

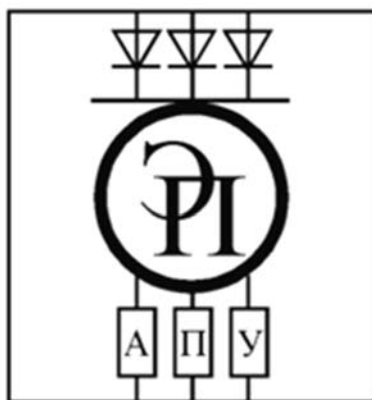
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
дневной формы обучения*

**Часть 2**



Могилев 2024

УДК 629.33:621.33  
ББК 39.33-04  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «30» августа 2024 г.,  
протокол № 5

Составитель ст. преподаватель Г. В. Бочкарев

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

Методические рекомендации предназначены для студентов направления  
подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» дневной формы  
обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Часть 2

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

10 Лабораторная работа № 10. Исследование взаимосвязи параметров генератора и его главных размеров .....	4
11 Лабораторная работа № 11. Исследование аккумуляторных батарей .....	7
12 Лабораторная работа № 12. Исследование характеристик электростартеров .....	18
13 Лабораторная работа № 13. Исследование характеристик тягового реле .....	23
14 Лабораторная работа № 14. Исследование характеристик классической контактной системы зажигания .....	27
15 Лабораторная работа № 15. Исследование характеристик контактно-транзисторной системы зажигания .....	34
16 Лабораторная работа № 16. Исследование потерь энергии в катушках зажигания .....	38
17 Лабораторная работа № 17. Исследование характеристик бесконтактной транзисторной системы зажигания .....	41
Список литературы .....	44

## Часть 2

### 10 Лабораторная работа № 10. Исследование взаимосвязи параметров генератора и его главных размеров

#### Цель работы

- 1 Исследование взаимосвязи основных параметров генератора.
- 2 Исследование соотношения основных параметров и главных размеров.

#### Состав оборудования

- 1 Автомобильный вентильный генератор с клювообразным ротором.
- 2 Измерительный инструмент.
- 3 Контрольно-измерительные приборы электрических параметров.

#### 10.1 Краткие теоретические сведения

Основные параметры и главные размеры генератора связаны между собой следующим уравнением (уравнение Арнольда):

$$D^2 \cdot l_i = \frac{P_i \cdot 6,1 \cdot 10^{12}}{k_B \cdot k_{об1} \cdot \alpha_i \cdot n \cdot B_\delta \cdot A_1},$$

где  $D$  – внутренний диаметр сердечника статора;

$l_i$  – расчетная длина статора;

$P_i$  – расчетная электромагнитная мощность;

$k_B$  – коэффициент формы кривой поля в зазоре;

$k_{об1}$  – обмоточный коэффициент для основной гармонии ЭДС;

$\alpha_i$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;

$n$  – скорость вращения ротора;

$B_\delta$  – максимальное значение магнитной индукции в зазоре;

$A_1$  – минимальная нагрузка.

Габаритные размеры и масса электрической машины определенным образом зависят от ее номинальной мощности и частоты вращения. Эта зависимость имеет общий характер для всех видов электрических машин. Электродвижущая сила обмотки статора (якоря) пропорциональна числу витков обмотки  $\omega$ , магнитному потоку  $\Phi$  и частоте вращения  $n$ :

$$E \sim \omega \cdot \Phi \cdot n.$$

Магнитный поток

$$\Phi = B \cdot S_m,$$

где  $B$  – средняя магнитная индукция в пределах площади сечения магнитопровода  $S_m$ .

Таким образом, можно записать

$$E \sim \omega \cdot B \cdot S_m \cdot n.$$

Статор (якорь) можно представить как произведение плотности тока  $\Delta$  на площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки  $q_{эф}$ :

$$I = \Delta q_{эф}.$$

Выражение расчетной мощности имеет вид

$$P_i \sim \Delta \cdot q_{эф} \cdot \omega \cdot B \cdot S_m \cdot n.$$

Произведение  $q_{эф} \cdot \omega = S_{об}$  представляет собой общую площадь поперечного сечения всех витков обмотки. Тогда

$$P_i \sim \Delta \cdot B \cdot S_m \cdot n \cdot S_{об}.$$

Площади  $S_m$  и  $S_{об}$  пропорциональны квадрату линейного размера  $l$ , поэтому

$$S_m \cdot S_{об} \sim l^2 \cdot l^2 \sim l^4.$$

Тогда

$$P_i \sim \Delta \cdot B \cdot n \cdot l^4.$$

Если принять для ряда электрических машин  $\Delta$  и  $B$  неизвестности, то

$$\frac{P_i}{n} \sim l^4$$

или

$$l \sim \sqrt[4]{\frac{P_i}{n}} \sim \sqrt[4]{M},$$

где  $M$  – электромагнитный момент машины,  $M = \frac{P_i}{n}$ .

Следовательно, в ряде машин возрастающей мощности, в которых плотность тока и магнитная индукция неизменны, линейные размеры меняются пропорционально корню четвертой степени из их электромагнитного момента.

Если к тому же этот ряд машин имеет постоянную частоту вращения, то линейные размеры машин меняются пропорционально корню четвертой степени из их расчетной мощности:

$$l \sim \sqrt[4]{P_i}.$$

Например, если машины 1 и 2 подобны, то для них справедливо равенство отношений одноименных геометрических размеров (диаметров  $D$ , длин  $l$ , ширины  $b_n$  и т. д.)

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{b_{n1}}{b_{n2}}.$$

Масса  $G$  машины пропорциональна ее объему, т. е. кубу линейных размеров. Поэтому для ряда геометрически подобных машин можно записать

$$G \sim l^3 \sim \left(\sqrt[4]{P_i}\right)^3 \sim \sqrt[4]{P_i^3}.$$

Сумма потерь в машине  $\sum P$  при заданных значениях магнитной индукции и плотности тока пропорциональна массе машины, т. е.

$$\sum P \sim l^3 \sim \sqrt[4]{P_i^3}.$$

На практике установленные закономерности не соблюдаются точно, т. к. при проектировании ряда электрических машин возрастающей мощности приходится отступать от законов геометрического подобия. Объясняется это тем, что потери в машинах растут пропорционально их объему, т. е. пропорционально кубу линейных размеров, в то время как поверхности охлаждения машин растут пропорционально квадрату этих размеров (пропорционально площади охлаждения).

## **10.2 Порядок выполнения работы**

- 1 Произвести разборку генератора с клювообразным ротором.
- 2 Выполнить эскизный чертеж пакета статора.
- 3 В соответствии с паспортными данными и измеренными значениями  $D$  и  $l_i$  произвести расчет машинной постоянной Арнольда.
- 4 Произвести расчет обмоточного коэффициента  $k_{об1}$  и полюсного перекрытия  $\alpha_i$ .
- 5 Для принятого значения коэффициента формы кривой поля в зазоре  $k_B = 1,11$  и расчетного значения линейной нагрузки  $A$  (см. лабораторную работу № 8) рассчитать магнитную индукцию в воздушном зазоре  $B_\delta$ .
- 6 Выполнить анализ изменения главных размеров при различных значениях основных параметров генератора.

### ***Содержание отчета***

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Краткие теоретические сведения.
- 3 Эскизный чертеж пакета статора.
- 4 Расчет машины постоянной Арнольда.
- 5 Расчет обмоточного коэффициента  $k_{об1}$  и полюсного перекрытия  $\alpha_i$ .
- 6 Расчет магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$ .
- 7 Анализ изменения главных размеров при различных значениях основных параметров генератора.
- 8 Вывод.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какова взаимосвязь основных параметров генератора и его главных размеров согласно уравнению Арнольда?
- 2 Каким параметрам генератора пропорциональна его расчетная мощность?
- 3 В каком пропорциональном отношении находятся расчетная мощность  $P_i$ , скорость вращения ротора  $n$  и расчетная длина статора  $l_i$ ?
- 4 В каком пропорциональном отношении находятся масса  $G$  и расчетная мощность  $P_i$  генераторов?
- 5 Влияние величины магнитной индукции в воздушном зазоре на главные размеры генератора.

## **11 Лабораторная работа № 11. Исследование аккумуляторных батарей**

### ***Цель работы***

- 1 Исследование временных характеристик разряда аккумуляторной батареи (АКБ).
- 2 Исследование временных характеристик заряда АКБ.

### ***Состав оборудования***

- 1 АКБ.
- 2 Комплексный энергосиловой стенд.

### ***11.1 Краткие теоретические сведения***

Электродвижущая сила свинцового аккумулятора

$$E = 2,047 + \frac{R \cdot T}{F} \ln \left[ \frac{\alpha(\text{H}_2\text{SO}_4)}{\alpha(\text{H}_2\text{O})} \right],$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$F$  – число Фарадея;

$\alpha(\text{H}_2\text{SO}_4)$ ,  $\alpha(\text{H}_2\text{O})$  – активности серной кислоты и воды соответственно.

Значение  $\frac{RT}{F}(+25\text{ }^\circ\text{C})$  равно 0,02565 В.

Активность электролита зависит от его концентрации, т. е. от плотности  $\gamma$ .

При плотности электролита  $\gamma = 1,3\text{ г/см}^2$  и  $E = +25\text{ }^\circ\text{C}$  имеем  $E = 2,154\text{ В}$ .

Для практических целей ЭДС может быть определена по эмпирической формуле

$$E = 0,84 + \gamma_{25},$$

где  $\gamma_{25}$  – плотность электролита, измеренная при температуре плюс 25  $^\circ\text{C}$ .

Если измерения проводились при температуре, отличной от плюс 25  $^\circ\text{C}$ , то необходимо привести плотность  $\gamma_t$  к температуре плюс 25  $^\circ\text{C}$ .

$$\gamma_{25} = \gamma_t + 0,00075(T - 25).$$

Практически ЭДС не зависит от температуры, т. к. при ее изменении на 100  $^\circ\text{C}$  ЭДС изменится только на 0,04 В.

На практике более важным параметром является напряжение аккумулятора, которое при разряде всегда ниже, а при заряде всегда выше ЭДС. Это отношение обусловлено падением напряжения на внутреннем активном сопротивлении аккумулятора  $R_o$ , а также электродной поляризацией.

Поляризация – изменение потенциала электрода под действием прохождения тока от исходного равновесного  $\gamma$  (без тока) до нового  $\gamma'$ . Мерой поляризации служит модуль разности потенциалов электрода под током и равновесного:

$$\eta = (\gamma' - \gamma).$$

При разряде аккумулятора потенциалы электродов за счет поляризации сближаются, при заряде раздвигаются, т. е. напряжение соответственно уменьшается или увеличивается.

$$U_p = E - \eta_{(+)} - \eta_{(-)} - R_o I_p;$$

$$U_z = E + \eta_{(+)} - \eta_{(-)} + R_o I_z,$$

где  $I_p$ ,  $I_z$  – токи разряда и заряда соответственно.

Так как процесс поляризации при прохождении тока через батарею приводит к дополнительным потерям энергии, его удобно представлять как потери на некотором дополнительном активном сопротивлении поляризации  $R_n$ . Тогда



$$U_p = E - I_p(R_o + (\eta_{(+)} - \eta_{(-)}) / I_p) = E - I_p(R_o + R_{n.p});$$

$$U_z = E + I_z(R_o + (\eta_{(+)} - \eta_{(-)}) / I_z) = E + I_z(R_o + R_{n.z}),$$

где  $R_{n.p}$ ,  $R_{n.z}$  – сопротивление поляризации при разряде и заряде соответственно.

Поляризация является переходным процессом. Его длительность после включения батареи на разряд зависит от силы тока и температуры электролита.

Аккумулятор удобно представлять приближенной эквивалентной электрической схемой замещения, которая отражает основные процессы, происходящие в нем, как в элементе электрической цепи, показанной на рисунке 11.1.

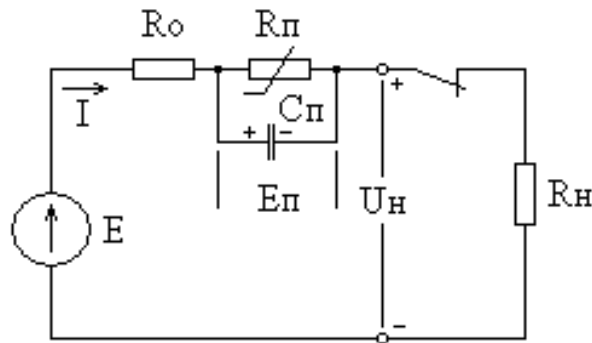


Рисунок 11.1 – Эквивалентная электрическая схема замещения АКБ

На схеме  $E$  – источник равновесной ЭДС, а сопротивление  $R_n$  зависит от тока (нелинейный элемент). Учет инерционности (реактивности) процесса поляризации выполнен в виде  $C_n$ , параллельно включенного  $R_n$ . С помощью  $C_n$  моделируются переходные процессы при включении и отключении нагрузок  $R_n$ . В установившемся режиме

$$U_n = E - E_n - I_n R_o,$$

где  $E_n$  – ЭДС поляризации,  $E_n = I_n R_n$ ;

$R_o$  – сопротивление батареи,  $R_o = R_{эл} + R_c + R_m + R_s$ ;

$R_{эл}$  – сопротивление электролита;

$R_c$  – сопротивление сепараторов;

$R_m$  – сопротивление активной массы;

$R_s$  – сопротивление решеток и соединительных элементов.

