

Лекция № 3 ДПТ с последовательным возбуждением

1. Вывод уравнений скоростных и механических характеристик и их анализ.
2. Универсальные характеристики.
3. Построение скоростных и механических характеристик по универсальным характеристикам.
4. Построение искусственных скоростных и механических характеристик.
5. Тормозные режимы.
6. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений.
7. Механические характеристики ДПТ смешанного возбуждения.

1. Вывод уравнений скоростных и механических характеристик ДПТ с последовательным возбуждением и их анализ.

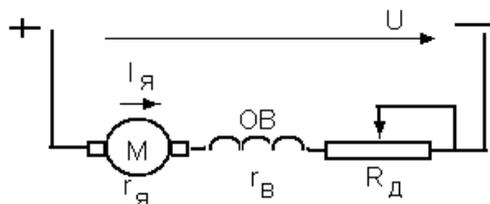


Рис. 1 Схема включения ДПТ последовательного возбуждения

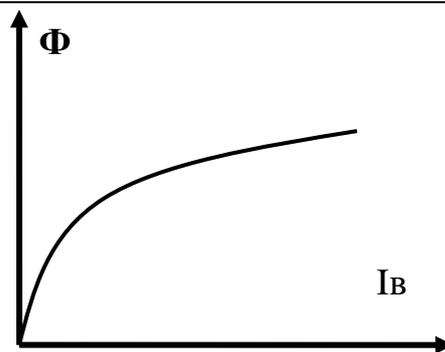


Рис. 2 Зависимость намагничивания сердечника ДПТ ПВ

Отличительной особенностью двигателей последовательного возбуждения является включение обмотки возбуждения последовательно с обмоткой якоря (рис. 1) и создание основного магнитного потока током якоря. При сравнительно малых нагрузках, когда сердечники двигателя не насыщенный, магнитный поток пропорционален току (рис. 2), т.е.

$$\Phi = kI_{\text{я}} \quad (3.1)$$

Подставляя эту зависимость в выражение для электромагнитного момента ($M = c\Phi I_{\text{я}}$), получим:

$$M = c\Phi I_{\text{я}} = ckI_{\text{я}}^2, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности между током якоря и магнитным потоком.

Как известно (из курса электрических машин), допустимые нагрузки двигателей постоянного тока определяются в основном допустимыми токами якоря, которые могут приводить к перегреву обмоток якоря и выходу из строя щеток якоря или обмотки (повышенному искрению щеток). (Из этого следует, что) У двигателей последовательного возбуждения момент пропорционален квадрату тока якоря, и как следствие они обладают большей перегрузочной способностью, чем двигатели с параллельным возбуждением.

Уравнение скоростной характеристики этого двигателя можно получить из ($I_{я} = \frac{U - c\Phi\omega}{r_{я.ц} + R_{д}}$), выразив в нем магнитный поток через ток якоря:

$$I_{я} = \frac{U}{r_{я.ц} + R_{д}} - \frac{ckI_{я}}{r_{я.ц} + R_{д}}\omega. \quad (3.3)$$

где $r_{я.ц}$ – сопротивление **якорной цепи**, куда входит $r_{я}$ – сопротивление обмотки якоря, r_{σ} – сопротивление обмотки возбуждения и $r_{д.п}$ – сопротивление дополнительных полюсов. В расчетах обычно принимают $r_{я.ц} \approx 1,5r_{я}$ (3.3)

Решив выражение ($I_{я} = \frac{U}{r_{я.ц} + R_{д}} - \frac{ckI_{я}}{r_{я.ц} + R_{д}}\omega$) относительно тока, получим уравнение скоростной характеристики двигателя:

$$I_{я} = \frac{U}{r_{я.ц} + R_{д} + ck\omega} \quad (3.4)$$

Ток двигателя является гиперболической функцией угловой скорости при малых нагрузках, когда как магнитный поток пропорционален току якоря. При увеличении нагрузки и насыщении сердечников зависимость тока от скорости переходит в прямую линейную.

