



МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

А.И. ФЕЩЕНКО, И.К. МАСЛЕННИКОВ

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ

СБОРНИК ЗАДАЧ

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МАДИ)

Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

Утверждаю
Зав. кафедрой профессор
_____ В.Е. Ютт
« ____ » _____ 2018 г.

А.И. ФЕЩЕНКО, И.К. МАСЛЕННИКОВ

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ

СБОРНИК ЗАДАЧ

МОСКВА
МАДИ
2018

УДК 629.33.066
ББК 39.33-048.2
Ф476

Фещенко, А.И.

Ф476 Электрооборудование автомобилей: сборник задач / А.И. Фещенко, И.К. Масленников. – М.: МАДИ, 2018. – 72 с.

Сборник задач предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электрооборудование автомобилей и электромобили») и изучающих дисциплины «Электрооборудование двигателей внутреннего сгорания» и «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей».

Даны задачи и упражнения по системам электроснабжения, пуска и зажигания, необходимые при проведении лабораторно-практических занятий и контрольных работ. Приведены методические указания, необходимые для решения задач.

УДК 629.33.066
ББК 39.33-048.2

© МАДИ, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем сборнике задач сделана попытка изложить основные принципы расчетов основных приборов и систем электрооборудования ДВС. Примерами расчетов охвачены системы электроснабжения, пуска и зажигания.

Приводимые расчеты, однако, не могут быть механически перенесены на более детальные расчеты автомобильного электрооборудования. Задачи, представленные в сборнике, иногда для упрощения расчетов даны с допущениями, которые не всегда могут быть применены при более точных расчетах. В ряде случаев было решено отказаться от применения готовых расчетных формул, которые хотя и уменьшают объем расчетов, часто используются студентами чисто механически.

Сборник разбит на главы, соответствующие основным системам электрооборудования ДВС. В каждой главе приводятся методические указания, необходимые для решения конкретных задач.

1. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

1.1. Какое теоретическое количество губчатого свинца, диоксида свинца и серной кислоты расходуется на 1 А·ч электрической емкости при разряде свинцово-кислотного аккумулятора?

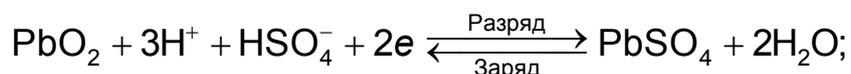
Указание. Теоретическое количество вещества, прореагировавшего при прохождении через электрохимическую систему единицы количества электричества, называется электрохимическим эквивалентом. Вычисление его основано на законах Фарадея, согласно которым

$$q = \frac{M}{zF},$$

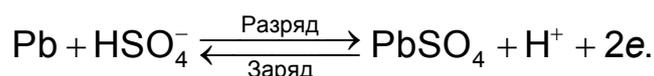
где M – молекулярная масса вещества (или A – атомная масса вещества); z – заряд иона; F – число Фарадея, равное 26,8 А·ч.

Согласно теории двойной сульфатации реакции разрядного и зарядного процессов в свинцово-кислотном аккумуляторе описываются следующими уравнениями:

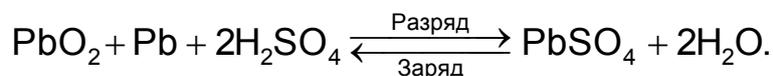
– на положительном электроде:



– на отрицательном электроде:



Общая токообразующая реакция в аккумуляторе



Электрохимические эквиваленты:

– губчатого свинца

$$q_{\text{Pb}} = \frac{A_{\text{Pb}}}{2F};$$

– диоксида свинца

$$q_{\text{PbO}_2} = \frac{M_{\text{PbO}_2}}{2F};$$

– серной кислоты

$$q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{M_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{F};$$

– сульфата свинца

$$q_{\text{PbSO}_4} = \frac{M_{\text{PbSO}_4}}{2F};$$

– воды

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{F}.$$

1.2. Какое теоретическое количество сульфата свинца и воды расходуется на 1 А·ч электрической емкости при заряде свинцово-кислотного аккумулятора (указания к задаче 1.1)?

1.3. Какое теоретическое количество гидроксида трехвалентного никеля NiOOH и кадмия Cd расходуется на 1 А·ч электрической емкости при разряде никель-кадмиевого аккумулятора?

Указание. В основе никель-кадмиевого аккумулятора лежит следующая электрохимическая система



Основные токообразующие реакции:

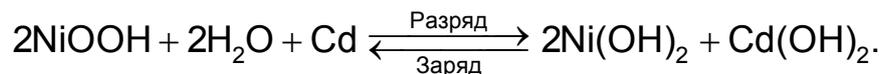
– на положительном электроде



– на отрицательном электроде



– в аккумуляторе в целом



Атомные массы химических элементов приведены в приложении.

1.4. Какое теоретическое количество гидроксида двухвалентного никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$ и гидроксида кадмия $\text{Cd}(\text{OH})_2$ расходуется на 1 А·ч электрической емкости при заряде никель-кадмиевого аккумулятора (см. указания к задаче 1.3)?

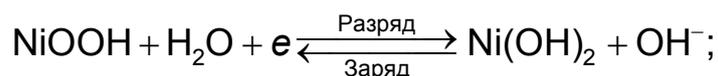
1.5. Какое теоретическое количество гидроксида трехвалентного никеля NiOOH и железа Fe расходуется на на 1 А·ч электрической емкости при разряде никель-железного аккумулятора?

Указание. В основе никель-железного аккумулятора лежит следующая электрохимическая система

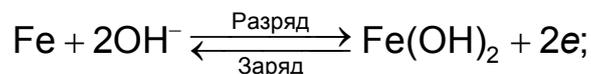


Основные токообразующие реакции:

– на положительном электроде



– на отрицательном электроде



– в аккумуляторе в целом



1.6. Какое теоретическое количество гидроксида двухвалентного никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$ и гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$ расходуется при заряде никель-железного аккумулятора? (см. указания к задаче 1.5)?

1.7. Положительный электрод свинцово-кислотного аккумулятора, содержащий $g_+ = 75$ г активной массы, обладает разрядной емкостью $C_p^* = 8,23$ А·ч.

Рассчитать коэффициент использования диоксида свинца θ_{PbO_2} , если активная масса электрода содержит 90% PbO_2 ($P_{\text{PbO}_2} = 0,9$).

Указание. Обобщенным показателем, характеризующим эффективность работы аккумулятора, является коэффициент использования активных материалов (%)

$$\theta = \frac{C_p}{C_o} \cdot 100,$$

где C_p – фактическая емкость аккумулятора, полученная при его разряде; C_o – теоретическая емкость того же аккумулятора, рассчитанная по электрохимическим эквивалентам.

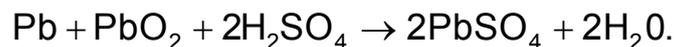
1.8. Определить суммарный теоретический расход материалов для получения одного ампер-часа электричества (удельный расход материалов q_c [г/А·ч]) и теоретическую удельную емкость C_d [А·ч/кг] свинцово-кислотного аккумулятора (см. указания к задаче 1.1).

1.9. Определить теоретический удельный расход материалов на единицу энергии q_w [г/Вт·ч] и теоретическую удельную энергию W_d [Вт·ч/кг] свинцово-кислотного аккумулятора.

Указание. Напряжение разомкнутой цепи аккумулятора равно $U_{pc} = 2,04$ В.

1.10. Какой объем электролита в см^3 плотностью $\gamma_3 = 1,28$ г/см³ требуется на 1 А·ч снятой емкости свинцово-кислотного аккумулятора?

Указание. Согласно теории двойной сульфатации разряд свинцово-кислотного аккумулятора протекает по реакции



При прохождении $2F$ электричества изменение массы электролита составляет $2M_{\text{H}_2\text{SO}_4} - 2M_{\text{H}_2\text{O}}$, где $F = 26,8$ А·ч – число Фарадея; $M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98,076$ г – молекулярная масса серной кислоты; $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,016$ г – молекулярная масса воды. Если разрядная емкость аккумулятора равна C_p [А·ч], то соответствующее изменение массы электролита составит

$$\frac{C_p (M_{\text{H}_2\text{SO}_4} - M_{\text{H}_2\text{O}})}{F} = 3C_p.$$

С другой стороны, это изменение массы электролита равно $V_3\gamma_3 - V_p\gamma_p$, где V_3 и V_p – объемы электролита, γ_3 и γ_p – плотности электролита в заряженном (начальном) и разряженном (конечном) состоянии соответственно.

Таким образом, $V_3\gamma_3 - V_p\gamma_p = 3C_p$, откуда

$$V_3 = \frac{3C_p + V_p\gamma_p}{\gamma_3}.$$

При разряде свинцово-кислотного аккумулятора наблюдается уменьшение объема (сжатие) электролита

$$V_p = V_3 - \Delta V \cdot C_p,$$

где ΔV – удельное изменение объема электролита, соответствующее 1 А·ч протекающего электричества.

С достаточной точностью можно принять $\Delta V = 1 \text{ см}^3/(\text{А}\cdot\text{ч})$, тогда уравнение для расчета минимального объема аккумуляторного электролита примет вид

$$V_3 = \frac{(3 - \gamma_p) \cdot C_p}{\gamma_3 - \gamma_p}.$$

1.11. Определить степень разряженности свинцово-кислотной батареи, если плотность электролита полностью заряженной батареи была $1,28 \text{ г/см}^3$, а в результате эксплуатации плотность электролита оказалась равной $1,24 \text{ г/см}^3$.

1.12. К какому виду исполнения относится аккумуляторная стартерная свинцово-кислотная батарея номинальной емкостью 60 А·ч, если масса новой батареи составляет $W_1 = 15,74 \text{ кг}$ и масса той же батареи после перезаряда в течение 500 часов при температуре $+40^\circ\text{C}$ и постоянном напряжении 14,4 В $W_2 = 15,33 \text{ кг}$?

Указание. Согласно принятой в настоящее время международной классификации батареи открытого вида производятся в следующих исполнениях:

- нормального исполнения (N), для которых расход воды не нормируется;
- исполнение с малым расходом воды (L) – не более 4 г/А·ч емкости двадцатичасового разряда;
- исполнение с очень малым расходом воды (VL) – не более 1 г/А·ч емкости двадцатичасового разряда.

Расход воды по ГОСТ Р 53165-2008 (МЭК 60095-1:2006) определяется путем взвешивания новой батареи и этой же батареи после перезаряда в течение 500 часов (21 суток) при температуре +40°C и постоянном напряжении 14,4 В.

1.13. Полностью заряженная батарея 6СТ-182 при температуре электролита +25°C разрядилась током $I_p = 0,05 \cdot C_{20}$ до напряжения 10,5 В за 10 часов. Определить пригодность батареи к дальнейшей эксплуатации.

Указание. Средний срок службы или наработку батарей в эксплуатации определяют до момента снижения емкости ниже 40% от номинального значения или снижения продолжительности разряда в стартерном режиме током $I_p = 0,6I_{хп}$ при температуре электролита +25°C до конечного напряжения 9,0 В менее 1,5 минут ($I_{хп}$ – ток холодной прокрутки, указанный производителем батарей).

1.14. Используя координаты точки A на вольт-амперной характеристике батареи (рис. 1.1), определить ее внутреннее эквивалентное сопротивление.

1.15. При каком сопротивлении внешней нагрузки R_n (рис. 1.2) батарея будет отдавать во внешнюю цепь максимальную мощность?

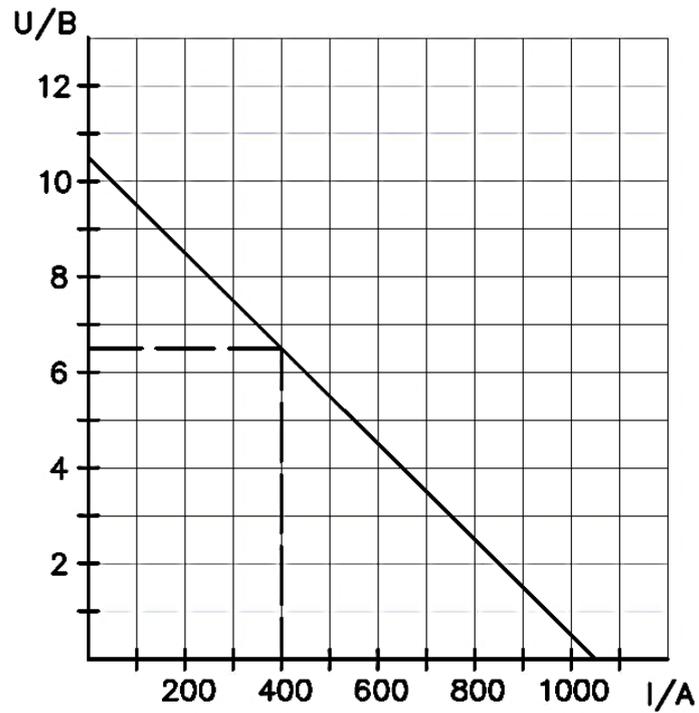


Рис. 1.1. Вольт-амперная характеристика аккумуляторной батареи

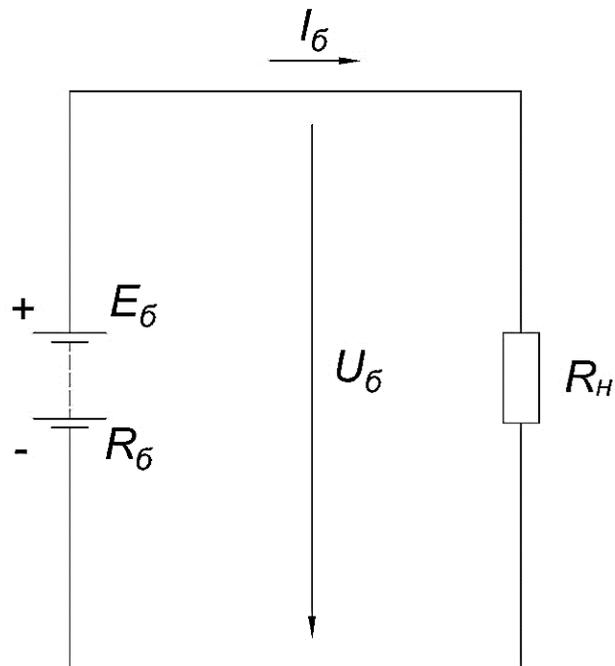


Рис. 1.2

1.16. Емкость полностью заряженной батареи 6СТ-60 равнялась 65 А·ч. После месячного бездействия (30 суток) емкость этой батареи составила 45,4 А·ч. Определить скорость саморазряда батареи.

1.17. Определить количество аккумуляторных батарей типа 6СТ-75N, которые одновременно можно зарядить от зарядного агрегата с выходным напряжением $U = 70$ В и силой тока $I = 8$ А. Составить схему заряда и определить сопротивление регулировочного реостата в зарядной цепи.

Указание. Число аккумуляторных батарей, соединенных последовательно в одну группу, из расчета напряжения 2,7 В на один аккумулятор

$$K = \frac{U}{2,7n},$$

где n – число аккумуляторов в батарее.

Число групп, которое можно подключать параллельно, из расчета, что ток заряда батареи равен I_3

$$m = I/I_3.$$

Сопротивление реостата, который включается последовательно в каждой группе, определяется из расчета, что начальное зарядное напряжение на одном аккумуляторе 2 В:

$$R = \frac{U - 2nK}{I_3}.$$

1.18. Какое количество батарей типа 6СТ-75N и 6СТ-90N можно одновременно зарядить от зарядного агрегата, который имеет на выходе напряжение 120 В и силу тока 25 А? Составить схему заряда и определить сопротивление регулировочных реостатов в зарядных цепях (см. указание к задаче 1.17).

1.19. Вывести соотношение, связывающее токи холодной прокрутки стартерных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей по стандартам SAE и EN.

Указание. Пусковые качества аккумуляторной батареи определяются ее внутренним электрическим сопротивлением. Величина

внутреннего сопротивления батареи в зависимости от ее типа и условий разряда составляет сотые и тысячные доли Ом. Поэтому на практике пусковые качества стартерной батареи оцениваются величиной тока холодной прокрутки. Существует несколько методик определения тока холодной прокрутки. Во всех методиках предусмотрены испытания полностью заряженных батарей при температуре -18°C (0°F). Согласно стандарту *SAE J537*, разряд производится таким максимальным током I_{SAE} , при котором по истечении 30 с напряжение на выводах 12-вольтовой батареи соответствовало 7,2 В. В отличие от методики *SAE* стандартом *EN 50342+A1* предусмотрен разряд в две стадии. Первая стадия разряда происходит при токе холодной прокрутки I_{EN} , указанном производителем батареи, в течение 10 с. При этом напряжение в конце 10-й с должно быть не менее 7,5 В. Затем разряд прекращают на 10 с. После паузы разряд продолжают при токе, равном $0,6I_{хп}$, до конечного напряжения 6,0 В. При этом общее (приведенное) время разряда до напряжения 6,0 В должно быть не менее 90 мин.

Для полностью заряженной батареи, подвергнутой предварительному циклированию, в режиме постоянства разрядного тока ее напряжение на 10-й и 30-й с различается незначительно, т.е. влиянием продолжительности разряда в указанном диапазоне можно пренебречь. Тогда можно предположить, что параметры разряда аккумуляторной батареи по методикам *SAE* и *EN* являются координатами точек общей вольт-амперной характеристики (рис. 1.3).

Связующим звеном, позволяющим провести сопоставление показателей стартерного разряда, является внутреннее сопротивление батареи

$$R_{\text{в}} = \frac{U_{\text{нр}} - U_{\text{р}}}{I_{\text{р}}} = \frac{U_{\text{нр}} - 7,2}{I_{SAE}} = \frac{U_{\text{нр}} - 7,5}{I_{EN}},$$

где $U_{\text{нр}}$ – начальное разрядное напряжение при $I_{\text{р}} = 0$.

Независимо от номинальной емкости при 100%-й заряженности и температуре электролита -18°C величина $U_{\text{нр}} = 11,5$ В.

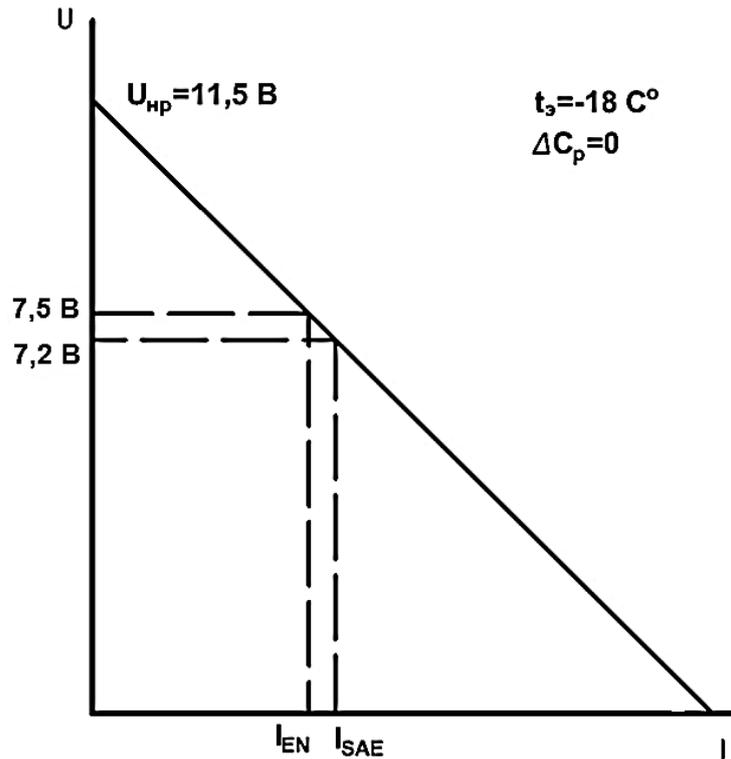


Рис. 1.3. Нормативные показатели стартерного разряда аккумуляторной батареи на ее вольт-амперной характеристике

1.20. Определить фактическое значение тока холодной прокрутки по методике *EN* $I_{EN.факт}$, если при испытании стартерной батареи заявленным фирмой-изготовителем током $I_{EN.заявл} = 360 \text{ А}$ напряжение на 10-й с заряда составило $U_{10} = 7,7 \text{ В}$.