Одним из важнейших параметров, характеризующих батарею, является ее емкость. Разрядной емкостью  $C_p$  называется максимальное количество электричества  $Q_{p.max}$ , которое аккумулятор может сообщить во внешнюю цепь при полном разряде, от начального напряжения  $U_{нач}$  до конечного  $U_{кон}$  за время  $t_{кон}$ :

$$C_p = Q_{p.max} = \int_0^{t_{кон}} I_p(t) dt.$$

Обычно разрядная емкость аккумуляторных батарей определяется при постоянной массе  $I_p$ . Тогда

$$C_p = I_p \cdot t_{\text{кон}}.$$

Номинальная разрядная емкость аккумуляторной батареи  $C_{20}$  определяется при 20-часовом режиме разряда током  $I = 0,05C_{20}$  при температуре плюс 25 °С.

Разряд должен прекращаться при  $U_{\text{кон}} = 10,5$  В. Аналогично определяется зарядная емкость  $C_z$ .

Единицей заряда в СИ является кулон. На практике используют единицу  $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Кл}$ .

Энергозапасом аккумуляторной батареи  $W_p$  называется максимальное количество энергии, которое выделяется во внешней цепи при разряде за время  $t_{\text{кон}}$ :

$$W_p = \int_0^{t_{\text{кон}}} U_p(t) dt.$$

Если рассмотреть среднее напряжение  $U_p$  за время  $t_{\text{кон}}$

$$U_p = \frac{1}{t_{\text{кон}}} \int_0^{t_{\text{кон}}} U_p(t) dt,$$

то можно при постоянном разрядном токе записать

$$W_p = U_p \cdot I_p \cdot t_{\text{кон}} = U_p \cdot C_p.$$

Аналогично определяется энергия заряда:

$$W_p = U_z \cdot C_z.$$

Энергозапас можно определить, проводя через равные промежутки времени измерения напряжения разряда  $U_{pi}$  и вычислив  $U_p$  приближенно:

$$U_p = 1/N \sum_{i=1}^N U_{pi},$$

где  $N$  – количество зарядов за  $t_{\text{кон}}$ .

Совершенство конструкции аккумулятора характеризуется коэффициентами отдачи по скорости  $\mu_c$  и энергии  $\mu_w$ :

$$\mu_c = C_p / C_z \quad \mu_w = W_p / W_z.$$

Все характеристики батареи можно разделить на разрядные, зарядные и зарядно-разрядные. Разрядные характеристики снимают в двух режимах: осветительном (ток разряда до  $0,5C_{20}$ ) и стартерном (ток разряда от  $1,5C_{20}$  до  $7C_{20}$ ).

Разрядные характеристики условно делятся на следующие группы:

- временные, выражающие зависимость напряжения от продолжительности разряда;
- вольт-амперные, выражающие зависимость напряжения от тока;
- емкостные, мощностные и энергетические, которые рассчитываются на основе временных.

Напряжение аккумулятора в процессе разряда постоянным током  $I_p$  изменяется сложным образом. Это объясняется нелинейностью и непостоянством во времени его внутреннего сопротивления, особенно поляризационной составляющей.

Процесс разряда аккумуляторной батареи разделяется на четыре стадии. Временные характеристики процесса разряда представлены на рисунке 11.2.

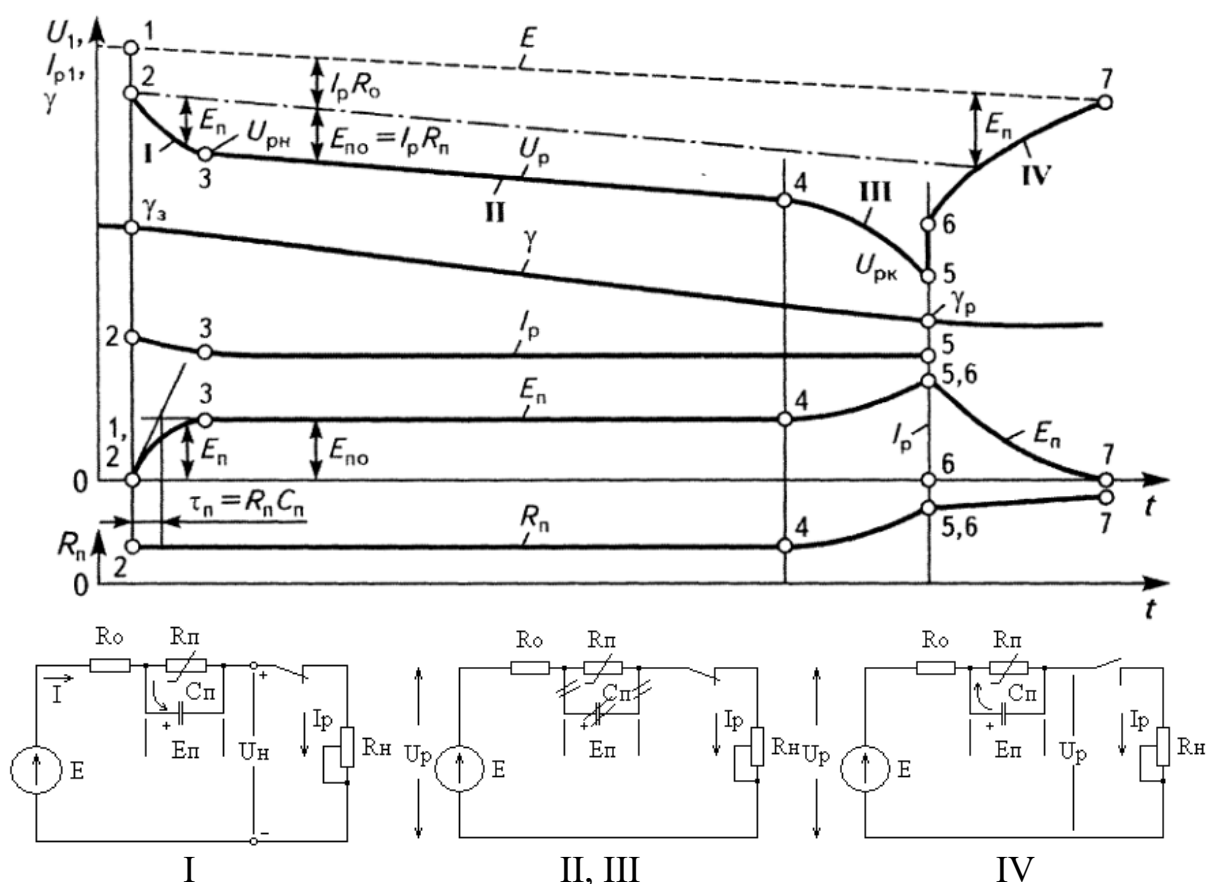


Рисунок 11.2 – Временные характеристики процесса разряда аккумулятора

Стадия I – процесс разряда аккумулятора составляет несколько десятков секунд. Она начинается при включении нагрузки  $R_n$  (точка 1) и заканчивается в точке 3 после завершения переходного процесса, определяемого поляризационными явлениями. Точка 1 соответствует равновесной ЭДС  $E$  аккумулятора, а участок 1–2 – падению напряжения на  $R_o$ . На участке 2–3 происходит нарастание ЭДС поляризации  $E_n$ , определяющееся в основном концентрационным сдвигом потенциалов электродов. На эквивалентной схеме это соответствует заряду конденсатора  $C_n$ , который заканчивается в точке 3. После

точки 3 постоянство  $I_p$  обеспечивается за счет уменьшения переменного сопротивления нагрузки  $R_n$ .

Стадия II – начинается из точки 3 и характеризуется постоянством ЭДС поляризации  $E_n = I_n \cdot R_n$ , а также линейным уменьшением напряжения  $U_p$  в связи с линейным падением равновесной ЭДС  $E$ . В ходе токообразующей реакции из-за образования воды и поглощения серной кислоты из раствора электролита происходит линейное уменьшение плотности электролита  $\gamma$ . Продолжительность стадии II, ограниченной на разрядных характеристиках точками 3 и 4, составляет при  $I_p = 0,05C_{20}$  (осветительный режим) 80 %...90 % общего времени разряда. На эквивалентной схеме для данной стадии  $R_b = R_o + R_n$ .

Стадия III – начинается из точки 4, когда существенным становится процесс пассивации активной массы электродов. Начинается увеличение поляризационного сопротивления  $R_n$  и, следовательно, увеличение ЭДС  $E_n$ . Кроме того, увеличивается и омическое сопротивление  $R_o$  в связи с падением плотности электролита  $\gamma$ . Химические реакции, протекающие при недостатке кислоты из-за пассивации сульфатом свинца после точки 5, являются необратимыми. Глубокий разряд приводит к порче электродов. Поэтому при снятии временной характеристики необходимо прекращать разряд при определенном напряжении  $U_{pk}$ . Принимается  $U_{pk} = 0,75U_{pn}$ . Напряжение  $U_{pn}$  соответствует точке 3.

Стадия IV – начинается из точки 5 после отключения нагрузки. Напряжение  $U_p$  резко возрастает на величину падения напряжения на омическом сопротивлении  $I_p R_o$ , но не достигает значения равновесной ЭДС  $E$  из-за неравномерного распределения плотности электролита по толщине электродов. На эквивалентной схеме это соответствует наличию заряда на конденсаторе  $C_n$ . По истечении переходного процесса распределение плотности  $\gamma$  становится равномерным и напряжение на аккумуляторе повышается до величины  $E$ . На эквивалентной схеме это соответствует разряду конденсатора  $C_n$  на сопротивление поляризации  $R_n$ .

Процесс заряда аккумуляторной батареи представлен в виде временных характеристик на рисунке 11.3.

Схема заряда состоит из источника питания  $E_3$ , выключателя и переменного балластного резистора  $R_6$ .

Стадия I – происходит скачок напряжения из относительной равновесной ЭДС  $E$  на величину  $I_3 R_o$  (участок 1–2), а затем переходный процесс (участок 2–3) стабилизации неравномерного регулирования концентрации электролита вблизи электродов (заряд  $C_{II}$ ).

Стадия II – для упрощения объединяет линейный и нелинейный участки нарастания  $U_3$  (участок 3–4). За счёт формирования активной массы, повышения плотности электролита  $\gamma$  на этой стадии происходят повышение ЭДС батареи  $E$  и рост зарядного напряжения  $U_3$ , необходимого для поддержания постоянного зарядного тока  $I_3$ . При завершении процесса заряда, когда почти

вся активная масса электродов окажется восстановленной (напряжение на аккумуляторе достигает 2,3 В), зарядный ток начинает частично, а затем полностью расходоваться на разложение воды с выделением водорода и кислорода. При этом напряжение резко повышается и достигает 2,7 В, что объясняется более высоким напряжением для разложения воды. После достижения указанного значения напряжения заряд перестаёт возрастать.

