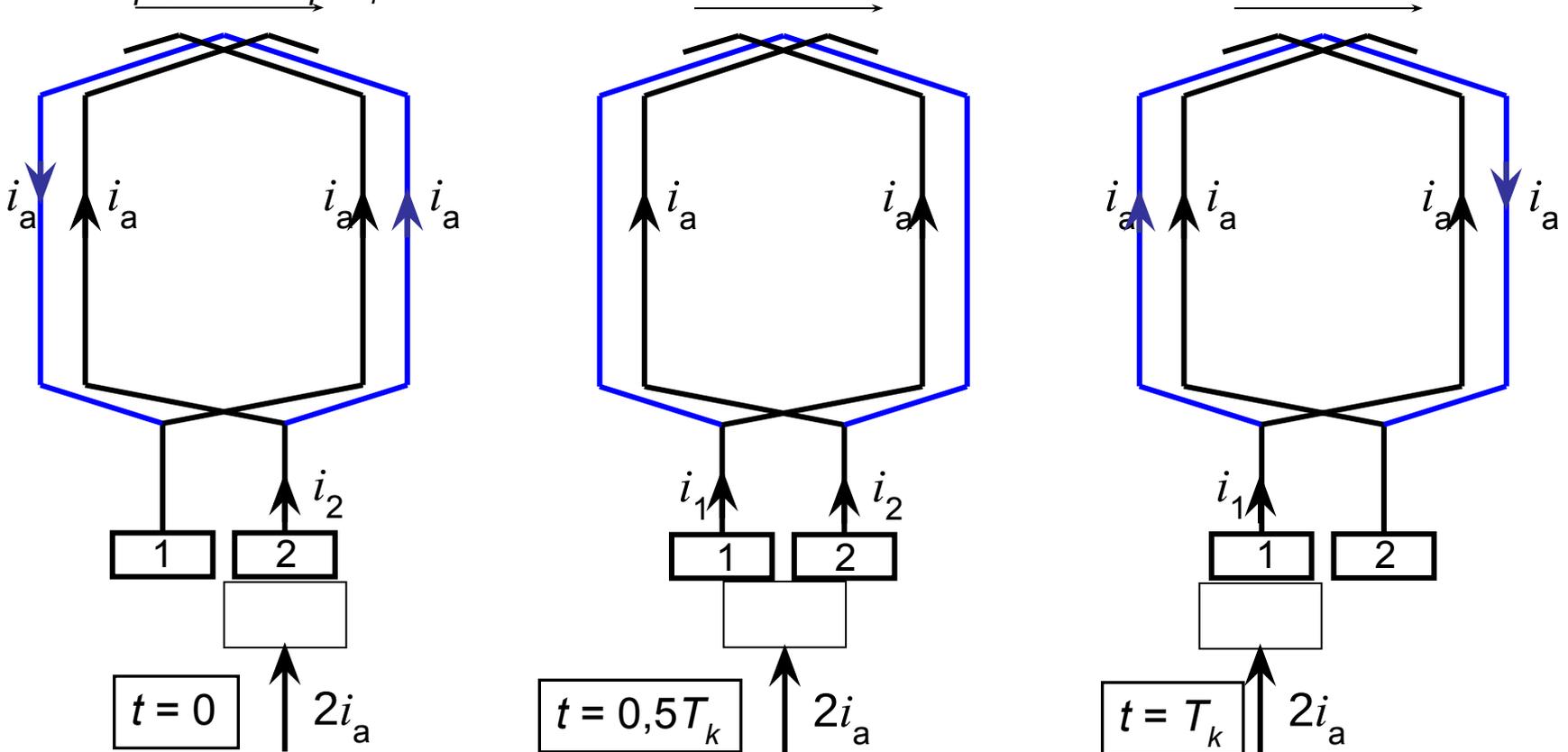


Коммутация в машинах постоянного тока

Обмотка якоря МПТ разделяется щетками на две (в волновых обмотках) или на несколько пар параллельных ветвей.

При работе МПТ обмотка якоря вращается относительно неподвижных щеток, поэтому секции обмотки якоря непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую.

Направление вращения



В процессе переключения секция замыкается щеткой накоротко, а ток секции изменяет свое направление на противоположное.

Коммутация в машинах постоянного тока

Процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с ним явления в короткозамкнутых секциях называют коммутацией машин постоянного тока.

Время в течении которого секция обмотки якоря накоротко замкнута щеткой называют периодом коммутации T .

Коммутация – сложный процесс, зависящий от большого числа факторов. Поэтому точный и строгий анализ этого явления чрезвычайно труден.

Существует несколько теорий коммутации, в основу которых положен ряд допущений, упрощающих анализ:

- 1) классическая теория коммутации Арнольда;
- 2) теория ступени малого тока О.Г. Вегнера;
- 3) энергетическая теория А.С. Курбасова;
- 4) теория оптимальной коммутации М.Ф. Карасева.