Указание. На рис. 1.4 изображены фактическая и нормированная вольт-амперные характеристики батареи 6СТ-45L, построенные по координатам параметров разряда при температуре электролита -18°C .

Из уравнения фактической вольт-амперной характеристики внутреннее сопротивление батареи можно определить по координатам точек *A* и *B*

$$R_{б.факт} = \frac{U_{нр} - U_{10}}{I_{EN.заявл}} = \frac{U_{нр} - U_{10н}}{I_{EN.факт}},$$

где U_{10} – нормированное значение разрядного напряжения батареи согласно стандарту *EN*.

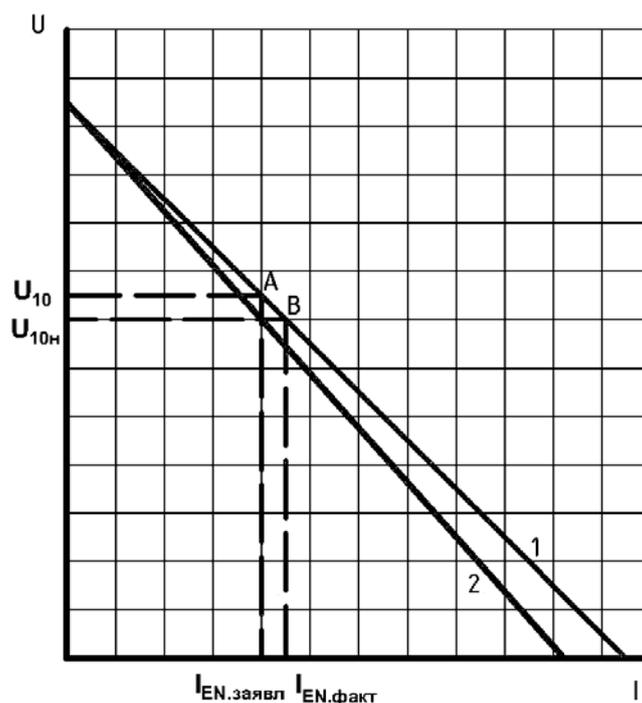


Рис. 1.4. Фактическая 1 и нормированная 2 вольт-амперные характеристики батареи

1.21. Установить аналитическую зависимость между резервной $C_{рез}$ и номинальной C_{20} емкостями стартерной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи, используя формулу Либенова.

Указание. Резервная емкость определяется временем разряда в минутах полностью заряженной батареи при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ током силой 25 А до конечного напряжения на аккумуляторе 1,75 В (10,5 В на 12-вольтовую батарею).

Разряд батареи при испытании на емкость 20-часового режима разряда проводят током $I_p = 0,05 \cdot C_{20}$ при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ до конечного напряжения 10,5 В у 12-вольтовой батареи (1,75 В на аккумулятор).

Формула Либенова связывает величину разрядной емкости C_p , выраженную в А·ч, с током разряда I_p

$$C_p = \frac{a}{b + I_p},$$

где a , b – постоянные коэффициенты.

Для M/60 – и 20-часовых режимов разряда можно записать следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{25 \cdot M}{60} = \frac{a}{b + 25}, \\ C_{20} = \frac{a}{b + 0,05 \cdot C_{20}}. \end{cases}$$

Численное значение коэффициента b определяется для контрольной точки $C_{20} = 55 \text{ А}\cdot\text{ч}$, $C_{20} = 100 \text{ мин}$.

1.22. Установить аналитическую зависимость между резервной $C_{\text{рез}}$ и номинальной C_{20} емкостями батареи, используя формулу Пейкерта.

Указание. Формула Пейкерта связывает величину разрядного тока и продолжительность разряда батареи

$$I_p^n \tau_p = k,$$

где n , k – постоянные коэффициенты.

Численное значение коэффициента n определяется для контрольной точки $C_{20} = 55 \text{ А}\cdot\text{ч}$, $C_{20} = 100 \text{ мин}$.

1.23. При каких значениях напряжения и разрядного тока аккумуляторная батарея развивает максимальную мощность?

Указание. Работоспособность аккумуляторной батареи, как источника энергии в электропусковой системе, характеризуется ее разрядной вольт-амперной характеристикой, представляющей собой зависимость напряжения на полюсных выводах от величины разрядного тока для определенного момента времени разряда. Экспериментальная вольт-амперная характеристика имеет вблизи осей координат нелинейные участки и линейный характер в средней части, которая соответствует диапазону рабочих токов, потребляемых стартером. Поэтому вольт-амперную характеристику изображают прямой линией,

отсекающей по оси ординат условное начальное напряжение $U_{\text{нр}}$, а по оси абсцисс – условный ток короткого замыкания $I_{\text{БК}}$ (рис. 1.5).

Уравнение расчетной вольт-амперной характеристики батареи

$$U_{\text{б}} = U_{\text{нр}} - I_{\text{б}} R_{\text{б}},$$

где $R_{\text{б}}$ – внутреннее сопротивление батареи пропорционально тангенсу угла наклона α характеристики к оси тока ($R_{\text{б}} \sim \text{tg}\alpha$).

В процессе разряда на нагрузку $R_{\text{н}}$ батарея развивает мощность

$$P_{\text{б}} = U_{\text{б}} I_{\text{б}} = I_{\text{б}}^2 R_{\text{н}}.$$

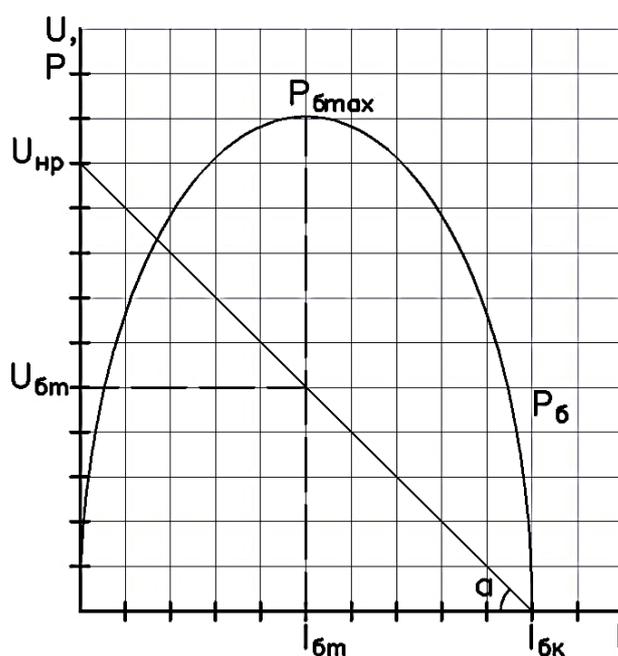


Рис. 1.5. Вольт-амперная и мощностная характеристики батареи

2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Выразить токи I_r , I_6 , I_H в системе электроснабжения (рис. 2.1) через ее параметры.

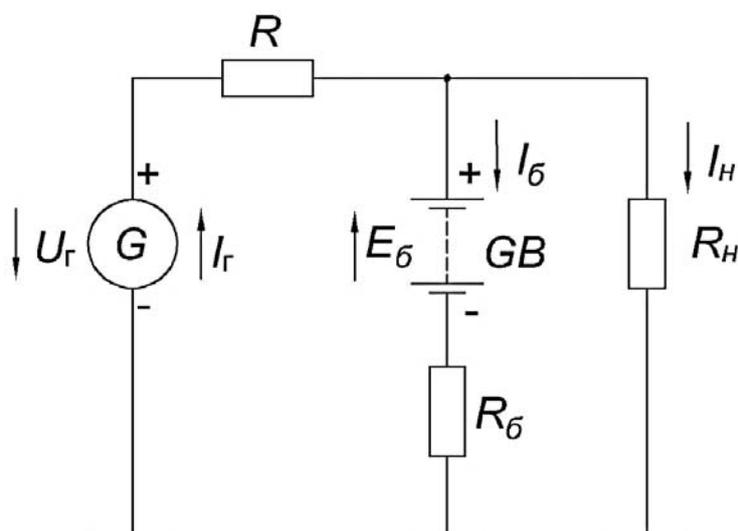


Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема системы электроснабжения

Указание. Если пренебречь током возбуждения I_B , то для системы электроснабжения справедливы уравнения

$$0 = I_r R + I_H R_H - U_r;$$

$$E_6 = -I_6 R_6 + I_H R_H;$$

$$I_H = I_r - I_6,$$

где U_r – напряжение генератора; E_6 , R_6 – ЭДС и внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи; R – эквивалентное сопротивление проводов, соединительных переходных контактов между генератором и аккумуляторной батареей; I_r , I_6 , I_H – силы тока соответственно генератора, батареи, нагрузки.

2.2. При каком сопротивлении нагрузки R_H (рис. 2.1) ток аккумуляторной батареи равен нулю ($I_6 = 0$)?

Указание. Воспользоваться формулами, полученными при решении задачи 2.1.

2.3. Для схемы электроснабжения, приведенной на рис. 2.1, получить выражения для максимального зарядного тока аккумуляторной батареи.

Указание. Если все потребители выключены ($R_H = \infty$, $I_H = 0$), то $I_r = I_6$.

2.4. Пользуясь графиком параллельной работы генератора с аккумуляторной батареей (рис. 2.2), определить токи генератора, батареи и нагрузки, а также напряжение системы для указанных точек. Полученные данные свести в табл. 2.1.

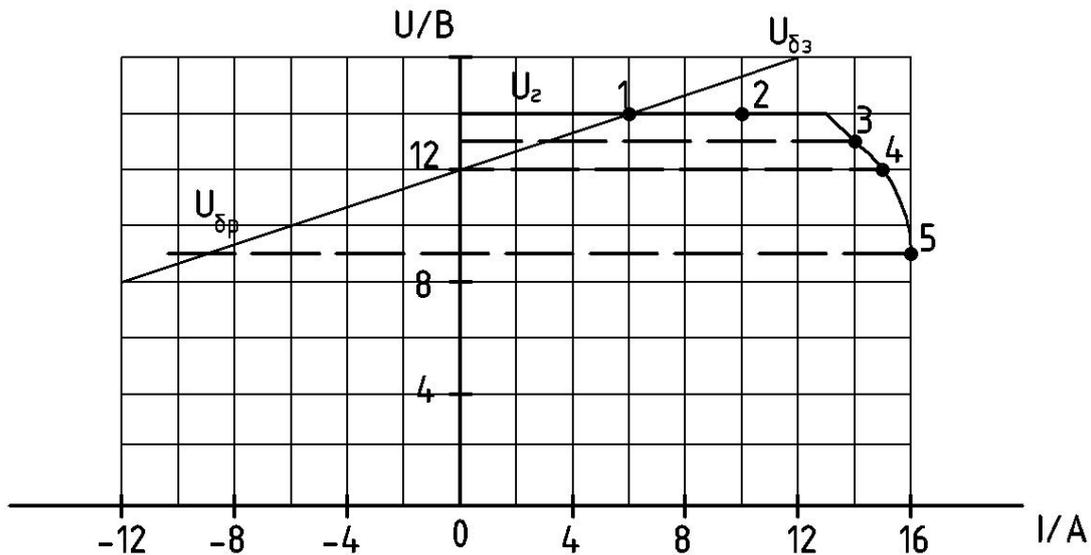


Рис. 2.2. Совмещение разрядно-зарядной характеристики аккумуляторной батареи с внешней характеристикой генератора

Таблица 2.1

Результаты расчета электрических параметров системы электроснабжения

Номер точки на графике (рис. 2.2)	Ток, А			Напряжение, В
	генератора I_r	батареи I_6	нагрузки I_H	
1				
2				
3				
4				
5				

2.5. Определить частоту переменного f и выпрямленного f_{Π} токов (напряжения) синхронного генератора с числом пар полюсов $p = 6$ при частоте вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

2.6. Определить частоту вращения ротора начала отдачи вентильного генератора при выходном напряжении 28 В, если при напряжении генератора 27 В его частота вращения начала отдачи составляет 1350 мин^{-1} .

2.7. Определить величину пульсации ΔU_d , максимальное $U_{d\max}$ и минимальное $U_{d\min}$ значения выпрямленного напряжения генератора, электрическая схема которого изображена на рис. 2.3, а, при среднем значении выпрямленного напряжения $U_d = 14 \text{ В}$.

2.8. Какие диоды выпрямительного блока (рис. 2.3, а) работают в момент времени t_1 (рис. 2.3, б)? Почему?

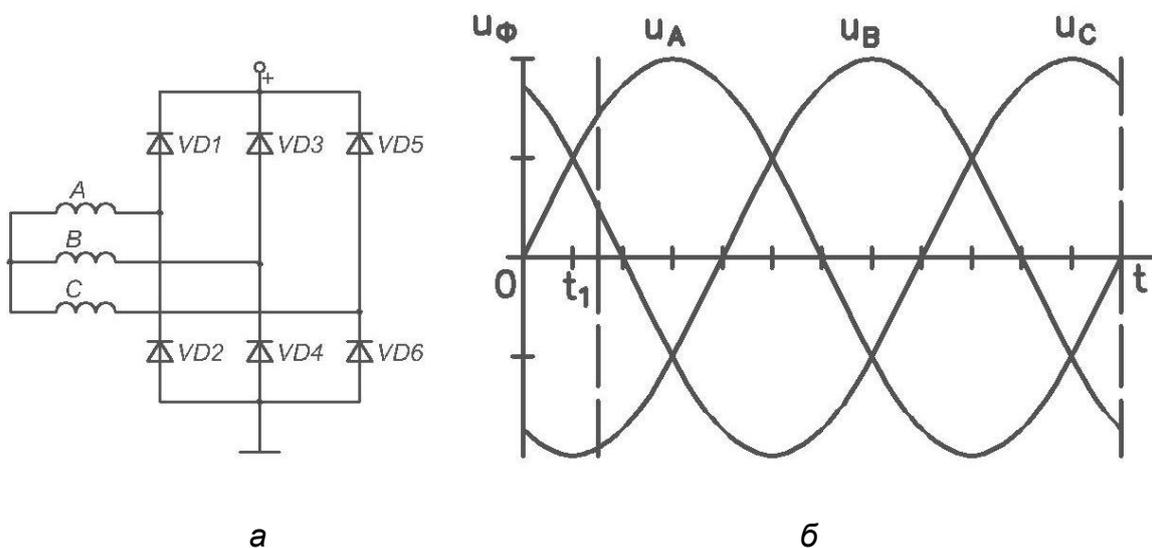


Рис. 2.3. Электрическая схема трехфазного генератора с выпрямительным блоком (а) и временная диаграмма фазных напряжений (б)

2.9. Какой максимальный ток отдачи $I_{\Gamma\max}$ может иметь трехфазный вентильный генератор, если в силовом выпрямительном блоке применяются 12 диодов с максимально допустимым током $I_{VD} = 20 \text{ А}$?

2.10. Какое напряжение будет подаваться на зарядную цепь аккумуляторной батареи $U_{бз}$ и потребителей U_{RH} (система зажигания, контрольно-измерительные приборы и др.) (рис. 2.4), если из-за окисления контактов имеется падение напряжения по 1 В на предохранителе F и выключателе зажигания S ? Напряжение, поддерживаемое регулятором напряжения KV на его зажимах, равно 14 В.

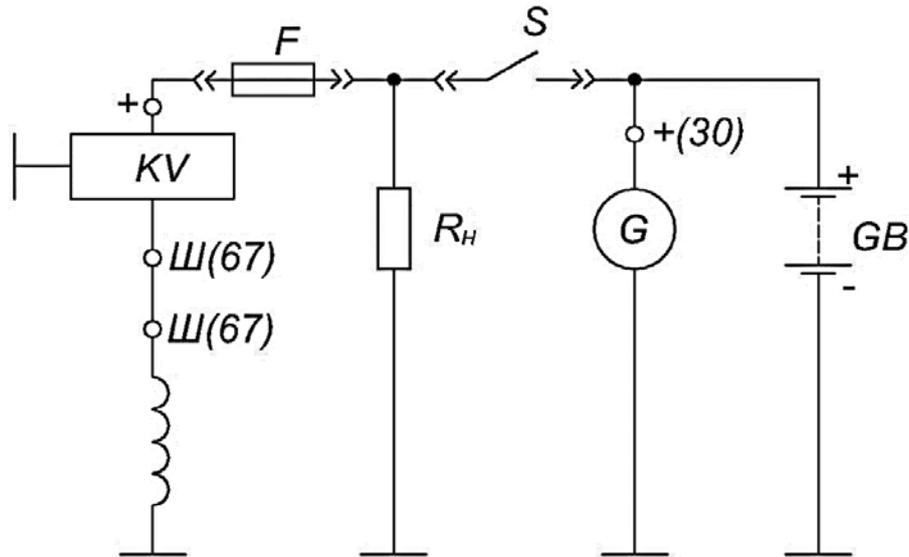


Рис. 2.4. Схема включения генератора G и аккумуляторной батареи GB на автомобиле: KV – регулятор напряжения; F – предохранитель; S – выключатель зажигания; RH – потребители электрической энергии

2.11. Определить постоянную времени экспоненты, аппроксимирующую токоскоростную характеристику автомобильного вентильного генератора методами средних арифметических и наименьших квадратов. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Параметры токоскоростной характеристики генератора

$n_r, \text{мин}^{-1}$	1100	1630	2000	3000	4000	5000
I_r, A	0	24	35	47	53	55

Указание. Токоскоростная характеристика вентильного генератора может быть аппроксимирована выражением

$$I_r = I_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{n_0 - n_r}{\tau}} \right), \quad (2.1)$$

где n_0 – частота вращения ротора начала отдачи; I_{rmax} – максимальный ток отдачи при частоте вращения ротора 5000 или 6000 мин⁻¹.

Для определения постоянного коэффициента τ данную зависимость (2.1) можно представить в преобразованном виде

$$\ln\left(1 - \frac{I_r}{I_{\text{rmax}}}\right) = \frac{1}{\tau}(n_0 - n_r),$$

график которой $\ln\left(1 - \frac{I_r}{I_{\text{rmax}}}\right) = f(n_0 - n_r)$ изображается прямой линией.

Для уравнения вида $y = \frac{1}{\tau} \cdot x$ по среднеарифметическому методу имеем¹

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n (n_{ri} - n_0)}{\sum_{i=1}^n \ln\left(1 - \frac{I_{ri}}{I_{\text{rmax}}}\right)}.$$

По методу наименьших квадратов для того же уравнения имеем¹

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n (n_{ri} - n_0)^2}{\sum_{i=1}^n (n_{ri} - n_0) \ln\left(1 - \frac{I_{ri}}{I_{\text{rmax}}}\right)}.$$

Результаты вычислений для определения коэффициента τ представить в табл. 2.3.

Провести сравнительную оценку точности результатов расчета тока отдачи генератора.