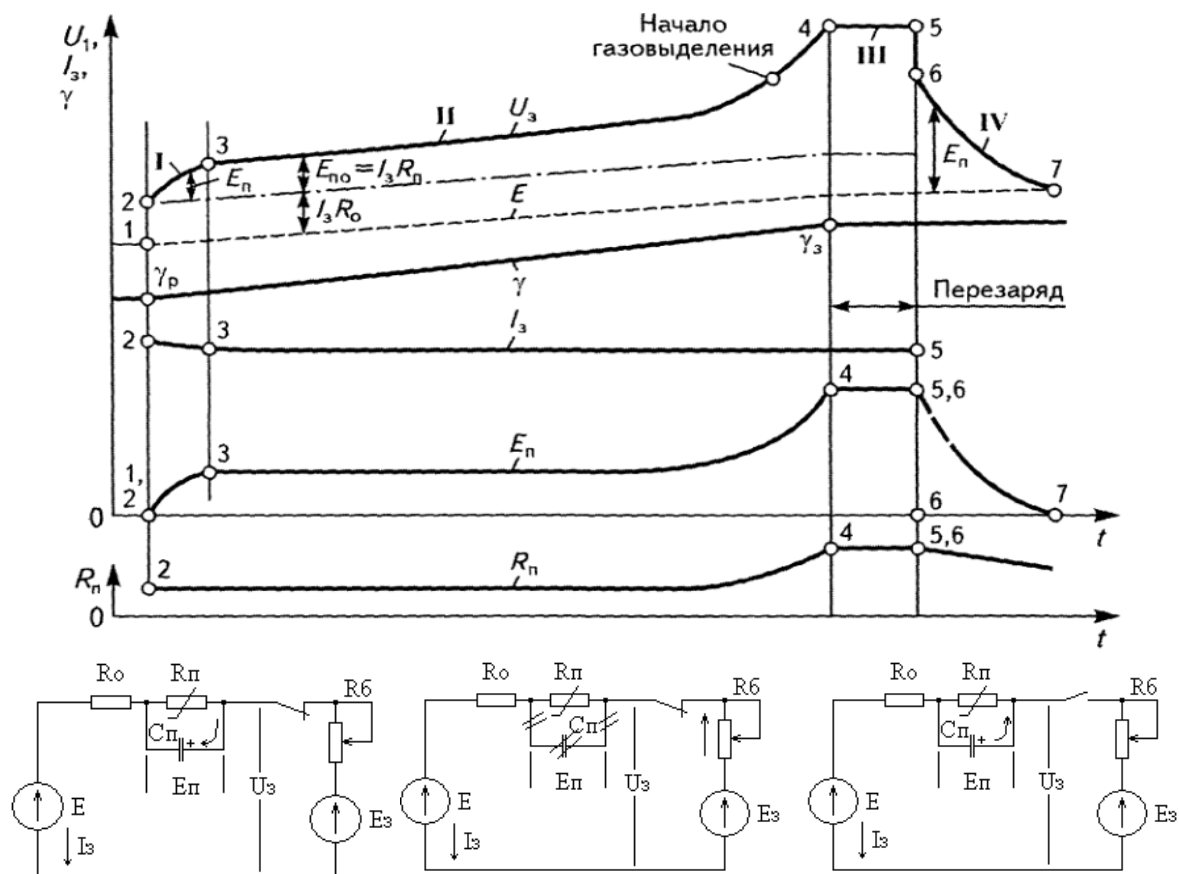


Рисунок 11.3 – Временные характеристики заряда аккумуляторной батареи

Стадия III – соответствует перезаряду (участок 4–5), когда в течение 2...3 ч напряжение  $U_3$  и плотность  $\gamma$  не изменяются. При этом наблюдается обильное газовыделение – «кипение» электролита. На этой стадии происходит полное электрическое разложение сульфата  $PbSO_4$ . Для необслуживаемых батарей этого участка почти нет.

Стадия IV – формируется после отключения зарядной цепи (участок 5–7). Плотность электролита у электродов и между ними выравнивается. Соответственно, понижается и напряжение аккумулятора до значения равновесной ЭДС  $E$ , соответствующей достигнутой плотности электролита  $\gamma$ . Отрезок 5–6 соответствует падению напряжения на активном сопротивлении в конце заряда  $I_3 \cdot R_6$ .

Сила тока стартерного разряда аккумуляторной батареи зависит от мощности стартера и условий пуска ДВС и может составлять 100...1500 А. Активные параметры батареи для данного режима оцениваются по вольт-

амперной и временной характеристикам. Вольт-амперная характеристика представляет собой зависимость напряжения батареи  $U_{\bar{o}}$  от тока разряда  $I_3$ . Временная характеристика – это зависимость напряжения от времени разряда при постоянной силе разрядного тока.

Вольт-амперная характеристика батареи может быть получена экспериментально или рассчитана для заданных условий разряда. Она выражается сложной кривой, имеющей квазилинейный участок в зоне от  $I_3 = C_{20}$  до  $U_{\bar{o}} = 0,4U_{ном}$  (кривая 1) на рисунке 11.4.

Нелинейность этой характеристики объясняется нелинейностью внутреннего сопротивления батареи, в основном его поляризационной составляющей. С достаточной для инженерной практики точностью реальную вольт-амперную характеристику заменяют линейной, которая при пересечении с осями координат формирует отрезки, пропорциональные условному начальному разрядному напряжению  $U_{нр}$  и условному току короткого замыкания  $I_{\bar{o}к}$ . Прямая, проведённая через эти две точки, называется расчётной вольт-амперной характеристикой АКБ.

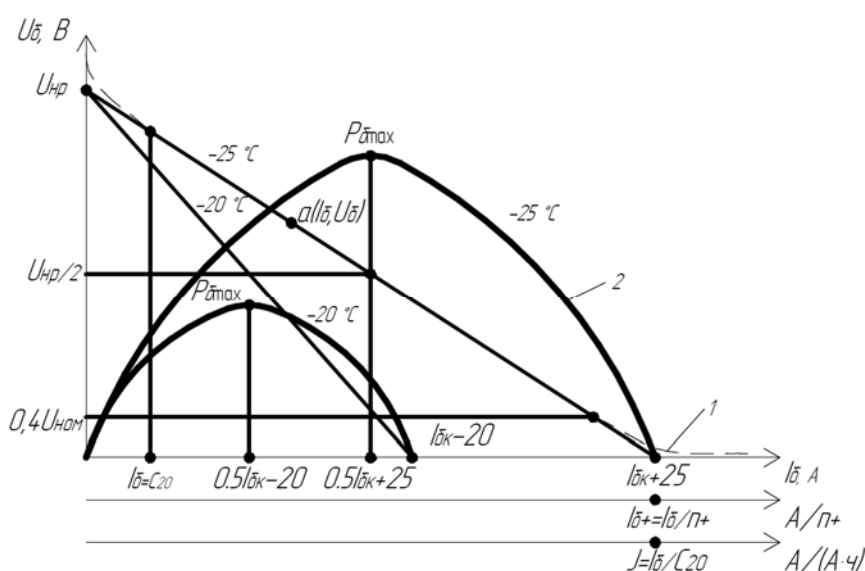


Рисунок 11.4 – Вольт-амперные 1 и мощностные 2 характеристики батареи при плюс 25 °C и минус 20 °C

Внутреннее сопротивление батареи по такой характеристике

$$R_{\bar{o}} = \frac{U_{нр}}{I_{\bar{o}к}}$$

и пропорционально тангенсу угла наклона  $\phi$ .

В процессе разряда на нагрузку  $R_n$  батарея развивает активную мощность  $P_{\bar{o}}$  (кривая 2):

$$P_{\bar{o}} = U_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}} = I_{\bar{o}}^2 \cdot R_n.$$

Так как для расчётной вольт-амперной характеристики

$$U_{\delta} = U_{нр} - I_{\delta} \cdot R_{\delta} = I_{\delta} \cdot R_n,$$

то

$$R_{\delta} = \frac{U_{нр}^2 \cdot R_n}{(R_n + R_{\delta})^2}.$$

При  $P_{\delta} = R_n$  мощность будет достигать своего максимального значения.

$$R_{\delta} = \frac{U_{нр}^2}{4R_{\delta}} = \frac{U_{нр} \cdot I_{\deltaк}}{4}.$$

При этом  $I_{\delta} = 0,5I_{\deltaк}$  и  $U_{\delta} = 0,5U_{нр}$ .

Для оси абсцисс вольт-амперной характеристики используются различные масштабы: сила тока разряда батареи  $I_{\delta}$ , А; ток разряда на один положительный электрод АБ  $I_{\delta+} = \frac{I_{\delta}}{n_+} \left( \frac{A}{n_+} \right)$ ; ток разряда на 1 А·ч  $J = \frac{I_{\delta}}{C_{20}}$ .

Для расчётной вольт-амперной характеристики необходимо определить начальное разрядное напряжение  $U_{нр}(I_{\delta} = 0)$  и условный ток короткого замыкания  $I_{\deltaк}(U_{\delta} = 0)$ .

Начальное разрядное напряжение определяется следующей эмпирической зависимостью:

$$U_{нр} = m(2,02 + 0,00136t_{\ominus} - 0,001\Delta C_p),$$

где  $m$  – число аккумуляторов в батарее;

$t_{\ominus}$  – температура электролита;

$\Delta C_p$  – разряженность батареи, %.

Ток короткого замыкания  $I_{\deltaк}$  невозможно определить экспериментально. Его можно рассчитать, имея координаты какой-либо рабочей точки  $a(I_{\delta}, U_{\delta})$ .

$$I_{\deltaк} = I_+ \cdot n_+ = \frac{U_{нр} \cdot I_{\delta}}{U_{нр} - U_{\delta}},$$

где  $I_+$  – условный ток короткого замыкания, приходящийся на один положительный электрод;

$n_+$  – число положительных электродов в аккумуляторе.

Тогда

$$I_+ = \frac{I_{\deltaк}}{n_+} = \frac{U_{нр} \cdot I_{\delta}}{(U_{нр} - U_{\delta}) \cdot n_+}.$$

Вольт-амперная характеристика может быть представлена в виде уравнения прямой в отрезках:

$$\frac{I_{\delta}}{I_{+} \cdot n_{+}} + \frac{U_{\delta}}{U_{нр}} = 1.$$

Или, с учётом исходной формулы,

$$U_{\delta} = m(2,02 + 0,00136t_{\ominus} - 0,001\Delta C_p) \left( 1 - \frac{I_{\delta}}{I_{+} \cdot n_{+}} \right).$$

Данное уравнение даёт возможность рассчитывать вольт-амперную характеристику (ВАХ) для батарей любой ёмкости  $n_{+}$  и напряжения  $m$  (рисунок 11.5). Вольт-амперная характеристика для случая, когда  $m = 1$ ,  $n_{+} = 1$ , является единой для батарей всех типов, собранных из одних и тех же электродов и сепараторов. Переход к конкретному типу батарей осуществляется за счёт изменения масштаба координатных осей.

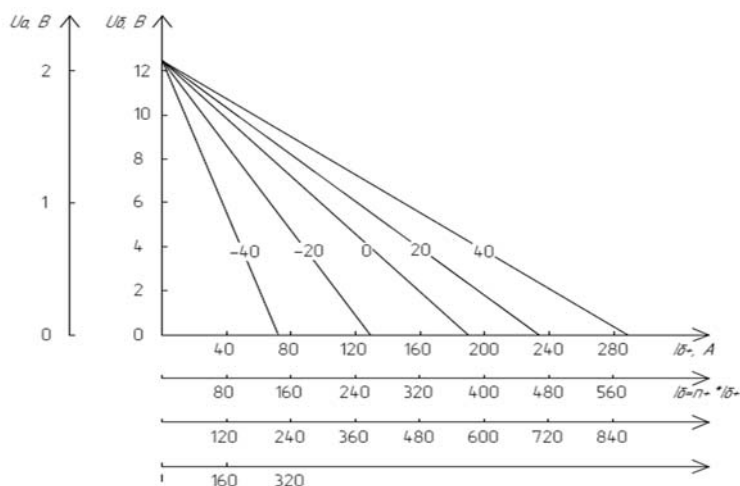


Рисунок 11.5 – Единые расчётные вольт-амперные характеристики АБ с  $I_{+} = \text{const}$ , от плюс 40 °С до минус 40 °С,  $n_{+} = 1, 2, 3$

## 11.2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить СЭП КЭС.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Включить измерительные приборы РА3, РВ3.
- 4 Выполнить измерение плотности электролита АБ GB1 и температуры.
- 5 Резистором R10 установить требуемое сопротивление нагрузки.
- 6 Включить КМ5, К15 и снять временные характеристики разряда АБ, поддерживая постоянным ток разряда с помощью резистора R10 (согласно методике подразд. 11.1).
- 7 Данные, полученные в результате эксперимента, занести в таблицу 11.1.
- 8 Отключить КМ5.



Таблица 11.1 – Результаты исследования временных характеристик разряда АБ

$t$ , мин										
$I_p$ , А										
$U_p$ , А										
$\gamma$ , г/см										

9 Включить SA5 в положение GB1, предварительно измерив плотность электролита заряженной АБ.

10 Резистором R12 установить расчётную величину тока заряда АБ по прибору PA5.

11 Снять временные характеристики заряда АБ, при необходимости поддерживая постоянным ток заряда с помощью R12 (согласно методике подразд. 11.1).

12 Данные, полученные в результате эксперимента, занести в таблицу 11.2.

Таблица 11.2 – Результаты исследования временных характеристик заряда АБ

$t$ , мин										
$I_z$ , А										
$U_z$ , А										
$\gamma$ , г/см										

13 Отключить SA5.

14 По данным таблицы 11.2 построить временные характеристики разряда и заряда АБ.

15 По экспериментальным данным рассчитать разрядную и зарядную ёмкости АБ, энергозапас АБ  $W_p$  и энергию заряда  $W_z$ .

16 Выполнить расчёты и построение вольт-амперной характеристики АБ согласно методике подразд. 11.1.

17 Для снятия вольт-амперной характеристики АБ включить приборы PA3, PV3 и KM5.

18 Снять вольт-амперную характеристику АБ, изменяя сопротивление нагрузки с помощью выключателей KM11...KI15.

19 Данные, полученные в результате эксперимента, занести в таблицу 11.3.

Таблицу 11.3 – Результаты исследования вольт-амперной характеристики АБ

$I_\sigma$ , А					
$U_\sigma$ , А					

20 Отключить KM5, KM11...KM15, приборы и стенд.

21 По данным таблицы 11.3 выполнить построение вольт-амперной характеристики АБ.