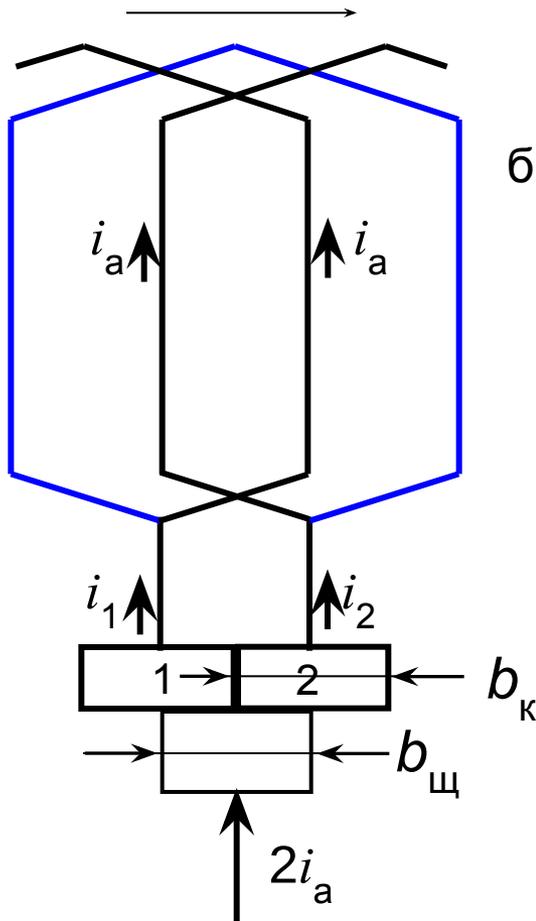
Классическая теория коммутации

В ее основу положены следующие допущения:

- 1) полное механическое совершенство КЩУ при любых скоростях вращения;
- 2) постоянство удельного сопротивления контакта между щеткой и коллектором и независимость его от плотности тока в контакте;
- 3) толщиной изоляционной прокладки между коллекторными пластинами можно пренебречь.

Коммутация в машинах постоянного тока

Предположим: а) ширина щетки $b_{щ}$ равна ширине коллекторной пластины b_k



$$b_{щ} = b_k;$$

б) сумма ЭДС, индуцируемых в короткозамкнутой секции равна нулю

$$\sum e = 0.$$

При этом изменение тока в к. з. секции будет определяться только контактными сопротивлениями между щеткой и коллекторными пластинами.

Этот случай носит название коммутации сопротивлением.

Предположим, что коммутация секции началась в момент времени $t = 0$, а закончится при $t = T$.

Тогда в момент времени t щетка перекрывает по ширине следующие участки коллекторных пластин:

$$b_1 = v_k t; \quad b_2 = v_k (T - t).$$

где v_k – окружная скорость коллектора.

Площадь касания щетки с ламелями 1 и 2:

$$S_1 = b_1 l_{щ}; \quad S_2 = b_2 l_{щ}.$$

Коммутация в машинах постоянного тока

Учитывая, что длина щетки $l_{щ} = S_{щ}/b_{щ}$, а ее ширина $b_{щ} = v_k T$, получим

$$S_1 = S_{щ} t / T; \quad S_2 = S_{щ} (T - t) / T.$$

Переходное сопротивление контакта обратно пропорционально площади контакта

$$r_1 = R_{щ} S_{щ} / S_1 = R_{щ} T / t,$$

$$r_2 = R_{щ} S_{щ} / S_2 = R_{щ} T / (T - t),$$

где $R_{щ}$ - сопротивление переходного слоя щетки.

По законам Кирхгофа: для к. з. контура

$$\sum e = i_2 r_2 - i_1 r_1 = 0, \quad (1)$$

для узлов $i_1 = i_a - i_c, \quad i_2 = i_a + i_c. \quad (2)$

Подставив (2) в (1) получим

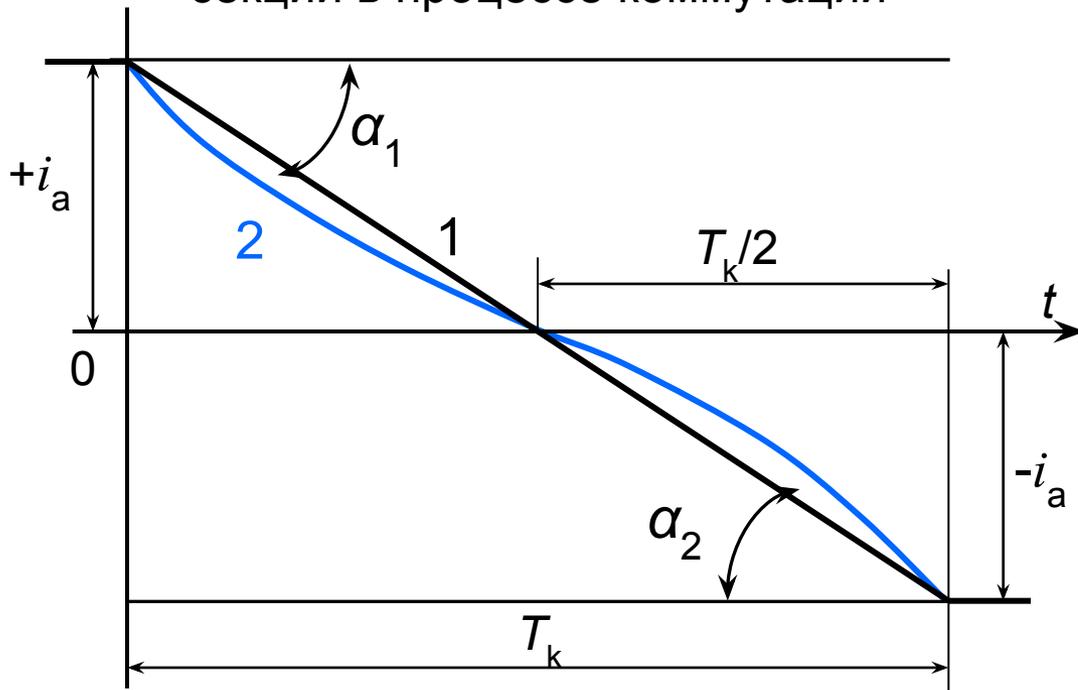
$$i_c = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} = i_a \left(1 - \frac{2t}{T}\right).$$

Ток в к. з. секции изменяется по линейной зависимости от t .