После умножения обеих частей выражения ($I_{я} = \frac{U}{r_{я.ц} + R_{д}} - \frac{ckI_{я}}{r_{я.ц} + R_{д}}\omega$) на $c\Phi$, получаем уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{Uc\Phi}{r_{я.ц} + R_{д}} - \frac{(c\Phi)^2}{r_{я.ц} + R_{д}}\omega \quad (3.5)$$

и выразим угловую скорость:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я.ц} + R_{д}}{(c\Phi)^2}M \quad (3.6)$$

Подставив значения магнитного потока из формулы ($\Phi = kI_{я}$) и момента из ($M = c\Phi I_{я} = ckI_{я}^2$), после преобразований получим:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{Mck}} - \frac{r_{я.ц} + R_{д}}{ck} \quad (3.7)$$

В полученном выражении для постоянных величин введем обозначения

$$A_1 = \frac{U}{\sqrt{ck}} \quad \text{и} \quad B_1 = \frac{r_{я.ц} + R_{д}}{ck} \quad (3.8)$$

и решим его относительно момента:

$$M = \frac{A_1^2}{(\omega + B_1)^2} \quad (3.9)$$

Величина B_1 на много меньше номинальной скорости двигателя, поэтому без большой погрешности можно принять $B_1 \approx 0$.

Тогда уравнение механической характеристики запишется как:

$$M = \frac{A_1^2}{\omega^2} . \quad (3.10)$$

Отсюда следует, что механическая характеристика двигателя представляет собою квадратичную гиперболу.

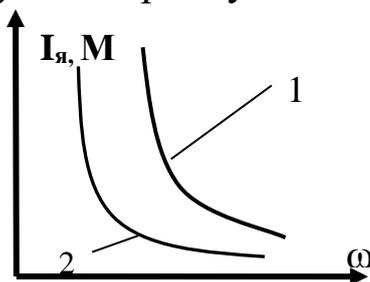


Рис 3 Графики скоростной и механической характеристики ДПТ ПВ

Из графиков (рис.3) видно, что при малых нагрузках, механические и скоростные характеристики обладают невысокой жесткостью, т.е. при незначительном изменении нагрузки угловая скорость изменяется в широких пределах. При возрастании тока нагрузки жесткость характеристик увеличивается.

Уравнения скоростной ($I_{я} = \frac{U}{r_{я.ц} + R_{\delta} + ck\omega}$) и механической ($M = \frac{A_1^2}{\omega^2}$) характеристик выводились в предположении, что магнитная цепь двигателя **ненасыщенна и магнитный** поток пропорционален току якоря. На практике современные двигатели при нагрузках, близких к номинальным, работают в зоне насыщения магнитопроводов, линейная зависимость между током и магнитным потоком нарушается, а характеристики из гиперболических постепенно переходят в прямолинейные. Поэтому эти уравнения справедливы только при малых нагрузках и не соответствуют реальным характеристикам.

ДПТ ПВ применяются в тех установках, где по роду работы не требуется постоянства скорости, но важным является преодоление больших нагрузок, например в подъемно-транспортных установках: трамваях, троллейбусах, электрокарах, электропоездах и т.п. При значительном уменьшении нагрузки (в том числе при режиме холостого хода) скорость двигателя сильно увеличивается, и теоретически стремится к бесконечности. Практически из-за механических потерь и остаточного магнетизма, он набирает скорость в 5...6 раз больше номинальной (говорят двигатель идет вразнос), что вызывает сильное искрение на коллекторе вплоть до появления кругового огня и может привести к разрушению двигателя. По этим соображениям в электроприводах с такими двигателями не разрешается применять ременные и клиноременные передачи в связи с опасностью обрыва или соскальзывания ремней; в этих приводах применяются соединения муфтами, цепные, зубчатые

или червячные передачи. Не допускается также работа этих двигателей при нагрузках меньше 25% от номинальной.

2. Универсальные характеристики ДПТ с последовательным возбуждением.

Для построения характеристик обычно используются не уравнения, а графические зависимости момента и скорости от тока якоря, выраженные в относительных единицах, приводимых в каталогах и справочниках. Эти характеристики называются универсальными, т.к. могут использоваться для широкого ряда мощностей электродвигателей.

Естественные механическая $\mu=f(v)$ и скоростная $i=\varphi(v)$ характеристики двигателя последовательного возбуждения в относительных единицах представлены на рисунке 4.

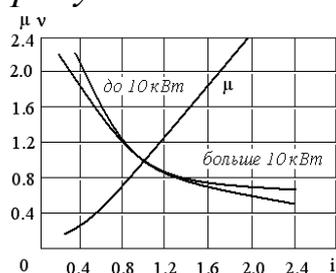


Рис. 4 Универсальные характеристики ДПТ ПВ.