### ***Содержание отчёта***

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения эксперимента.
- 4 Таблицы проведения эксперимента.
- 5 Расчёты и график вольт-амперной характеристики АБ.
- 6 Графики временных характеристик и заряда АБ, график вольт-амперной характеристики АБ, построенные по экспериментальным данным.
- 7 Анализ полученных результатов и выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 От каких параметров зависит электродвижущая сила свинцового аккумулятора?
- 2 Устройство свинцового аккумулятора.
- 3 Процесс поляризации свинцового аккумулятора.
- 4 Приведите выражения для напряжений разряда и заряда АБ и дайте пояснения.
- 5 Приведите схему замещения АБ и поясните принцип её работы для различных режимов.
- 6 Дайте определение разрядной и зарядной емкостей АБ.
- 7 Дайте определение энергозапаса АБ.
- 8 Вид временных характеристик разряда АБ для различных стадий.
- 9 Вид временных характеристик заряда АБ для различных стадий.
- 10 Порядок формирования расчётной вольт-амперной характеристики АБ.
- 11 Приведите выражение активной мощности АБ и дайте пояснения.

## **12 Лабораторная работа № 12. Исследование характеристик электростартеров**

### ***Цель работы***

- 1 Исследование электромеханических характеристик стартера  $n_c = f(I_c)$ .
- 2 Исследование характеристики  $P_{эм} = f(I_c)$ .
- 3 Исследование характеристики  $\eta = f(I_c)$ .

### ***Состав оборудования***

- 1 Автомобильный электростартер.
- 2 Аккумуляторная батарея.
- 3 Комплексный энергосиловой стенд.

### 12.1 Краткие теоретические сведения

Электромеханическими характеристиками называются зависимости основных параметров стартерного электродвигателя (напряжения, частоты вращения, момента, КПД, мощности) от тока стартера  $I_c$ . Удобство использования электромеханических характеристик для анализа работы системы электростартерного пуска объясняется возможностью совмещать их с вольт-амперными характеристиками аккумуляторной батареи.

На рисунке 12.1 представлена схема включения электростартера, для которой на рисунке 12.2 изображены зависимости падений напряжений на различных участках в функции тока  $I_c$  (баланс напряжений системы пуска).

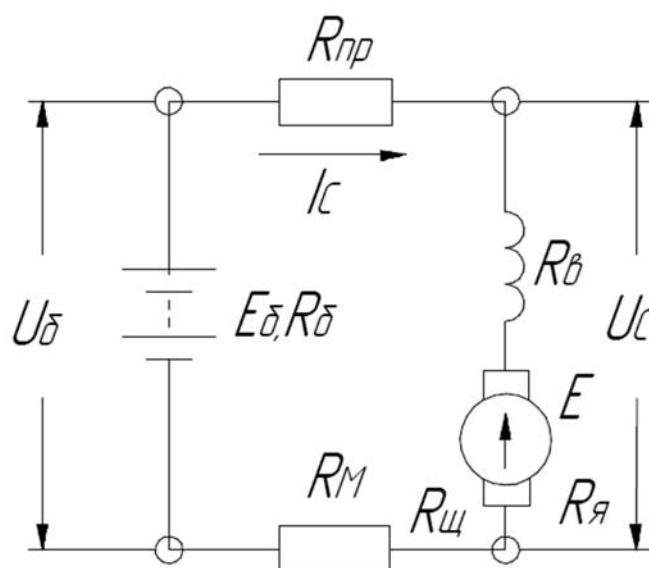


Рисунок 12.1 – Схема включения электростартера

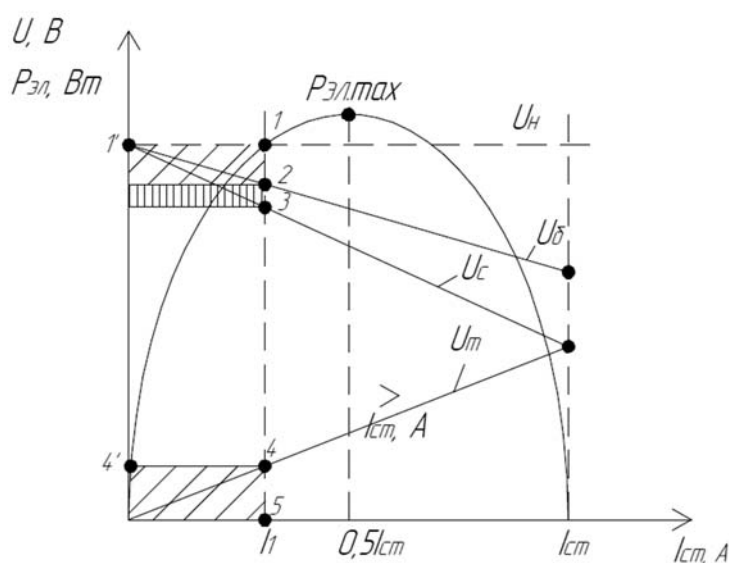


Рисунок 12.2 – Зависимости падений напряжений

Напряжение  $U_c$ , подводимое к стартеру, меньше напряжения батареи  $U_b$  на величину его падения на сопротивлениях проводов стартерной цепи  $R_{np}$  ( $\Delta U_{np}$ ) и «массы»  $R_m$  ( $\Delta U_m$ ). Они в сумме составляют общие потери в стартерной цепи от аккумуляторной батареи до стартера  $\Delta U_{\Sigma}$ :

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_{np} + \Delta U_m = (R_{np} + R_m) \cdot I_c.$$

Ток  $I_{cm}$  соответствует полностью заторможенному якорю стартера. В этом режиме все напряжение  $U_c$ , подведенное к стартеру, равно падению напряжения на его внутреннем сопротивлении:

$$R_C = R_B + R_J + 2R_{\Sigma},$$

где  $R_B, R_J$  – сопротивления обмоток возбуждения и якоря соответственно;  
 $2R_{\Sigma}$  – сопротивление щеточно-коллекторного узла.

В отличие от обмоток стартерного электродвигателя, сопротивление  $R_{\Sigma}$  является нелинейным (не превышает 2,5 В). Если считать, что  $R_{\Sigma}$  мало изменяется от тока и частоты вращения, то можно принять, что падение напряжения на внутреннем сопротивлении стартера изменяется линейно от силы тока (прямая  $U_T(I_c)$ ). Показатель  $U_T$  называется тормозным напряжением.

Падение напряжения по участкам цепи стартера при некотором рабочем токе  $I_1$  распределяется следующим образом: участок 1–5 – ЭДС батареи  $E_b$ ; участок 1–2 – падение напряжения на внутреннем сопротивлении батареи  $\Delta U_{b1} = I_1 \cdot R_b$ ; участок 2–3 – падение напряжения в проводах и «массе»  $\Delta U_{\Sigma}$ ; участок 3–4 – ЭДС стартера  $E_C = C_{en} \Phi$  ( $\Phi$  – поток возбуждения); 3–4 – тормозное напряжение  $U_T = I_1 \cdot (R_B + R_J + 2R_{\Sigma})$ .

Потери мощности на отдельных участках цепи при токе  $I_1$  пропорциональны заштрихованной площади. Площади 3', 3, 4, 4' соответствуют электромагнитной мощности, подведенной к якорю стартера,  $P_{ЭМ} = E_C \cdot I_c$ , которая при изменении тока от 0 до  $I_{CT}$  изменяется по параболе:

$$P_{ЭМ} = E_b \cdot I_c - (R_b + R_{\Sigma} + R_C) \cdot I_c^2.$$

Корни данного уравнения  $I_{c1} = 0$  и  $I_{c2} = \frac{E_b}{R_b + R_{\Sigma} + R_C} = I_{CT}$ . Согласно дан-

ному выражению,  $P_{ЭМ, \max}$  имеет место при  $I_c = \frac{E_b}{2(R_b + R_{\Sigma} + R_C)} = 0,5 I_{CT}$ .

Электромеханические характеристики стартера показаны на рисунке 12.3.

Зависимость частоты вращения  $n_c(I_c)$  и момента  $M_c(I_c)$  можно разбить на два участка: первый, когда магнитная система стартера не насыщена и магнитный поток  $\Phi$  с ростом тока  $I_c$  резко увеличивается (до  $I < (0,8 \dots 0,9) I_{сн}$ , где  $I_{сн}$  – номинальный ток стартера); второй, когда магнитная система насыщена и магнитный поток  $\Phi$  почти не изменяется ( $I_c > (0,8 \dots 0,9) I_{сн}$ ). Характеристи-

ки  $n_c(I_c)$  и  $M_c(I_c)$  на втором участке имеют почти линейный характер.

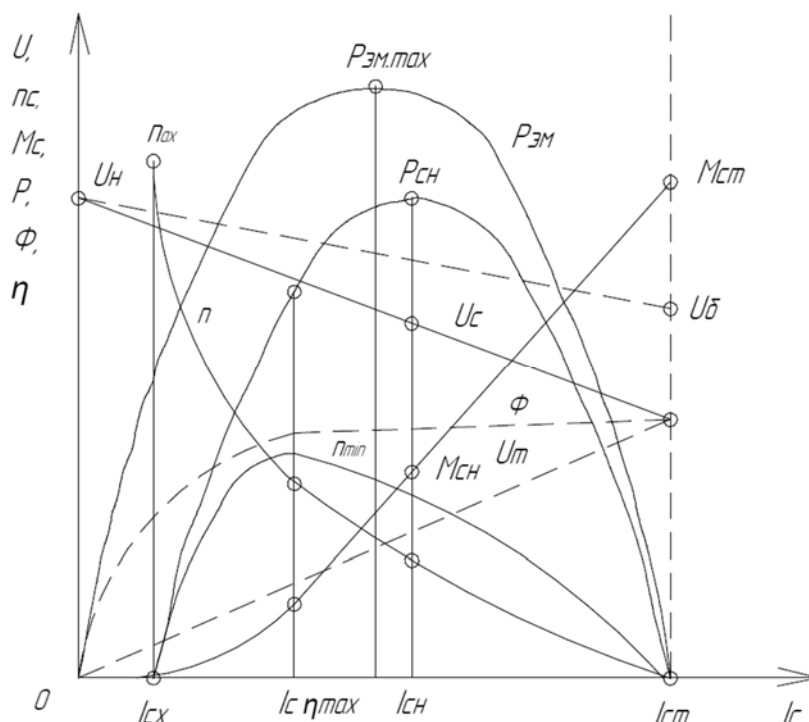


Рисунок 12.3 – Электромеханические характеристики стартера

Механическая мощность на валу стартера  $P_c = M_c \cdot n_c / 9,55$  меньше электромагнитной мощности  $P_{эм}$  на размер потерь на трение в подшипниковых узлах и щеточном контакте, вентиляционных и магнитных потерь (перемагничивание и вихревые токи). Стартер потребляет электрическую мощность  $P_{эл} = I_c \cdot U_c$ , преобразовывая её в механическую с КПД.

$$\eta = \frac{P_c}{P_{эл}}.$$

Максимальный КПД электродвигателя стартера не превышает значений  $0,5 \dots 0,6$ .

Для электромеханических характеристик стартера можно выделить следующие режимы:

- холостого хода, характеризуемый частотой вращения  $n_{cx}$  и силой тока  $I_{cx}$ ;
- при максимуме КПД (характеризуется  $I_{c\eta\max}$ );
- номинальный при максимуме мощности стартера. На этом режиме задают номинальные параметры стартера: мощность  $P_{ст}$ , момент  $M_{сн}$ , частоту вращения  $n_{сн}$ , силу тока  $I_{сн}$ . Напряжение на стартере в номинальном режиме не задается, но обычно оно составляет около 8 В для стартера на 12 В ( $\approx 0,75 U_{бн}$ ). В режиме пуска двигателя желательно, чтобы стартер работал при токах  $I_{c\eta\max} \dots I_{сн}$ ;
- полного торможения. Параметры этого режима – момент полного торможения  $M_{ст}$  и сила тока  $I_{ст}$  – используются как диагностические для оценки

состояния электрических и магнитных цепей стартера.

### 12.2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить СЭП КЭС.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию стартера на экспериментальном агрегате.
- 4 Включить измерительные приборы PV3, PV4, PA4.
- 5 Подключить частотомер к блоку А6.
- 6 Подключить измеритель момента к блоку А6.
- 7 Включить переключатель SA4 в положение «Н» (нагрузка).
- 8 Включить автоматический выключатель QF1.
- 9 Включить выключатель кнопочный «Пуск».
- 10 Включить К7 и КМ4.

11 Изменяя нагрузку генератора М1 с помощью выключателей SA6...SA11, снять характеристики системы «АБ – электродвигатель стартера». Данные эксперимента занести в таблицу 12.1.

Таблица 12.1 – Результаты исследования характеристик системы «АБ – электродвигатель стартера»

$I_c, A$	$U_6, B$	$U_c, B$	$n_c, \text{мин}^{-1}$	$M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$

12 По данным таблицы 12.1 произвести расчет характеристик  $P_{эм} = f(I_c)$ ,  $P_c = f(I_c)$ ,  $\eta = f(I_c)$ .