Такая коммутация называется прямолинейной.

Коммутация в машинах постоянного тока

Изменение тока в короткозамкнутой секции в процессе коммутации



При этом средняя плотность тока под щеткой:

$$j_{\text{ср}} = \frac{2i_a}{S_{\text{щ}}}$$

Плотность тока под набегающим краем щетки:

$$j_1 = \frac{2i_a}{S_{\text{щ}}} \operatorname{tg} \alpha_1 = j_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha_1$$

Под сбегающим краем щетки

$$j_2 = \frac{2i_a}{S_{\text{щ}}} \operatorname{tg} \alpha_2 = j_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha_2$$

При прямолинейной коммутации:

$$j_1 = j_2 = j_{\text{ср}} = \text{const}$$

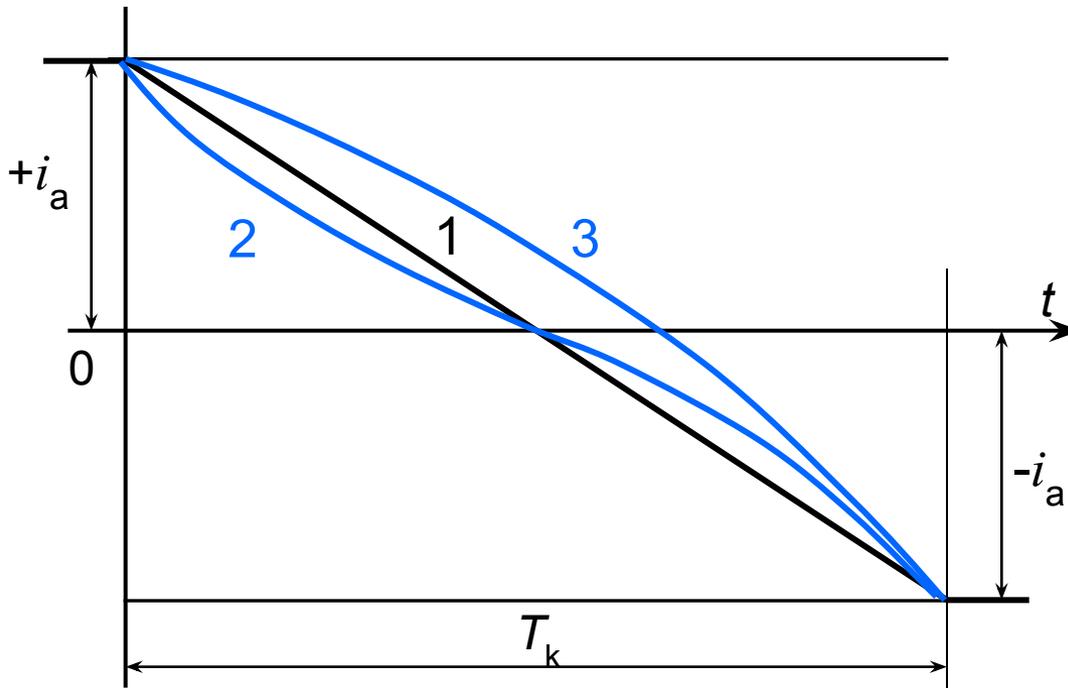
При учете сопротивления пеньшкоров и самой секции
(кривая 2)

$$i_c = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2 + R} = i_a \frac{1 - 2 \frac{t}{T}}{1 + \frac{R}{R_{\text{щ}}} \frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)}$$

Коммутация в машинах постоянного тока

Кроме того:

1) в процессе коммутации в короткозамкнутой секции индуцируется ЭДС самоиндукции $e_L = -L \frac{di}{dt}$ которая стремится воспрепятствовать изменению тока.



