

УДК. 621.313.333

А.В.Китаев, В.И.Глухова, В.Л.Агбомассу

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

У роботі показано, що аналіз поведінки синхронних двигунів та двигунів постійного струму, може бути побудований на використанні схем заміщення, аналогічних схемі заміщення асинхронного двигуна з електричним еквівалентом механічної потужності на валу, завдяки чому досягнуто уніфікації дослідження всіх вказаних типів електричних машин.

Введение. Согласно канонов дидактики, изложение материала каждой изучаемой дисциплины должно строиться на основе соблюдения принципов системности и преемственности. Аналогичные требования постоянно звучат и в директивных документах Министерства образования. Если под таким ракурсом рассмотрим курс «Электрические машины», то в итоге будут установлены разные точки зрения, например:

- материал построен строго, четко и удовлетворяет все выставленные требования;
- электрические машины столь разнотипные устройства, что разговор о какой-либо системности и унификации беспредметен;
- курс объемный, сложный и по целому ряду разделов требует усилий по совершенствованию логической последовательности при изложении материала.

Если согласиться с последним мнением, то разговор о схемах замещения электрических двигателей приобретает значительный интерес, остроту и актуальность. Его существо изложено ниже.

Асинхронный двигатель

Изложение общей теории теории электрических машин построено так, что знакомство со схемами замещения начинается еще в разделе «Трансформаторы». Именно здесь подчеркивается, что схема замещения – это физико-математическая модель в виде простой электрической цепи, которая способствует пониманию процессов, определяющих работу ТР, и упрощению расчетов. Изложенные причины определили необходимость усилий по обеспечению приемлемости системы основных уравнений и схемы замещения ТР по отношению к асинхронному двигателю (АД). Полученная в итоге схема приведена на Рис.1а. Применяя по отношению к ней метод эквивалентного генератора и положения теории четырехполюсников, можно добиться ее существенного упрощения (см. Рис.1б, в). Среди основных достоинств приведенных схем особо подчеркивают, что здесь удалось отразить выходную механическую мощность в виде электрического эквивалента. Нетрудно составить перечень вопросов, решение которых было сделано на основе обращения к схеме замещения АД:

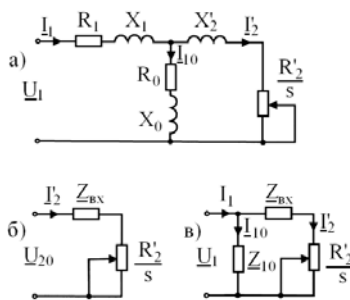


Рис.1. Схемы замещения АД

1. Найти аналитические соотношения для определения момента M ; скорости вращения ротора n_2 ; мощности на валу P_2 ; тока в обмотке статора I_1 ; мощности, потребляемой от источника P_1 ; к.п.д. η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ в функции скольжения s (см. таблицу 1).
2. Рассчитать и построить семейство характеристик скольжения (см. Рис. 2), которые легко перестраиваются в зависимости от другого переменного параметра, например, мощности P_2 , т.е. в семейство рабочих характеристик (см. Рис. 3).
3. Исследовать поведение АД в генераторном и тормозном режимах.

4. Исследовать поведение АД при динамическом и конденсаторном торможении; установить критерии самовозбуждения на верхней и нижней критических скоростях;
5. Разработать алгоритм оперативной оценки возможностей АД на основании данных каталога [1];
6. Построить круговую диаграмму АД и т.д.

При записи аналитических соотношений таблицы 1 использованы относительные значения частоты вращения, момента, тока и мощности. В качестве базовых значений для построения семейства характеристик скольжения выбраны: n_1 – частота вращения магнитного поля статора; M_{MAX} – максимальный момент; $I_{2кз}$ – ток короткого замыкания в цепи ротора и $P_{2ЭMAX} = \omega_1 M_{MAX}$ – максимальная электромагнитная мощность. При построении рабочих характеристик базовые значения тока и мощности заменены на $I'_{2НОМ}$ – приведенный ток в обмотке ротора при номинальном режиме, и $P_{2ЭНОМ} = \omega_1 M_{НОМ}$.