13 По данным таблицы 12.1 и результатам расчета п. 12 выполнить построение характеристик  $U_6 = f(I_c)$ ,  $U_c = f(I_c)$ ,  $n_c = f(I_c)$ ,  $M_c = f(I_c)$ ,  $P_{эл} = f(I_c)$ ,  $P_c = f(I_c)$ ,  $\eta = f(I_c)$ .

14 С помощью КМ6...КМ10 ввести дополнительное сопротивление в цепь питания стартера (величина сопротивления задается преподавателем).

15 Повторить эксперимент по пп. 10–13.

### Содержание отчета

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения эксперимента и её описание.
- 4 Таблицы результатов эксперимента.
- 5 Графики характеристик по пп. 13 и 15.
- 6 Выводы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Из каких основных элементов состоит система пуска?
- 2 Какие типы электродвигателей применяются в стартерах?
- 3 Чем определяется момент сопротивления двигателя прокручиванию?
- 4 Баланс напряжений системы электростартерного пуска.
- 5 Как изменяются электромеханические характеристики стартера при изменении вольт-амперной характеристики АБ?
- 6 Каков физический смысл  $P_{эм. max}$ ?
- 7 Каков физический смысл  $\eta_{max}$ ?

## **13 Лабораторная работа № 13. Исследование характеристик тягового реле**

### **Цель работы**

- 1 Исследование тяговой характеристики электромагнита реле  $P = f(\delta)$ .
- 2 Исследование электромеханической характеристики линейного перемещения якоря  $L_{x.a} = f(I_в)$  в составе стартера.
- 3 Исследование минимального тока и напряжения срабатывания тягового реле в составе стартера.
- 4 Исследование минимального тока и напряжения отпущения тягового реле в составе стартера.

### **Состав оборудования**

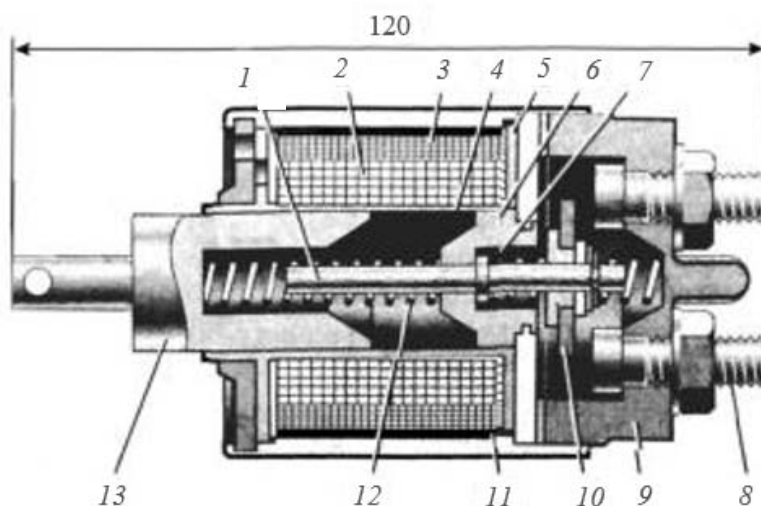
- 1 Тяговое реле электростартера.
- 2 Комплексный энергосиловой стенд.
- 3 Устройство нагрузки.
- 4 Измерительный инструмент.

### **13.1 Краткие теоретические сведения**

Управляемые дистанционно-тяговые реле обеспечивают ввод шестерни в зацепление с венцом маховика и подключают стартерный электродвигатель к аккумуляторной батарее. Они отличаются между собой по способу крепления на стартере, числу обмоток, конструкции контактного устройства и форме стопа электромагнита.

Конструкция тягового реле представлена на рисунке 13.1.

Реле может иметь одну или две обмотки, намотанные на латунную втулку 4, в которой свободно перемещается стальной якорь 13, воздействующий на шток 1 с подвижной контактной пластиной 10. Два неподвижных контакта в виде контактных болтов 8 закреплены в пластмассовой крышке 9.



1 – шток; 2, 3 – втягивающая и удерживающая обмотки; 4 – втулка; 5 – каркас катушки; 6 – магнитопровод реле; 7, 12 – пружины; 8 – контактный болт; 9 – крышка реле; 10 – контактная пластина; 11 – корпус реле; 13 – якорь реле

Рисунок 13.1 – Конструкция тягового реле с разделенной контактной системой

В двухобмоточном реле удерживающая обмотка 3, рассчитанная только на удержание якоря 13 реле в притянутом к магнитопроводу 6 состоянии, имеет провод меньшего сечения и прямой выход на массу ( $-U_{AB}$ ). Втягивающая обмотка 2 подключена параллельно контактам реле. При включении реле она действует согласованно с удерживающей обмоткой и создает необходимую силу притяжения, когда зазор между якорем 13 и магнитопроводом 6 максимален. Во время работы стартерного электродвигателя замкнутые контакты тягового реле шунтируют втягивающую обмотку и выключают её из работы.

По конструкции контактные системы могут быть разделенные или неразделенные. В неразделенной контактной системе подвижный контакт имеет пружину. Перемещение подвижного контактного диска в исходное нерабочее положение обеспечивает возвратная пружина.

В разделенной контактной системе (см. рисунок 13.1) подвижная контактная пластина 10 жестко не связана с якорем 13 реле. Контактную пластину круглой или прямоугольной формы устанавливают между изоляционной втулкой и шайбой на штоке. Это обеспечивает надежное соединение контактов реле при возможном перекашивании и перемещении пластины вдоль оси штока за счет сжатия пружин контактной системы.

Основным устройством тягового реле, обеспечивающим работу привода стартера и электроконтактной группы, является электромагнит. Основной характеристикой электромагнита является его тяговая характеристика – зависимость усилия притяжения якоря от его хода. Форма тяговой характеристики в значительной степени зависит от конструкции электромагнита. Электромагниты разделяют на две группы: с внутренним якорем (якорь перемещается внутри катушки) и с внешним якорем (якорь перемещается вне катушки).

В стартерах используются электромагниты с внутренним якорем. Общий вид тяговой характеристики электромагнита представлен на рисунке 13.2.



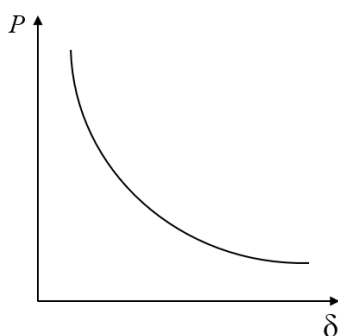


Рисунок 13.2 – Тяговая характеристика

Тяговая характеристика относится к броневым магнитам со стоком конической формы и имеет нелинейный характер, определяемый обратной пропорциональной зависимостью тягового усилия  $P$  от магнитного сопротивления воздушного зазора  $\delta$ . Коническая форма позволяет увеличить проводимости воздушного зазора и тем самым увеличить начальное тяговое усилие.

Полюса электромагнита при прохождении через них магнитного потока стремятся притянуться друг к другу. Возникающая механическая сила притяжения полюсов зависит от величины электромагнитной энергии поля, запасенной в воздушном зазоре между полюсами. В соответствии с балансом электромагнитной энергии и механической работы получено выражение

$$P = 0,4 \cdot B^2 \cdot S \cdot 10^6,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;

$S$  – сечение полюса, м<sup>2</sup>.

Данное выражение называется формулой Максвелла. Если учесть, что магнитный поток  $\Phi = BS$ , то

$$P = 0,4(\Phi^2 / S) \cdot 10^6.$$

Формула Максвелла справедлива только для равномерного поля, т. е. для тех случаев, когда краевыми потоками можно пренебречь.

Для расчета тяговой характеристики электромагнита необходимо рассчитать семейство кривых намагничивания электромагнита для принятых значений рабочих воздушных зазоров  $\Phi_\delta = f(F_{м.к})$ . Затем определяются потоки рабочего воздушного зазора  $\Phi_\delta$  при каждом значении  $\delta_\delta$  с помощью кривых намагничивания электромагнита при заданной МДС катушки. Далее расчёт силы притяжения выполняется по формуле Максвелла.

Кроме геометрических размеров воздушного зазора в электромагнитах, усилие притяжения якоря в значительной степени зависит от силы тока катушки. Поэтому работа электромагнита в составе стартера может быть представлена электромеханической характеристикой линейного перемещения якоря  $l_{х.я} = f(I_\delta)$ .

### 13.2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить СЭП КЭС.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию стартера на электромагнитном агрегате.
- 4 Выполнить коммутацию тягового реле в нагрузочно-измерительном устройстве.
- 5 Снять перемычку с клемм ХТ2 и ХТ3.
- 6 Подключить нагрузочно-измерительное устройство к клемме ХТ3.
- 7 Включить измерительные приборы PV4, DA4.
- 8 Включить автоматический выключатель QF1.
- 9 Включить КМ4.
- 10 Задавая значения воздушного зазора  $\delta$  (перемещение якоря) электромагнита, регистрировать величину тягового усилия  $P$ . Данные эксперимента занести в таблицу 13.1.

Таблица 13.1 – Исследование тяговой характеристики электромагнита тягового реле

$\delta$ , мм										
$P$ , Н										

- 11 По данным таблицы 13.1 выполнить построение характеристики  $P = f(\delta)$ .
- 12 Отключить КМЧ.
- 13 Отключить нагрузочно-измерительное устройство от ХТ3.
- 14 Снять перемычку с клемм ХТ6 и ХТ7.
- 15 Установить перемычки на клеммы ХТ3, ХТ4 и ХТ5, ХТ6.
- 16 Снять перемычку с клемм ХТ8 и ХТ9.
- 17 Установить перемычку на клеммы ХТ8, ХТ10 для подключения блока UZ4.
- 18 Включить КМ4.
- 19 Задавая R14 величину тока катушек тягового реле (показания РА4), произвести измерения хода якоря  $l_{х.я}$ . Данные эксперимента занести в таблицу 13.2.

Таблица 13.2 – Исследование электромеханической характеристики линейного перемещения якоря в составе стартера

$I_{\theta}$ , А							
$l_{х.я}$ , мм							

- 20 По данным таблицы 13.2 восполнить построение характеристики  $l_{х.я} = f(I_{\theta})$ .
- 21 Определить минимальную величину напряжения и тока срабатывания тягового реле.
- 22 Определить минимальную величину напряжения и тока отпускания тягового реле.

### ***Содержание отчета***

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения экспериментов и их описание.
- 4 Таблицы результатов экспериментов.
- 5 Графики характеристик (см. рисунок 13.2).
- 6 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Из каких основных элементов состоит тяговое реле?
- 2 Какие типы тяговых реле применяются в стартерах?
- 3 От каких параметров зависит вид тяговой характеристики электромагнита?
- 4 Методика расчета тяговой характеристики электромагнита.
- 5 Почему в тяговом реле применяют две обмотки?
- 6 Какое техническое решение применяют для увеличения начального тягового усилия электромагнита?

## **14 Лабораторная работа № 14. Исследование характеристик классической контактной системы зажигания**

### ***Цель работы***

- 1 Исследование характеристик максимального вторичного напряжения в функции вращения коленчатого вала двигателя  $U_{2m} = f(n)$ .
- 2 Исследование характеристики тока разрыва в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя  $I_p = f(n)$ .
- 3 Исследование зависимости вторичного напряжения от емкости конденсатора в первичной цепи  $U_{2m} = f(C)$ .
- 4 Исследование динамической характеристики первичного тока при различных значениях сопротивления первичной цепи.
- 5 Исследование переходных процессов в системе зажигания  $i_1(t)$ ,  $U_2(t)$ .

### ***Состав оборудования***

- 1 Распределитель 30.3706.
- 2 Катушка зажигания.
- 3 Комплексный стенд исследования систем зажигания (КСИСЗ).
- 4 Осциллограф.
- 5 Генератор прямоугольных импульсов.

### 14.1 Краткие теоретические сведения

Классическая система батарейного зажигания с одной катушкой и многоискровым механическим распределением выполняет две функции: прерывание цепи постоянного тока для генерирования высокого напряжения; синхронное распределение высокого напряжения по цилиндрам двигателя.

Схема классической системы зажигания представлена на рисунке 14.1.