3. Построение скоростных и механических характеристик ДПТ ПВ по универсальным характеристикам.

Для построения естественных скоростных и механических характеристик используются паспортные данные двигателя и универсальные характеристики.

$$P_n ; I_n ; U_n ; n_n ; \eta_n$$

$$1. \text{ Вначале определяем } \omega_n \text{ и } M_n, : \quad \omega_i = \frac{\pi n_i}{30} \quad M_i = \frac{P_i}{\omega_i} \quad (3.11)$$

2. Строится таблица для расчета характеристик двигателя (3.11):

Переменные	Численные значения					
i	0,4	0,8	1,2	1,6	2
μ	0,3	0,7	1,3
v	1,8	1,1	0,9
$\omega = v\omega_n$						
$M = \mu M_n$						
$I = iI_n$						

2.1. Задается ряд значений относительных токов с требуемым шагом (из графиков универсальных характеристик).

2.2. По универсальным характеристикам находят относительные скорости, соответствующие принятым значениям относительных токов.

2.3. Используя номинальные значения тока, скорости и момента из паспорта данного двигателя, полученные относительные значения

этих величин переводятся в абсолютные, по которым строится естественная скоростная и механическая характеристика.

4. Построение искусственных скоростных и механических характеристик ДПТ с последовательным возбуждением.

Расчет искусственных механических и скоростных характеристик по уравнениям $(I_{я} = \frac{U}{r_{яц} + R_{\delta}} - \frac{ckI_{я}}{r_{яц} + R_{\delta}} \omega)$ (3.3) и $(\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{яц} + R_{\delta}}{(c\Phi)^2} M)$ из-за непостоянства магнитного потока не представляется возможным.

Учитывая, что при **одном и том же значении** тока якоря на естественной и искусственной характеристиках магнитный поток **один и тот же**, из уравнения (3.3) можно выразить угловые скорости:

на естественной характеристике: $\omega_e = \frac{U_n - I_{я} r_{яц}}{c\Phi}$, (3.12)

на искусственной реостатной характеристике: $\omega_{ur} = \frac{U_n - I_{я}(r_{яц} + R_{\delta})}{c\Phi}$, (3.13)

Поделив правые и левые части выражений (3.12) и (3.13), получим уравнение скоростной искусственной характеристики при заданном добавочном сопротивлении R_{δ} :

$$\omega_{ur} = \omega_e \frac{U_n - I_{я}(r_{яц} + R_{\delta})}{U_n - I_{я} r_{яц}}. \quad (3.14)$$

После преобразований в (3.14) перейдем от уравнения в абсолютных величинах к уравнению в относительных единицах.

Для этого разделим обе части равенства $(\omega_{ur} = \omega_e \frac{U_n - I_{я}(r_{яц} + R_{\delta})}{U_n - I_{я} r_{яц}})$ на ω_n , чис-

литель и знаменатель правой части разделим на U_n , а токи в числителе и знаменателе умножим на отношение R_n/R_n .

Полагая далее, что $\omega_{ur}/\omega_n = v_{ur}$, $\omega_e/\omega_n = v_e$, $U_n/I_n = R_n$ и $(r_{яц} + R_{\delta})/R_n = \rho_{яц} + \rho_{\delta}$, окончательно можно записать

$$v_{ur} = v_e \frac{1 - i_{я}(\rho_{яц} + \rho_{\delta})}{1 - i_{я}\rho_{яц}}. \quad (3.15)$$

Уравнения (3.14) и (3.15) позволяют строить естественные и искусственные резисторные характеристики в абсолютных и относительных единицах.

При изменении напряжения в них следует принять добавочное сопротивление равным нулю и изменять подводимое напряжение. В этом случае механическая характеристика в относительных единицах при-

нимает вид: $v_{ur} = v_e \frac{u - i_{я}\rho_{яц}}{1 - i_{я}\rho_{яц}}$ (3.16)

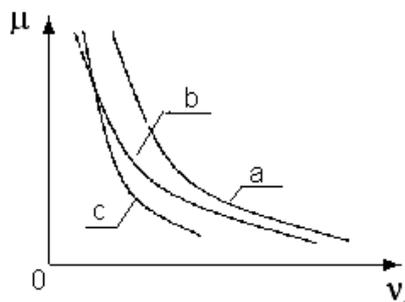


Рис 5 Естественная и искусственная характеристики ДПТ ПВ

На рис. 5 показаны механические характеристики в относительных единицах: естественная – *a* и искусственные – *c* при напряжении $0,5U_n$ и резисторная – *b* при $R_d = 2r_{яц}$

5. Тормозные режимы ДПТ ПВ.