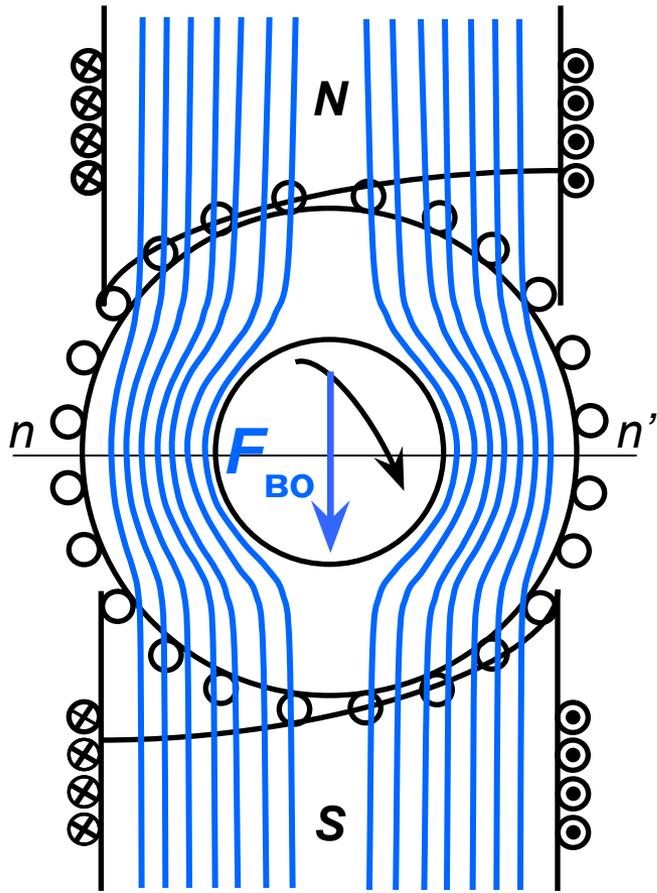
В результате происходит замедленная коммутация (кривая 3) — плотность тока под набегающим краем щетки j_1 — уменьшается, а под сбегающим краем j_2 — возрастает.

2) Если щетка перекрывает несколько коллекторных пластин, то в рассматриваемой секции будут наводиться ЭДС взаимоиндукции e_M , которые увеличивают суммарную e_L .

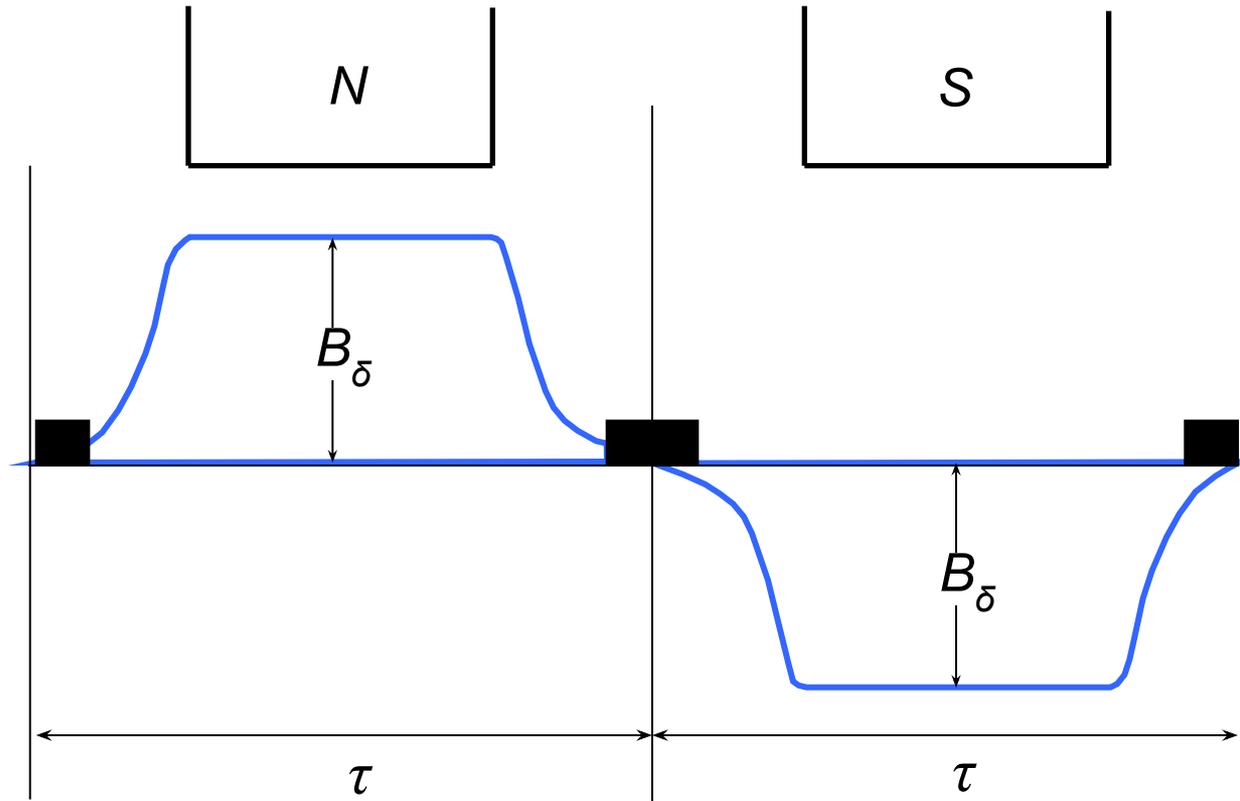
3) При вращении якоря в КЗ секции индуцируется ЭДС вращения e_k , при пересечении проводниками секции внешнего магнитного поля, которое может образоваться в зоне коммутации, как за счет реакции якоря, так и дополнительными полюсами.