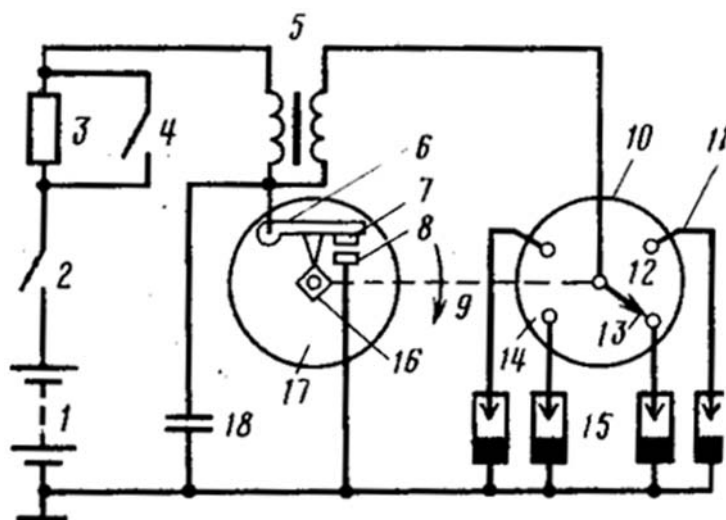


Рисунок 14.1 – Принципиальная схема классической системы зажигания

На схеме представлены следующие элементы: аккумуляторная батарея 1, выключатель зажигания 2, добавочный резистор 3, который уменьшает топливные потери в катушке зажигания (при пуске резистор шунтируется выключателем 4 одновременно с включением стартера), катушка зажигания 5, между первичной и вторичной обмотками которой существует автотрансформаторная связь, прерыватель 17, содержащий рычажок 6 с подушечкой 7 из текстолита, контакты прерывателя 8, кулачок 16, имеющий число граней, равное числу цилиндров, конденсатор первичной цепи 18, подключенный параллельно контактам 8, распределитель 14, включающий в себя бегунок 12, крышку 10, на которой расположены неподвижные боковые электроды 11, соединённые через высоковольтные провода с соответствующими свечами зажигания. Высокое напряжение к бегунку 12 подаётся через центральный электрод с помощью скользящего угольного контакта. На бегунке имеется электрод 13, который отделён воздушным зазором от боковых электродов 11. Бегунок 12 распределителя и кулачок 16 прерывателя находятся на одном валу.

При вращении кулачка 16 контакты 8 попеременно замыкаются и размыкаются. После замыкания контактов через первичную обмотку катушки зажигания 5 протекает ток, нарастая от нуля до определённого значения за данное время замкнутого состояния контактов. При малых частотах вращения ток может нарастать до установившегося значения. Протекание первичного тока вызывает образование магнитного потока и накопление электромагнитной энергии. После размыкания контактов прерывателя как в первичной, так и во

вторичной обмотке индуцируется ЭДС самоиндукции. Вторичное напряжение тем больше, чем быстрее исчезает магнитный поток, созданный током первичной обмотки, больше первичный ток в момент разрыва и больше число витков во вторичной обмотке.

При замыкании контактов прерывателя вторичная цепь почти не влияет на процесс нарастания первичного тока, т. к. токи и напряжения во вторичной цепи при относительно малой скорости нарастания первичного тока незначительны. Вторичную цепь можно считать разомкнутой. Ток в первичной цепи изменяется по экспоненциальному закону

$$i_1 = \frac{U_\delta}{R_1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right),$$

где  $U_\delta$  – напряжение АБ;

$R_1$  – полное сопротивление первичной цепи, равное сумме сопротивления первичной цепи, сопротивления первичной обмотки, сопротивления добавочного резистора и проводов;

$\tau_1$  – постоянная времени первичного контура,  $\tau_1 = \frac{L_1}{R_1}$ .

При  $t = 0$  ток  $i = 0$ , скорость нарастания тока максимальная:  $\left( \frac{di_1}{dt} \right)_{t=0} = \frac{U_\delta}{L_1}$ .

При  $t = \infty$  ток достигает максимального установившегося значения  $i = \frac{U_\delta}{R_1}$ .

Для современных автомобильных катушек зажигания время нарастания тока примерно 0,02 с.

Во время нарастания тока в первичной обмотке наводится ЭДС самоиндукции

$$e_{c1} = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = -U_\delta \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}.$$

ЭДС самоиндукции убывает по экспоненциальному закону. При  $t = 0$   $e_{c1} = -U_\delta$ , при  $t \rightarrow \infty$   $e_{c1} = 0$ .

Во вторичной обмотке индуцируется ЭДС взаимной индукции

$$e_{b2} = -M \cdot \frac{di_1}{dt} = -\frac{M}{L_1} U_\delta \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}},$$

где  $M$  – взаимная индукция.

В некоторый момент времени контакты размыкаются. Ток разрыва при прочих равных условиях зависит от времени замкнутого состояния контактов  $t_3$ :

$$I_p = \frac{U_{\delta}}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_1}} \right).$$

Время  $t_3$  зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя  $n$ , числа цилиндров  $z$ , профиля кулачка, т. е. соотношения между углом замкнутого и разомкнутого состояния контактов  $t_3$ .

Частота размыкания контактов при четырёхтактном двигателе

$$f = \frac{z \cdot n}{2 \cdot 60}.$$

Время полного периода работы прерывателя

$$T = t_3 + t_p = \frac{120}{z \cdot n},$$

где  $t_p$  – время разомкнутого состояния контактов.

Относительное время замкнутого и разомкнутого состояний контактов

$$\tau_3 = \frac{t_3}{T}; \quad \tau_p = \frac{t_p}{T}.$$

Тогда время замкнутого состояния

$$t_3 = \tau_3 \cdot T = \tau_3 \cdot \frac{120}{z \cdot n},$$

а величина тока разрыва

$$I_p = \frac{U_{\delta}}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{t_3 \cdot 120}{\tau_1 \cdot z \cdot n}} \right).$$

Таким образом, ток разрыва уменьшается с увеличением частоты вращения вала и числа цилиндров и возрастает с увеличением относительного времени замкнутого состояния контактов. Ток разрыва зависит также от параметров первичной цепи:  $U_{\delta}$ ,  $R_1$  и  $L_1$ .

Момент размыкания контактов прерывателя соответствует моменту зажигания. В этот момент магнитное поле исчезает и в первичной и вторичной обмотках катушки индуцируется напряжение. Напряжение, индуцируемое во вторичной обмотке, тем выше, чем больше коэффициент трансформации и первичный ток в момент его прерывания.

В момент размыкания контактов прерывателя электромагнитная энергия, запасённая в катушке, преобразуется в энергию электрического поля конденсаторов  $C_1$  (первичной цепи) и  $C_2$  (распределения ёмкости вторичной цепи). Значение максимального вторичного напряжения можно получить из уравнения

электрического баланса в контурах первичной и вторичной цепей, пренебрегая напряжением в них:

$$\frac{L_1 \cdot I_p^2}{2} = \frac{C_1 \cdot U_{1m}^2}{2} + \frac{C_2 \cdot U_{2m}^2}{2},$$

где  $U_{1m}$ ,  $U_{2m}$  – максимальные значения первичного и вторичного напряжений соответственно.

Если учесть, что  $U_{1m} = \frac{W_1}{W_2} \cdot U_{2m}$  ( $W_1$  и  $W_2$  – число витков в первичной и вторичной обмотках катушки зажигания соответственно), то

$$U_{2m} \cong I_p \sqrt{\frac{L_1}{C_1 \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 + C_2}}.$$

Данное выражение не учитывает потери энергии в сопротивлении нагара, шунтирующего искровой промежуток свечи, магнитные потери в стали, электрические потери в искровом промежутке распределителя и в дуге на контактах прерывателя. Для учета потерь в контурах вводят в виде множителя коэффициент  $\eta$ , выражающий уменьшение максимума напряжения из-за потерь энергии:

$$U_{2m} \cong I_p \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2}} \cdot \eta,$$

где  $\eta$  – коэффициент затухания, для контактных систем  $\eta = 0,75 \dots 0,85$ .

Переходные процессы в системе зажигания имеют вид, представленный на рисунке 14.2.

Зависимость  $U_{2m}$  от частоты вращения вала и числа цилиндров двигателя определяется временем замкнутого состояния контактов

$$t_3 = \alpha_3 / (6 \cdot n),$$

где  $\alpha_3$  – угол замкнутого состояния контактов;

$n$  – частота вращения валика распределителя.

Из выражения видно, что с возрастанием частоты вращения валика время  $t_3$  уменьшается и ток разрыва становится меньше. Уменьшение тока разрыва влечет за собой снижение напряжения  $U_{2m}$ . Увеличение числа цилиндров двигателя при всех прочих равных условиях и параметрах системы зажигания также уменьшает время замкнутого состояния контактов  $t_3$  и снижает вторичное

напряжение. На рисунке 14.3 приведены рабочие характеристики классической системы зажигания.

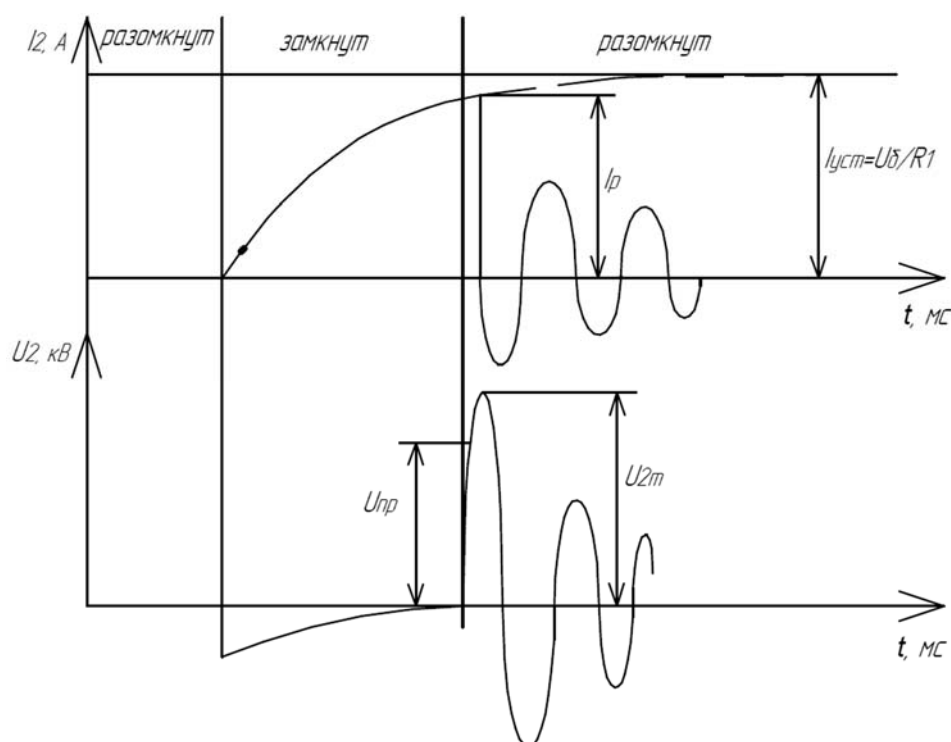


Рисунок 14.2 – Переходные процессы в системе зажигания

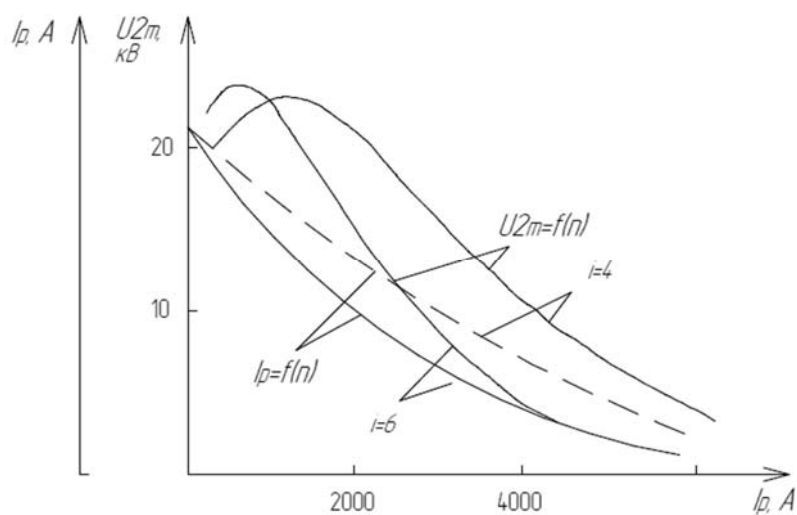


Рисунок 14.3 – Типовые рабочие характеристики классической системы зажигания

Первичный ток и скорость его нарастания зависят от постоянной времени первичного контура  $\tau_1 = \frac{L_1}{R_1}$ . Скорость нарастания тока

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_{\delta}}{L_1} e^{-\frac{R_1}{L_1} t}$$



При  $t = 0 \left( \frac{di_1}{dt} \right)_{t=1} = \frac{U_0}{L_1}$  обратно пропорциональна индуктивности  $L_1$ .

При неизменной индуктивности первичной цепи сила тока разрыва увеличивается с уменьшением сопротивления  $R_1$ , т. к. увеличивается установившееся значение тока. Динамические характеристики первичного тока при различных значениях  $R_1$  представлены на рисунке 14.4.