Разумеется, что схемы замещения, приведенные на Рис.1, не учитывают такие глубинные процессы поведения АД, как вытеснение тока в обмотках статора и ротора, их интенсивный нагрев при пуске машины и т.д. Поэтому сопоставление расчетных значений по формулам таблицы 1 с результатами эксперимента и практики желаемой сходимости часто не дает. Например, зависимость $\mu = f(s)$, рассчитанная по формуле момента табл. 1 (формула Клосса), характеризуется значением пусковых моментов, которые отличаются от каталожных данных примерно в два раза. Для устранения проблемы было предложено считать, что АД имеет разные критические скольжения на устойчивом и неустойчивых участках работы [3]. Причем на первом участке, где скольжения меняются от нуля до критического, можно полагать критическое скольжение равным s_{KM} . Находится оно из уравнений момента, записанных соответствен для номинального и критического режимов работы, и по известному значению перегрузочной способности АД. Для участка неустойчивой работы, согласно каталога, известно отношение пускового момента к номинальному. Поэтому запись системы уравнений для номинального и пускового режимов позволит найти еще одно критическое скольжение значением s_{KI} . Если принять, что в диапазоне изменения s от s_{KM} до единицы критическое скольжения меняется от s_{KM} до s_{KI} по линейному закону, то связь между текущими значениями s и s_K запишется в виде соотношения:

$$s_K = s_{KM} + \frac{s_{KI} - s_{KM}}{1 - s_{KM}} \cdot (s - s_{KM}) \tag{1}$$

Предложенная методика позволяет снизить расхождение между расчетными и опытными зависимостями $M = f(s)$ до значений приемлемой инженерной точности.

Таблица 1

Аналитические соотношения для расчета характеристик скольжения

Наименование показателя	Аналитическое соотношение
Частота вращения ротора	$v = 1 - s$
Момент	$\mu = \frac{2ss_k}{s_k^2 + s^2}$
Мощность на валу	$p_2 = \mu v$
Ток в обмотке ротора	$\beta = \frac{s\sqrt{s_k^2 + 1}}{\sqrt{s_k^2 + s^2}}$
Угол сдвига между E'_2 и I'_2	$\psi = \arctg \frac{s}{s_k}$
Ток в обмотке статора	$\beta_1 = \left[\beta_0^2 + \beta^2 + 2\beta_0 \times \right]^{0,5}$ $\times \beta \sin(\psi_2 + \alpha_0)$
Потребляемая мощность	$p_1 = \mu + s + 2s_H$
К.п.д	$\eta = \frac{p_2}{p_1}$
Кэффиц мощности	$\cos \varphi_1 = \frac{\beta \cos(\psi_2 + \theta)}{\beta_1} + \frac{\beta_0 \cos(\alpha_0 + \theta)}{\beta_1}$

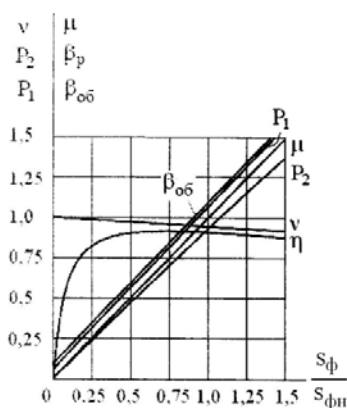


Рис. 2. Семейство характеристик скольжения

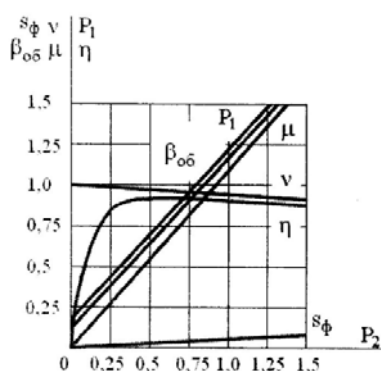


Рис. 3. Семейство рабочих характеристик

Короче говоря, схема замещения АД – это удобный, нужный и полезный инструмент исследования поведения машины. И если при решении конкретных вопросов она дает результат, не соответствующий объективной действительности, то чаще всего, как правило, удастся найти приемы по коррекции расчета, при которых желаемый уровень точности может быть обеспечен. И это обстоятельство не может трактоваться, как бесполезность и неприемлемость схемы замещения.

В ракурсе изложенного интересно сопоставить возможности и достоинства схемы замещения АД с аналогичными схемами других электрических двигателей (постоянного тока (ДПТ) и синхронного (СД)). Однако поиск таких схем в учебной и технической литературе [1, 2, 4, 5] успеха не принесет, поскольку их там нет.