У двигателей постоянного тока последовательного возбуждения возможны два тормозных режима: **динамический** и **противовключением**. **Генераторный** тормозной режим невозможен т.к. у этих двигателей отсутствует скорость, при которой электродвижущая (э.д.с.) сила превышала бы напряжение сети.

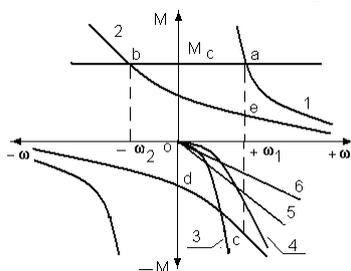


Рис 6 Механическая характеристика ДПТ ПВ в тормозных режимах

В режим торможения **противовключением** двигатель переходит, когда за счет приложенного к валу внешнего момента, он начинает вращаться в сторону, противоположную включению. Для ограничения тока в цепь якоря необходимо ввести **добавочное сопротивление**.

Если принять, что двигатель нагружен постоянным, не зависящим от величины и направления скорости моментом сопротивления M_c , то при работе на естественной характеристике (кривая 1 на рис.6) в точке *a* момент двигателя и скорость ω_1 имеют одинаковые знаки, что соответствует двигательному режиму. При введении в цепь якоря добавочного сопротивления двигатель перейдет на искусственную характеристику (кривая 2) в точке *e*. При этом момент, развиваемый двигателем, меньше момента сопротивления, в результате чего вначале происходит замедление и затем изменение направления скорости до $-\omega_2$, когда наступает равновесие моментов в точке *b*. При положительном моменте скорость становится отрицательной и двигатель работает в режиме торможения **противовключением**. Этот способ торможения обычно применяется для спуска грузов, поэтому его еще называют **режимом тормозного спуска**.

Торможение противовключением можно получить путем реверсирования двигателя, то есть, поменяв полярность обмотки якоря или обмотки возбуждения, с одновременным введением в цепь якоря необходимого добавочного сопротивления для ограничения тока.

Как показано на рисунке (6), если двигатель работал на естественной характеристике прямого вращения в точке a при скорости ω_1 , то после реверсирования он переходит на искусственную реостатную характеристику обратного вращения в точке c , развивая тормозной момент. В интервале скорости от точки c до точки d двигатель **работает в режиме торможения противовключением**.

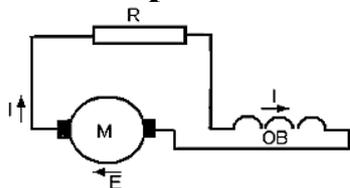


Рис 7 Схема включения ДПТ ПВ при динамическом торможении с самовозбуждением

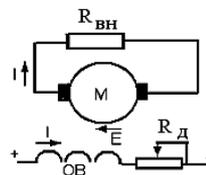


Рис 8 Схема включения ДПТ ПВ при динамическом торможении с НВ

Для динамического торможения с самовозбуждением двигатель полностью отключается от сети и цепь якоря замыкается на внешнее сопротивление (рис.7). Во избежание саморазмагничивания необходимо изменить **на противоположную полярность** подключения **якоря** или обмотки **возбуждения**. В момент включения двигателя, благодаря остаточному магнетизму, в якоре наводится э.д.с., и происходит процесс самовозбуждения.

Вначале намагничивающий ток, обусловленный э.д.с. от остаточного магнетизма невелик. В дальнейшем ток быстро возрастает и происходит резкий скачок тормозного момента (**линии 3 и 4** на рис. 7), что при сравнительно больших инерционных массах механизма может вызвать **нежелательные удары** в звеньях передаточного устройства.

В связи с этим на практике для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения чаще применяется динамическое торможение с независимым возбуждением (рис. 8). Здесь обмотка возбуждения через сопротивление, ограничивающее в ней ток, подключается к источнику постоянного тока, а обмотка якоря замыкается на внешнее сопротивление. В этом случае динамический тормозной режим ни чем не отличается от ранее рассмотренного для двигателей параллельного возбуждения: механические характеристики линейные и пересекаются в точке при скорости, равной нулю (**линии 5 и 6** на рис. 8).

6. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений ДПТ ПВ.

Расчет пусковых сопротивлений двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, как и двигателей параллельного возбуждения, предусматривает:

1. **нахождение полного сопротивления;**
2. **числа ступеней;**

3. сопротивление каждой ступени.

После отключения последней ступени выход на естественную характеристику должен происходить при пусковом токе I_1 .

Расчеты пусковых и тормозных сопротивлений можно производить *графо-аналитическим* и *графическим* методами.

Графо-аналитический метод.

Рассмотрим пример схемы пуска и пусковой диаграммы для трех ступеней сопротивлений приведен на рис. 9.

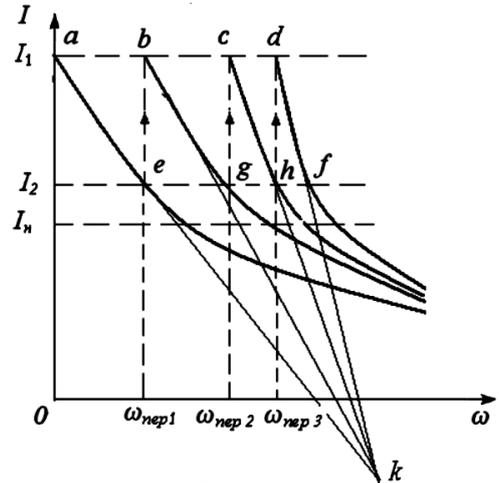
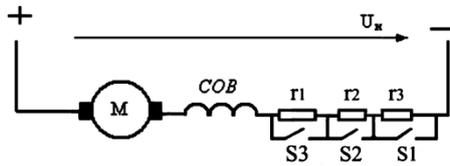


Рис 9 схемы пуска для трех ступеней ДПТ ПВ.

Рис 10 Пусковая диаграмма для 3 ступеней ДПТ ПВ.

Расчет ступеней пусковых резисторов ведется в следующем порядке:
1. Задаем значения пускового тока I_1 и тока переключения I_2 , и рассчитываем полное сопротивление якорной цепи при пуске

$$R_{доб} = \frac{U_n}{I_1} - r_{я.ц}. \quad (3.17)$$

2. По универсальным характеристикам строим естественную и по выражению $(v_{ur} = v_e \frac{1 - i_y(\rho_{яц} + \rho_o)}{1 - i_y \rho_{яц}})$ (3.15), искусственную при полном добавочном сопротивлении скоростные характеристики двигателя.

Как отмечалось ранее (рис 2.) При малых нагрузках зависимость между током и магнитным потоком не линейна. Однако при токе якоря, превышающем номинальный, скоростные характеристики становятся близкими к линейным, поскольку незначительное увеличение магнитного потока при росте тока компенсируется реакцией якоря. Таким образом, в этом режиме работы магнитный поток, пересекающий обмотку якоря, практически остается постоянным ($c\Phi \approx const$).

Линейные части характеристик продлеваем до пересечения в точке k , образуя между собой подобные треугольники с параллельными основаниями, образуемыми линиями пускового тока I_1 и тока переключения I_2 .

Из точки пересечения линии тока I_2 и первой пусковой характеристики проводим линию перехода тока на вторую пусковую характеристику

стику после отключения первой ступени сопротивления (линия eb на **рис. 10**). Из точки b проводим линию bk и так далее до полного построения пусковой диаграммы. (**рис.10**) Если при отключении последней ступени сопротивления, выход на естественную характеристику окажется выше или ниже точки d , необходимо изменить величину тока переключения I_2 и вновь повторить построение пусковой диаграммы.