2.12. Определить численное значение коэффициента τ в формуле (2.1) (см. задачу 2.11), если известны паспортные данные генератора:

- частота вращения ротора начала отдачи $n_0 = 1050$ мин⁻¹;
- расчетная частота вращения ротора $n_p = 2150$ мин⁻¹;
- расчетный ток отдачи $I_p = 60$ А;
- максимальный ток отдачи $I_{\text{rmax}} = 90$ А.

¹ Блох, Л.С. Практическая номография / Л.С. Блох. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с.

Таблица 2.3

Результаты вычислений для определения коэффициента τ
в формуле (2.1) методами средних арифметических
и наименьших квадратов

№ опыта	$n_{r_i},$ мин^{-1}	$I_{r_i},$ А	Среднеарифметический метод		Метод наименьших квадратов		I_{r_i} расчет, А
			$n_{r_i} - n_0$	$\ln\left(1 - \frac{I_r}{I_{\text{max}}}\right)$	$(n_{r_i} - n_0)^2$	$(n_{r_i} - n_0) \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{r_i}}{I_{\text{max}}}\right)$	
.							
.							
.							
$\sum_{i=1}^n$	—	—					

2.13. Аналитическим путем определить часовую отдачу генератора q_r в транспортном режиме работы трактора. Паспортные данные тракторного индукторного генератора: $n_0 = 1300 \text{ мин}^{-1}$, $n_p = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $I_p = 21 \text{ А}$, $I_{\text{max}} = 30 \text{ А}$.

Гистограмма плотности распределения частоты вращения ротора генератора в транспортном режиме работы трактора (табл. 2.4) аппроксимируется нормальным законом распределения

$$t(n_r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n_r - n_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2)$$

где n_{cp} – среднее арифметическое значение частоты вращения ротора генератора; σ – среднее квадратичное отклонение частоты вращения ротора генератора.

Указание. В общем виде часовая отдача генератора определяется значением определенного интеграла

$$q_r = \int_{n_{\text{rx}}}^{n_{\text{max}}} I_r(n_r) t(n_r) dn_r. \quad (2.3)$$

Таблица 2.4

Результаты расчета параметров скоростного режима работы генератора и его часовой отдачи

Интервалы частот вращения генератора $n_{гi}$, мин ⁻¹	Относительное время работы в данном интервале частот вращения Δt_i	Частота вращения ротора, соответствующая середине данного интервала, $n_{гсрi}$, мин ⁻¹	$n_{гсрi} \cdot \Delta t_i$, мин ⁻¹ · ч/ч	$(n_{гсрi} - n_{гi})^2 \cdot \Delta t_i$	Ток отдачи генератора, соответствующий середине данного интервала $I_{гсрi}$, А	Отдача генератора в данном интервале $I_{гсрi} \cdot \Delta t_i$, А · ч/ч
1220–1400	0,006					
1400–1580	0,017					
1580–1760	0,044					
1760–1940	0,091					
1940–2120	0,150					
2120–2300	0,192					
2300–2480	0,192					
2480–2660	0,150					
2660–2840	0,091					
2840–3020	0,044					
3030–3200	0,017					
3200–3380	0,006					
–	$\Sigma \Delta t_i = 1,000$	–	$n_{гсрi} = \sum_{i=1}^m n_{гсрi} \cdot \Delta t_i$	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m (n_{гсрi} - n_{гi})^2 \cdot \Delta t_i}$	–	$q_r = \sum_{i=1}^m I_{гсрi} \cdot \Delta t_i$

Токоскоростная характеристика генератора $I_r(n_r)$ и функция $t(n_r)$, характеризующая скоростной режим работы генератора, имеют аналитические выражения соответственно (2.1) и (2.2). Поэтому проведение некоторых преобразований приводит выражение (2.3) к табличным интегралам, которые при интегрировании от $-\infty$ до $+\infty$ дают выражение для часовой отдачи генератора

$$q_r = I_{r\max} \left[1 - e^{-\left(\frac{n_0 - n_{cp}}{\tau} - \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right)} \right]. \quad (2.4)$$

Результаты расчета параметров скоростного режима работы генератора n_{cp} , σ и часовой отдачи свести в табл. 2.4.

2.14. Определить коэффициент усиления по току B составного транзистора регулятора напряжения (рис. 2.5).

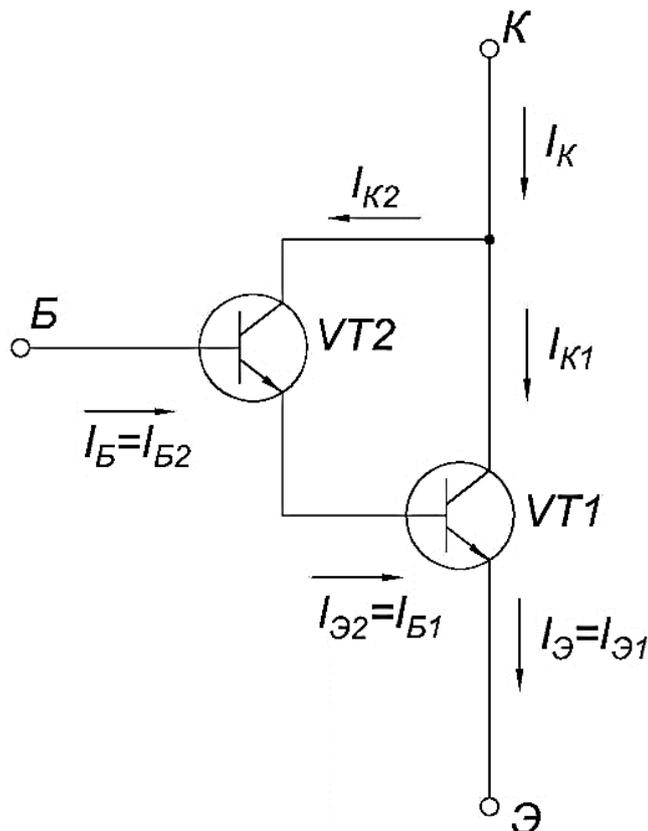


Рис. 2.5. Схема распределения токов в составном транзисторе

2.15. К каким группам регуляторов дискретного действия относятся следующие регуляторы напряжения:

- а) одноступенчатый контактно-вибрационный;
- б) двухступенчатый контактно-вибрационный;
- в) контактно-транзисторный;
- г) бесконтактный транзисторный?

Указание. Регуляторы дискретного действия характеризуются коэффициентом, учитывающим изменение параметров цепи возбуждения генератора $c = (L'_B R_B) / (L_B R'_B)$, и коэффициентом, учитывающим изменение структуры регулирования $k = (U_{п} R_B / U_{и} R'_B)$, где R_B и R'_B – сопротивления цепи возбуждения соответственно во время импульсов и пауз; L_B и L'_B – индуктивности цепи возбуждения соответственно во время импульсов и пауз; $U_{и}$ и $U_{п}$ – напряжения, приложенные к цепи возбуждения соответственно во время импульсов и пауз.

Регуляторы дискретного действия делятся на 12 групп:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1) $C = 1, k = 0$; | 7) $C > 1, k > 0$; |
| 2) $C = 1, k = -1$; | 8) $C > 1, k < 0$; |
| 3) $C = 1, k > 0$; | 9) $C < 1, k = 0$; |
| 4) $C = 1, k < 0$; | 10) $C < 1, k = -1$; |
| 5) $C > 1, k = 0$; | 11) $C < 1, k > 0$; |
| 6) $C > 1, k = -1$; | 12) $C < 1, k < 0$. |

2.16. Определить численные значения пороговых напряжений и динамических сопротивлений диода, стабилитрона и транзистора, вольт-амперные характеристики которых представлены на рис. 2.6.

Указание. Для транзистора определить значения динамических сопротивлений $R_э$ и $R'_э$, соответствующие токам эмиттера $I_э$ и базы $I_б$. Коэффициент усиления по току транзистора $B = 15$.

2.17. Определить напряжения срабатывания $U_{ср}$ и возврата $U_в$ транзисторного регулятора напряжения, измерительная цепь которого представлена на рис. 2.7.

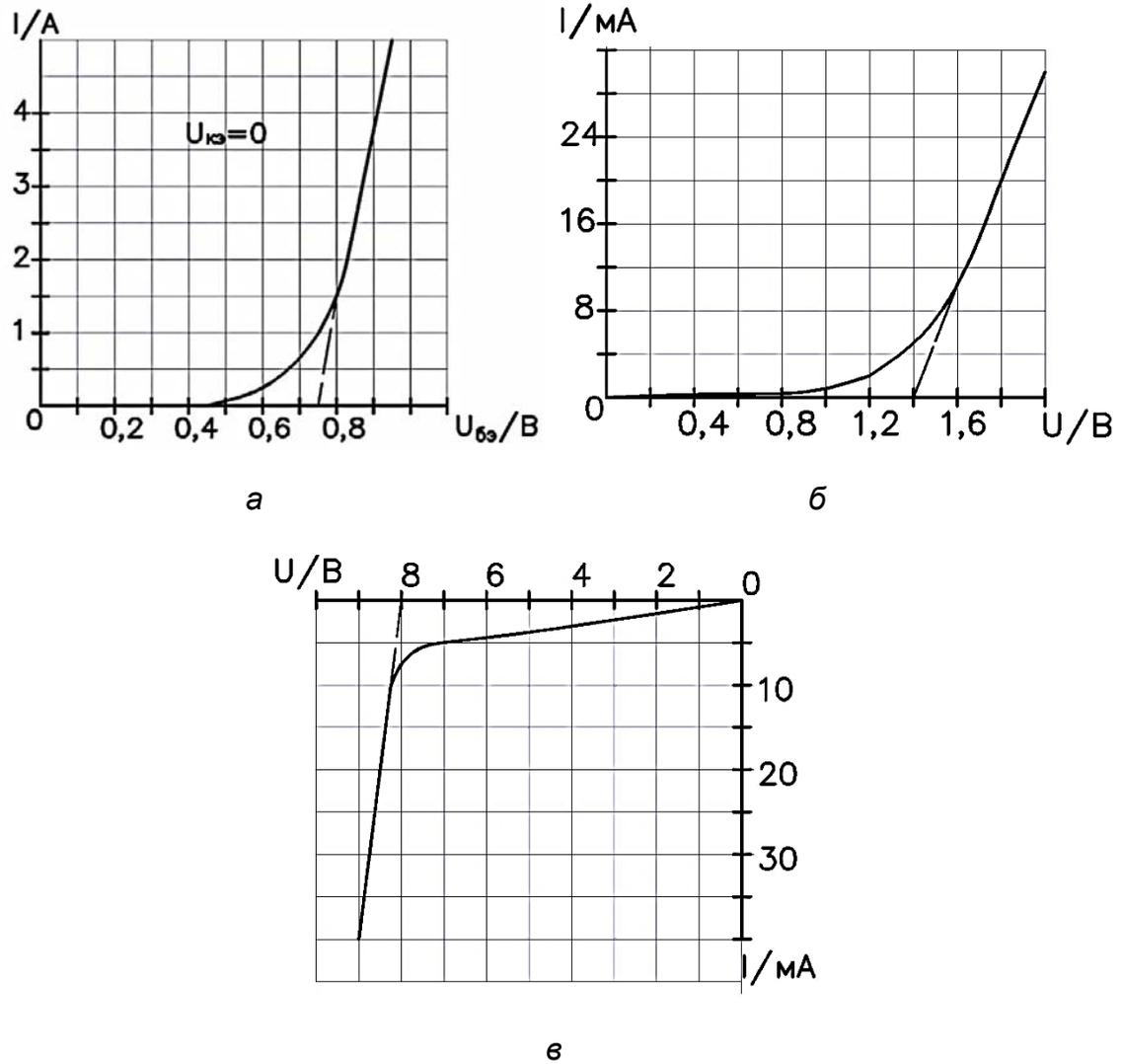


Рис. 2.6. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов

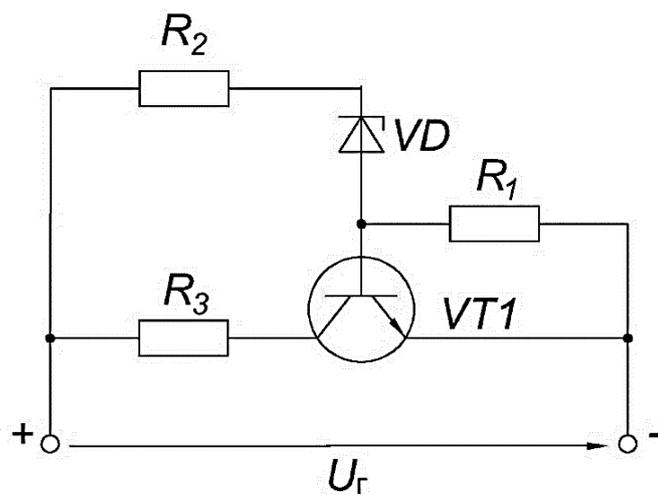


Рис. 2.7. Простейшая схема измерительного устройства регулятора напряжения

Указание. При $U_r = U_{cp}$ стабилитрон VD пробит, транзистор VT находится в состоянии отсечки.

Напряжение срабатывания можно определить, решив систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} U_{cp} &= I(R_2 + R_{ct} + R_1) + U_{ост}, \\ U_{o3} &= IR_1 \text{ (условие переключения реле),} \end{aligned} \right\}$$

где $U_{ост}$ – пороговое напряжение (напряжение пробоя) стабилитрона); R_{ct} – динамическое сопротивление стабилитрона; U_{o3} – пороговое напряжение транзистора.

При $U_r = U_B$ транзистор VT находится в состоянии насыщения (рис. 2.8).

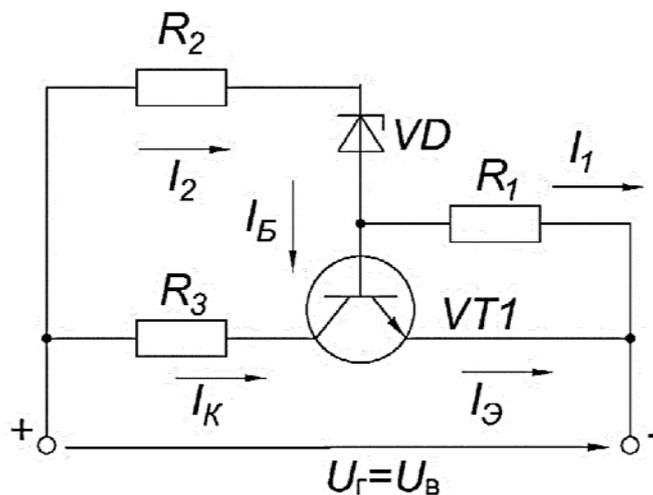


Рис. 2.8. Схема распределения токов в измерительной цепи транзисторного регулятора напряжения при $U_e = U_B$

Для напряжения возврата транзисторного реле справедливы уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_B &= I_2(R_2 + R_{ct}) + U_{ост} + I_1 R_1, \\ U_B &= I_K R_3 + U_{кэнас}. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Условие переключения реле

$$U_{o3} + I_3 R_3 = I_1 R_1. \quad (2.6)$$

Соотношения между токами

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= I_1 + I_6, \\ I_3 &= I_6(B + 1), \\ I_K &= I_6 B, \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где $I_{\bar{0}}$, I_{κ} , $I_{\bar{3}}$ – токи базы, коллектора и эмиттера транзистора; $U_{\kappa\text{нас}}$ – напряжение насыщения перехода «коллектор-эмиттер» транзистора; B – коэффициент усиления по току; $R_{\bar{3}}$ – динамическое сопротивление транзистора, соответствующее току $I_{\bar{3}}$.

Решая систему уравнений (2.5), (2.6), (2.7), можно определить напряжение возврата транзисторного реле.

2.18. Рассчитать мощность, рассеиваемую на наиболее нагруженном элементе регулятора напряжения PP350 – R6 (рис. 2.9), при отключении аккумуляторной батареи от сети электропитания при частоте вращения ротора генератора 3000 мин^{-1} , если известна эпюра напряжения на выводах «+» и «–» регулятора (рис. 2.10).

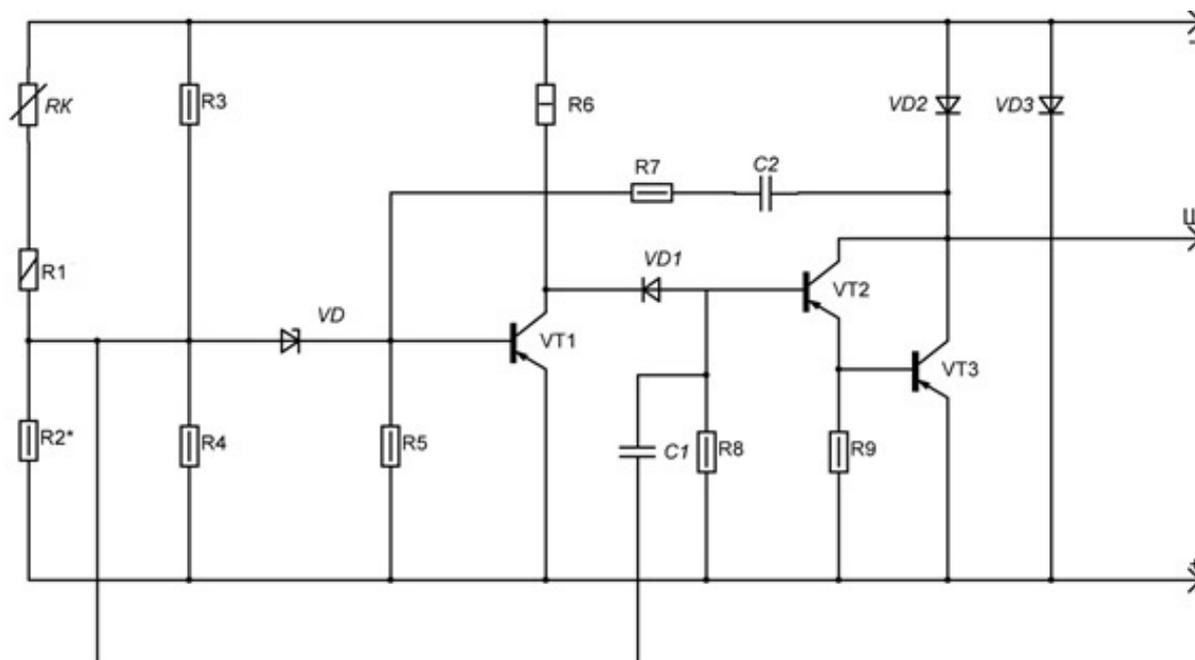


Рис. 2.9. Принципиальная электрическая схема регулятора напряжения PP350:

- RK – терморезистор ММТ – 1 кОм; $R1$ – резистор МЛТ-0,25 – 820 Ом;
 $R2$ – МЛТ-0,5 – подстроечный резистор; $R3$ – резистор МЛТ-0,5 – 150 Ом;
 $R4$, $R8$ – резисторы МЛТ-0,5 – 300 Ом; $R5$ – резистор МЛТ-0,5 – 270 Ом;
 $R6$ – резистор МЛТ-1,0 – 470 Ом; $R7$ – резистор МЛТ-0,5 – 3,3 кОм;
 $R9$ – резистор МЛТ-0,5 – 100 Ом; $C1$, $C2$ – конденсаторы К73-9 – 0,1 мкФ;
 VD – стабилитрон Д814А; $VT1$ – транзистор КТ502В;
 $VD1$ – диод КД105Б; $VT2$, $VT3$ – транзисторы КТ837-Х;
 $VD2$ – диод КД202В; $VD3$ – диод КД209А

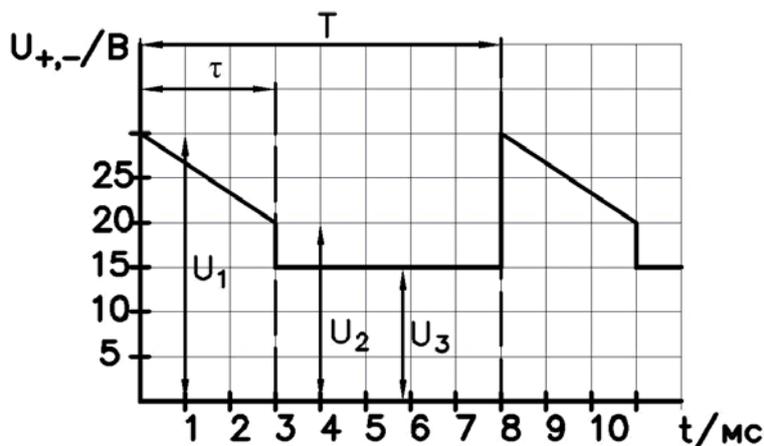


Рис. 2.10. Эпюра напряжения на выводах «+» и «-» регулятора PP350 при отключении аккумуляторной батареи от сети

Указание. Пренебрегая напряжением на переходе «эмиттер-коллектор» транзистора VT1, которое меньше 2 В, мощность, рассеиваемая на резисторе R6, рассчитывается с использованием выражения

$$P_{R6} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (2.8)$$

где $u(t)$ и $i(t)$ – соответственно напряжение и ток на участке цепи; T – период импульса напряжения; t – время.