Реакция якоря машины постоянного тока

В режиме холостого хода $I_{\text{я}}=0$ и в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения $F_{\text{во}}$



$$I_{\text{я}}=0$$

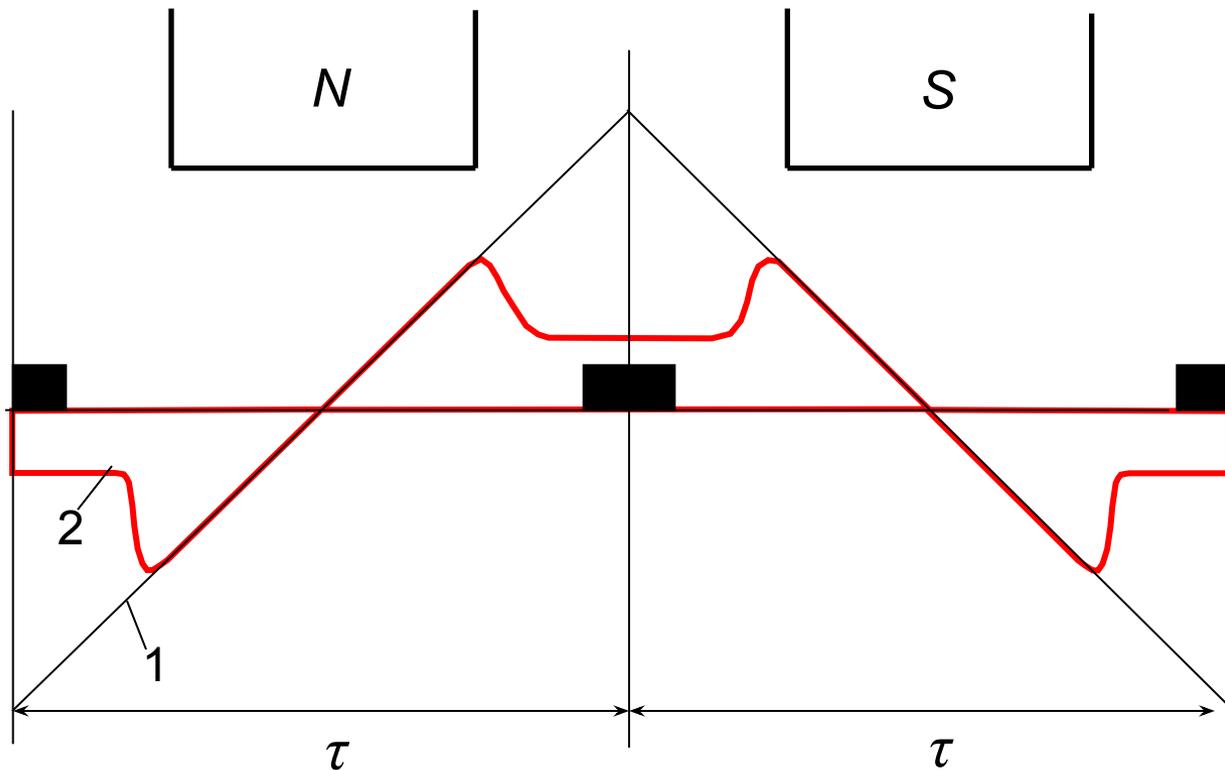
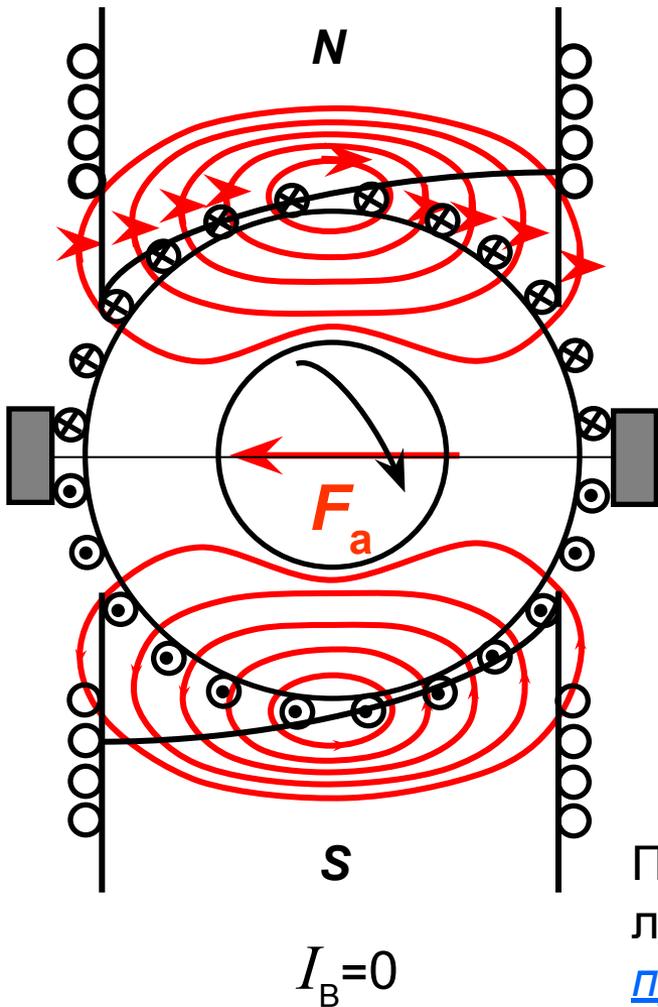


В этом случае магнитное поле симметрично относительно оси полюсов

Реакция якоря машины постоянного тока

Если машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток $I_{я}$, кот создает МДС якоря F_a .