Специалисты по электрическим машинам объясняют этот факт тем, что анализ поведения ДПТ и СД удалось выполнить без разработки схем замещения. Поэтому их поиск означает усложнение решения задачи и, следовательно, бесполезен. Подобные заявления не согласуются с методологией и логикой здравого смысла, поэтому покажем, что схемы замещения ДПТ и СД с электрическим эквивалентом механической мощности на валу могут быть построены и объективно обоснованы, причем они сохраняют все возможности и достоинства схем замещения АД, например, в части описания и построения характеристик.

Двигатель постоянного тока

При анализе поведения ДПТ, например, параллельного возбуждения, обычно приводят схему, изображенную на Рис. 4а. Она является электрической принципиальной схемой и к разряду схем замещения с электрическим эквивалентом механической мощности на валу отнесена быть не может. Однако, обращаясь к ней, можно составить уравнение баланса напряжений для якорной цепи:

$$U = I_{Я} R_{Я} + E_{Я}, \tag{2}$$

где U – напряжение источника питания; $I_{Я}, R_{Я}, E_{Я}$ – соответственно ток, сопротивления и э.д.с. якорной цепи.

Уравнение (2) после несложных преобразований нетрудно переписать в виде:

$$U = I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R_{\text{я}} \frac{1 - s_{\Phi}}{s_{\Phi}}) = I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}}}{s_{\Phi}}, \tag{3}$$

где $s_{\Phi} = \frac{n_o - n}{n_o}$ совпадает с определением скольжения s в асинхронных машинах, и потому может быть названо формальным или фиктивным скольжением; n_o – число оборотов ротора в минуту при идеальном холостом ходе.

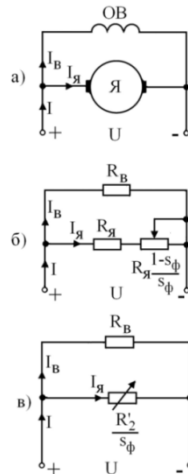


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема и схемы замещения ДПТ

На основании уравнения (3) могут быть составлены схемы замещения ДПТ (см. Рис. 4б, в), по существу сходные со схемами замещения АД. Следует подчеркнуть, что диапазон изменения s_{Φ} для ДПТ тот же самый, что и для скольжения s в АД, т.е. лежит в пределах от нуля (холостой ход) до 1 (режим пуска, где $n = 0$). Полная аналогия сохраняется так же при сопоставлении выражений $R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$; $\frac{R'_2}{s}$ и $R_{\text{я}} \cdot \frac{1-s_{\Phi}}{s_{\Phi}}$; $\frac{R_{\text{я}}}{s_{\Phi}}$, поскольку каждое из них выступает либо как эквивалент механической мощности на валу, либо как эквивалент электромагнитной мощности.

Схема замещения ДПТ параллельного возбуждения распространяется и на ДПТ независимого возбуждения, поскольку, если параметры и показатели обмотки возбуждения рассчитаны на напряжение, отличное от номинального напряжения якорной цепи $U_{НОМ}$, то, используя операцию приведения, их можно свести к $U_{НОМ}$.

Обеспеченная выше идентичность схем замещения АД и ДПТ независимого и параллельного возбуждения открывает возможность унификации описания их характеристик. Поэтому в число характеристик ДПТ, наряду с известными, войдут и характеристики, которые принято считать относящимися только к АД:

- моментная характеристика или зависимость $M = f(s_{\Phi})$;
- механическая характеристика или зависимость $n = f(M)$;
- скоростная характеристика или зависимость $n = f(I_{\text{я}})$;
- семейство рабочих характеристик или зависимостей $s_{\Phi}, n, M, I, P_1, \eta = f(P_2)$.

Рассмотрим относящиеся к ним подробности.

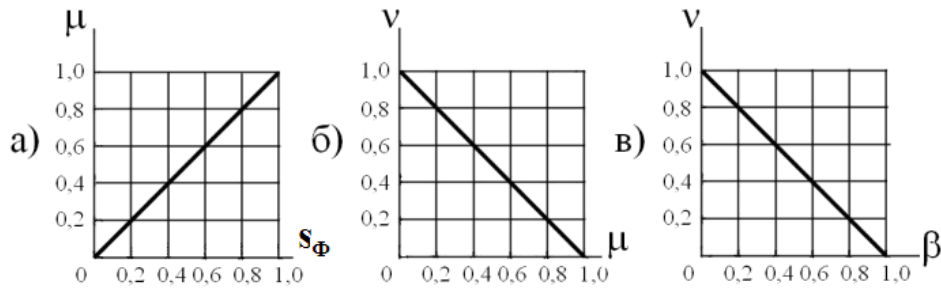


Рис. 5. Моментная, механическая и скоростная характеристики ДПТ

Моментная характеристика

Вывод аналитического выражения моментной характеристики выполним тем же приемом, который используется по отношению к АД:

