости не более 5% при колебании нагрузки от нуля до номинальной.

Диапазон регулирования скорости  $D$  при поступательном главном движении определяется отношением максимальной  $V_{\max}$  и минимальной  $V_{\min}$  линейной скоростей движения и достигает 30 [5].

Режим работы электропривода — продолжительный, с частыми реверсами.

Предъявляемым требованиям достаточно полно соответствуют приводы постоянного тока. Они обладают широким диапазоном регулирования скорости с довольно жесткой механической характеристикой. В целях получения широкого диапазона скоростей вращения необходимо осуществлять двухзонное управление электродвигателем: по полю двигателя и по току якоря.

### 1.2.3. Нагрузочная диаграмма и тахограмма механизма передвижения стола

Расчет усилий и скоростей рабочей машины осуществляют в соответствии с выполнением технологического режима. Участок перед врезанием, когда двигатель работает вхолостую, принимают равным 5% от длины стола:

$$\ell = 0,05L. \quad (1.5)$$

Процесс врезания происходит при минимальной скорости  $V_{\min}$ , а далее осуществляется разгон привода до скорости резания  $V_{\text{рез}}$ . Рассчитаем время работы станка на отдельных участках нагрузочной диаграммы при различных режимах резания.

#### **Черновая обработка. Прямой ход**

Время разгона стола до скорости врезания  $V_{\min}$ :

$$t_1 = \frac{V_{\min}}{a_{\text{доп}}}, \quad (1.6)$$

где  $a_{\text{доп}}$  — допустимое линейное ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Время прохождения расстояния  $\ell = 0,05L$ :

$$t_2 = \frac{0,05L}{V_{\min}}. \quad (1.7)$$

Время движения стола при резании с  $V_{\min}$ :

$$t_3 = \frac{L - 0,05L \cdot 2}{V_{\min}}. \quad (1.8)$$

Время движения стола с  $V_{\min}$  после выхода резца из заготовки:

$$t_4 = t_2.$$

Время, необходимое для снижения скорости до 0:

$$t_5 = t_1.$$

#### **Черновая обработка. Обратный ход**

Расстояние, проходимое столом за время  $t_1$  при разгоне до скорости  $V_{\min}$ :

$$S_1 = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_1^2}{2}. \quad (1.9)$$

Следовательно, ход стола:

$$S = 2S_1 + L + 2\ell. \quad (1.10)$$

Время разгона стола до скорости обратного хода  $V_{\text{обр}}$  после реверса:

$$t_6 = \frac{V_{\text{обр}}}{a_{\text{доп}}}. \quad (1.11)$$

Расстояние, проходимое столом за время  $t_6$ :

$$S_6 = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_6^2}{2}. \quad (1.12)$$

Время замедления стола до  $V_{\min}$ :

$$t_8 = \frac{V_{\text{обр}} - V_{\min}}{a_{\text{доп}}}. \quad (1.13)$$

Расстояние, проходимое столом за время  $t_8$ :

$$S_8 = \frac{V_{\text{обр}}^2 - V_{\min}^2}{2a_{\text{доп}}}. \quad (1.14)$$

Расстояние, проходимое столом с скоростью  $V_{\text{обр}}$ :

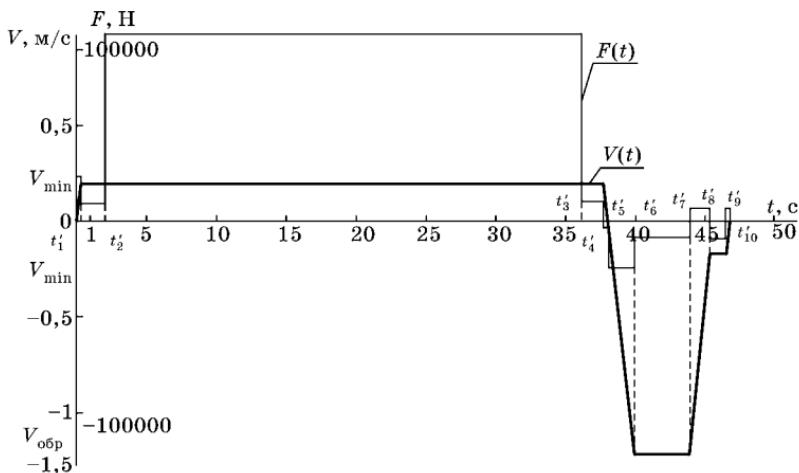
$$S_7 = S - S_6 - S_1 - \ell - S_8. \quad (1.15)$$

Время прохождения столом расстояния  $S_7$ :

$$t_7 = \frac{S_7}{V_{\text{обр}}}. \quad (1.16)$$

Время движения стола после реверса с  $V_{\min}$ :

$$t_9 = t_2.$$



**Рис. 1.4**  
Тахограмма и нагрузочная диаграмма рабочей машины  
при черновой обработке

Время снижения скорости стола от  $V_{\min}$  до 0:

$$t_{10} = t_1.$$

По полученным данным построим тахограмму (рис. 1.4), где

$$\begin{aligned} t'_1 &= t_1, \quad t'_2 = t'_1 + t_2, \quad t'_3 = t'_2 + t_3, \quad t'_4 = t'_3 + t_4, \quad t'_5 = t'_4 + t_5, \\ t'_6 &= t'_5 + t_6, \quad t'_7 = t'_6 + t_7, \quad t'_8 = t'_7 + t_8, \quad t'_9 = t'_8 + t_9, \\ t'_{10} &= t'_9 + t_{10} = t_{\text{черт.цикл.}} \end{aligned}$$

**Чистовая обработка. Прямой ход**

Время разгона стола от 0 до  $V_{\min}$ :

$$t_{11} = t_1.$$

Время движения стола с минимальной скоростью  $V_{\min}$ :

$$t_{12} = t_2.$$

Время разгона стола до скорости чистовой обработки  $V_{\max}$ :

$$t_{13} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{a_{\text{доп}}}. \quad (1.17)$$

Расстояние, проходимое столом за время  $t_{13}$ :

$$S_{13} = \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{2a_{\text{доп}}}. \quad (1.18)$$

Расстояние, проходимое столом со скоростью  $V_{\max}$ :

$$S_{14} = S - 2S_1 - 2\ell - 2S_{13}. \quad (1.19)$$

Время прохождения расстояния  $S_{14}$ :

$$t_{14} = \frac{S_{14}}{V_{\max}}. \quad (1.20)$$

Время замедления стола от  $V_{\max}$  до  $V_{\min}$ :

$$t_{15} = t_{13}.$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)