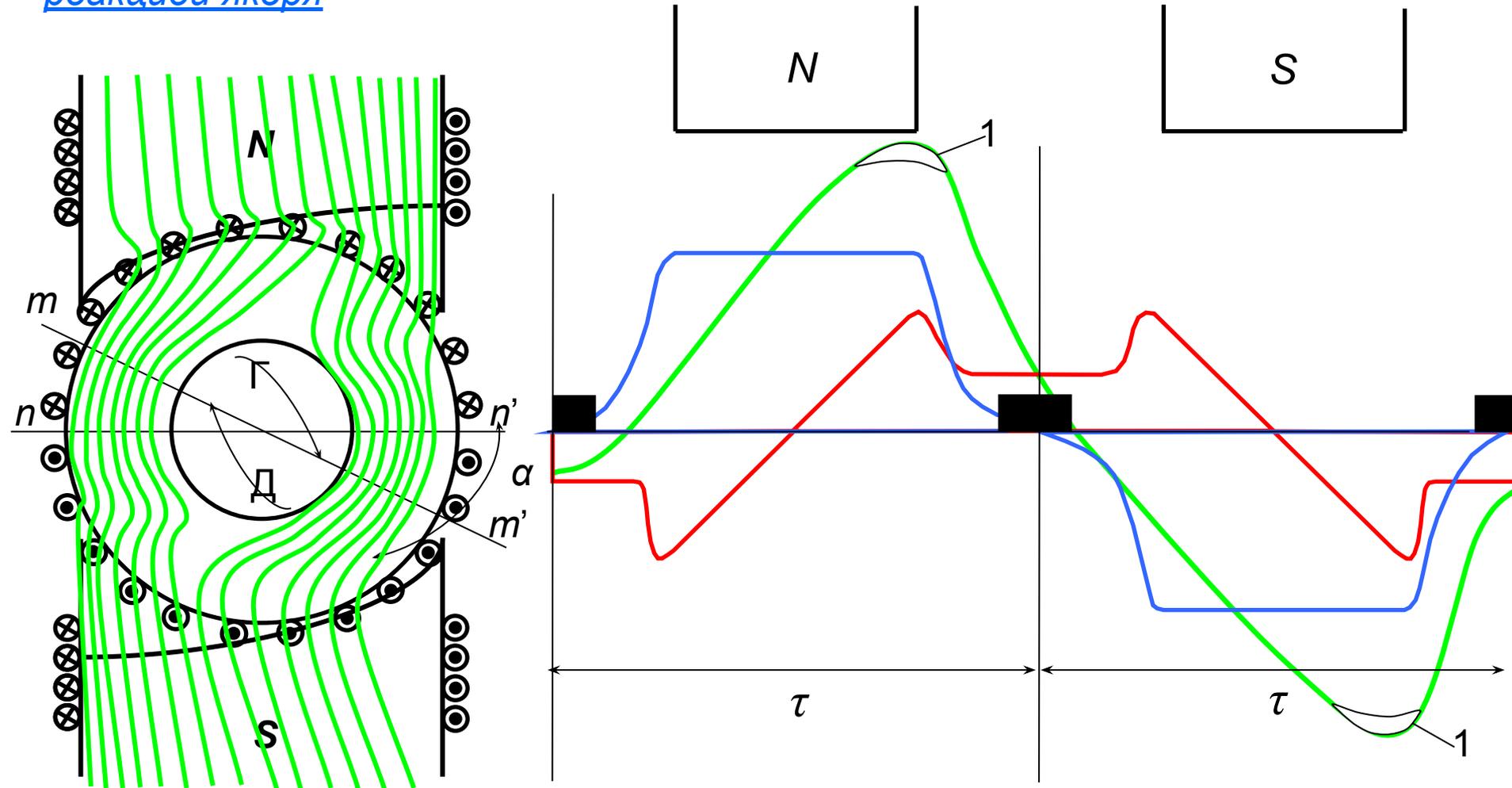
Допустим, что МДС обмотки возбуждения $F_{в0} = 0$, тогда магнитное поле МДС якоря F_a будет иметь вид:



Пространственное положение МДС якоря F_a определяется положением щеток и остаётся неизменным при вращении якоря

Реакция якоря машины постоянного тока

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря



Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.

Реакция якоря машины постоянного тока

Если магнитная система машины не насыщена, то реакция якоря будет лишь искажать результирующий магнитный поток Φ , не изменяя его значения: один край полюса и находящийся под ним зубцовый слой якоря, где МДС F_a и $F_{во}$ совпадают по направлению, будут подмагничиваться, а другой край полюса и соответствующий слой якоря, где МДС F_a и $F_{во}$ не совпадают по направлению, будут размагничиваться.

Результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на угол α . Т. е. физическая нейтраль $m m'$ смещается относительно геометрической нейтрали $n n'$ на угол α .

В режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а режиме двигателя – против вращения якоря.