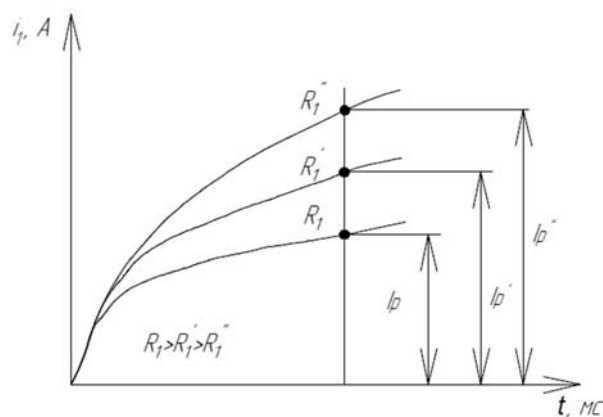


Рисунок 14.4 – Динамические характеристики первичного тока системы зажигания

Для увеличения максимального вторичного напряжения необходимо уменьшать сопротивление первичной цепи. Однако при чрезмерном уменьшении  $R_1$  увеличивается установившееся значение тока, что ухудшает работу контактов при низких частотах вращения и приводит к перегреву катушки.

Согласно акинетическому выражению для расчета  $U_{2m}$ , с уменьшением емкости конденсатора  $C_1$  вторичное напряжение должно увеличиваться. Такой характер изменения  $U_{2m}$  возможен лишь при больших значениях  $C_1$ . В диапазоне малых емкостей  $C_1$  по мере их уменьшения вторичное напряжение также уменьшается. Это явление объясняется тем, что при малой емкости не устраняется дугообразование на контактах, вызывающее значительные потери энергии. Зависимость вторичного напряжения от емкости конденсатора первичной цепи  $C_1$  представлена на рисунке 14.5.

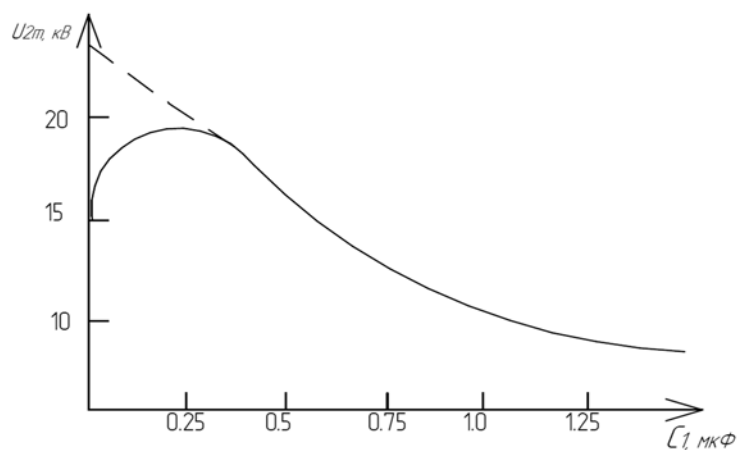


Рисунок 14.5 – Зависимость вторичного напряжения от емкости конденсатора в первичной цепи

Характер приведенной зависимости показывает, что существует оптимальное значение емкости  $C_1$ . На практике  $C_1$  выбирается в пределах  $0,15 \dots 0,35$  мкФ.

### **14.2 Порядок выполнения работы**

- 1 Изучить СЭП КСИСЗ.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию распределителя зажигания на электромашинном агрегате.

### **Содержание отчета**

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения экспериментов и их описание.
- 4 Таблицы результатов экспериментов.
- 5 Выводы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Принцип действия контактно-транзисторной системы зажигания.
- 2 От каких факторов зависит максимальное вторичное напряжение, развиваемое катушкой зажигания?
- 3 Какие факторы определяют первичный ток системы зажигания?
- 4 Выполните сравнительный анализ контактно-транзисторной и классической систем зажигания.
- 5 Каково назначение добавочного сопротивления?

## **15 Лабораторная работа № 15. Исследование характеристик контактно-транзисторной системы зажигания**

### **Цель работы**

- 1 Исследование характеристик максимального вторичного напряжения в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя  $U_{2m} = f(n)$ .
- 2 Исследование характеристики тока разрыва в функции разрыва частоты вращения коленчатого вала двигателя  $I_p = f(n)$ .
- 3 Исследование характеристики угла опережения зажигания в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя  $\theta = f(n)$ .
- 4 Исследование характеристики угла опережения зажигания при совместной работе центробежного регулятора и вакуумного регулятора.
- 5 Исследование переходных процессов в системе зажигания  $i(t), U_2(t)$ .

## Состав оборудования

- 1 Распределитель.
- 2 Катушка зажигания.
- 3 Коммутатор.
- 4 Комплексный стенд исследования систем зажигания (КСИСЗ).
- 5 Осциллограф.
- 6 Генератор прямоугольных импульсов.

### 15.1 Краткие теоретические сведения

На рисунке 15.1 представлены схемы контактно-транзисторных систем зажигания.

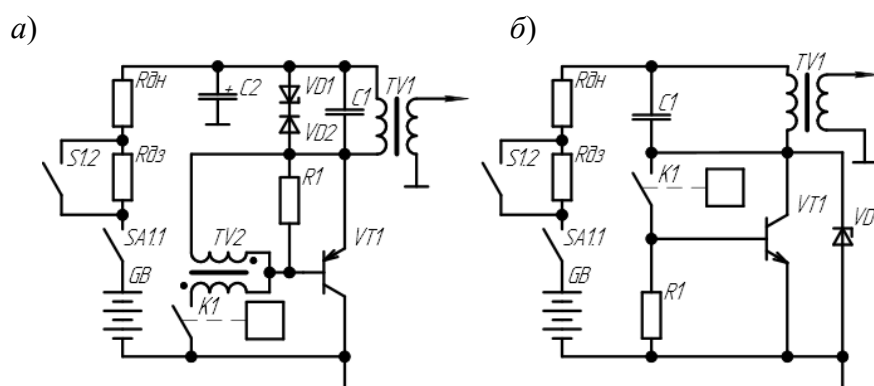


Рисунок 15.1 – Схемы контактно-транзисторных систем зажигания

На рисунке 15.1, *а* приведена схема контактно-транзисторной системы зажигания с транзисторным коммутатором ТК102. При замкнутых контактах прерывателя К1 транзистор находится в состоянии насыщения и по первичной обмотке катушки протекает ток. Силу тока разрыва транзисторной системы зажигания определяют по формуле

$$I_p = \frac{U_{\delta} - U_{k-э \text{ нас}}}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} t_n} \right),$$

где  $U_{k-э \text{ нас}}$  – падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер насыщенного транзистора.

$$R_1 = R_{\delta\delta} + R_{\delta\eta} + R_{\omega} + R_{\eta},$$

где  $R_{\delta\delta}$  – часть добавочного сопротивления резистора, заворачиваемого при пуске;  
 $R_{\delta\eta}$  – часть сопротивления незаконченного добавочного резистора;  
 $R_{\omega}$  – сопротивление первичной обмотки.

На первом этапе процесс протекает так, как в классической контактной

системе зажигания. Отличие заключается в том, что через контакты прерывателя протекает ток базы транзистора, величина которого в  $(\beta + 1)$  раз меньше тока первичной обмотки ( $\beta$  – коэффициент усиления по току транзистора).

После размыкания контактов прерывателя транзистор переключается в состояние отсечки. С помощью трансформатора TV2 обеспечивается отрицательное смещение на эмиттерном переходе транзистора, поскольку в первичной обмотке индуцируется ЭДС взаимоиндукции.

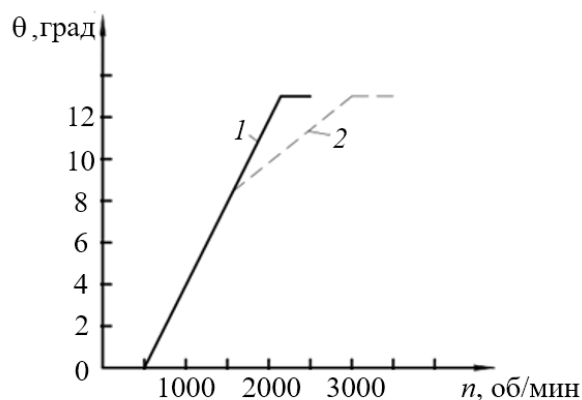
Одновременно с возникновением высокого напряжения на вторичной обмотке в первичной индуцируется большая ЭДС самоиндукции. С целью исключения перенапряжения на транзисторе первичная обмотка катушки зажигания шунтирована цепочкой VD1, VD2. Электролитический конденсатор C2 защищает транзистор от случайного импульсного перенапряжения.

Катушка зажигания имеет трансформаторную связь с повышенным коэффициентом трансформации ( $R_{mp} = 235$ ) и малую индуктивность первичной обмотки ( $L_1 = 3,7$  мГн) ( $L_1 = 3,7$  мГн).

Отличительной особенностью схемы, приведенной на рисунке 15.1, б, является отсутствие запирающего трансформатора и наличие диода, шунтирующего транзистор. Диод VD1 защищает транзистор от инверсного включения при колебательном процессе в первичной цепи.

Автоматическое регулирование угла опережения зажигания в зависимости от частоты вращения коленчатого вала обеспечивается центробежным регулятором, а в зависимости от нагрузки – вакуумным регулятором.

На рисунке 15.2 приведены типовые характеристики опережения зажигания в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, обеспечиваемые центробежным регулятором.



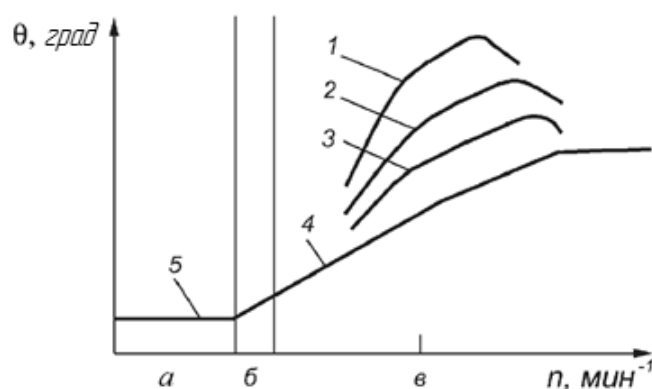
1 – пружинные с  $\sigma = \text{const}$ ; 2 – пружинные с  $\sigma \neq \text{const}$

Рисунок 15.2 – Типовые характеристики центробежных регуляторов

Вакуумный автомат опережения зажигания регулирует момент зажигания при изменении угла открытия дроссельной заслонки, т. е. при изменении нагрузок двигателя. При малых нагрузках двигателя уменьшается наполнение цилиндров рабочей смесью и, следовательно, давление в момент воспла-

менения. В то же время увеличивается загрязнение смеси остаточными газами, что приведёт к уменьшению скорости сгорания, а это требует увеличения угла опережения зажигания. С увеличением нагрузки процент остаточных газов уменьшается. Коэффициент избытка воздуха находится в пределах 0,8...0,9. Такая смесь имеет наибольшую скорость сгорания, поэтому угол опережения зажигания должен быть минимальным.

Реальный угол опережения зажигания складывается из угла начальной установки и углов, автоматически устанавливаемых центробежным и вакуумным регуляторами. На рисунке 15.3 приведена зависимость угла опережения зажигания от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя.



$a$  – область пуска;  $b$  – область холостого хода;  $v$  – рабочая область; 1 – 1/4 нагрузки; 2 – 1/2 нагрузки; 3 – 3/4 нагрузки; 4 – полная нагрузка (вакуумный автомат выключен); 5 – установочный угол

Рисунок 15.3 – Характеристика изменения момента зажигания при совместной работе регулятора опережения

## 15.2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить СЭП КСИСЗ.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию распределителя зажигания на электромашинном агрегате.

### Содержание отчета

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения экспериментов и их описание.
- 4 Таблицы результатов экспериментов.
- 5 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Нарисуйте и объясните схему замещения, принятую при рассмотрении этапа создания вторичного напряжения.

2 Влияет ли на величину сопротивления потерь суммарная смежность с катушкой зажигания и почему?

3 От каких конструктивных факторов зависят потери в катушке зажигания?

4 Можно ли снизить потери энергии в катушке зажигания за один период, увеличив частоту колебаний?

## **16 Лабораторная работа № 16. Исследование потерь энергии в катушках зажигания**

### ***Цель работы***

1 Определение эквивалентного сопротивления потерь катушки зажигания путем исследования процесса затухания свободных колебаний.

### ***Состав оборудования***

1 Катушки зажигания.

2 Комплексный стенд исследования систем зажигания (КСИСЗ).

3 Осциллограф.

### ***Краткие теоретические сведения***

После прерывания тока в первичной цепи катушки зажигания в первичном и вторичном контурах системы зажигания возникают переходные процессы напряжений:

$$U_1(t) = \frac{I_p}{\omega \cdot c} \cdot K \cdot K_T \cdot e^{-\alpha t};$$

$$U_2(t) = \frac{I_p}{\omega \cdot c} \cdot K \cdot K_T \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t,$$

где  $I_p$  – ток разрыва первичной цепи;

$\omega$  – угловая частота колебательного процесса (частота собственных колебаний контура);

$K$  – коэффициент магнитной связи между обмотками;

$K_T$  – коэффициент трансформации,  $K_T = W_2/W_1$ ;

$W_2, W_1$  – число витков вторичной и первичной обмоток;

$\alpha$  – коэффициент затухания колебаний,  $\alpha = 1/2RC$ ;

$C$  – суммарная емкость системы зажигания, приведенная к первичной

обмотке,  $C = C_1 + C_2 \cdot K_T^2$  ( $C_1, C_2$  – первичная и вторичные емкости);

$R$  – суммарное сопротивление потерь в системе, приведенное к первичной обмотке,  $R = \frac{R_n R_{uu}}{R_{uu} + R_n} \cdot \frac{1}{K_T^2}$ ;

$R_n$  – сопротивление, включенное во вторичную цепь схемы замещения и эквивалентное потерям в системе зажигания;

$R_{uu}$  – сопротивление потерь, включенное также во вторичную цепь схемы замещения и учитывающее потери энергии в нагаре свечи.

