

ПРИМЕНЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ

Рассмотрено применение безразмерной и универсальной магнитных характеристик тяговых электродвигателей тепловозов при расчете их тягово-экономических параметров.

Ключевые слова: тяговая передача мощности, безразмерная и универсальная магнитные характеристики

EDN: FTZWMR



Э.Х. Тасанг



О.В. Воронов

Качество современного подвижного состава железных дорог в значительной мере зависит от процессов и стадий преобразования энергии при формировании силы тяги локомотива и его тяговой характеристики.

На стадии проектирования современных локомотивов важно прогнозировать их тягово-экономические характеристики, а особенно параметры электрической передачи мощности. В настоящее время эта проблема решается, как правило,

с использованием электромеханических (ЭМХ) или же нагрузочных характеристик (НХ) тяговых электродвигателей (ТЭД). Однако зачастую эти характеристики отсутствуют, а их применение сопряжено с хранением большого цифрового материала.

Таким образом, применение универсальной магнитной характеристики и методики ее использования представляет собой весьма важную и актуальную научно-производственную задачу.

Тасанг Эрик Хельмутович, старший преподаватель кафедры железнодорожного транспорта ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». Область научных интересов: математическое моделирование и САПР в локомотивостроении. Автор более 100 научных работ, в том числе семи учебных пособий, одной монографии и четырех учебников. Имеет 20 патентов на изобретения.

Воронов Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры социально-гуманитарных естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин филиала Ростовского государственного университета путей сообщения в г. Воронеж. Область научных интересов: экологическая безопасность на железнодорожном транспорте, в транспортном строительстве. Автор более 30 научных работ.

Быкадоров Вадим Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожного транспорта, директор института транспорта и логистики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». Область научных интересов: теплотехника и конструкции локомотивов. Автор более 70 научных работ, в том числе пяти монографий, пяти учебных пособий и учебников. Имеет 34 патента на изобретения.

Клюев Александр Семенович, старший преподаватель кафедры железнодорожного транспорта ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». Область научных интересов: электрооборудование и электрические передачи локомотивов. Автор более 80 научных работ, в том числе трех учебных пособий и учебников. Имеет 17 патентов на изобретения.

Ливцов Юрий Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой железнодорожного транспорта ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». Область научных интересов: техническое обслуживание подвижного состава, САПР в метрологии. Автор 24 научных работ.

Анализ последних исследований и публикаций

Расчетам тягово-экономических характеристик тепловозов посвящены публикации [1;2], а исследованиям, связанным с параметрами электрической передачи — [3–9].

На кафедре «Железнодорожный транспорт» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» разработан и в настоящее время совершенствуется программный пакет на алгоритмическом языке JavaScript в HTML для проектирования электрической передачи тепловозов. Программный пакет позволяет комплектовать структуру электрической передачи путем подбора ее элементов, как конструктор и получать результаты в виде графиков и цифрового материала для тяговой характеристики, внешней характеристики тягового генератора, НХ, с учетом сопротивления движению поезда и комплектации состава различного типа вагонами. Применение универсальной магнитной характеристики для ТЭД позволит как для разработанной программы, так и при других расчетах, упростить вычисления и уменьшит количество исходного цифрового материала.

Изложение основных материалов

С целью упрощения понимания материала его изложение в дальнейшем будет сопровождаться расчетными и графическими материалами, полученными посредством системы математических расчетов Mathcad.

Расчет тягово-экономических характеристик тепловозов предполагает выбор основных параметров тяговой передачи мощности [2], при котором предварительно определяются ее основные характеристики в точке длительного режима тяговой характеристики при движении тепловоза со сцепной массой $M_{\text{сц}}$ на расчетном подъеме 9‰. Это расчетные данные — касательная сила тяги $F_{\text{кр}}$, скорость локомотива v_p , номинальные значения токов якоря ТЭД $I_{\text{тэд.н}}$, напряжения $U_{\text{тэд.н}}$ и частота вращения вала $n_{\text{тэд.н}}$. Последние три параметра необходимы для использования универсальной магнитной характеристики.