Искажения результирующего поля неблагоприятно влияет на рабочие свойства МПТ:

1. сдвиг физической нейтрали ухудшает условия работы щеточного контакта, что может привести к усилению искрения на коллекторе;

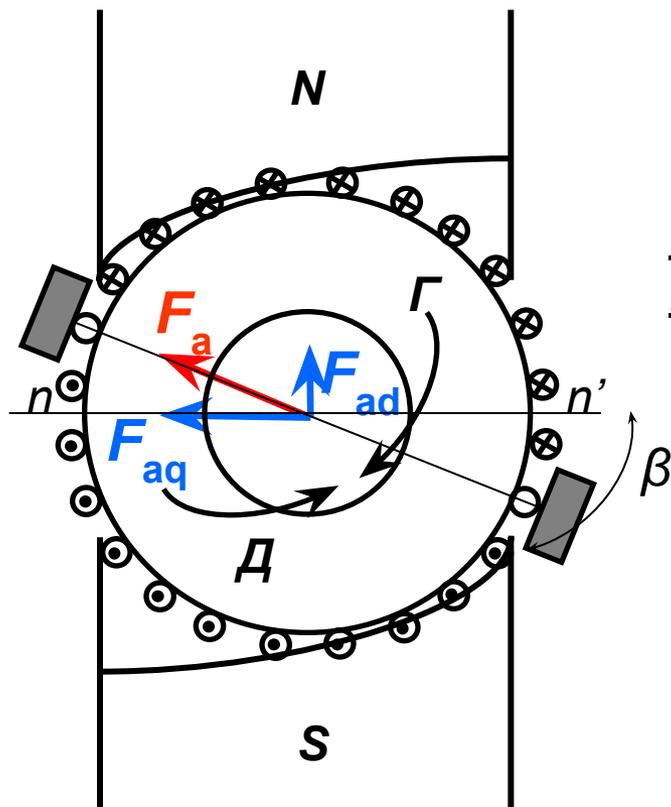
2. искажения поля приводит к неравномерному распределению магнитной индукции в зазоре, и, следовательно, к росту мгновенных значений ЭДС отдельных секций, что может привести к такому возрастанию напряжений между коллекторными пластинами, при котором возможно возникновения электрической дуги на коллекторе.

Реакция якоря машины постоянного тока

Если магнитная система машины насыщена, то под влиянием реакции якоря подмагничивание одного края полюса и зубцового слоя якоря происходит в меньшей степени, чем размагничивание другого края полюса и зубцового слоя якоря.

При этом результирующий магнитный поток Φ уменьшается, т.е. реакция якоря в насыщенной машине размагничивает магнитную систему.

В результате у генераторов снижается ЭДС, а у двигателей – вращающий момент.



Влияние реакции якоря усиливается при смещении щеток с геометрической нейтрали, т. к. вместе со щетками смещается и вектор МДС якоря.

При этом МДС якоря F_a помимо поперечной составляющей $F_{aq} = F_a \cos\beta$ приобретает и продольную составляющую $F_{ad} = F_a \sin\beta$, направленную по оси полюсов.

Реакция якоря машины постоянного тока

В генераторном режиме:

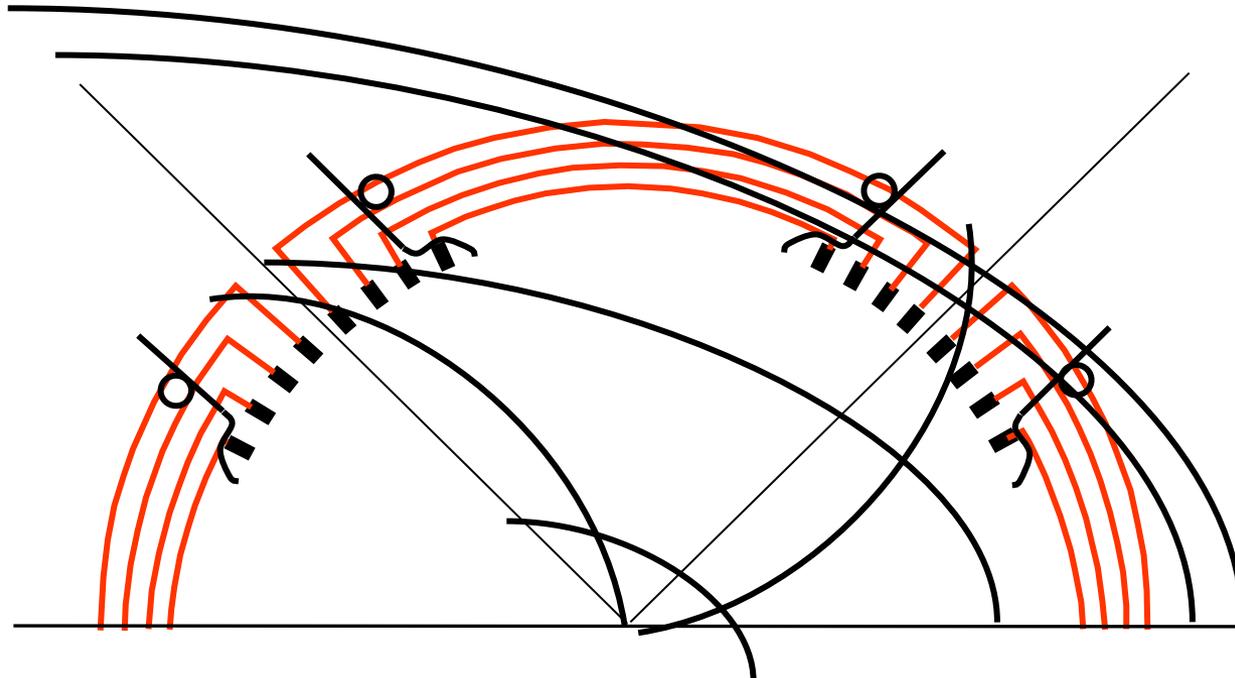
- при смещении щеток по направлению вращения якоря продольная составляющая F_{ad} размагничивает машину, т. е. ослабляет основной поток;
- при смещении щеток против направления вращения якоря продольная составляющая F_{ad} подмагничивает машину, т. е. усиливает основной поток, но при этом может явиться причиной искрения на коллекторе.