Напряжение $u(t)$ на выводах «+» и «-» регулятора напряжения можно аппроксимировать двумя выражениями

$$u(t) = U_1 + \frac{U_2 - U_1}{\tau} t \text{ при } 0 \leq t \leq \tau;$$

$$u(t) = U_3 \text{ при } \tau \leq t \leq T,$$

где U_1 , U_2 , U_3 , τ – параметры эпюры напряжения (рис. 2.10).

Поскольку $i(t) = u(t)/R_6$, выражение (2.8) можно записать в виде

$$P_{R6} = \frac{1}{TR_6} \left[\int_0^{\tau} \left(U_1 + \frac{U_2 - U_1}{\tau} \cdot t \right)^2 dt + \int_{\tau}^T U_3^2 dt \right].$$

После интегрирования можно получить окончательное расчетное выражение и, подставив в него исходные данные ($R_6 = 470$ Ом, $U_1 = 30$ В, $U_2 = 20$ В, $U_3 = 15$ В, $\tau = 3$ мс, $T = 8$ мс), найти значение мощности P_{R6} , рассеиваемой на резисторе R_6 .

2.19. Рассчитать энергию, рассеиваемую на резисторе R_6 , включенном между выводами «+» и «-» регулятора напряжения РР350 (рис. 2.9) при внезапном уменьшении тока генератора с 40 до 5 А при частоте вращения ротора $10\,000\text{ мин}^{-1}$ (при работе без аккумуляторной батареи). Эюра напряжения на выводах регулятора для данного аномального режима представлена на рис. 2.11. Параметры эюры напряжения $U_1 = 70\text{ В}$, $U_2 = 40\text{ В}$, $U_3 = 17\text{ В}$, $\tau = 0,2\text{ с}$.

Указание. Для определения энергии W_{R_6} , рассеиваемой на резисторе R_6 регулятора напряжения, необходимо аппроксимировать эюру напряжения $u(t)$ (рис. 2.11), используя уравнения прямой, проходящей через две данные точки:

$$\frac{u(t) - U_1}{U_2 - U_1} = \frac{t - 0}{\tau/2 - 0} \text{ при } 0 \leq t \leq \tau/2;$$

$$\frac{u(t) - U_2}{U_3 - U_2} = \frac{t - \tau/2}{\tau - \tau/2} \text{ при } \tau/2 \leq t \leq \tau.$$

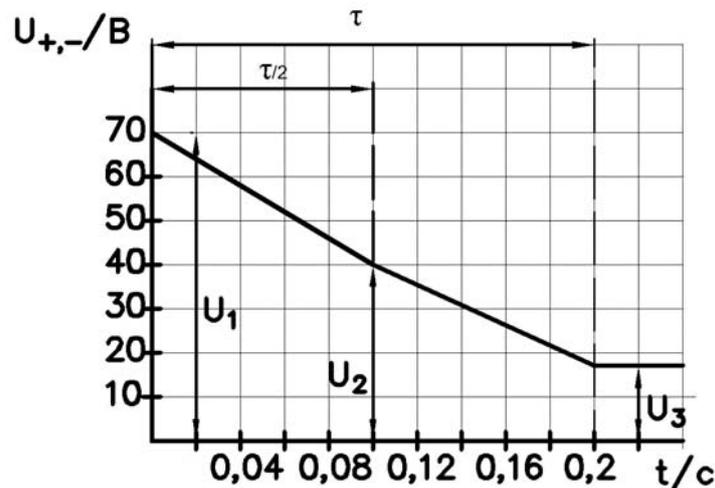


Рис. 2.11. Эюра напряжения на выводах «+» и «-» регулятора РР350 при внезапном уменьшении тока нагрузки генератора 32.3701

3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА

3.1. Основным режимом работы стартера является режим пуска при положительных температурах двигателя со средней продолжительностью включения $t_{\text{в}} = 1,5$ с. Определить относительную продолжительность включения стартера ПВ для автомобилей, эксплуатируемых во II и III категориях условий эксплуатации (30 включений стартера на 100 км пробега, средняя скорость движения автомобиля $V = 40$ км/ч).

Указание. Относительная продолжительность включения стартера

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + t_{\text{п}}} \cdot 100\%,$$

где $t_{\text{в}}$ – время включения стартера (1,5 с); $t_{\text{п}}$ – продолжительность паузы между включениями стартера.

На 100 км пробега затрачивается время

$$t_{100} = S/V = 100/40 = 2,5 \text{ ч.}$$

Следовательно, за 1 ч (3600 с) работы автомобиля получаем $n_{\text{в}} = 30/2,5 = 12$ включений стартера.

Время паузы между включениями стартера составит

$$t_{\text{п}} = \frac{(t_{\text{в}} + t_{\text{п}})_1 - n_{\text{в}} t_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} = \frac{3600 - 12 \cdot 1,5}{12} = 298,5 \text{ с.}$$

3.2. Определить максимальную электромагнитную мощность стартерного электродвигателя, если известны номинальное напряжение 12 В, падение напряжения в щеточно-коллекторном узле 1 В, ток полного торможения 500 А.

3.3. Определить внутреннее сопротивление стартерного электродвигателя, если ток полного торможения равен 300 А, а напряжение питания изменяется по закону $U_{\text{с}} = 12 - 0,02I$.

3.4. Определить частоту вращения якоря стартерного электродвигателя при токе $I = 200$ А для новой вольт-амперной характеристики аккумуляторной батареи $U'_c(I)$, приведенной к стартеру (рис. 3.1).

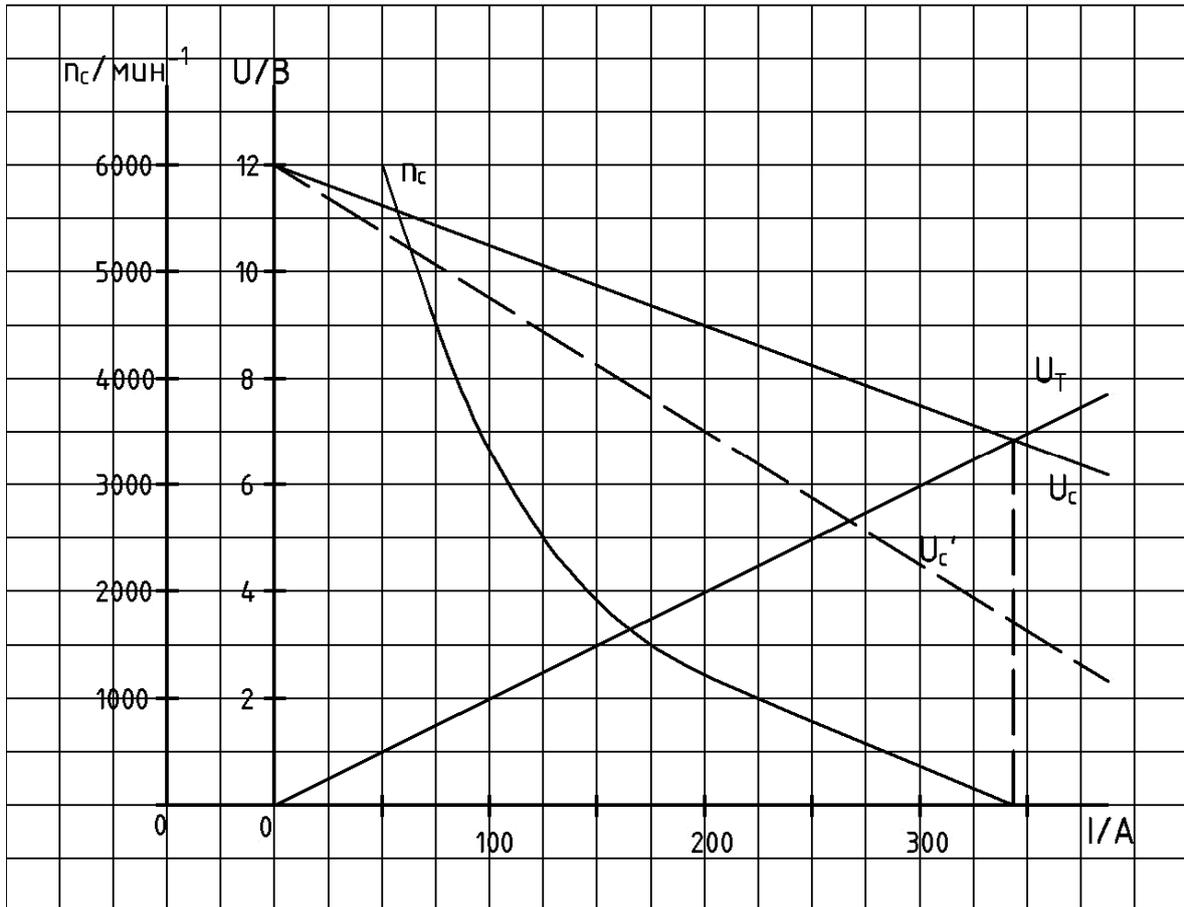


Рис. 3.1. Вольт-амперные характеристики аккумуляторной батареи и скоростная характеристика стартера

3.5. При пуске двигателя ток, потребляемый стартером, равен 200 А, напряжение на клеммах аккумуляторной батареи и стартерного электродвигателя составляет соответственно 10,3 и 9,8 В. Определить, соответствует ли падение напряжения в цепи питания стартера требованию технических условий, если нормированное значение данного параметра составляет 2 В на 1000 А.

3.6. Выразить величину тока полного торможения стартера через значения начального разрядного напряжения $U_{нр}$ и сопротивлений аккумуляторной батареи R_6 , цепи питания $R_{ц}$ и стартера $R_{ст}$ (рис. 3.2).

3.7. При каком потребляемом токе, кратном току полного торможения $I/I_{ст}$, и ЭДС якоря, кратной начальному разрядному напряжению аккумуляторной батареи $E_c/U_{нр}$, стартерный электродвигатель развивает максимальную электромагнитную мощность (рис. 3.2)?

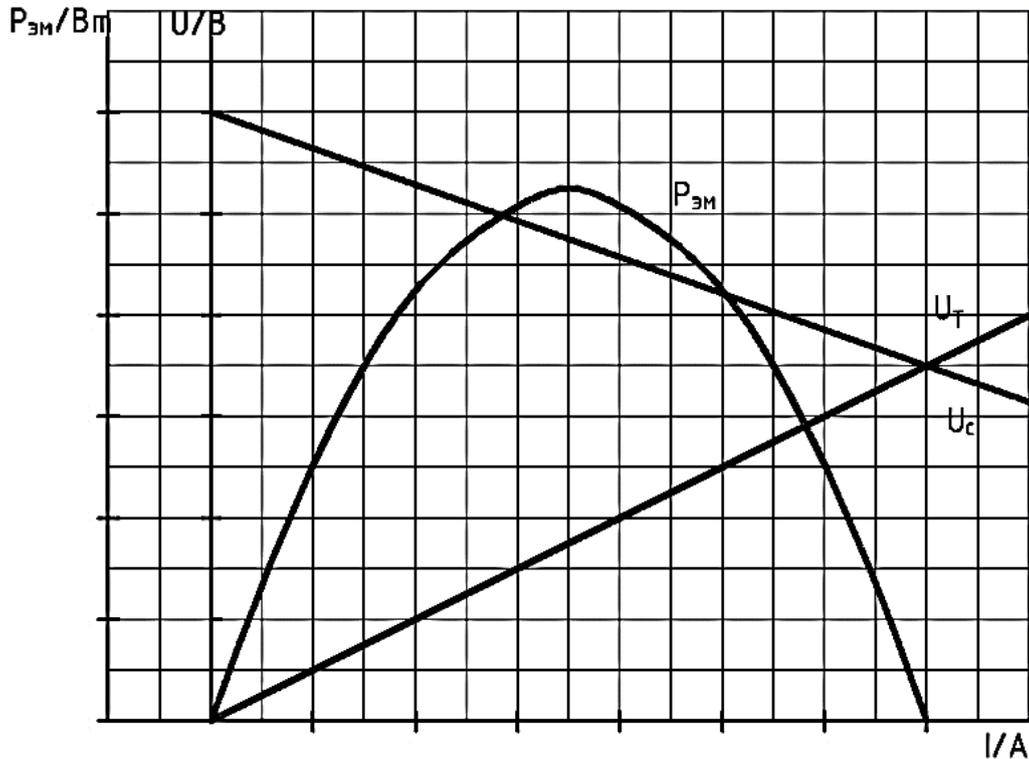


Рис. 3.2. Зависимость электромагнитной мощности стартерного электродвигателя от потребляемого тока

Указание. Проанализировать выражения для электромагнитной мощности стартерного электродвигателя на максимум: $dP_{эм}/dI$ и $dP_{эм}/dE_c$.

3.8. Получить выражения для токов якоря $I_{ам}$ и стартера I_m (рис. 3.3) в режиме полного торможения, используя параметры системы пуска: $U_{нр}$ – начальное разрядное напряжение аккумуляторной батареи; $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щеточно-коллекторном узле; $R_б$, $R_{щ}$, R_{qs} , R_a , R_c , R_s – электрические сопротивления батареи, цепи питания, удерживающей обмотки тягового реле, обмотки якоря, последовательной и параллельной обмоток возбуждения соответственно.

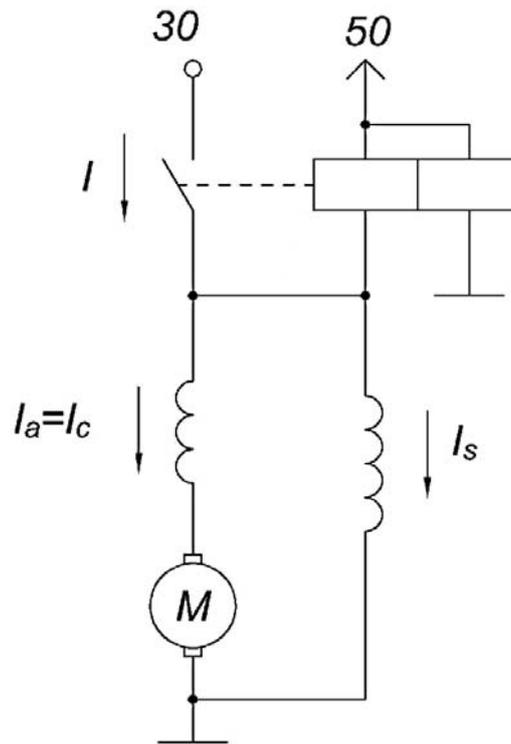


Рис. 3.3. Электрическая схема стартера

Указание. При выводе формул принять следующие выражения:

– суммарное эквивалентное сопротивление параллельно цепи якоря

$$R_{\text{эс}} = \frac{R_s \cdot R_{qs}}{R_s + R_{qs}};$$

– отношение суммарного сопротивления обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения к суммарному эквивалентному сопротивлению $R_{\text{эс}}$

$$K_{\text{ас}} = \frac{R_a + R_c}{R_{\text{эс}}};$$

– отношение эквивалентного сопротивления $R_{\text{эс}}$, подключенного параллельно цепи якоря, к сумме сопротивлений R_b , $R_{\text{ц}}$ и $R_{\text{эс}}$

$$K_s = \frac{R_{\text{эс}}}{R_b + R_{\text{ц}} + R_{\text{эс}}}.$$

Основные формулы для расчёта:

– напряжение на выводах стартера

$$U_c = U_{\text{нр}} - I(R_b + R_{\text{ц}});$$

– ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря стартерного электродвигателя

$$E_c = U_c - \Delta U_{щ} - I_a(R_a + R_c);$$

– суммарный ток нагрузки, подключенной параллельно цепи якоря

$$I_{\Sigma S} = \frac{U_c}{R_{\Sigma S}};$$

– ток, потребляемый стартером

$$I = I_a + I_{\Sigma S}.$$

3.9. Вывести формулу для расчета длительности периода работы стартера, в течение которого его номинальная мощность изменится не более чем на 3%.

Для заданного типа стартера, работающего в номинальном режиме, рассчитать:

- продолжительность его работы с неизменной мощностью $t_{3\%}$;
- относительное изменение мощности за счет нагрева обмоток стартерного электродвигателя $P_{\Sigma M\%}$ за $t = 15$ с;
- превышение температуры обмоток τ за время работы $t = 15$ с.

Основные параметры стартеров приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные для расчета

Тип стартера	Номинальное напряжение U_n , В	Средняя плотность тока обмоток j , $A/m^2 \cdot 10^6$	Сопротивление обмоток стартера R_{c+20} , Ом	Внутреннее сопротивление батареи R_b , Ом
29.3708	12	27	0,0133	0,00820
26.3708	12	30	0,0189	0,00833
СТ230 К	12	23	0,0118	0,00672
СТ142 Б	24	28	0,0078	0,00578
25.3708	24	19	0,00767	0,00578

Указание. Мощность работающего стартера не остается постоянной, а падает в зависимости от продолжительности работы. Считая процесс нагрева обмоток стартерного электродвигателя адиабатическим (теплообмен с окружающей средой отсутствует), принима-

ем, что стартер в начальный период включения работает в режиме номинальной (максимальной) мощности при температуре $+20^{\circ}\text{C}$. При этом полезная мощность на валу пропорциональна его электромагнитной мощности

$$P_{\text{ЭМ}m+20} = \frac{U_{\text{н}}}{4(R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{с}+20})}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение стартера; $R_{\text{б}}$ – внутреннее сопротивление батареи; $R_{\text{ц}}$ – сопротивление цепи питания стартера (принимается $0,002 \text{ Ом}$); $R_{\text{с}+20}$ – сопротивление обмоток стартерного электродвигателя при температуре $+20^{\circ}\text{C}$.

Для адиабатического процесса нагрева обмоток стартера можно составить следующее равенство

$$cm\tau = I^2 R_{\text{с}} t, \quad (3.2)$$

где $c = 393 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ – удельная теплоемкость меди; m – масса меди обмоток; τ – превышение температуры обмоток; I – ток стартера; $R_{\text{с}}$ – сопротивление обмоток стартера; t – время протекания тока.