Магнитная характеристика ТЭД постоянного тока представляет собой зависимость магнитного потока $\Phi_{\text{тэд}}$ от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ [9]:

$$\Phi_{\text{тэд}} = f(I_{\text{в}}). \quad (1)$$

С другой стороны, для электродвигателя с последовательным возбуждением для полного поля при $I_{\text{тэд}} = I_{\text{в}}$, известно соотношение:

$$n_{\text{тэд}} = \frac{U_{\text{тэд}} - I_{\text{тэд}} \cdot R_{\Sigma} - U_{\text{щ}}}{C_e \cdot \Phi_{\text{тэд}}} = \frac{E_{\text{тэд}}}{C_e \cdot \Phi_{\text{тэд}}}. \quad (2)$$

Здесь $n_{\text{тэд}}$ — частота вращения вала двигателя, об/мин; $U_{\text{тэд}}$, $I_{\text{тэд}}$ — соответственно питающие двигатель напряжение и ток якоря; R_{Σ} — суммарное сопротивление нагретых обмоток двигателя; $U_{\text{щ}}$ — падение напряжения на щетках ТЭД; C_e — конструктивная постоянная. Числитель выражения представляет электродвижущую силу

$$E_{\text{тэд}} = U_{\text{тэд}} - I_{\text{тэд}} \cdot R_{\Sigma} - U_{\text{щ}}. \quad (3)$$

Эту зависимость можно представить как $C_e \cdot \Phi_{\text{тэд}} = E_{\text{тэд}} / n_{\text{тэд}}$, а характеристику намагничивания, при

$$(E/n) = E_{\text{тэд}} / n_{\text{тэд}}, \quad (4)$$

как

$$(E/n) = f(I_{\text{в}}), \quad (5)$$

аналогично с (1).

Авторами были рассмотрены ЭМХ мощностного ряда наиболее распространенных серий тепловозов: ТЭМ103, ТЭМ2, ТЭ3, ТЭМ7, ТЭ127, 2ТЭ116, 2ТЭ10М, 2ТЭ116А, 2ТЭ116УП, 2ТЭ121, ТЭП150, 2ТЭ126, ТЭ136 с установленными ТЭД: ЭД-118, ЭД-133У1, ЭДТ-200Б, ЭД-120АУ1, ЭД-129У1, ЭД-126У1, ЭД-150У1 и определены их характеристики (4) для полного и ослабленных полей и получена усредненная универсальная безразмерная характеристика (табл. 1).

Безразмерные величины относительного тока $I_{\text{во}} = I_{\text{тэд}} / I_{\text{тэд.н}}$ и $(E/n)_o = (E/n) / (E/n)_n$.

Для аппроксимации по узловым точкам можно применить как полиномиальную зависимость, так и

Таблица 1

Безразмерная характеристика

$I_{\text{во}}$	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.7	2.2
$(E/n)_o$	0	0.121	0.21	0.368	0.613	0.788	0.912	1.0	1.064	1.109	1.153	1.191

функцию в виде экспоненты. Полиномиальная зависимость представляет собой сумму значений функций различной степени в узловых точках. Точность аппроксимации определяется максимальной степенью полинома. Но даже при высокой степени точности ее значение будет выполняться только в диапазоне узловых токов. Вне диапазона кривая из полинома может значительно расходиться с предполагаемой характеристикой, которая должна изменяться монотонно. В результате таких выводов аппроксимацию выполним экспоненциальной функцией вида:

$$f(x) = a \cdot e^{b \cdot x} + c, \quad (6)$$

В Mathcad имеется стандартная функция $\text{expfit}(vx, vy, [vg])$. Эта функция возвращает вектор, содержащий три коэффициента для экспоненциальной кривой формы $a \cdot \exp(b \cdot x) + c$, которая наилучшим образом аппроксимирует данные в vx и vy . Функция expfit использует метод Левенберга-Марквардта для минимизации ошибок. При этом vx и vy это парные наборы токов $I_{\text{во}}$ и величин $(E/n)_o$. Массив $[vg]$ — необязательный трехэлементный вектор реальных предполагаемых значений параметров a , b и c в экспоненциальном уравнении. Применение данной функции к набору значений на рис. 1, при $vg = [-1 \ 1 \ 1]^T$ дает значения для $a = -1,196$, $b = -1,696$, $c = 1,22$, а аппроксимирующая функция для $(E/n)_o$ выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{E}{n}\right)_o(I_{\text{во}}) = 1,22 - 1,196 \cdot e^{-1,696 \cdot I_{\text{во}}}. \quad (7)$$

График полученной характеристики приведен на рис. 1.