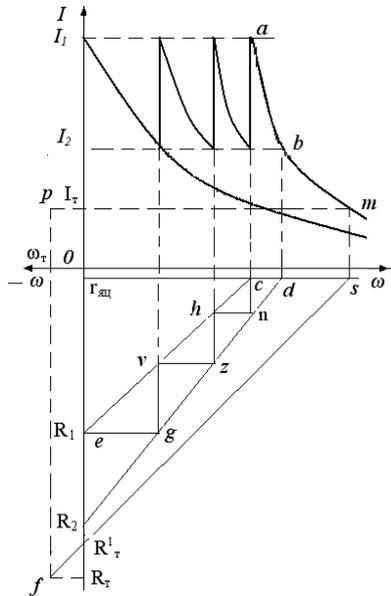


Рис. 11

3. Значения сопротивлений отдельных ступеней определяются из соотношения пропорциональных сторон подобных треугольников:

$$r_1 = \frac{R_{дооб} ab}{ad} \quad r_2 = \frac{R_{дооб} bc}{ad} \quad r_3 = \frac{R_{дооб} cd}{ad} \quad (3.18).$$

Величину $R_{дооб}/ad$ может рассматриваться, как масштаб, сопротивления, а отрезки ab , bc и cd пропорциональны сопротивлениям первой, второй и третьей ступеней пускового резистора.

Графический метод.

1.1. Задаем пусковые токи I_1 и I_2 .

1.2. Вычисляем $r_{яц}$ по приближенной формуле:

$$r_{яц} = 1,5 \cdot 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n) \quad (3.19)$$

1.3. Определяем полное добавочное пусковое сопротивление R_1 и вспомогательное сопротивление R_2

$$R_1 = \frac{U_n}{I_1} - r_{яц} \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{U_n}{I_2} - r_{яц} \quad (3.20)$$

Переходим к графической части расчета:

2.1. Аналогично методике графо-аналитического метода строим естественную скоростную характеристики. Наносим токи I_1 и I_2 , на пусковую диаграмму (рис. 11) и проводим горизонтали до пересечения с естественной характеристикой (т. a и b).

2.2. На оси ординат вниз от нуля откладываем в произвольном масштабе сопротивление якорной цепи $r_{яц}$, через полученную точку проводим линию, параллельную оси абсцисс.

2.3. Из точек пересечения линий пусковых токов с естественной характеристикой a и b проводим вертикали до пересечения с линией $r_{яц}$, в точках c и d .

2.4. Откладываются на оси ординат вниз от $r_{яц}$ (где точка 0_r , будет началом отчета) в масштабе R_1 и R_2 . Через концы этих отрезков и точки c и d проводим наклонные линии.

2.5. Начиная с точки e , строим ступенчатую линию $egvhn$. В том случае, если точка n не совпадает с вертикалью cb , необходимо изменить значение тока переключения I_2 и вновь произвести построения, добиваясь этого совпадения. Количество вертикальных отрезков ступенчатой линии gv , zh и т.д. указывает на количество ступеней пускового резистора, а их величины в принятом масштабе выражают сопротивления этих ступеней.

Расчет сопротивления торможения противовключением

1. Задаются параметрам торможения: I_m и ω_m .
2. По заданному току торможения определяем вспомогательную величину тормозного сопротивления.

$$R'_m = \frac{U}{I_m} - r_{яц}, \quad (3.21)$$

3. На графике в масштабе откладываем откладываем I_m и ω_m , R'_m
4. По этим координатам строим точку p , через которую проводим горизонталь до пересечения с естественной характеристикой в точке m . Из этой точки проводим вертикаль до точки s .

5. Через точки s и конец отрезка сопротивления R'_m проводим линию до пересечения с границей скорости торможения в точке f . Проецируя точку f на ось ординат, получаем искомое сопротивление торможения R_m .

7. Механические характеристики ДПТ смешанного возбуждения.

Двигатели смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения, одна из которых включается параллельно якорю (ШОВ), и вторая (СОВ) последовательно (рис. 12).

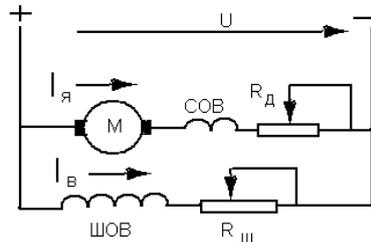


Рис. 12 Принципиальная электрическая схема ДПТ СВ.

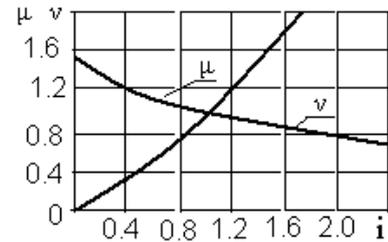
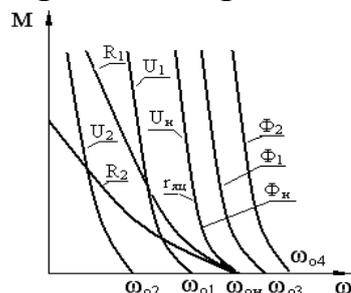


Рис. 13 Универсальные характеристики ДПТ СВ.