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}}{\omega_0 s_{\phi}} = \frac{(U - c_E n \Phi)^2}{\omega_0 s_{\phi} R_{\text{я}}} = M_{\text{max}} s_{\phi}, \tag{4}$$

где ω_0, ω – угловые скорости вращения якоря при холостом ходе и избранном режиме; M_{MAX} – максимальный момент ДПТ; c_E – коэффициент; Φ – магнитный поток.

Полученное уравнение (4) является уравнением прямой, выходящей из начала координат. Она может быть построена при конкретных числовых значениях, если перейти на использование относительных значений. С этой целью введем относительное значение момента $\mu = M / M_{\text{MAX}}$. Тогда аналитическое выражение моментной характеристики запишется в виде

$$\mu = s_{\phi}. \tag{4a}$$

Ее графическое изображение дано на Рис. 5а.

Механическая характеристика

В случае АД усилий по определению её аналитического выражения не предпринимают, а используют прием перестроения $M = f(s)$ в $n = f(M)$. Он основывается на том, что для любого фиксированного момента M число оборотов n найдется по соотношению: $n = n_0(1 - s)$. Этот прием может быть использован и для ДПТ, но линейный характер моментной характеристики определяет линейность и механической характеристики, которая подчиняется следующему аналитическому выражению:

$$n = n_0 \left(1 - M \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} \right) = n_0 \left(1 - \frac{M}{M_{\text{MAX}}} \right), \tag{5}$$

или после перехода к относительным значениям момента и числа оборотов $v = n / n_0$ получим

$$v = 1 - \mu. \tag{5a}$$

Графическое изображение механической характеристики дано на Рис. 5б.

Скоростная характеристика

Вновь воспользуемся уравнением баланса напряжений, которое перепишем в виде

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}}}{c_E \Phi} = n_0 \left(1 - \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{ЯКЗ}}} \right). \tag{6}$$

Переход к относительным значениям здесь даст следующее выражение

$$n = 1 \quad \text{в}, \quad (6a)$$

где $\beta = I_{\text{я}} / I_{\text{якз}}$, а ток короткого замыкания $I_{\text{якз}}$ находится делением напряжения сети питания U на сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$. Отсюда, при сопоставлении (4а), (5а), (6а), получаем $s_{\Phi} = \mu = \beta$. Поэтому графическое изображение скоростной характеристики (Рис. 5в) повторяет изображение механической характеристики.

Семейство характеристик скольжения

Аналитические соотношения для семейства характеристик скольжения в относительных значениях приведены в таблице 2. На рис. 6 дано их графическое изображение в диапазоне скольжений от нуля до единицы.

Здесь следует объяснить, что рабочий диапазон скольжений ДПТ существенный и лежит в пределах от 0 до $1,5 s_{\Phi H}$. Это приводит к малым и неудобным относительным числовым значениям тока и мощности (порядка 0,01, 0,001 и т.п.), а при построении характеристик желательно, чтобы эти показатели в номинальном режиме имели значение, равное единице. Очевидно, что в таком случае целесообразно изменить масштаб путем смены базовых показателей режима короткого замыкания на показатели номинального режима, а в качестве переменного аргумента использовать отношение $\frac{s_{\Phi}}{s_{\Phi H}}$.

В итоге, зависимости семейства характеристик скольжения будут описываться другими числовыми значениями, одновременно изменится их графическое изображение (см. Рис.7).

Семейство рабочих характеристик

В принципе возможна аналитическая запись входящих сюда зависимостей. Однако полученные в итоге соотношения будут иметь громоздкий вид и неудобны для расчета. Более выгодно здесь использовать прием перестроения, основываясь на уже известных результатах расчета семейства характеристик скольжения. В итоге будут построены графические зависимости семейства рабочих характеристики (см. Рис.8).