Приведем пример использования полученной характеристики намагничивания для тепловоза 2ТЭ116УП, для которого [1]: потребляемая мощность ТЭД типа ЭД-133 У1 $P_1 = 400,5$ кВт; мощность

на валу $P_2 = 365$ кВт; номинальное напряжение $U_{\text{ТЭД,н}} = 450$ В, ток $I_{\text{ТЭД,н}} = 890$ А и частота вращения вала $n_{\text{ТЭД,н}} = 532$ об/мин, суммарное сопротивление нагретых обмоток двигателя $R_{\Sigma} = 0,036$ Ом; падение напряжения на щетках ТЭД $U_{\text{щ}} = 2$ В; степени ослабления магнитного потока $\alpha = [1 \ 0,64 \ 0,41]^T$.

Используя номинальные значения параметров, определим:

$$E_{\text{ТЭД,н}} = U_{\text{ТЭД,н}} - I_{\text{ТЭД,н}} \cdot R_{\Sigma} - U_{\text{щ}} = 450 - 890 \cdot 0,036 - 2 = 416,3 \text{ В}, \quad (E/n)_{\text{н}} = E_{\text{ТЭД,н}} / n_{\text{ТЭД,н}} = 416,3 / 532 = 0,782 \text{ В/(об/мин)}.$$

Учитывая, что реальные значения $I_{\text{ТЭД}} = I_o \cdot I_{\text{ТЭД,н}}$ и $(E/n) = (E/n)_o \cdot (E/n)_{\text{н}}$, выражение (7) получим в следующем виде:

$$f(x) = (E/n)_{\text{н}} \cdot \left(a \cdot e^{b \cdot \frac{1}{I_{\text{ТЭД,н}}} \cdot x} + c \right), \quad (8)$$

или

$$(E/n)(I_{\text{в}}) = 416,3 \cdot (1,22 - 1,196 \cdot e^{-1,696890 \cdot I_{\text{в}}}) = k_1 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot I_{\text{во}}} = 0,955 - 0,936 \cdot e^{-0,0019 \cdot I_{\text{во}}}. \quad (9)$$

Для дальнейшего использования, учитывая, что при полном поле $I_{\text{ТЭД}} = I_{\text{в}}$ построим $(E/n)(I_{\text{в}}) = f(I_{\text{в}})$ для следующих величин токов (рис. 2 и табл. 2).

Покажем одно из возможных использований полученной универсальной магнитной характеристики. Для тепловоза 2ТЭ116УП известны рабочие ЭМХ [1; 2]. Приведем их в виде распечаток из Mathcad:

(500)	(801)	(1260 1745 2340)	(2.766 1.998 1.49)
533	751.407	1176 1555 2100	2.964 2.242 1.66
600	667.5	975 1310 1720	3.575 2.661 2.027
700	572.143	774 1010 1350	4.504 3.451 2.582
Id = 750	Ud = 534	nd = 690 900 1160	Md = 5.052 3.873 3.005
800	500.625	630 810 1005	5.533 4.303 3.468
890	450	532 675 825	6.552 5.164 4.225
1000	400.5	440 550 665	7.922 6.338 5.242
1100	364.091	380 466 570	9.173 7.48 6.115