Магнитный поток главных полюсов складывается из двух потоков, постоянного, независящего от нагрузки, и потока, создаваемого током якоря. Поэтому в двигателе смешанного возбуждения сочетаются свойства двигателей параллельного и последовательного возбуждения, а его механические характеристики занимают промежуточное положение между характеристиками этих двигателей. Соотношение магнитных потоков параллельной и последовательной обмоток у двигателей различного типа может быть различным; чаще всего применяются двигатели, у которых при номинальном токе нагрузки намагничивающие **силы обеих обмоток равны**. Двигателям смешанного возбуждения свойственно значительное насыщение магнитной системы при нагрузках номинальных и выше. Вследствие изменения **магнитного потока при изменении нагрузки аналитического выражения для механических и скоростных характеристик не существует**, поэтому при расчетах обычно пользуются универсальными характеристиками (рис. 13), аналогичными характеристикам двигателей последовательного возбуждения. Эти характеристики приводятся в справочной литературе.



$$R_1 > R_2 > R_3 \quad U_1 > U_2 > U_3 \\ \Phi_n > \Phi_1 > \Phi_2$$

Рис. 14. Естественная и искусственные механические характеристики ДПТ СВ

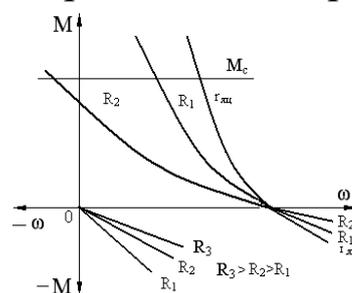


Рис. 15 Механические характеристики ДПТ СВ в тормозных режимах

Двигатели смешанного возбуждения могут работать на искусственных характеристиках при изменении сопротивления якорной цепи, напряжения и магнитного потока. Выведенные ранее общие выражения

для скоростных ($I_{я} = \frac{U - c\Phi\omega}{r_{я} + R_0}$) и механических ($M = \frac{Uc\Phi}{r_{я} + R_0} - \frac{(c\Phi)^2}{r_{я} + R_0}\omega$) характеристик двигателей постоянного тока справедливы и для двигателей смешанного возбуждения. Из этих уравнений следует, что при токе нагрузки, равном нулю, резисторные характеристики проходят через точку скорости идеального холостого хода. Эти двигатели в отличие от двигателей последовательного возбуждения имеют конечную величину скорости идеального холостого хода, которая определяется магнитным потоком, создаваемым параллельной обмоткой возбуждения. При увеличении тока нагрузки скорость вначале резко снижается, а затем по мере насыщения магнитной системы падает более медленно и по линейному закону, как у двигателей параллельного возбуждения. Угол наклона характеристик зависит от сопротивления цепи якоря.

При снижении напряжения на зажимах якоря уменьшается скорость идеального холостого хода, поэтому искусственные характеристики смещаются в сторону уменьшения скорости (**рис. 14**). При уменьшении магнитного потока параллельной обмотки скорость идеального холостого хода увеличивается, что приводит к смещению характеристик в сторону больших скоростей.

Двигатели смешанного возбуждения могут работать во всех трех режимах электрического торможения: с отдачей электрической энергии в сеть, динамическом и противовключением. На **рис. 15** приведены механические характеристики тормозных режимов двигателя со смешанным возбуждением. Торможение с отдачей энергии в сеть происходит при изменении направления тока в якоре и в последовательной обмотке возбуждения, когда скорость становится выше скорости идеального холостого хода. Это может привести к размагничиванию двигателя и снижению эффективности торможения. Поэтому этот тормозной режим обычно осуществляют при зашунтированной последовательной обмотке по системе независимого возбуждения и механические характеристики принимают вид прямых. По тем же соображениям и динамический тормозной режим целесообразно осуществлять по схеме независимого возбуждения при линейных механических характеристиках (**рис.15**). Тормозной режим противовключением аналогично двигателям с параллельным возбуждением получают путем принудительного вращения вала двигателя против направления его включения при введенных в цепь якоря токоограничительных сопротивлениях.