Таблица 2

Аналитические соотношения для расчета характеристик скольжения ДПТ

Наименование показателя	Аналитические соотношения
Частота вращения ротора	$v = 1 - s_{\Phi}$
Момент	$\mu = s_{\Phi}$
Мощность на валу	$p_2 = v \cdot \mu$
Ток в обмотке якоря	$\beta = s_{\Phi}$
Ток, потребляемый двигателем от источника	$\beta_1 = \beta + \beta_0$
Потребляемая мощность от источника	$p_1 = \mu + s_{\Phi} + 2s_{\Phi H}$
К.п.д	$\eta = \frac{p_2}{p_1}$

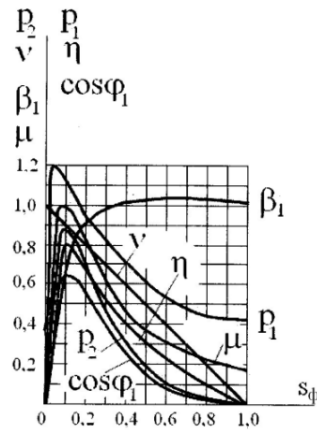


Рис. 6. Семейство характеристик скольжения

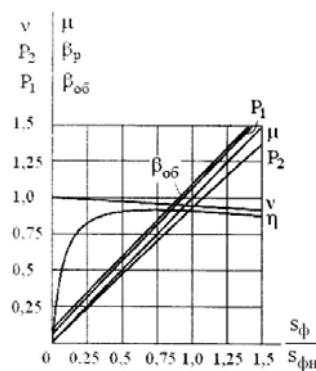


Рис. 7. Семейство характеристик для диапазона рабочих скольжений

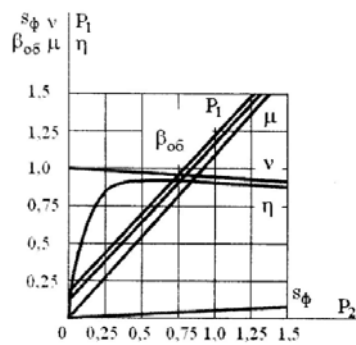


Рис. 8. Семейство рабочих характеристик

Синхронный двигатель

От АД и ДПТ синхронный двигатель (СД) принципиально отличается тем, что его ротор всегда вращается с неизменной (синхронной) скоростью, то есть у него нет скольжения. Тем не менее и для него можно составить схему замещения с электрическим эквивалентом механической мощности тем же приемом, который был использован по отношению к ДПТ. Но вначале решим вопрос с определением тока, потребляемого СД от сети. Обращаемся к основному уравнению баланса напряжений:

$$\underline{U} = \underline{I}Z_a + \underline{E}_a, \tag{7}$$

где $\underline{Z}_a = Z_a \cdot e^{j\varphi_a}$ – полное комплексное сопротивление якорной цепи с учетом реакции якоря; \underline{E}_a – э.д.с. обмотки якоря, наводимая основным магнитным потоком машины. Примем, что связь между \underline{U} и \underline{E}_a определяется соотношением: $\underline{E}_a = kUe^{-j\theta}$. Тогда из уравнения баланса напряжений найдется ток:

$$\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}}(1 - ke^{ju}) = \underline{I}_{КЗ}(1 - e^{ju}). \tag{8}$$

При использовании относительных значений последнее соотношение запишется в виде:

$$\underline{\epsilon} = 1 - ke^{ju} = \underline{\epsilon} e^{j\delta}, \tag{8a}$$

где $\underline{\epsilon} = \sqrt{1 + k^2 - 2k \cos u}$, $\delta = \arctg \frac{k \sin u}{1 - k \cos u}$.

Поскольку полный диапазон возможных значений θ лежит в пределах от нуля до девяносто градусов, то приняв дискретность изменения θ равной десять градусов, для любого избранного значения κ ($\kappa = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2$) можно рассчитать зависимость $\beta = f(\theta)$. При решении задач такого рода удобна и полезна векторно-круговая диаграмма, приведенная на Рис. 9. Она придает полученным результатам высокую степень наглядности и состоит из вектора, равного единице и расположенного на оси действительных чисел комплексной плоскости, ряда концентрических окружностей радиусом κ и шкалы значений угла u . Если под избранным углом θ провести вектор, по длине равный κ , а затем его конец соединить с концом единичного вектора, то вновь полученный вектор даст величину и пространственное положение вектора $\underline{\beta}$.