Учитывая, что

$$m = \gamma S l, \quad R_{\text{с}} = \frac{\rho l}{S},$$

где $\gamma = 8930 \text{ кг/м}^3$ – плотность меди; S – площадь сечения проводника; $\rho = 17,5 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – удельное электрическое сопротивление меди, получаем из (3.2) зависимость превышения температуры обмоток от плотности и времени протекания тока

$$\tau = j^2 \frac{\rho t}{c\gamma} = 5 \cdot 10^{-15} j^2 t, \quad (3.3)$$

где $j = \frac{I}{S}$ – плотность тока, А/м^2 .

Принимаем неизменными величины сопротивлений батареи ($R_{\text{б}} = \text{const}$) и цепи питания ($R_{\text{ц}} = \text{const}$), преобразуем формулу (3.1) с учетом увеличения сопротивления обмотки стартера за счет нагрева до температуры T . Тогда формула (3.1) будет иметь вид

$$P_{\text{ЭМ}mT} = \frac{U_{\text{н}}^2}{4[R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{с}+20}(1 + \alpha\tau)]}, \quad (3.4)$$

где $\alpha = 0,004 \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент изменения сопротивления меди.

Используя формулы (3.1), (3.3), (3.4), получим выражение для относительного изменения электромагнитной мощности в процентах за счет нагрева обмоток стартера

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ЭМ}\%} &= \frac{P_{\text{ЭМ}T} - P_{\text{ЭМ}+20}}{P_{\text{ЭМ}+20}} \cdot 100 = \\ &= \frac{-2 \cdot 10^{-15} R_{\text{с}+20} j^2 t}{R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{с}+20} (1 + 0,02 \cdot 10^{-15} \cdot j^2 t)}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Задаваясь 3%-м изменением мощности, т.е. подставляя в (3.5) $\Delta P_{\text{ЭМ}\%} = -3\%$, можно получить выражение для определения продолжительности работы стартера с неизменной номинальной мощностью $t_{3\%}$.

3.10. Определить кинематическую вязкость моторного масла ν , при которой для заданной температуры t_n стартер прокручивает коленчатый вал двигателя с минимальной пусковой частотой $n_d = n_{\text{мин}}$.

Исходными данными для расчета являются:

а) по двигателю:

- тип – бензиновый, четырехцилиндровый, рядный (P4);
- рабочий объем цилиндров $V_h = 2,5 \text{ л}$;
- минимальная пусковая частота вращения коленчатого вала $n_{\text{мин}} = 70 \text{ мин}^{-1}$ при температуре пуска $t_n = -20^\circ\text{C}$;

– коэффициенты формулы для расчета среднего момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала $K_1 = 1,1$; $A = 0,05$; $B = 0,04$; $y = 0,5$;

б) по аккумуляторной батарее:

- номинальное напряжение $U_n = 12 \text{ В}$;
- температура электролита $t_n = t_9 = -20^\circ\text{C}$;
- коэффициент, учитывающий влияние на электрическое сопротивление батареи температуры электролита $K_T = 1,04$;
- степень разряженности $\Delta C_p = 25\%$;
- поправочный коэффициент, учитывающий 25%-ю разряженность батареи $K_p = 0,085$;

- число попыток пуска $Z_{\text{п}} = 3$;
- продолжительность попытки пуска $\tau = 10$ с;
- коэффициент длительности попытки пуска $K_{\text{п}} = 1,04$;
- нормативные показатели разряда в стартерном режиме по стандарту EN 50342+A1:

- ток холодной прокрутки $I_{\text{хп}} = 450$ А;
- разрядное напряжение $U_{\text{р}} = 7,5$ В;
- время разряда $\tau_{\text{р}} = 10$ с;

в) по электрической цепи питания стартера:

- сопротивление стартерной цепи $R_{\text{ц}} = 0,002$ Ом;

г) по стартеру:

- способ возбуждения стартерного электродвигателя – электромагнитный;

- ток холостого хода $I_{\text{х}} = 55$ А;
- внутреннее сопротивление $R_{\text{с}} = 0,00171$ Ом;
- падение напряжения в щеточно-коллекторном узле $\Delta U_{\text{щ}} = 0$;
- коэффициенты в формулах для расчета скоростной и моментной характеристик: $a_n = 22560$; $b_n = 86$; $a_m = 571$; $b_m = 16,6$;

д) по зубчатой передаче шестерня привода стартера – венец маховика двигателя:

- передаточное число $i_{\text{дс}} = 15,35$;
- КПД зубчатой передачи $\eta = 0,9$.

Указание. Привести алгоритм (последовательность) и результаты вычислений, используя математический аппарат метода совмещения характеристик аккумуляторной батареи, стартера и двигателя.

Уравнение вольт-амперной характеристики аккумуляторной батареи

$$U_{\text{б}} = U_{\text{нр}} - I_{\text{с}} R_{\text{б}},$$

где

$$U_{\text{нр}} = \frac{U_{\text{н}} (11,784 + 0,0154t - 0,01\Delta C_{\text{р}})}{12} \quad (3.6)$$

- начальное разрядное напряжение при $I_{\text{с}} = 0$;

$$R_{\text{б}} = \frac{(K_{\text{т}} + K_{\text{р}})U_{\text{н}}(11,5 - U_{\text{р}})K_{\text{п}}}{12I_{\text{хп}}} \quad (3.7)$$

– внутреннее электрическое сопротивление.

Вольт-амперная характеристика батареи, приведенная к стартеру (скорректированная на падение напряжения в цепи питания)

$$U_{\text{с}} = U_{\text{нр}} - I_{\text{с}}(R_{\text{б}} + R_{\text{ц}}).$$

Аналитическое выражение скоростной характеристики стартера:

– с электромагнитным возбуждением

$$n_{\text{с}} = E_{\text{с}} \left(\frac{a_{\text{н}}}{I_{\text{с}}} + b_{\text{н}} \right) = (U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{с}}R_{\Sigma}) \left(\frac{a_{\text{н}}}{I_{\text{с}}} + b_{\text{н}} \right), \quad (3.8)$$

откуда ток, потребляемый стартером

$$I_{\text{с}} = 0,5 \left(I_{\text{ст}} - \frac{a_{\text{н}}}{b_{\text{н}}} - \frac{n_{\text{с}}}{b_{\text{н}}R_{\Sigma}} \right) + \sqrt{0,25 \left(\frac{n_{\text{с}}}{b_{\text{н}}R_{\Sigma}} + \frac{a_{\text{н}}}{b_{\text{н}}} - I_{\text{ст}} \right)^2 + \frac{a_{\text{н}}}{b_{\text{н}}} I_{\text{ст}}}; \quad (3.9)$$

– с магнитоэлектрическим возбуждением (постоянными магнитами)

$$n_{\text{с}} = \frac{E_{\text{с}}}{a_{\text{н}} + b_{\text{н}}I_{\text{с}}} = \frac{(U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{с}}R_{\Sigma})}{a_{\text{н}} + b_{\text{н}}I_{\text{с}}}, \quad (3.10)$$

откуда ток, потребляемый стартером

$$I_{\text{с}} = \frac{U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}} - a_{\text{н}}n_{\text{с}}}{b_{\text{н}}n_{\text{с}} + R_{\Sigma}}, \quad (3.11)$$

где $E_{\text{с}} = U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{с}}R_{\Sigma}$ – ЭДС стартера; $R_{\Sigma} = R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{с}}$ – суммарное (общее) электрическое сопротивление системы пуска;

$I_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}}}{R_{\Sigma}}$ – ток полного торможения стартера.

Аналитическое выражение моментной характеристики стартера:

– с электромагнитным возбуждением

$$M_{\text{с}} = \frac{(I_{\text{с}} - I_{\text{х}})^2}{a_{\text{м}} + b_{\text{м}}(I_{\text{с}} - I_{\text{х}})}, \quad (3.12)$$

откуда ток, потребляемый стартером

$$I_{\text{с}} = I_{\text{х}} + \frac{b_{\text{м}}M_{\text{с}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{b_{\text{м}}M_{\text{с}}}{2} \right)^2 + a_{\text{м}}M_{\text{с}}}; \quad (3.13)$$

– с магнитоэлектрическим возбуждением (постоянными магнитами)

$$M_c = [a_M + b_M(I_c - I_x)](I_c - I_x), \quad (3.14)$$

откуда ток, потребляемый стартером

$$I_c = I_x + \frac{a_M}{2b_M} - \sqrt{\left(\frac{a_M}{2b_M}\right)^2 - \frac{M_c}{b_M}}. \quad (3.15)$$

Средний момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала двигателя рассчитывается по эмпирической формуле

$$M_d = K_1 \cdot 7,8 \cdot V_h \cdot \left(A + B \frac{n_d}{100} \right) \nu^y, \quad (3.16)$$

где ν – кинематическая вязкость моторного масла, сСт.

3.11. Определить такую силу тока холодной прокрутки аккумуляторной батареи по стандарту *EN* $I_{хп}$, чтобы при заданной температуре пуска t_n стартер прокручивал коленчатый вал двигателя с минимальной пусковой частотой $n_d = n_{\text{пmin}}$.

Исходными данными для расчета являются:

а) по двигателю:

- тип – бензиновый, четырехтактный;
- схема расположения и число цилиндров – Р4;
- рабочий объем цилиндров $V_h = 2,2$ л;
- кинематическая вязкость моторного масла $\nu = 5000$ сСт при температуре пуска $t_n = -30^\circ\text{C}$;
- минимальная пусковая частота вращения коленчатого вала $n_{\text{пmin}} = 65 \text{ мин}^{-1}$ при температуре пуска $t_n = -30^\circ\text{C}$;
- коэффициенты в формуле (3.16) $K_1 = 1,1$; $A = 0,05$; $B = 0,04$;
- $y = 0,5$;

б) по аккумуляторной батарее:

- номинальное напряжение $U_n = 12$ В;
- температура электролита $t_э = t_n = -30^\circ\text{C}$;
- степень разряженности $\Delta C_p = 25\%$;
- коэффициенты в формуле (3.7) $K_T = 1,4$, $K_P = 0,085$, $K_n = 1,04$;

в) по цепи питания стартера:

- сопротивление стартерной цепи $R_{ц} = 0,002$ Ом;

г) по стартеру:

- способ возбуждения стартерного электродвигателя – магнито-электрический (с постоянными магнитами);
- ток холостого хода $I_x = 40$ А;
- внутреннее сопротивление $R_c = 0,0044$ Ом;
- падение напряжения в щеточно-коллекторном узле $\Delta U_{щ} = 0$;
- коэффициенты в формулах (3.10) и (3.14): $a_n = 3,47 \cdot 10^{-3}$; $b_n = 0,00315 \cdot 10^{-3}$; $a_M = 37,53 \cdot 10^{-3}$; $b_M = 0,0114 \cdot 10^{-3}$;

д) по зубчатой передаче шестерня привода стартера – венец маховика двигателя:

- передаточное число $i_{дс} = 13,2$;
- КПД зубчатой передачи $\eta = 0,9$;

Указание. Привести алгоритм (последовательность) и результаты вычислений, используя математический аппарат метода совмещения характеристик аккумуляторной батареи, стартера и двигателя. Основные формулы для расчета приведены в указаниях к задаче 3.10.

3.12. Какое передаточное число $i_{дс}$ должно быть у привода стартера, чтобы при заданной температуре пуска он обеспечивал прокручивание коленчатого вала двигателя с минимальной пусковой частотой $n_d = n_{\min}$?

Исходными данными для расчета являются:

а) по двигателю:

- тип – бензиновый, четырехтактный, четырехцилиндровый, рядный;
- температура пуска $t_n = -20^\circ\text{C}$, кинематическая вязкость моторного масла $\nu = 5000$ сСТ.
- момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала при заданных условиях пуска $M_d = 106,17$ Н·м;

б) по аккумуляторной батарее:

- начальное разрядное напряжение $U_{нр} = 11,226$ В и внутреннее сопротивление $R_6 = 0,0108$ Ом;

в) по электрической цепи питания стартера:

– сопротивление стартерной цепи $R_{ц} = 0,002 \text{ Ом}$;

г) по стартеру:

– способ возбуждения стартерного электродвигателя – электромагнитный;

– коэффициенты в формулах для расчета скоростной и моментной характеристик: $a_n = 22560$; $b_n = 86$; $a_M = 571$; $b_M = 16,6$;

– падение напряжения в щеточно-коллекторном узле $\Delta U_{щ} = 0$;

– ток холостого хода $I_x = 55 \text{ А}$;

– сопротивление обмоток $R_c = 0,0171 \text{ Ом}$;

д) по зубчатой передаче привода стартера:

– КПД зубчатой передачи $\eta = 0,9$.

Указание. Искомое передаточное число привода находят, исходя из условия, что для заданных условий пуска стартер прокручивает коленчатый вал с минимальной пусковой частотой

$$n_{\text{ср}} = n_{\text{пmin}} \cdot i_{\text{дс}} = (U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{с}} R_{\Sigma}) \left(\frac{a_n}{I_{\text{ср}}} + b_n \right) \quad (3.17)$$

и преодолевает требуемый для этого момент сопротивления двигателя

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{д}}}{i_{\text{дс}} \cdot \eta_z} = \frac{(I_{\text{с}} - I_x)^2}{a_M + b_M (I_{\text{с}} - I_x)}. \quad (3.18)$$

Для этого задаются несколькими значениями силы тока стартера $I_{\text{ср}}$ от 120 А с шагом, кратным 10 А. Для каждого значения тока определяют передаточное число привода, исходя из выполнения условий (3.17) и (3.18).

Искомое значение $i_{\text{дс}}$ находится графически (рис. 3.4).

3.13. Определить численные значения коэффициентов в формулах (3.8) и (3.12) для расчета скоростной и моментной характеристик стартера с электромагнитным возбуждением. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.2.

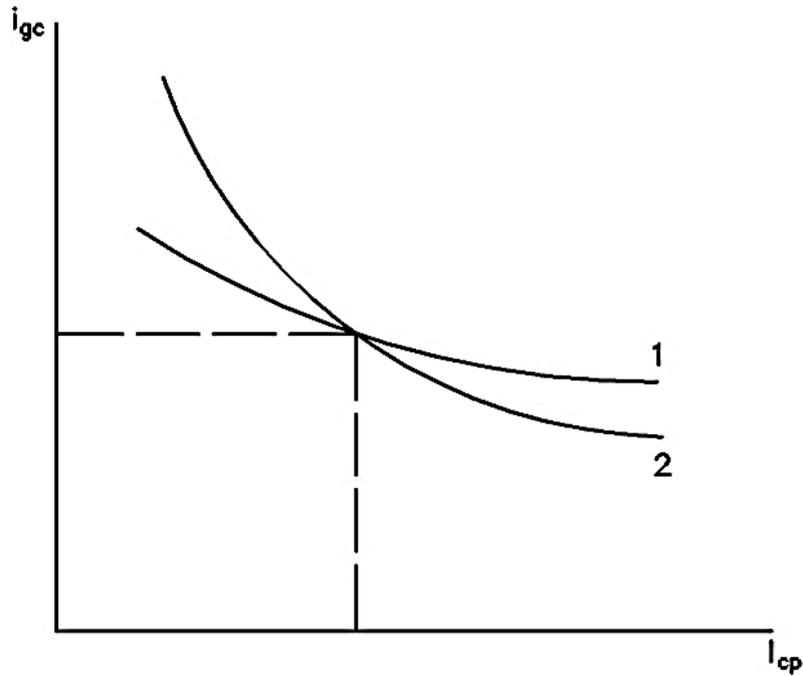


Рис. 3.4. Графический метод определения передаточного числа привода стартера: 1 – зависимость для условия (3.17); 2 – зависимость для условия (3.18)

Таблица 3.2

Параметры номинальных электромеханических характеристик стартера с электромагнитным возбуждением

№ опыта	I_c , А	U_c , В	U_T , В	n_c , мин ⁻¹	M_c , Н·м
1	150	10,8	2,1	2080	4,22
2	200	10,4	2,8	1560	6,87
3	250	10,0	3,5	1180	9,61
4	300	9,6	4,2	840	12,85
5	350	9,2	4,9	600	16,19
Ток в режиме холостого хода $I_c = 50$ А					

Указание. При снятии электромеханических характеристик стартера напряжение на его выводах изменялось по закону $U_c = 12 - 0,008 \cdot I_c$.

Зависимость тормозного напряжения от потребляемого тока в рабочей зоне стартера от холостого хода до полного торможения представляет прямую линию, уравнение которой $U_T = \Delta U_{щ} + I_c \cdot R_c$. Значения постоянных $\Delta U_{щ}$ и R_c в этой формуле при наличии опытных данных определяются по методу наименьших квадратов с помощью системы нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n I_{ci} \cdot U_{Ti} - R_c \sum_{i=1}^n I_{ci}^2 - \Delta U_{щ} \sum_{i=1}^n I_{ci} &= 0, \\ \sum_{i=1}^n U_{Ti} - R_c \sum_{i=1}^n I_{ci} - n \cdot \Delta U_{щ} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

откуда:

– сопротивление стартера

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ci} \cdot U_{Ti} - 1/n \sum_{i=1}^n U_{Ti} \sum_{i=1}^n I_{ci}}{\sum_{i=1}^n I_{ci} - 1/n (\sum_{i=1}^n I_{ci})^2};$$

– падение напряжения в щеточно-коллекторном узле

$$\Delta U_{щ} = 1/n (\sum_{i=1}^n U_{Ti} - R_c \sum_{i=1}^n I_{ci}),$$

где n – число опытов.

Для определения постоянных коэффициентов в формулах для расчета частоты вращения вала (3.8) и крутящего момента (3.12) стартера с электромагнитным возбуждением данные зависимости можно преобразовать к виду линейных функций, графиками которых являются прямые линии.

Уравнение скоростной характеристики стартера (3.8) можно записать в виде функции $\frac{n_c I_c}{E_c} = a_n + I_c b_n$, где $E_c = U_c - U_T$ – ЭДС стартера.