Рис. 1. Безразмерная характеристика намагничивания

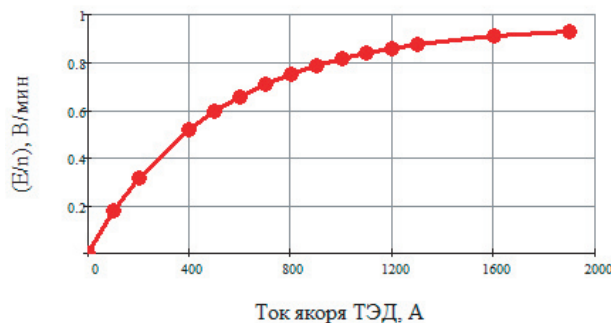


Рис. 2. Универсальная характеристика намагничивания

Таблица 2

Универсальная характеристика

$I_{\text{ТЭД}}, \text{ A}$	0	100	200	400	500	600	700	800	900
$(E/n), \text{ В} \cdot \text{мин}^{-1}$	0	0,181	0,315	0,518	0,594	0,656	0,708	0,751	0,786

Табл. 2. Продолжение

$I_{\text{ТЭД}}, \text{ A}$	1000	1100	1200	1300	1600	1900
$(E/n), \text{ В} \cdot \text{мин}^{-1}$	0,815	0,84	0,86	0,876	0,91	0,93

Здесь I_d , U_d , n_d , M_d – соответственно значения токов и напряжений якоря ТЭД типа ЭД-133, частоты вращения вала и момента на валу. По этим значениям вычислим электродвижущую силу $E_{\text{ТЭД}}$ и величины (E/n) по выражениям (3;4).

Распечатка из Mathcad:

$$E_d = \begin{pmatrix} 781.2 & 782.9 & 784 \\ 730.4 & 732.3 & 733.5 \\ 644.1 & 646.2 & 647.5 \\ 545.2 & 547.6 & 549.2 \\ 505.3 & 507.9 & 509.6 \\ 470.1 & 472.9 & 474.7 \\ 416.3 & 419.4 & 421.4 \\ 362.8 & 366.3 & 368.6 \\ 322.9 & 326.7 & 329.2 \end{pmatrix} \quad e_{nd} = \begin{pmatrix} 0.62 & 0.449 & 0.335 \\ 0.621 & 0.471 & 0.349 \\ 0.661 & 0.493 & 0.376 \\ 0.704 & 0.542 & 0.407 \\ 0.732 & 0.564 & 0.439 \\ 0.746 & 0.584 & 0.472 \\ 0.782 & 0.621 & 0.511 \\ 0.825 & 0.666 & 0.554 \\ 0.85 & 0.701 & 0.578 \end{pmatrix}$$

Аналогично, для токов I_d из ЭМХ определим значения $(E/n)=f(I_b)=f(I_d \cdot \alpha)$ (5) с помощью аппроксимированной кривой по табл. 3 и рис. 2. Получим:

$$e_{nd1} = \begin{pmatrix} 0.589 & 0.451 & 0.322 \\ 0.609 & 0.47 & 0.339 \\ 0.648 & 0.507 & 0.373 \\ 0.701 & 0.554 & 0.418 \\ 0.725 & 0.576 & 0.439 \\ 0.748 & 0.596 & 0.458 \\ 0.783 & 0.631 & 0.491 \\ 0.819 & 0.67 & 0.527 \\ 0.845 & 0.703 & 0.556 \end{pmatrix}$$

Для сравнения изобразим в одной системе координат графики зависимостей $(E/n)=f(I_b)$ по (5), рассчитанные с помощью универсальной характеристики (сплошные кривые) и по заданным ЭМХ (кружки) при различных степенях ослабления поля (рис. 3).

Для полной достоверности применения универсальной характеристики рассчитаем с ее помощью ЭМХ для приведенного выше ряда тепловозов (на рисунках в табл. 3 сплошными кривыми), сравним их с ЭМХ по [1;2] (обозначены символами) и определим максимальную относительную погрешность вычислений частоты вращения вала и момента $\delta_{\text{макс}}$ при значениях токов якоря и напряжений, приведенных в [1;2].