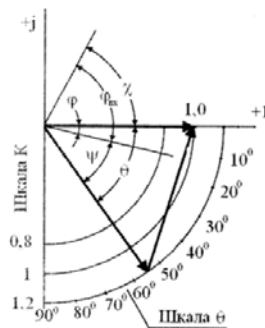


Рис. 9. Векторно-круговая диаграмма СД

В итоге, используя графические построения, можно найти зависимости $\beta = f(\theta)$ и даже $U -$ образные характеристики СД, уравнение (10) можно переписать и в другом виде, а именно:

$$\frac{U}{\underline{I}} = \underline{Z}_\epsilon = \frac{Z_a}{(1 - ke^{ju})} = \frac{Z_a}{\underline{\epsilon}} = \frac{Z_a}{\epsilon} e^{j(\phi_a - \delta)} = R_\epsilon + jX_\epsilon,$$

где

$$R_\epsilon = \frac{Z_a}{\epsilon} \cos(\phi_a - \delta); X_\epsilon = \frac{Z_a}{\epsilon} \sin(\phi_a - \delta).$$

Следовательно, для СД приемлема схема замещения, приведенная на Рис.10, где эквивалентом механической мощности выступает переменное активное сопротивление R_ϵ . Используя его, можно найти величину момента СД тем же приемом, что и для других типов электрических двигателей:

$$M = \frac{P_2}{\omega_0} = \frac{I^2}{\omega_0} R_\epsilon. \tag{9}$$

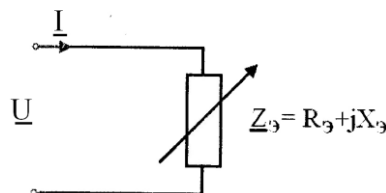


Рис. 10. Схема замещения СД

При переходе к относительным значениям момента, тока и сопротивлений получим:

$$\mu = \frac{\beta^2}{\beta_{90^0}^2} \cdot \frac{R_{\mathcal{E}}^*}{R_{\mathcal{E}90^0}^*}, \tag{9a}$$

где $\mu = \frac{M}{M_{MAX}}$; M_{MAX} – максимальный момент, который развивает СД при $\theta = 90^0$; β_{90^0} – относительное значение тока при максимальном моменте; $R_{\mathcal{E}}^*$, $R_{\mathcal{E}90^0}^*$ – эквивалентные активные сопротивления, соответствующие избранному значению θ и $\theta = 90^0$ (в относительных значениях).

Сохраняя тот же подход, можно получить аналитические соотношения в относительных значениях для выходной активной мощности. Используя найденные соотношения и векторно-круговую диаграмму, можно найти числовые значения выходной активной мощности p_2 , мощности, потребляемой от сети p_1 , к.п.д. η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$. Результаты этой работы сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Аналитические соотношения для расчета показателей СД

Наименование показателя	Аналитическое выражение в относительных единицах
Ток	$\beta = \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \theta}$
Частота вращения	$\nu = 1$
Момент	$\mu = \frac{\beta_{\theta}^2}{\beta_{90^0}^2} \cdot \frac{R_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}90^0}} = \sin \theta$
Мощность выхода	$p_2 = \mu \nu = \sin \theta$
Потребляемая мощность	$p_1 = \mu \nu + \sin \theta_X =$ $= \sin \theta_X + \frac{\beta_{\theta}^2}{\beta_{90^0}^2} \cdot \frac{R_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}90^0}}$
КПД	$\eta = \frac{p_2}{p_1}$
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1 = \frac{R_{\mathcal{E}}^*}{Z_{\mathcal{E}}^*}$

В таблице 4 приведены расчетные числовые значения показателей работы СД при $k = 1$ и $\varphi_a = 85^0$, в соответствии с которыми построено семейство угловых характеристик (Рис. 11), а затем последнее перестроено в семейство рабочих характеристик (Рис. 12).