Для определения коэффициентов a_n и b_n по методу наименьших квадратов имеем систему нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{n_{ci} I_{ci}^2}{E_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci}^2 - a_n \sum_{i=1}^n I_{ci} &= 0, \\ \sum_{i=1}^n \frac{n_{ci} I_{ci}}{E_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci} - n \cdot a_n &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Согласно этим уравнениям

$$b_n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{n_{ci} I_{ci}^2}{E_{ci}} - 1/n \sum_{i=1}^n \frac{n_{ci} I_{ci}}{E_{ci}} \sum_{i=1}^n I_{ci}}{\sum_{i=1}^n I_{ci}^2 - 1/n (\sum_{i=1}^n I_{ci})^2},$$

$$a_n = 1/n \left(\sum_{i=1}^n \frac{n_{ci} I_{ci}}{E_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci} \right).$$

Для зависимости крутящего момента стартера от потребляемого тока (3.12) линейной функцией является выражение

$$\frac{(I_c - I_x)^2}{M_c} = a_M + b_M (I_c - I_x),$$

для которого система нормальных уравнений будет выглядеть

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{(I_{ci} - I_x)^3}{M_{ci}} - b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)^2 - a_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) &= 0, \\ \sum_{i=1}^n \frac{(I_{ci} - I_x)^2}{M_{ci}} - b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) - n \cdot a_M &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Значение постоянных коэффициентов b_M и a_M по методу наименьших квадратов

$$b_M = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(I_{ci} - I_x)^3}{M_{ci}} - 1/n \sum_{i=1}^n \frac{(I_{ci} - I_x)^2}{M_{ci}} \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)}{\sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)^2 - 1/n \left[\sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) \right]^2},$$

$$a_M = 1/n \left[\sum_{i=1}^n \frac{(I_{ci} - I_x)^2}{M_{ci}} - b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) \right].$$

Результаты вычислений представить в табл. 3.3. Провести оценку расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 3.3

Результаты расчета электромеханических характеристик стартера с электромагнитным возбуждением

№ опыта	I_{ci}	U_{ci}	U_{π}	$I_{ci} \cdot U_{\pi}$	E_{ci}	$\frac{n_{ci} \cdot I_{ci}}{E_{ci}}$	$\frac{n_{ci} \cdot I_{ci}^2}{E_{ci}}$
.							
.							
.							
Σ		-			-		

Продолжение табл. 3.3

№ опыта	M_{ci}	$I_{ci} - I_x$	$(I_{ci} - I_x)^2$	$\frac{(I_{ci} - I_x)^2}{M_{ci}}$	$\frac{(I_{ci} - I_x)^3}{M_{ci}}$	Расчетные значения		
						U_T	n_c	M_c
.								
.								
.								
Σ		—				—	—	—

3.14. Определить численные значения коэффициентов в формулах (3.10) и (3.14) для расчета скоростной и моментной характеристик стартера с магнитоэлектрическим возбуждением (с постоянными магнитами). Результаты эксперимента приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Параметры номинальных электромеханических характеристик стартера с магнитоэлектрическим возбуждением

№ опыта	I_c, A	U_c, B	U_T, B	$n_c, \text{мин}^{-1}$	$M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$
1	200	10,74	0,89	2500	5,75
2	300	10,11	1,33	2000	9,00
3	400	9,47	1,78	1600	12,00
4	500	8,84	2,22	1250	15,00
5	600	8,21	2,67	1000	17,50
6	700	7,58	3,11	800	19,75
7	800	6,95	3,56	600	21,80
Ток холостого хода $I_x = 40 A$					

Указание. Для стартера с возбуждением от постоянных магнитов зависимости частоты вращения вала (3.10) и крутящего момента (3.14) от потребляемого тока можно преобразовать к виду линейной функции

$$\frac{E_c}{n_c} = a_n + b_n I_c,$$

$$\frac{M_c}{(I_c - I_x)} = a_M + b_M (I_c - I_x).$$

Для определения коэффициентов a_n и b_n по методу наименьших квадратов имеем систему нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} I_{ci}}{n_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci}^2 - a_n \sum_{i=1}^n I_{ci} &= 0, \\ \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci}}{n_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci} - n \cdot a_n &= 0, \end{aligned} \right\}$$

откуда

$$b_n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} I_{ci}}{n_{ci}} - 1/n \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci}}{n_{ci}} \sum_{i=1}^n I_{ci}}{\sum_{i=1}^n I_{ci}^2 - 1/n (\sum_{i=1}^n I_{ci})^2},$$

$$a_n = 1/n \left(\sum_{i=1}^n \frac{E_{ci}}{n_{ci}} - b_n \sum_{i=1}^n I_{ci} \right).$$

Коэффициенты a_M и b_M находятся из следующей системы нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_{ci} + b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)^2 - a_M (I_{ci} - I_x) &= 0, \\ \sum_{i=1}^n \frac{M_{ci}}{(I_{ci} - I_x)} + b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) - a_M \cdot n &= 0, \end{aligned} \right\}$$

откуда

$$b_M = \frac{1/n \sum_{i=1}^n \frac{M_{ci}}{(I_{ci} - I_x)} \cdot \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) - \sum_{i=1}^n M_{ci}}{\sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)^2 - 1/n [\sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x)]^2},$$

$$a_M = 1/n \left[\sum_{i=1}^n \frac{M_{ci}}{(I_{ci} - I_x)} + b_M \sum_{i=1}^n (I_{ci} - I_x) \right].$$

Результаты вычислений представить в виде таблицы (см. указания к задаче 3.13). Провести оценку результатов расчета частоты вращения вала и крутящего момента стартера.

4. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

4.1. Какое количество рабочих импульсов высокого напряжения подается в течение 1 с к свечам зажигания 4-тактного 8-цилиндрового двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1200 мин^{-1} ?

4.2. Через какой угол поворота коленчатого вала передаются импульсы высокого напряжения на свечи зажигания 4-тактного 4-цилиндрового двигателя?

4.3. Какое количество импульсов высокого напряжения подается в течение 1 с к свечам зажигания 4-тактного 6-цилиндрового двигателя при частоте вращения валика распределителя 1200 мин^{-1} ?

4.4. Сколько раз прерывается ток в первичной цепи системы зажигания 4-тактного 4-цилиндрового двигателя за один оборот коленчатого вала?

4.5. Через какой угол поворота приводного валика распределителя передаются импульсы высокого напряжения на свечи зажигания 4-тактного 4-цилиндрового двигателя?

4.6. Получить аналитическое выражение для расчета действующего (эффективного) значения тока в первичной цепи системы зажигания для кривых нарастания первичного тока:

а) по экспоненциальному закону

$$i_1 = \frac{U_n - \Delta U_k}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1 t}{L_1}} \right) \quad (\text{рис. 4.1, а});$$

б) с учетом заданного уровня ограничения тока I_{po}

$$i_1 = \begin{cases} \frac{U_n - \Delta U_k}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1 t}{L_1}} \right) & \text{при } 0 \leq t \leq t_0, \\ I_{po} & \text{при } t_0 \leq t \leq t_n \end{cases} \quad (\text{рис. 4.1, б});$$

в) по линейному закону $i_1 = kt$ (рис. 4.1, в), где U_n – напряжение питания; ΔU_k – падение напряжения на силовом ключе, включенном в первичную цепь катушки зажигания; R_1 – суммарное сопротивление первичной цепи системы зажигания; L_1 – индуктивность первичной обмотки катушки зажигания; t_n – время протекания первичного тока (время накопления энергии в катушке зажигания); t_0 – время, по истечении которого достигается заданный уровень ограничения тока I_{po} .

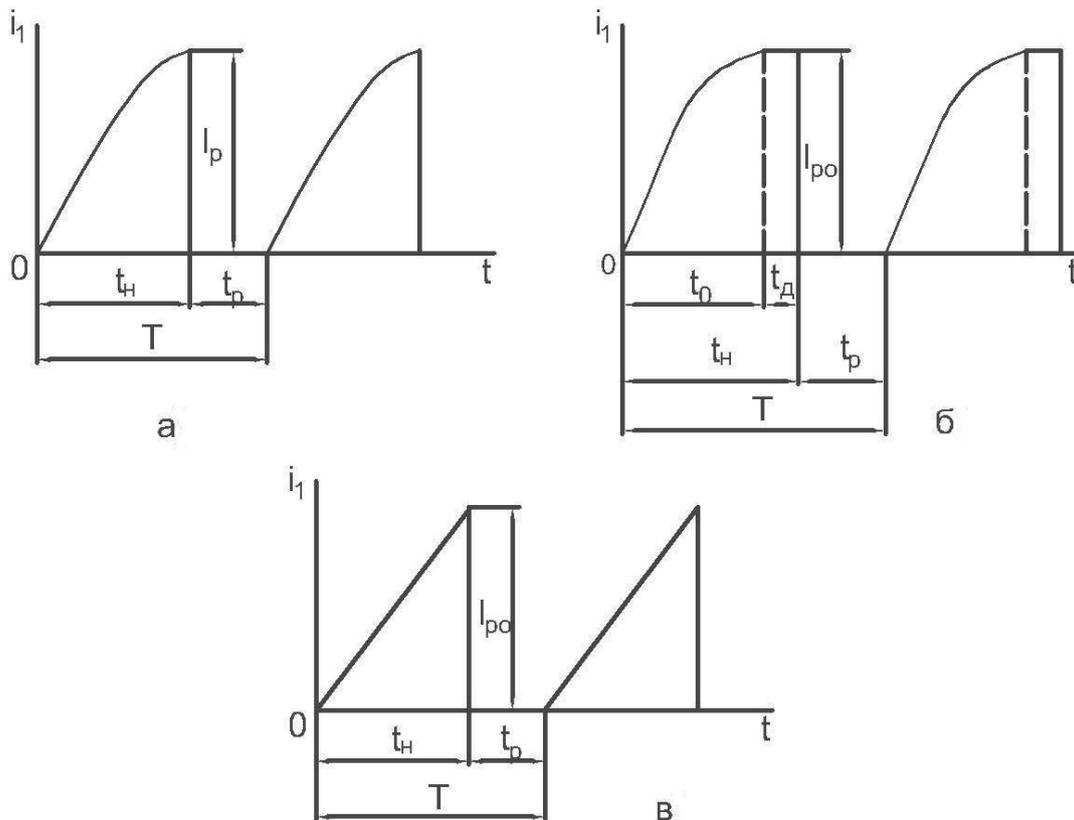


Рис. 4.1. Кривые изменения первичного тока:

$T = t_n + t_p = 120/(i_u \cdot n_{\partial\partial})$ – период работы системы зажигания
 (i_u – число цилиндров 4-тактного двигателя; $n_{\partial\partial}$ – частота вращения коленчатого вала); t_n – время накопления энергии в катушке зажигания;
 t_p – время отсутствия тока первичной цепи (для кривой тока б)
 $t_n = t_0 + t_{\partial}$; t_{∂} – время, в течение которого ограничивается первичный ток на заданном уровне I_{po})

Указание. Действующее значение первичного тока равно сред-неквадратичному значению периодического тока

$$I_{1д} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_1^2 dt}.$$

В окончательном виде в формулах для систем зажигания с ненормируемым (рис. 4.1, а) и нормируемым (рис. 4.1, б) временем накопления энергии параметры систем выразить через показатель $a = \frac{R_1}{L_1} t_H$

и постоянную времени первичного контура $\tau_1 = \frac{L_1}{R_1}$ соответственно.

Для системы зажигания с ограничением первичного тока необходимо определить время t_0 , по истечении которого достигается заданный уровень ограничения тока

$$I_{po} = \frac{U_n - \Delta U_k}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1 \cdot t_0}{L_1}} \right).$$

4.7. Определить силу тока разрыва и величину электромагнитной энергии, запасаемой в магнитном поле катушки зажигания к моменту размыкания первичного контура системы зажигания 4-тактного 4-цилиндрового ($i_{ц} = 4$) двигателя при частоте вращения коленчатого вала $n_{дв} = 1200 \text{ мин}^{-1}$.

Параметры системы зажигания:

- напряжение питания $U_n = 13,5 \text{ В}$;
- падение напряжения на силовом ключе (контактах прерывателя) $\Delta U_k = 0$;
- суммарное сопротивление первичной цепи $R_1 = 3 \text{ Ом}$;
- индуктивность первичной обмотки катушки зажигания $L_1 = 9 \text{ мГн}$;
- угол замкнутого состояния контактов прерывателя $\alpha_3 = 54^\circ \text{ ПВР}$;

Указание. Время замкнутого состояния контактов прерывателя (время накопления энергии в катушке зажигания) составляет некоторую часть от времени полного периода

$$t_3 = t_H = \tau_3 T = \frac{\tau_3 \cdot 120}{i_{ц} \cdot n_{дв}},$$

где $\tau_3 = \frac{t_3}{t_3 + t_p} = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_p}$ – относительное время протекания первичного тока (относительное время замкнутого состояния контактов прерывателя)

вателя); α_3, α_p – соответственно углы замкнутого и разомкнутого состояния контактов прерывателя.

4.8. Определить время накопления энергии t_n и ток разрыва, при частоте вращения коленчатого вала $n_{дв} = 1000 \text{ мин}^{-1}$ 4-тактного 4-цилиндрового двигателя, электронной системы зажигания, для которой нормируется относительное время τ_d , в течение которого ограничивается первичный ток катушки зажигания на уровне I_{po} .

Параметры системы зажигания: $U_n = 12,5 \text{ В}$; $\Delta U_k = 1 \text{ В}$; $L_1 = 3,7 \text{ мГн}$; $R_1 = 0,6 \text{ Ом}$; $I_{po} = 7,5 \text{ А}$; $\tau_d = 0,04$.

Указание. Относительное время нарастания первичного тока катушки зажигания до уровня ограничения (рис. 4.1, б)

$$\tau_d = \frac{t_d}{T} = \frac{t_d \cdot i_c \cdot n_{дв}}{120}.$$

4.9. Выразить величину электромагнитной энергии в магнитном поле катушки зажигания W_M через параметры системы зажигания $U_n, \Delta U_k, L_1, R_1, t_n$. Определить условие получения наибольшей электромагнитной энергии.

Указание. Электромагнитная энергия в магнитном поле катушки зажигания

$$W_M = \frac{L_1 I_p^2}{2}. \quad (4.1)$$

Ток разрыва в первичной цепи катушки зажигания

$$I_p = \frac{U_n - \Delta U_k}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1 t_n}{L_1}} \right). \quad (4.2)$$

Подставив (4.2) в (4.1), получить выражение для электромагнитной энергии, продифференцировать полученное уравнение по L_1 и приравнять к нулю ($dW_M/dL_1 = 0$), определить значение параметра

$a = \frac{R_1}{L_1} t_n$, при котором $W_M = W_{Mmax}$.

4.10. При каком значении параметра $a = \frac{R_1}{L_1} t_H$ системы зажигания обеспечивается заданный уровень энергии в магнитном поле катушки зажигания в требуемом диапазоне напряжений питания?

Заданы следующие значения напряжений:

– $U_{\text{пп}} = 6 \text{ В}$ – минимальное напряжение аккумуляторной батареи в режиме пуска;

– $U_{\text{пр}} = 13,5 \text{ В}$ – напряжение питания на рабочих режимах;

– $\Delta U_{\text{к}} = 1 \text{ В}$ – падение напряжения на силовом ключе, включенном в первичную цепь катушки зажигания.

Указание. Искомое значение параметра a определяется из условия равенства энергии, накапливаемой в магнитном поле катушки зажигания в пусковом и рабочем режимах двигателя.

4.11. При каком значении параметра $a = (R_1 \cdot t_H) / L_1$ системы зажигания выполняется условие обеспечения бесперебойного искрообразования на всем диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя от $n_{\text{двmin}}$ до $n_{\text{двmax}}$? Отношение требуемых максимальных значений вторичного напряжения, развиваемого катушкой зажигания, на всем диапазоне скоростного режима составляет $U_{2m}(n_{\text{двmax}}) / U_{2m}(n_{\text{двmin}}) = 0,6$.

Указание. Для нормальной работы системы необходимо, чтобы развиваемое катушкой зажигания максимальное вторичное напряжение U_{2m} соответствовало требуемым значениям в крайних точках скоростного режима работы двигателя:

$$\text{а) } U_{2m}(n_{\text{двmin}}) = \frac{U_{\text{п}} - \Delta U_{\text{к}}}{R_1} \cdot k_{\text{Т}} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2(k_{\text{Т}})^2}} \cdot \eta;$$

$$\text{б) } U_{2m}(n_{\text{двmax}}) = \frac{U_{\text{п}} - \Delta U_{\text{к}}}{R_1} \cdot (1 - e^{-a}) \cdot k_{\text{Т}} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2(k_{\text{Т}})^2}} \cdot \eta;$$

где $k_{\text{Т}}$ – коэффициент трансформации катушки зажигания; C_1 – емкость конденсатора первичной цепи; C_2 – распределенная емкость вторичной цепи; η – коэффициент, учитывающий снижение вторичного напряжения от потерь.

4.12. При каком значении параметра $a = (R_1 \cdot t_H)/L_1$ в магнитном поле катушки зажигания накапливается 50% энергии от максимально возможной при $t_H = \infty$ ($W_M/W_{Mmax} = 0,5$)?

Указание. Воспользоваться выражением, полученным при решении задачи 4.9.

4.13. Какое количество энергии в % от максимально возможного значения при $t_H = \infty$ накапливается в магнитном поле катушки зажигания для системы зажигания, параметр $a = (R_1 \cdot t_H)/L_1$ которой соответствует условию максимума запасаемой энергии ($W_M/W_{Mmax} = 100\%$)?

Указание. Значение параметра a для получения наибольшей запасаемой электромагнитной энергии определяется в задаче 4.9.

4.14. Определить величину энергии W_M , которую необходимо запасти в магнитном поле катушки зажигания, если требуемое значение энергии искрового разряда составляет $W_{ИР} = 50$ мДж. Коэффициент передачи энергии первичной цепи в искровой разряд $\eta_э = 0,4$.

4.15. Какую конструкцию магнитопровода должна иметь катушка зажигания с параметрами $I_p = 7,5$ А; $L_1 = 7,5$ А, чтобы обеспечить энергию искрового разряда $W_{ИР} = 50$ мДж.

Указание. По конструкции магнитной цепи катушки зажигания разделяются на два типа: с разомкнутой и замкнутой цепями. Коэффициент передачи запасенной энергии в энергию искры: для катушек зажигания с разомкнутым магнитопроводом $\eta_э = 0,35 \dots 0,45$; для катушек с замкнутым магнитопроводом $\eta_э = 0,6 \dots 0,8$;

4.16. Проводимость магнитной цепи катушки зажигания с замкнутой магнитной системой (G_3) в 2,9 раза больше, чем у катушки с разомкнутой системой (G_p).

Исходя из условия одинаковой запасаемой энергии в первичной цепи у катушек зажигания с замкнутой и разомкнутой магнитными системами, определить, во сколько раз число витков первичной обмотки катушки зажигания с замкнутой магнитной системой отличается от числа витков катушки зажигания с разомкнутой магнитной системой (w_{1P}/w_{13})?

Указание. Воспользоваться электротехническим уравнением индуктивности $L = w^2 G$.

4.17. Определить минимальную величину времени накопления энергии в магнитном поле катушки зажигания для системы зажигания 4-тактного 4-цилиндрового двигателя, если при максимальной частоте вращения коленчатого вала $n_{двmax} = 6000 \text{ мин}^{-1}$ длительность искрового разряда между электродами свечи составляет $t_{ир} = 1 \text{ мс}$.

4.18. Используя электрическую схему замещения системы зажигания на стадии индуктивного разряда без учета реакции первичной цепи (рис. 4.2), получить выражение для расчета длительности индуктивной составляющей разряда $t_{ир}$ (рис. 4.3).