При отсутствии свечи ( $R_{uu} = \infty$ )  $R = R_n / K_T^2$  и сопротивление  $R_n$  учитывает потери в магнитопроводе катушки зажигания на вихревые токи и гистерезис и потери в электрической цепи (потери в меди и в изоляции). Величина  $R_n$  в значительной мере определяет величину  $U_{2m}$ , т. к. за четверть периода в результате потерь энергии напряжение может снизиться на 20 %...40 %.

Величина  $R_n$  катушки зажигания может быть определена на основании осциллограммы затухающего колебательного процесса вторичного или первичного напряжения после прерывания первичного тока.

На рисунке 16.1 приведена осциллограмма первичного (вторичного) напряжения.

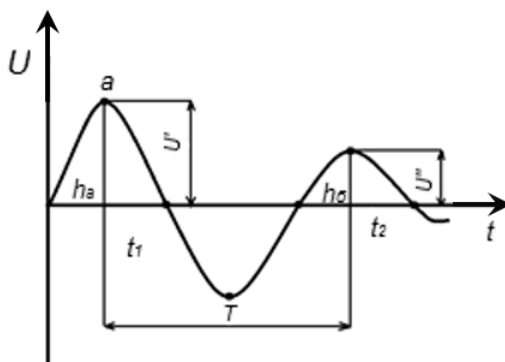


Рисунок 16.1 – Осциллограмма колебательного процесса в первичной цепи катушки зажигания

Исследовать первичное напряжение проще, чем вторичное, вследствие его меньшей величины.

Амплитуды первой и второй положительных полуволн первичного напряжения

$$U'_{1M} = A \cdot e^{-\omega t_1} \cdot \sin \omega t_1;$$

$$U''_{1M} = A \cdot e^{-\omega t_2} \cdot \sin \omega t_2.$$

С учетом того, что  $t_2 - t_1 = T$ ,

$$\frac{U'_{1M}}{U''_{1M}} = e^{\alpha T},$$

откуда можно получить

$$R = \frac{T}{2 \cdot C \cdot \ln \left( \frac{U'_{1M}}{U''_{1M}} \right)}.$$

При условии, что  $R_{ш}$  отсутствует,

$$R = R_n / K_T^2,$$

тогда

$$R = \frac{T \cdot K_T^2}{2 \cdot C \cdot \ln \left( \frac{U'_{1M}}{U''_{1M}} \right)}.$$

Емкость первичного конденсатора  $C_1$  составляет  $0,25 \cdot 10^{-6}$  Ф. Вторичная емкость системы зажигания  $C_2$  состоит из емкости вторичной обмотки катушки зажигания  $C_k$  и шунтирующей емкости  $C_{ш}$ . При неподключенном выводе высоковольтной обмотки  $C_2 = C_k$ .

Величина  $C_2$  для исследуемой катушки зажигания выбирается из таблицы 16.1.

Таблица 16.1 – Величина емкостей вторичных обмоток катушек зажигания

Тип катушки зажигания	В114	В115	В117А	В118
Емкость вторичной обмотки, нФ	$31 \pm 2$	$40 \pm 1$	$38 \pm 1$	$33 \pm 1,5$

## **16.2 Порядок выполнения работы**

- 1 Изучить СЭП КСИСЗ.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию распределителя зажигания на электромашинном агрегате.

### **Содержание отчета**

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения экспериментов и их описание.
- 4 Таблицы результатов экспериментов.
- 5 Выводы.



### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите преимущества, которыми обладает система зажигания с регулированием времени накопления энергии.
- 2 Объясните сущность регулирования времени накопления энергии.
- 3 Какие функции выполняет электронный коммутатор?
- 4 Объясните работу схемы электрической принципиальной системы зажигания.
- 5 Нарисуйте и объясните диаграммы электрических сигналов, действующих на различных участках схемы.

## **17 Лабораторная работа № 17. Исследование характеристик бесконтактной транзисторной системы зажигания**

### ***Цель работы***

- 1 Исследование характеристики максимального вторичного напряжения в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя  $U_{2m} = f(n)$ .
- 2 Исследование характеристики тока разрыва в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя  $I_p = f(n)$ .
- 3 Исследование характеристики изменения коэффициента заполнения импульса выходного тока в функции частоты вращения валика датчика-распределителя.
- 4 Исследование переходных процессов в системе зажигания  $i_1(t)$ ,  $U_2(t)$ .

### ***Состав оборудования***

- 1 Распределитель.
- 2 Катушка зажигания.
- 3 Коммутатор.
- 4 Комплексный стенд исследования систем зажигания (КСИСЗ).
- 5 Осциллограф.
- 6 Генератор прямоугольных импульсов.

### ***17.1 Краткие теоретические сведения***

Характерной особенностью бесконтактных транзисторных систем зажигания является то, что контактный датчик (контактный прерыватель) распределителя заменяется на бесконтактный магнитоэлектрический либо датчик на эффекте Холла. В рассматриваемой системе зажигания применен датчик на эффекте Холла. Кроме того, рассматриваемая система зажигания выполняет функцию регулирования времени накопления энергии в катушке зажигания.

В существующих контактных и бесконтактных системах зажигания с накоплением энергии в индуктивности время накопления энергии катушкой

зажигания определяется временем замкнутого состояния контактов или временем управляющего импульса датчика, которое обратно пропорционально частоте вращения его ротора (кулачка). Недостатком таких систем зажигания является то, что при малых частотах вращения время протекания тока через первичную обмотку катушки зажигания превышает время, необходимое для накопления энергии в индуктивности. Следствием этого являются низкий КПД системы, перегрев элементов системы, в первую очередь катушки зажигания, повышенный расход активных материалов.

Из графика потребляемой катушкой зажигания мощности, представленного на рисунке 17.1, видно, что энергия магнитного поля  $A_n$  определяется интегралом разности между полной мощностью  $i \cdot U_\delta$  и мощностью тепловых потерь в первичной обмотке и транзисторе.

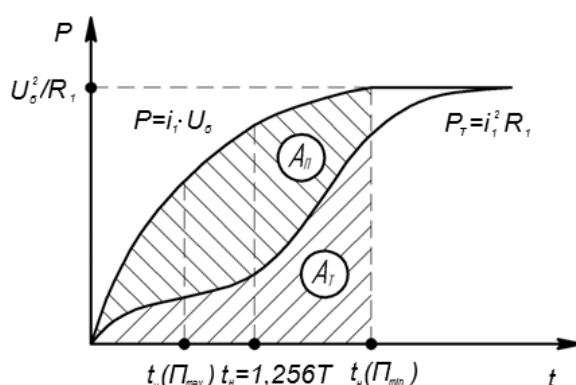


Рисунок 17.1 – Зависимости мощностей от времени накопления (полной  $P$  и потерь на тепло  $P_m$ )

Заштрихованные площади:  $A_n$  – энергия, накопленная в индуктивности;  $A_T$  – энергия потерь на тепло.

$$A_n = \int_{t=0}^{t-t_n} (U_\delta \cdot i_1 - R_1 \cdot i_1^2) dt = \frac{I_1^2 \cdot L_1}{2},$$

где  $i_1$  – мгновенное значение тока, протекающего по первичной обмотке катушки зажигания;

$U_\delta$  – напряжение на первичной обмотке катушки зажигания и коммутаторе;

$R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки катушки зажигания и выходной цепи коммутатора;

$L_1$  – индуктивность первичной обмотки катушки зажигания;

$T_n$  – время накопления энергии.

С точки зрения снижения потерь мощности на нагрев целесообразно, чтобы время накопления энергии было небольшим, т. к. по мере увеличения времени накопления все большая доля полной мощности расходуется на тепловые потери, снижая КПД системы. По истечении времени  $(3...4)T$  ( $T$  – постоянная времени первичной цепи) процесс накопления энергии почти заканчивается, после чего вся потребляемая от сети мощность преобразуется в тепло.

Величина вторичного напряжения зависит от запасенной в магнитном поле энергии

$$A_n = \frac{L_1 \cdot I_1^2}{2}.$$

С учетом выражения

$$I_1 = \frac{U_{\delta} \left( 1 - e^{-\frac{R_1 \cdot t_H}{L_1}} \right)}{R_1},$$

можно получить

$$A_n = \frac{L_1}{2} \left( \frac{U_{\delta}}{R_1} \right)^2 \left( 1 - 2 \cdot e^{-\frac{R_1 \cdot t_n}{L_1}} + e^{-\frac{2R_1 \cdot t_n}{L_1}} \right).$$

Если это уравнение продифференцировать по  $L_1$  и приравнять полученное выражение нулю, то определяется условие максимума запасенной энергии

$$t_n = 1,256 \frac{L_1}{R_1} = 1,256 \cdot T.$$

Таким образом, улучшение энергетических характеристик систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности может быть достигнуто за счет такого регулирования времени накопления энергии  $t_n$  при изменении частоты вращения двигателя, при котором оно будет приблизительно постоянным и иметь относительное значение, равное  $1,256T$ .

Регулирование в данном случае заключается в поддержании неизменным (нормированным) времени накопления энергии индуктивностью. Это означает, что по мере увеличения частоты вращения коэффициент заполнения импульса  $\gamma$  (отношение длительности импульса к периоду следования импульсов) будет постоянно увеличиваться.

Теоретически максимальная величина времени накопления ограничивается периодом следования искр при максимальной частоте вращения за вычетом длительности искрового разряда:

$$t_n = \left( 120 / n_y \cdot z \right) - (0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-3},$$

где  $n_y$  – частота вращения двигателя;

$z$  – число цилиндров двигателя.

В исследуемой системе зажигания достигается значительное снижение потребляемой мощности при обеспечении высоких выходных параметров (вторичного напряжения и энергии разряда) путем нормирования времени накоп-

ления энергии в магнитном поле катушки зажигания, стабилизации выходных параметров при отклонениях напряжения питания от номинального, ограничения тока разрыва при малых частотах вращения и, как следствие этого, исключение добавочного резистора.

### ***17.2 Порядок выполнения работы***

- 1 Изучить СЭП КСИСЗ.
- 2 Определить конфигурацию СЭП для проведения эксперимента.
- 3 Выполнить коммутацию распределителя зажигания на электромашинном агрегате.

### ***Содержание отчета***

- 1 Название работы, цель и применяемое оборудование.
- 2 Необходимые краткие теоретические сведения.
- 3 СЭП для проведения экспериментов и их описание.
- 4 Таблицы результатов экспериментов.
- 5 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Поясните принцип действия батарейной системы зажигания.
- 2 Какие факторы определяют величину вторичного напряжения?
- 3 Как изменяется вторичное напряжение от частоты вращения коленчатого вала двигателя?
- 4 Перечислите основные элементы батарейной системы зажигания и их названия.
- 5 Назовите основные недостатки батарейной системы зажигания с механическим прерывателем.

## **Список литературы**

- 1 Автомобили : учебник / А. В. Богатырев [и др.] ; под ред. А. В. Богатырева. – 3-е изд., стер. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 655 с.
- 2 **Кутьков, Г. М.** Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства : учебник / Г. М. Кутьков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 506 с.
- 3 **Набоких, В. А.** Диагностика электрооборудования автомобилей и тракторов : учеб. пособие / В. А. Набоких. – 2-е изд. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2015. – 288 с.
- 4 **Набоких, В. А.** Датчики автомобильных электронных систем управления и диагностического оборудования : учеб. пособие / В. А. Набоких. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2016. – 240 с.

5 **Набоких, В. А.** Испытания электрооборудования автомобилей и тракторов : учебник / В. А. Набоких. – М. : Академия, 2003. – 253 с.

6 **Набоких, В. А.** Эксплуатация и ремонт электрооборудования автомобилей и тракторов : учебник для вузов / В. А. Набоких. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2006. – 240 с.

7 **Соснин, Д. А.** Новейшие автомобильные электронные системы : учеб. пособие / Д. А. Соснин. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с. : ил.

8 **Набоких, В. А.** Аппараты систем зажигания: справочник / В. А. Набоких. – М. : Академия, 2009. – 320 с.

9 **Ходасевич, А. Г.** Справочник по устройству, применению и ремонту электронных приборов автомобилей: в 5 ч. / А. Г. Ходасевич, Т. И. Ходасевич. – М. : АНТЕЛКОМ, 2007. – Ч. 1, 3–5.