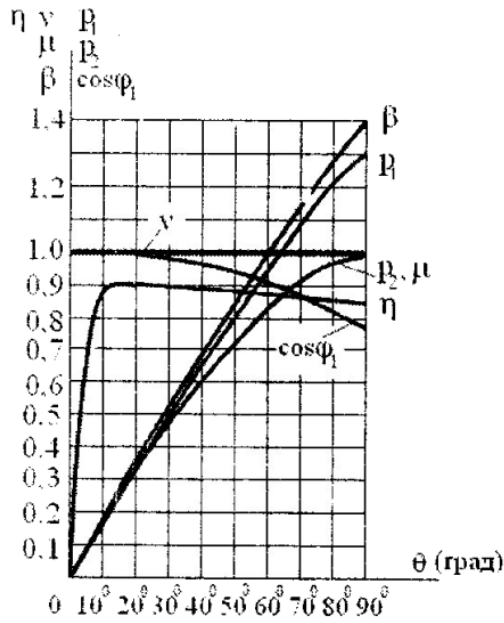


Рис. 11. Семейство угловых характеристик

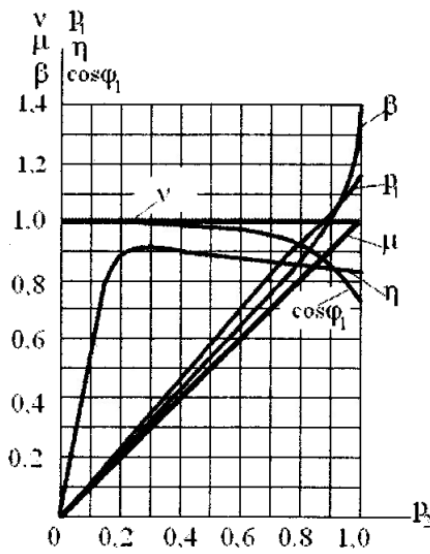


Рис. 12. Семейство рабочих характеристик

Если по форме таблицы 4 составить аналогичные, но при других значениях k , то к уже полученным зависимостям можно присовокупить семейство U -образных характеристик.

Таблица 4

Результаты расчетов показателей работы СД при $k = 1$ и $\varphi_a = 85^\circ$

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
β	0	0,174	0,347	0,52	0,684	0,845	1,0	1,147	1,285	1,414
x	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Z_v^*	∞	5,747	2,88	1,92	1,46	1,183	1,0	0,87	0,178	0,704

R_v^*	∞	5,66	2,87	1,89	1,41	1,11	0,9	0,753	0,04	0,54
X_v^*	0	0	0,251	0,33	0,98	0,404	0,42	0,435	0,446	0,45
ϕ_s	5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Ψ	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
μ	0	0,161	0,341	0,47	0,01	0,79	0,83	0,917	0,978	1
p_2	0	0,161	0,341	0,47	0,01	0,79	0,83	0,917	0,978	1
p_1	0,026	0,19	0,378	0,521	0,68	0,88	0,929	1,065	1,152	1,21
η	0	0,84	0,9	0,9	0,897	0,88	0,87	0,86	0,85	0,83
$\cos \varphi_1$	1	1	0,99	0,98	0,966	0,94	0,9	0,87	0,82	0,767

Выводы:

1. Схемы замещения с электрическим эквивалентом механической мощности могут быть составлены для электрических двигателей всех типов, что унифицирует методику исследования их поведения в полном соответствии с принципами системности и преемственности.
2. Полученные схемы позволяют построить вывод аналитических соотношений для основных характеристик АД, ДПТ и СД по единому алгоритму, причем в простом и компактном виде.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Важнов А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1968. – 768 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Китаев А.В. Глухова В.И. Анализ работы асинхронного двигателя по данным каталога // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – №1(11). – 2003. – С. 40-49.
4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 1. – Л.: Энергия. – 1972. – 544 с.
5. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2. – Л.: Энергия. – 1972. – 1973. – 648 с.
5. Петров Г.Н. Электрические машины. Часть 1. – М. – Л.: ГЭИ. – 1956. – 135 с.
6. Петров Г.Н. Электрические машины. Часть 2. – М. – Л.: ГЭИ. – 1963. – 416 с.
7. Петров Г.Н. Электрические машины. Часть 3. – М. – Л.: ГЭИ. – 1968. – 244 с.

КИТАЕВ Александр Васильевич – к.т.н., профессор кафедры энергетики и электротехники Херсонского национального технического университета.

Научные интересы:

– ТОО, электрические машины, электропривод.

ГЛУХОВА Валентина Ивановна – старший преподаватель кафедры энергетики и электротехники Херсонского национального технического университета.

Научные интересы:

– информационный анализ;
– электротехника, ТОО, электрические машины.

АГРОБОМАССУ Виньон Лоран – магистр технических наук, инженер первой категории кафедры энергетики и электротехники Херсонского национального технического университета.

Научные интересы:

– информационный анализ;
– электротехника, ТОО, электрические машины.