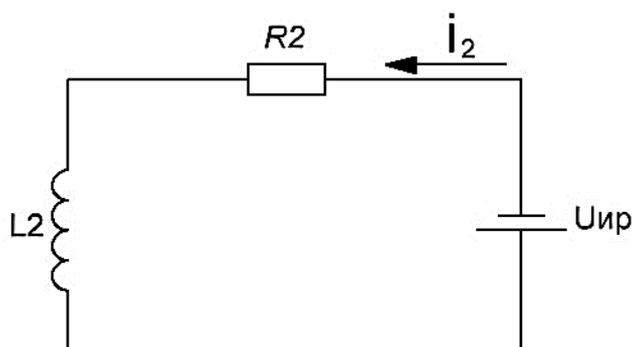


Рис. 4.2. Электрическая схема замещения системы зажигания для индуктивной фазы разряда: $U_{ир}$ – напряжение индуктивной фазы искрового разряда

Указание. Дифференциальное уравнение для электрической цепи (рис. 4.2), составленное по второму закону Киргофа

$$i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = -U_{ир}. \quad (4.3)$$

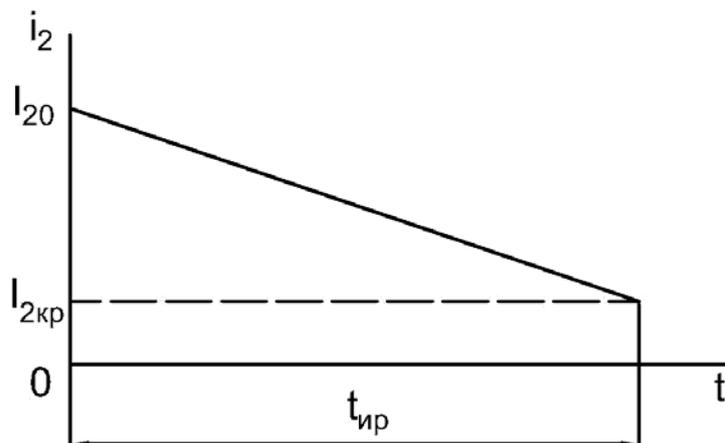


Рис. 4.3. Расчетная кривая разрядного тока:

I_{20} – максимальное (амплитудное) значение тока индуктивной фазы разряда;
 $I_{2кр}$ – критическое значение вторичного тока в момент прекращения разряда

Ток в переходном режиме принято рассматривать состоящим из суммы двух слагаемых

$$i_2 = i_{2ПР} + i_{2СВ},$$

где $i_{2ПР}$ – принужденный ток, который устанавливается в цепи после окончания переходного процесса; $i_{2СВ}$ – свободный ток.

Решением уравнения (4.3) без правой части для свободного тока

$$L_2 \frac{di_{2СВ}}{dt} + i_{2СВ} R_2 = 0$$

будет выражение

$$i_{2СВ} = A p^{e t}.$$

Из характеристического уравнения $L_2 p + R_2 = 0$ определяют показатель степени p :

$$p = -\frac{R_2}{L_2}.$$

Полный ток цепи

$$i_2 = i_{2ПР} + A p^{\frac{R_2 t}{L_2}}, \quad (4.4)$$

где $i_{2ПР} = -\frac{U_{ИР}}{R_2}$.

Постоянную интегрирования A определяют на основании первого закона коммутации из начального условия (при $t = 0$; $i_2 = I_{20}$).

Подставляя в (4.4) начальное условие

$$I_{20} = -\frac{U_{\text{ИР}}}{R_2} + A,$$

находят значение A

$$A = I_{20} + \frac{U_{\text{ИР}}}{R_2}.$$

В окончательном виде для дифференциального уравнения (4.3), описывающего процесс изменения силы тока индуктивной фазы разряда, имеем следующее решение

$$i_2 = -\frac{U_{\text{ИР}}}{R_2} + \left(I_{20} + \frac{U_{\text{ИР}}}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2 t}{L_2}}. \quad (4.5)$$

Воспользовавшись уравнением (4.5), можно определить время индуктивной составляющей искрового разряда.

4.19. Используя электрическую схему замещения конденсаторной системы зажигания с непрерывным накоплением энергии (рис. 4.4), описать переходный процесс заряда накопительного конденсатора $u_{c1}(t)$, $i_{c1}(t)$.

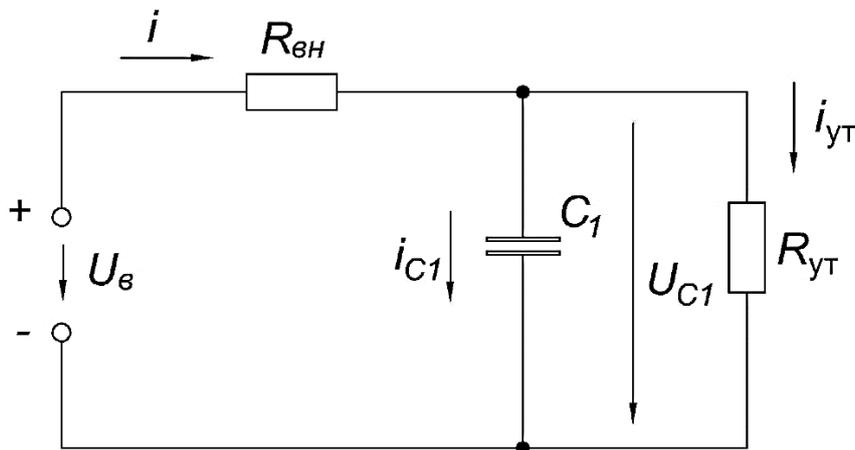


Рис. 4.4. Электрическая схема замещения конденсаторной системы зажигания с непрерывным накоплением энергии для режима заряда накопительного конденсатора: $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление преобразователя; $R_{\text{ут}}$ – результирующее сопротивление утечки зарядной цепи (в основном тиристора); $U_{\text{в}}$ – напряжение на выходе выпрямителя; i – общий ток электрической цепи; i_{c1} – ток заряда конденсатора C_1 ; u_{c1} – напряжение на конденсаторе C_1 ; $i_{\text{ут}}$ – ток утечки

Указание. Уравнения электрической цепи (рис. 4.4) имеют следующий вид

$$i = i_{c1} + i_{yT}; \quad (4.6)$$

$$U_B = iR_{BH} + u_{c1}; \quad (4.7)$$

$$i_{c1} = C_1 \frac{du_{c1}}{dt}; \quad i_{yT} = \frac{u_{c1}}{R_{yT}}. \quad (4.8)$$

Подставляя (4.8) в (4.6), получим выражение для тока цепи

$$i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + \frac{u_{c1}}{R_{yT}}. \quad (4.9)$$

С учетом (4.9) уравнение электрического состояния цепи (4.7) примет вид

$$U_B = C_1 R_{BH} \frac{du_{c1}}{dt} + u_{c1} \left(\frac{R_{yT} + R_{BH}}{R_{yT}} \right). \quad (4.10)$$

Решением данного дифференциального уравнения будет искомое выражение $u_{c1}(t)$.

Используя уравнения электрической цепи (4.6), (4.8) и полученное выражение $u_{c1}(t)$, находят зависимость для тока заряда накопительного конденсатора $i_{c1}(t)$.

4.20. Необходимым условием нормальной работы конденсаторной системы зажигания (рис. 4.5) является полный заряд конденсатора C_1 до напряжения U_B за время $t = 3\tau$ (рис. 4.6) между двумя искрами при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя $n_{двmax}$. Учитывая, что конденсатор в схеме рис. 4.5 начинает заряжаться лишь после замыкания контактов прерывателя, и считая скважность работы прерывателя, равной 2 ($T/t_p = 2$), определить условие нормальной работы системы зажигания (постоянную времени цепи заряда конденсатора τ , результирующее сопротивление утечки зарядной цепи R_{yT} и внутреннее сопротивление преобразователя R_{BH}).

Для четырехтактного четырехцилиндрового ($i_{ц} = 4$) двигателя, имеющего максимальную частоту вращения коленчатого вала $n_{двmax} = 6000 \text{ мин}^{-1}$, применяется система зажигания, в которой в качестве коммутирующего элемента используют тиристор с током утечки $I_{yT} =$

= 10 мА при напряжении $U = 400$ В и накопительный конденсатор емкостью $C_1 = 1$ мкФ.

Указание. Воспользоваться выражением для постоянной времени электрической цепи заряда накопительного конденсатора τ , полученным при решении задачи 4.19.

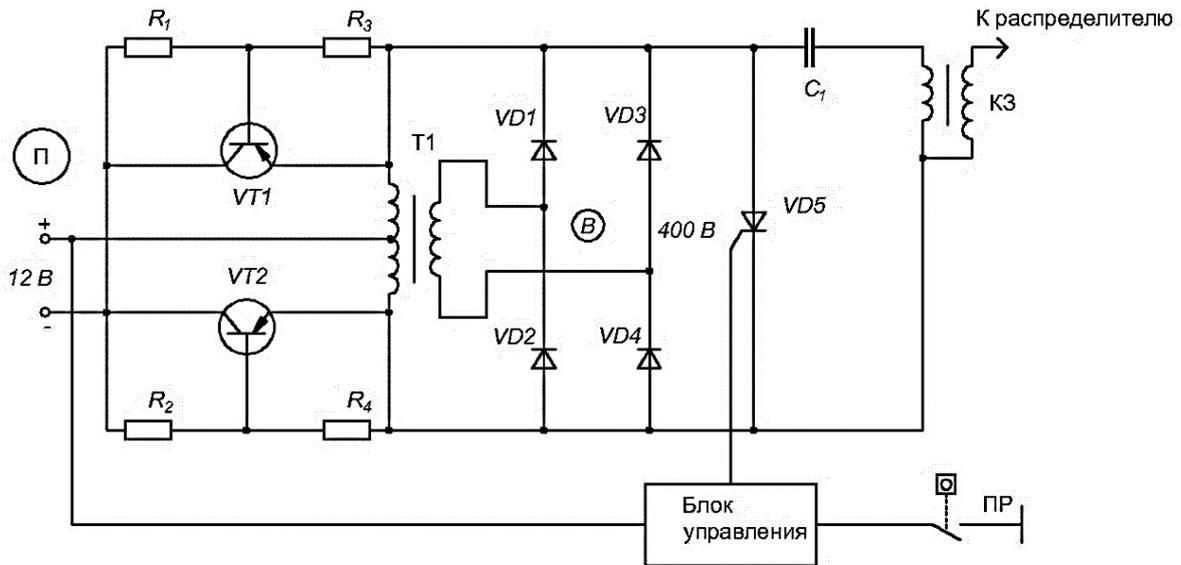


Рис. 4.5. Принципиальная электрическая схема конденсаторной системы зажигания с непрерывным накоплением энергии:
 П – преобразователь постоянного напряжения бортовой сети автомобиля в переменное 300...400 В с частотой около 500 Гц;
 В – выпрямитель переменного напряжения; VD5 – тиристор;
 C1 – накопительный конденсатор; КЗ – катушка зажигания; Пр – прерыватель

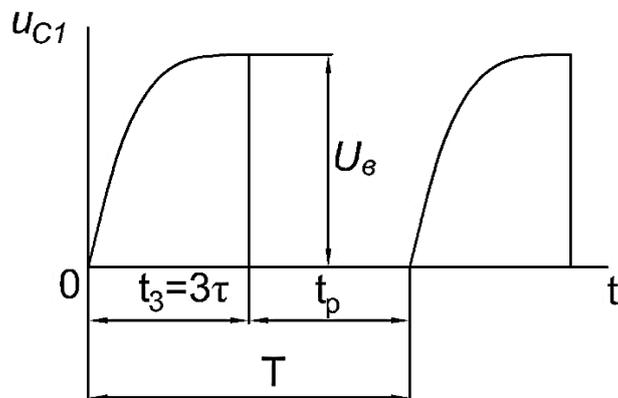


Рис. 4.6. Изменение напряжения накопительного конденсатора при прерывистом заряде многочисленными импульсами: τ – постоянная времени электрической цепи заряда накопительного конденсатора; t_3 , t_p – время заряда и разряда конденсатора C1 соответственно;

$$T = (120/i_{\text{ц}} \cdot n_{\text{де}}) \text{ – полный период работы системы зажигания}$$

4.21. Определить допустимый ток утечки в первичной цепи конденсаторной системы зажигания с импульсным накоплением энергии (рис. 4.7), при котором система остается работоспособной на пусковых режимах 4-цилиндрового двигателя ($i_{ц} = 4$), для следующего случая: минимальная пусковая частота вращения коленчатого вала двигателя $n_{дв} = 150 \text{ мин}^{-1}$; емкость накопительного конденсатора $C_1 = 1 \text{ мкФ}$; первоначальное напряжение на накопительном конденсаторе $U_1 = 350 \text{ В}$, а допустимое его уменьшение $\gamma = 100 \cdot \Delta U / U_1 = 15\%$.

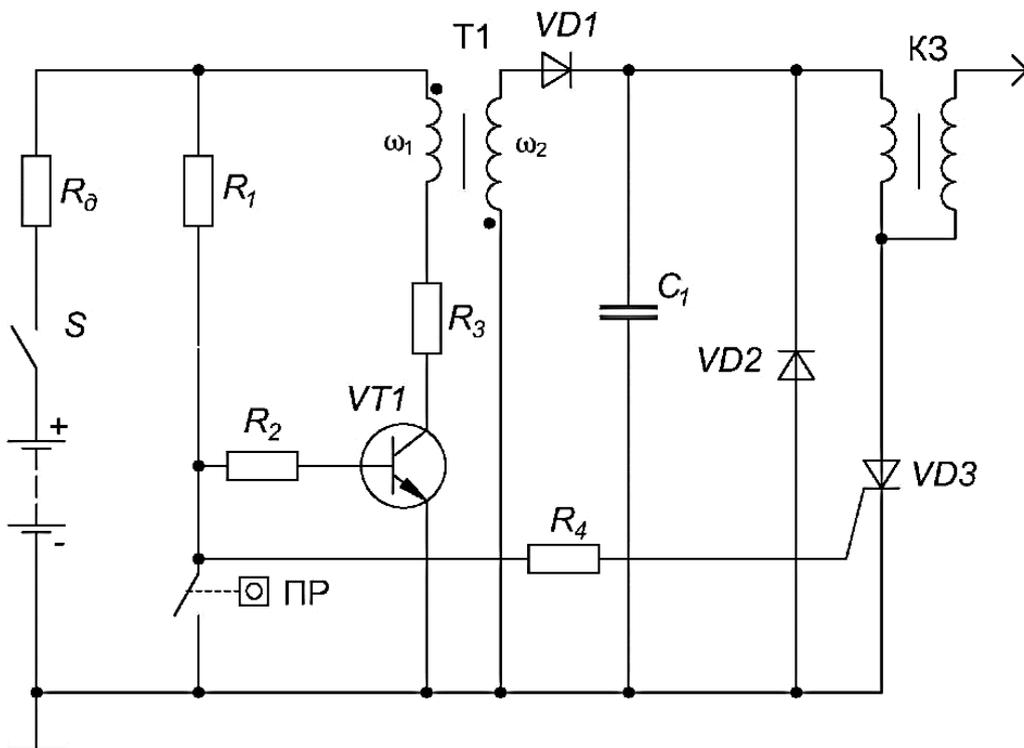


Рис. 4.7. Принципиальная электрическая схема конденсаторной системы зажигания с импульсным накоплением энергии: ПР – прерыватель; Т1 – повышающий трансформатор; VD3 – тиристор; К3 – катушка зажигания

Указание. В течение времени τ_1 (рис. 4.8) накопительный конденсатор C_1 разряжается через обратные сопротивления диода VD1, тиристора VD3 и свое собственное сопротивление изоляции, и напряжение на нем к моменту искрообразования уменьшается на $\Delta U = U_1 - U_2$. На пусковых режимах работы 4-тактного двигателя

$$\tau_1 \approx T = \frac{120}{i_{ц} \cdot n_{дв}}.$$

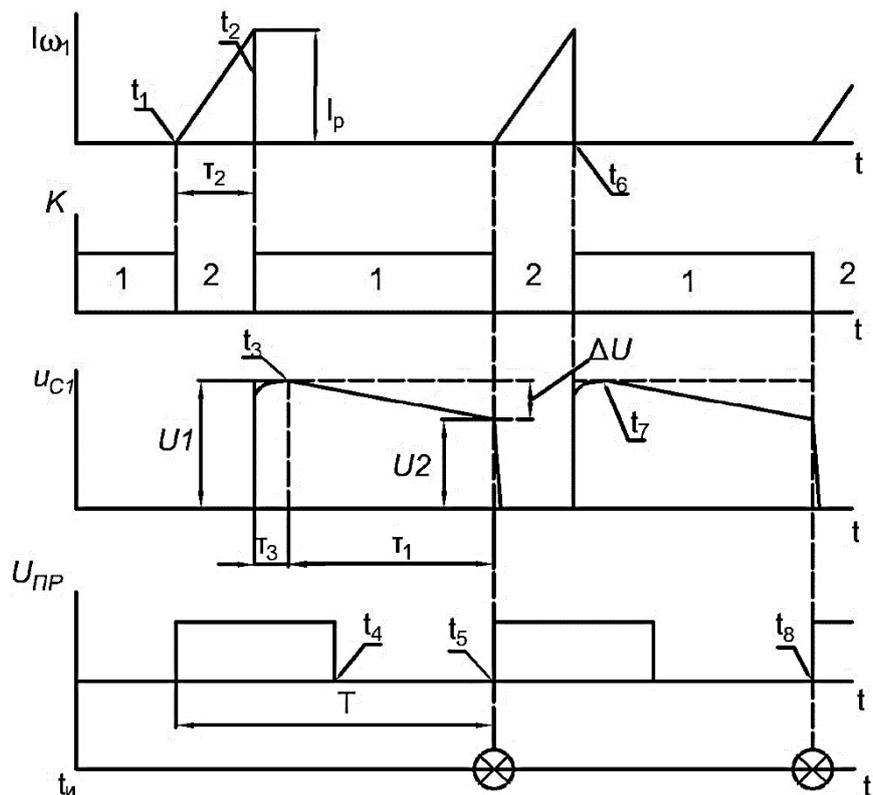


Рис. 4.8. Временные диаграммы работы конденсаторной системы зажигания с импульсным накоплением энергии: $I_{\omega 1}$ – ток через первичную обмотку трансформатора; K – положение ключа $VD3$; U_{C1} – напряжение на накопительном конденсаторе $C1$; $U_{пр}$ – напряжение на контактах прерывателя; t_u – момент искрообразования

Количество электричества, первоначально запасенное в накопительном конденсаторе $C1$, составляет

$$Q_1 = C_1 U_1.$$

Количество электричества, потерянное накопительным конденсатором за время $\tau_1 \approx T$

$$\Delta Q = I_{ут} \cdot T,$$

где $I_{ут}$ – суммарный ток утечки в первичной цепи системы зажигания.

Количество электричества, оставшееся в накопительном конденсаторе к моменту искрообразования,

$$Q_2 = Q_1 - \Delta Q = C_1 U_1 - I_{ут} T$$

и напряжение на накопительном конденсаторе, соответствующее этому количеству электричества,

$$U_2 = Q_2/C_1 = U_1 - (I_{\text{ут}} \cdot T)/C_1.$$

Уменьшение напряжения на накопительном конденсаторе к моменту искрообразования

$$\Delta U = U_1 - U_2 = (I_{\text{ут}} \cdot T)/C_1.$$

Задавшись допустимым значением уменьшения напряжения $\gamma = 100 \cdot \Delta U/U_1$ на накопительном конденсаторе, можно получить окончательное выражение для определения допустимого суммарного тока утечки $I_{\text{ут}}$.

4.22. Необходимым условием нормальной работы конденсаторной системы зажигания с импульсным накоплением энергии является полный заряд накопительного конденсатора к моменту искрообразования при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя. Ввиду того что нарастание тока в обмотке ω_1 трансформатора Т1 начинается одновременно с размыканием контактов прерывателя (рис. 4.8), записать условие нормальной работы системы с импульсным накоплением для 4-тактного двигателя.

Указание. Время заряда накопительного конденсатора складывается из двух фаз – времени τ_2 нарастания тока в первичной обмотке ω_1 трансформатора Т1 и времени τ_3 непосредственного заряда конденсатора после разрыва тока I_{ω_1} .

4.23. Определить геометрические размеры и обмоточные данные классической (маслонаполненной) катушки зажигания.

Исходные данные проектируемой катушки зажигания:

$R_1 = 0,75$ Ом – сопротивление первичной обмотки;

$L_1 = 4,5$ мГн – индуктивность первичной обмотки;

$k_{\text{тр}} = w_2/w_1 = 80$ – коэффициент трансформации.