Для токов якоря, питающего напряжения и известных степенях возбуждения ТЭД, при которых сняты известные ЭМХ по выражениям (2;3;5), определим $E_{\text{ТЭД}}=U_{\text{ТЭД}}-I_{\text{ТЭД}} \cdot R_{\Sigma}-U_{\text{щ}}, C_e \cdot \Phi_{\text{ТЭД}}=(E/n)=f(I_b)=f(I_d \cdot \alpha)$, $n_{\text{ТЭД}}=E_{\text{ТЭД}}/(C_e \cdot \Phi_{\text{ТЭД}})$ и момент на валу ТЭД, $M_{\text{ТЭД}}$ по выражению

$$M_{\text{ТЭД}} = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_{\text{ТЭД}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (10)$$

На рисунках в табл. 3 приведены зависимости частоты вращения вала ТЭД (спадающие сплошные и символы) и момента на валу (возрастающие сплошные и символы) от токов якоря при различных степенях ослабления поля (кружки – полное поле, ромб – 1-я ступень, квадрат – 2-я ступень ослабления поля).

Выводы

Предложена универсальная магнитная характеристика и методика ее использования, позволяющая при отсутствии ЭМХ или НХ ТЭД произвести расчет тягово-экономических характеристик тепловозов.

Сравнительный анализ ЭМХ, рассчитанных с применением универсальной магнитной характеристики с ЭМХ, приведенными в [1;2], для десяти тепловозов

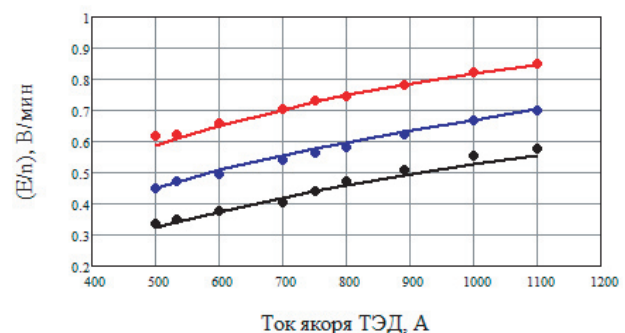
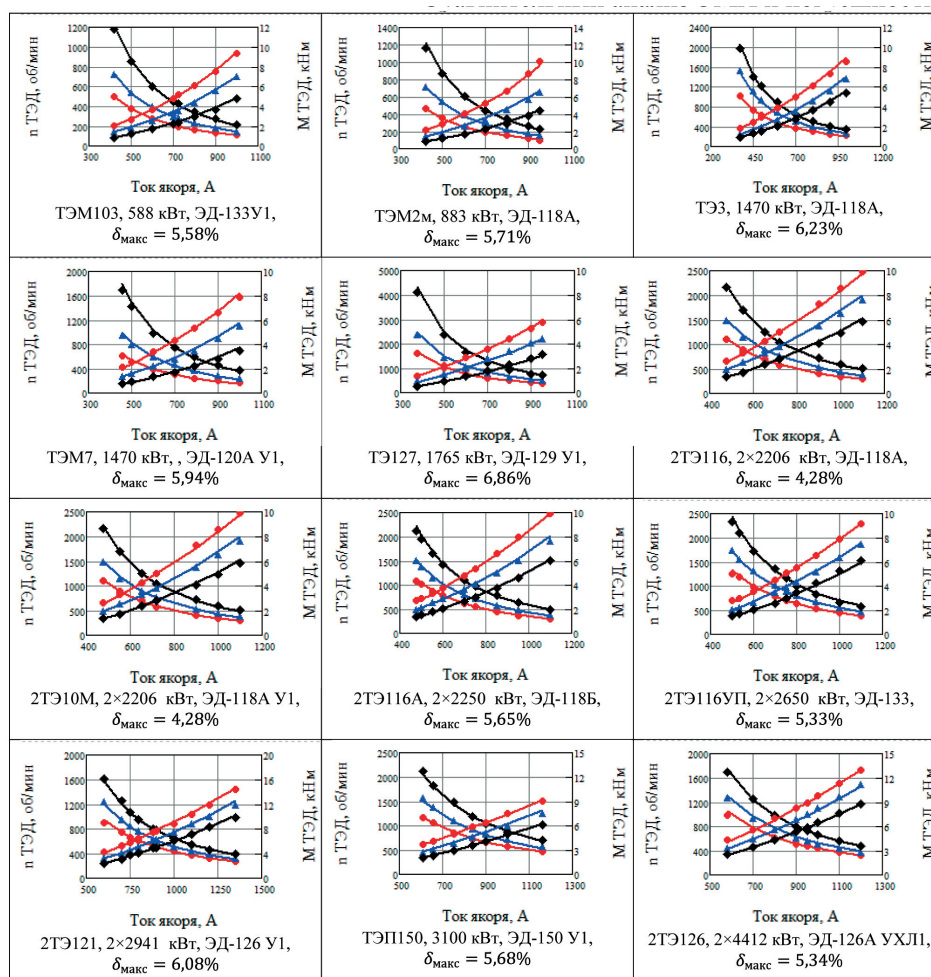