В качестве аналога принять катушку зажигания 27.3705 с параметрами:

$R_{01} = 0,45$ Ом – сопротивление первичной обмотки;

$L_{01} = 3,8$ мГн – индуктивность первичной обмотки;

$w_{01} = 198$ – число витков первичной обмотки;

$d_{01} = 1,12$ мм – диаметр провода первичной обмотки;

$w_{02} = 16200$ – число витков вторичной обмотки;

$d_{02} = 0,07$ мм – диаметр провода вторичной обмотки.

Указание. Принимая за основу магнитную систему аналога ($G_1 = G_{01}$), определяют число витков первичной обмотки проектируемой катушки

$$L_1 = w_1^2 G_1,$$

$$L_{01} = w_{01}^2 G_{01},$$

где G_1, G_{01} – условные магнитные проводимости потока, созданного первичной обмоткой проектируемой катушки и аналогом соответственно.

Для определения диаметра провода первичной обмотки проектируемой катушки вычисляют:

– площадь сечения провода первичной обмотки катушки зажигания 27.3705

$$q_{01} = \frac{\pi d_{01}^2}{4};$$

– среднюю длину первичной обмотки катушки зажигания 27.3705

$$I_{cp01} = \frac{R_{01} \cdot q_{01}}{\rho \cdot w_{01}},$$

где $\rho = 17,5 \cdot 10^{-9}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление меди;

– площадь сечения провода первичной обмотки проектируемой катушки зажигания

$$q_1 = \frac{\rho \cdot I_{cp01} \cdot w_{01}}{R_1};$$

– диаметр провода первичной обмотки проектируемой катушки зажигания

$$d_1 = \sqrt{\frac{4q_1}{\pi}}.$$

Диаметр d_1 округляется до ближайшей стандартной величины и уточняется площадь сечения провода q_1 .

Проверка возможности укладки первичной обмотки проектируемой катушки в габаритах катушки зажигания 27.3705 по площади, занимаемой первичной обмоткой:

$$S_{01} = w_{01} \cdot q_{01},$$

$$S_1 = w_1 \cdot q_1.$$

Если $S_1 \leq S_{01}$, первичная обмотка проектируемой катушки укладывается в объем катушки зажигания – аналога.

Число витков вторичной обмотки проектируемой катушки зажигания

$$w_2 = w_1 \cdot k_{\text{тр}}.$$

Диаметр провода вторичной обмотки выбирают, исходя из его механической прочности, обусловленной технологическим процессом намотки, размерами и стоимостью катушки. Диаметр провода вторичной обмотки d_2 принимается равным 0,05...0,07 мм. Если $S_1 \leq S_{01}$, диаметр провода можно оставить прежним $d_2 = 0,07$ мм.

Площади, занимаемые вторичными обмотками,

$$S_{02} = w_{02} \cdot q_{02},$$

$$S_2 = w_2 \cdot q_2.$$

Проверка возможности размещения проектируемой катушки зажигания в габаритах катушки-аналога. Если $S_1 + S_2 \leq S_{01} + S_{02}$, обмотки проектируемой катушки укладываются в объем выбранного аналога.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ

1. Аккумуляторные батареи

- 1.1. $q_{Pb} = 3,866 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{PbO_2} = 4,463 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{H_2SO_4} = 3,66 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.2. $q_{PbSO_4} = 5,66 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{H_2O} = 0,672 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.3. $q_{NiOOH} = 3,422 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{Cd} = 2,097 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.4. $q_{Ni(OH)_2} = 1,729 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{Cd(OH)_2} = 2,731 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.5. $q_{NiOOH} = 3,422 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{Fe} = 1,042 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.6. $q_{Ni(OH)_2} = 1,729 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $q_{Fe(OH)_2} = 1,676 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$.
- 1.7. $\theta_{PbO_2} = 54,4\%$.
- 1.8. $q_c = 11,989 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$; $C_d = 83,41 \text{ А} \cdot \text{ч/кг}$.
- 1.9. $q_w = 5,877 \text{ г/Вт} \cdot \text{ч}$; $W_d = 170 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$.
- 1.10. $V_3/C_p = 11,75 \text{ см}^3/\text{А} \cdot \text{ч}$.
- 1.11. $\Delta C_p = 25\%$.
- 1.12. Фактический расход воды составляет 3,6 г/А·ч, следовательно, батарея по виду исполнения относится к открытым (вентилируемым) батареям с малым расходом воды – не более 4 г/А·ч (L).
- 1.13. Батарея пригодна к дальнейшей эксплуатации, так как ее фактическая емкость составляет 50% от номинального значения.
- 1.14. $R_6 = 0,0125 \text{ Ом}$.
- 1.15. $R_H = R_6$.
- 1.16. $x = 1\%$.
- 1.17. $k \cdot m = 4$ батареи; $R = 2,9 \text{ Ом}$.
- 1.18. $(k \cdot m_1) = 14$ батарей 6СТ-75N; $R_1 = R_2 = 4,8 \text{ Ом}$; $(k \cdot m)_2 = 7$ батарей 6СТ-90N; $R_3 = 4 \text{ Ом}$.
- 1.19. $I_{SAE} = 1,07 I_{EN}$ или $I_{EN} = 0,93 I_{SAE}$.
- 1.20. $I_{EN.факт} = 379 \text{ А}$.
- 1.21. $C_{рез} = 0,0013 \cdot C_{20} (1366 + C_{20})$.

$$1.22. C_{\text{рез}} = 1,0982 \cdot C_{20}^{1,1258}.$$

$$1.23. U_{\text{бм}} = U_{\text{нр}}/2; I_{\text{бм}} = I_{\text{бк}}/2.$$

2. Системы электроснабжения

$$2.1. I_{\text{r}} = \frac{U_{\text{r}}R_{\text{б}} + (U_{\text{r}} - E_{\text{б}})R_{\text{н}}}{R_{\text{б}}(R + R_{\text{н}}) + RR_{\text{н}}}; I_{\text{б}} = \frac{(U_{\text{r}} - E_{\text{б}})R_{\text{н}} - E_{\text{б}}R}{R_{\text{б}}(R + R_{\text{н}}) + RR_{\text{н}}};$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{r}}R_{\text{б}} + E_{\text{б}}R}{R_{\text{б}}(R + R_{\text{н}}) + RR_{\text{н}}}.$$

$$2.2. R_{\text{н}} = E_{\text{б}}R/(U_{\text{r}} - E_{\text{б}}).$$

$$2.3. I_{\text{бзmax}} = (U_{\text{r}} - E_{\text{б}})/(R_{\text{б}} + R).$$

$$2.4. \text{Для точки 1 на рис. 2.2 } I_{\text{r}} = I_{\text{б}} = 6 \text{ A, } I_{\text{н}} = 0, U = 13 \text{ В.}$$

$$2.5. f = 300 \text{ Гц, } f_{\text{п}} = 1800 \text{ Гц.}$$

$$2.6. n'_0 = 1400 \text{ мин}^{-1}.$$

$$2.7. \Delta U_{\text{д}} = 1,95 \text{ В, } U_{\text{дmax}} = 14,7 \text{ В, } U_{\text{дmin}} = 12,7 \text{ В.}$$

$$2.8. \text{VD1, VD4.}$$

$$2.9. I_{\text{rmax}} = 120 \text{ A.}$$

$$2.10. U_{\text{бз}} = 16 \text{ В, } U_{\text{RH}} = 15 \text{ В.}$$

$$2.11. \tau = 913 \text{ (по методу средних арифметических), } \tau = 905 \text{ (по методу наименьших квадратов).}$$

$$2.12. \tau = 580.$$

$$2.13. q_{\text{r}} = 23,5 \text{ г/А}\cdot\text{ч.}$$

$$2.14. B = B_1B_2 + B_1 + B_2.$$

$$2.15. \text{а) 11 группа; б) 11 группа (первая ступень), 5 группа (вторая ступень); в) 11 группа; г) 1 группа.}$$

$$2.16. U_{\text{од}} = 1,4 \text{ В, } R_{\text{од}} = 20 \text{ Ом (для диода); } U_{\text{ост}} = 8 \text{ В, } R_{\text{ост}} = 25 \text{ Ом (для стабилитрона); } U_{\text{оэ}} = 0,75 \text{ В, } R_{\text{э}} = 0,04 \text{ Ом, } R'_{\text{э}} = 0,64 \text{ Ом (для транзистора).}$$

$$2.17. U_{\text{ср}} = U_{\text{ост}} + \frac{U_{\text{оэ}}}{R_1}(R_2 + R_{\text{ст}} + R_1);$$

$$U_{\text{в}} = \frac{(U_{\text{ост}} + U_{\text{оэ}} \cdot A - U_{\text{кэнас}}) \cdot BR_3}{BR_3 - (B + 1) \cdot R_3 \cdot A - (R_2 + R_{\text{ст}})} + U_{\text{кэнас}},$$

$$\text{где } A = 1 + \frac{R_2 + R_{\text{ст}}}{R_1}.$$

$$2.18. P_{R_6} = \frac{1}{TR_6} \left[\frac{\tau}{3} (U_1^2 + U_1 U_2 + U_2^2) + U_3^2 (T - \tau) \right] = 0,8 \text{ Вт.}$$

$$2.19. W_{R_6} = \frac{\tau}{6R_6} [U_1^2 + U_2(U_1 + 2U_2 + U_3) + U_3^2] = 0,84 \text{ Вт} \cdot \text{с.}$$

3. Системы электростартерного пуска

$$3.1. \text{ПВ} = 0,5\%.$$

$$3.2. P_{\text{ЭМmax}} = 1375 \text{ Вт.}$$

$$3.3. R_{\text{СТ}} = 0,02 \text{ Ом.}$$

$$3.4. n'_c = 750 \text{ мин}^{-1}.$$

$$3.5. u_{\text{цфакт}} = 2,5 \text{ В/1000 А} > 2 \text{ В/1000 А (не соответствует ТУ).}$$

$$3.6. I_T = U_H / (R_6 + R_{\text{ц}} + R_{\text{СТ}}).$$

$$3.7. III_T = 0,5; E_c / U_{\text{HP}} = 0,5.$$

$$3.8. I_{\text{ат}} = \frac{U_{\text{HP}} \cdot K_s - \Delta U_{\text{щ}}}{K_s (R_6 + R_{\text{ц}}) + R_a + R_c}; I_T = \frac{U_{\text{HP}} (1 + K_{\text{ас}} - \Delta U_{\text{щ}})}{(R_6 + R_{\text{ц}}) (1 + K_{\text{ас}}) + R_a + R_c}.$$

$$3.9. t_{3\%} = 1546 \cdot 10^{12} \cdot \frac{R_6 + R_{\text{ц}} + R_{\text{с+20}}}{j^2 \cdot R_{\text{с+20}}}.$$

Для стартера 29.3708:

$$t_{3\%} = 3,7 \text{ с}; \Delta P_{\text{ЭМm\%}} = -11\%; t = 55^\circ\text{C за } t = 15 \text{ с.}$$

$$3.10. \nu = 3200 \text{ сСт.}$$

$$3.11. I_{\text{хп}} = 340 \text{ А (EN).}$$

$$3.12. i_{\text{дс}} = 38,1.$$

$$3.13. \Delta U_{\text{щ}} = 0; R_c = 0,014 \text{ Ом}; a_n = 33781; b_n = 39,12; a_M = 859;$$

$$b_M = 15,93.$$

$$3.14. a_n = 3,58 \cdot 10^{-3}; b_n = 0,0029 \cdot 10^{-3}.$$

4. Системы зажигания

$$4.1. f = 80.$$

$$4.2. \alpha_{\text{пкв}} = 180^\circ.$$

$$4.3. f = 120.$$

$$4.4. 2 \text{ раза.}$$

$$4.5. \alpha_{\text{прв}} = 90^\circ.$$

$$4.6. \text{ а) } I_{1д} = \frac{U_{п} - \Delta U_{к}}{R_1} \sqrt{\frac{t_H}{T} \left[1 - \frac{1}{2a} (e^{-a} - 1)(e^{-a} - 3) \right]};$$

$$\text{б) } I_{1д} = \frac{U_{п} - \Delta U_{к}}{R_1} \sqrt{\frac{1}{T} \left[t_0 - \frac{\tau_1}{2} \left(e^{-\frac{t_0}{\tau_1}} - 1 \right) \left(e^{-\frac{t_0}{\tau_1}} - 3 \right) \right]} + I_{po} \sqrt{\frac{t_H - t_0}{T}};$$

$$\text{в) } I_{1д} = I_{po} \sqrt{\frac{t_H}{3T}}.$$

$$4.7. I_p = 4,13 \text{ А}; W_M = 76,8 \text{ мДж.}$$

$$4.8. t_H = 3,95 \text{ мс}; I_p = I_{po} = 7,5 \text{ А.}$$

$$4.9. W_M = \frac{1}{2} L_1 \left(\frac{U_{п} - \Delta U_{к}}{R_1} \right)^2 \left(1 - 2e^{-\frac{R_1 t_H}{L_1}} + e^{-\frac{2R_1 t_H}{L_1}} \right).$$

Условие $W_M = W_{M \max}$ выполняется при показателе

$a = \frac{R_1}{L_1} t_H = 1,256$, которое определяется из выражения

$1 - e^{-a}(1 + 2a) = 0$ численным методом.

$$4.10. a = -\ln \frac{U_{пр} - U_{пп}}{U_{пр} - \Delta U_{к}} = 0,511.$$

$$4.11. a = -\ln \left[1 - \frac{U_{2m}(n_{дв\max})}{U_{2m}(n_{дв\min})} \right] = 0,916.$$

$$4.12. a = 1,23.$$

$$4.13. \frac{W_M}{W_{M \max}} \cdot 100\% = 51,1\%.$$

$$4.14. W_M = 125 \text{ мДж.}$$

$$4.15. \eta_э = 0,74 \text{ (катушка зажигания с замкнутым магнитопроводом).}$$

$$4.16. w_{1P} / w_{13} = 1,7.$$

$$4.17. t_{H \min} = 4 \text{ мс.}$$

$$4.18. t_{ир} = \frac{L_2}{R_2} \ln \left(\frac{I_{20} + U_{ир} / R_2}{I_{2кр} + U_{ир} / R_2} \right).$$

$$4.19. u_{c1} = U_B \frac{R_{yT}}{R_{yT} + R_{BH}} (1 - e^{-t/\tau});$$

$$i_{c1} = \frac{U_B}{R_{yT} + R_{BH}} \left(1 + \frac{R_{yT}}{R_{BH}} e^{-t/\tau} \right),$$

где $\tau = \frac{R_{yT} \cdot R_{BH}}{R_{yT} + R_{BH}} C_1$ – постоянная времени электрической

цепи заряда накопительного конденсатора.

4.20. Необходимые условия нормальной работы системы зажигания: $\tau \leq 20/(i_{ц} \cdot n_{двmax}) \leq 0,83$ мс; $R_{yT} \gg R_{BH}$ ($R_{yT} = 40$ кОм, $R_{BH} = 848$ Ом).

$$4.21. I_{yT} \leq \frac{i_{ц} n_{дв} U_1 C_1 \gamma}{12000} \leq 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ А} \approx 0,26 \text{ мА.}$$

$$4.22. \tau_2 + \tau_3 \leq \frac{120}{i_{ц} n_{двmax}}.$$

4.23. $w_1 = 216$; $d_1 = 0,93$ мм; $S_1 = 147$ мм²; $w_2 = 17280$; $d_2 = 0,07$ мм; $S_2 = 66$ мм².

ПРИЛОЖЕНИЕ

Атомные массы некоторых химических элементов

Элемент	Химический символ	Атомная масса
Алюминий	Al	26,98
Водород	H	1,008
Железо	Fe	55,85
Кадмий	Cd	112,40
Кислород	O	16,00
Кобальт	Co	58,93
Лантан	La	138,9
Литий	Li	6,94
Натрий	Na	22,99
Никель	Ni	58,69
Свинец	Pb	207,20
Сера	S	32,06
Хлор	Cl	35,45
Цинк	Zn	65,37

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей: учебник / В.Е. Ютт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 440 с.
2. Теория конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: учебник / М.Н. Фесенко [и др.]; под общ. ред. М.Н. Фесенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 384 с.
3. Курзуков, Н.И. Стартерные аккумуляторные батареи. Основы устройства, эксплуатации и обслуживания / Н.И. Курзуков, В.М. Ягнятинский. – М.: ООО «Никкель», 2011. – 224 с.
4. Дасоян, М.А. Основы расчета, конструирования и технологии производства свинцовых аккумуляторов / М.А. Дасоян, И.А. Агуф. – Л.: Энергия, 1978. – 152 с.
5. Акимов, А.В. Генераторы зарубежных автомобилей / А.В. Акимов, С.В. Акимов, Л.П. Лейкин; под общ. ред. С.В. Акимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2003. – 128 с.
6. Фещенко, А.И. Методические указания к курсовому проекту «Расчет баланса электроэнергии на автомобиле» / А.И. Фещенко, С.А. Феофанов, Л.С. Феофанова. – М.: МАДИ, 2016. – 48 с.
7. Климова, Н.С. Расчет характеристик тракторного генератора Г306 по критерию «заряд полной отдачи – масса» / Н.С. Климова // Автотракторное электрооборудование. – 1978. – Вып. 12. – С. 6–11.
8. Сорокин, В.И. Полупроводниковые регуляторы напряжения и особенности их работы в аномальных режимах эксплуатации / В.И. Сорокин, Е.А. Дормидонтов, В.Г. Мнёв // Конструирование, исследование, технология и экономика производства автомобиля: сб. науч. тр. / ЗИЛ. – 1987. – Вып. 15. – С. 70–76.
9. Фещенко, А.И. Методические указания к курсовому проекту «Расчет выходных характеристик системы электростартерного пуска ДВС» / А.И. Фещенко, С.А. Феофанов. – М.: МАДИ, 2008. – 37 с.

10. Балагуров, В.А. Аппараты зажигания / В.А. Балагуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
11. Набоких, В.А. Аппараты систем зажигания. Справочник: учебное пособие / В.А. Набоких. – М.: Академия, 2009. – 240 с.
12. Ютт, В.Е. Аппараты систем управления зажиганием и впрыском топлива / В.Е. Ютт, В.В. Морозов, В.И. Чепланов. – М.: МАДИ, 2013. – 112 с.
13. Ходасевич, А.Г. Справочник по устройству и ремонту электронных приборов автомобилей. Вып. 1. Электронные системы зажигания / А.Г. Ходасевич, Т.И. Ходасевич. – М.: АНТЕЛКОМ, 2001. – 208 с.
14. Фещенко, А.И. Аппроксимация электромеханических характеристик стартера с магнитоэлектрическим возбуждением / А.И. Фещенко, И.А. Кузьмин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2016. – № 1 (7). – С. 11.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ.....	4
2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	17
3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА.....	31
4. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ	48
ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ	64
ПРИЛОЖЕНИЕ	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	70

Учебное издание

ФЕЩЕНКО Александр Иванович
МАСЛЕННИКОВ Иван Константинович

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
АВТОМОБИЛЕЙ**

СБОРНИК ЗАДАЧ

Редактор Н.В. Шашина

Редакционно-издательский отдел МАДИ. E-mail: rio@madi.ru

Подписано в печать 13.06.2018 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,5. Тираж 75 экз. Заказ . Цена 150 руб.
МАДИ, Москва, 125319, Ленинградский пр-т, 64.