Рис. 3. Зависимости $(E/n)=f(I_{\text{ТЭД}})$ по ЭМХ [1;2] (точки) и с использованием универсальной характеристики (сплошные) для сравнения

Таблица 3

Сравнительный анализ ЭМХ и погрешности



различной мощности, показал, что максимальная относительная погрешность вычислений составила 6,86%.

Реальная погрешность на самом деле составляет меньшее значение, так как приведенные в [1;2] ЭМХ имеют зачастую значительное рассеивание значений и при этом нарушается монотонность зависимостей.

Приведенные результаты позволяют получить данные для рационального выбора конструктивных параметров тяговых передач при проектировании и модернизации тепловозов и в учебных целях.



Литература

1. Электрические передачи локомотивов / Э. Х. Тасанг, В. В. Быкадоров, О. В. Воронов, А. С. Ключев, Е. И. Иванова, О. В. Мокшина. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Воронеж: Изд-во филиала РГУПС в г. Воронеж, 2023. - 428 с. - Текст : непосредственный.
2. Расчёт тягово-энергетических характеристик тепловозов: учебник / В. В. Быкадоров, Э. Х. Тасанг, В. М. Новиков, О. В. Воронов, Ю. Э. Ладик. - Воронеж: Изд-во филиала РГУПС в г. Воронеж, 2019. - 366 с. - Текст : непосредственный.

3. Гаккель, Е. Я. Проектирование и расчет электрической передачи тепловоза : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Е. Я. Гаккель, К. И. Рудая. - Москва : Транспорт, 1972. - 151 с. - Текст : непосредственный.
4. Конструкция и динамика тепловозов : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. В. Иванов, Н. И. Панов, А. П. Третьяков, В. Н. Иванов ; под ред. профессора, доктора технических наук В. Н. Иванова. - 2-е изд., доп. - Москва : Транспорт, 1974. - 336 с. - Текст : непосредственный.
5. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов : учебник для вузов по специальности «Локомотивостроение» / А. А. Камаев, Н. Г. Апанович, В. А. Камаев [и др.]; под ред. А. А. Камаева. - Москва: Машиностроение, 1981. - 351 с. - Текст : непосредственный.
6. Луков Н. М. Передачи мощности тепловозов : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Н. М. Луков, В. В. Стрекопытов, К. И. Рудая; под редакцией Н. М. Лукова. - Москва : Транспорт, 1987. - 279 с. - Текст : непосредственный.
7. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов / А. Д. Степанов, В. И. Андерс, В. А. Пречисский, Ю. И. Гусевский. - Москва : Транспорт, 1982. - 254 с. - Текст : непосредственный.
8. Загорский, М. В., Никифоров Н. И. Прогнозирование тяговых качеств на стадии проектирования экипажной части локомотива / М. В. Загорский, Н. И. Никифоров. - Текст : непосредственный // Сборник научных трудов; Брянский государственный технический университет. - Брянск : Изд-во БГТУ. - 2000. - С. 16 - 22.
9. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика» / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Москва [и др.] : Питер : Питер Пресс, 2007. - 319 с. - Фактическая дата выхода в свет: 2006. - Текст : непосредственный.