В двигательном режиме:

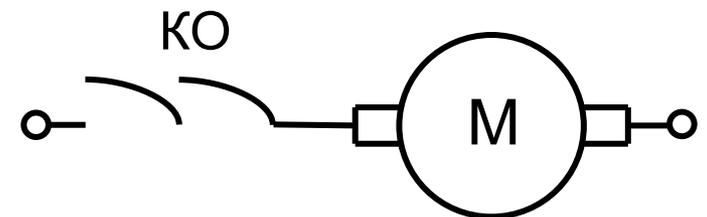
- смещение щеток по направлению вращения якоря подмагничивает машину;
- при смещении щеток против направления вращения продольная составляющая F_{ad} размагничивает машину.

Устранение вредного влияния реакции якоря

Наиболее эффективное средство – компенсационная обмотка (КО), которая укладывается в пазы полюсных наконечников.



Компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы ее МДС $F_{КО}$ была противоположна направлению МДС обмотки якоря F_a .



Такое включение КО обеспечивает автоматическую компенсацию МДС якоря при любой нагрузке машины.

Коммутация в машинах постоянного тока

ЭДС вращения e_k может изменять свой знак в зависимости от направления поля в зоне коммутации и направления вращения.

Ток в коммутируемой секции:

$$i_c = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} + \frac{e_L \pm e_k}{r_1 + r_2}$$

При этом может осуществляться:

4 – ускоренная коммутация

$$e_k > e_L \text{ (разные знаки)}$$

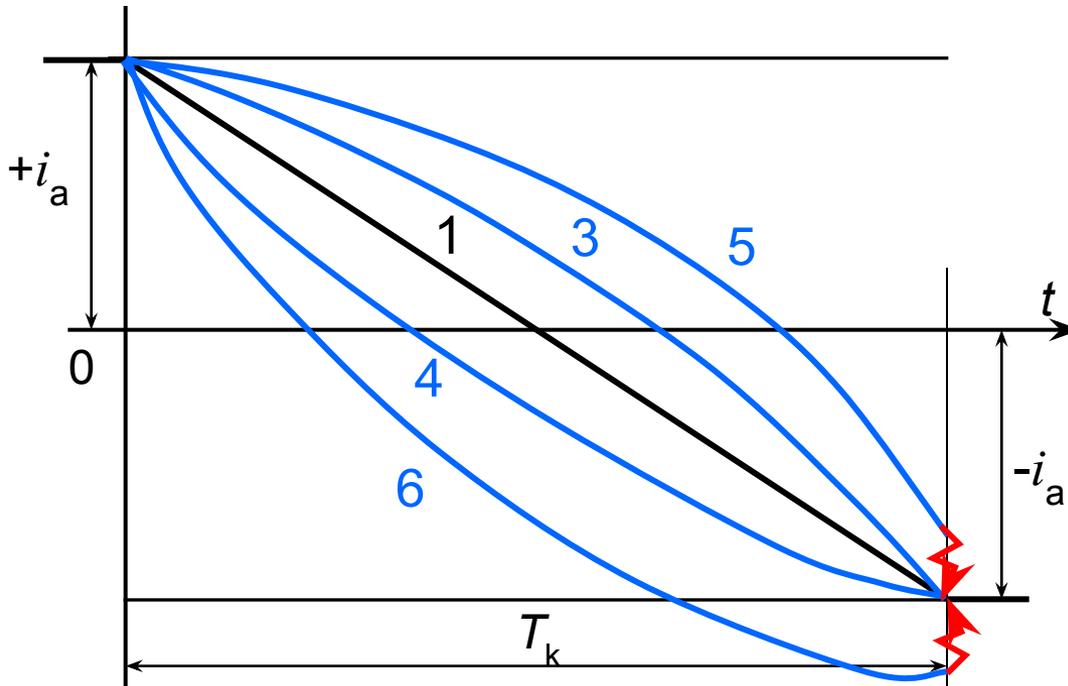
$$e_L - e_k < 0$$

5 – сильно замедленная коммутация

$$e_L + e_k \gg 0$$

6 – сильно ускоренная коммутация

$$e_L - e_k \ll 0$$



Коммутация под сбегающим краем щетки при $j_2 = 0$ обеспечивает безыскровое размыкание контура к. з. секции. При этом j_1 имеет повышенное значение, но оно в определенных границах, не представляет опасности, т.к. безыскровое замыкание контура осуществляется легче, чем размыкание.

Коммутация в машинах постоянного тока

Теория оптимальной коммутации

Согласно этой теории для безыскровой работы необходимо иметь в момент разрыва обесточенный сбегающий контакт, т.е.

$$i_c \rightarrow 0 \quad \text{и} \quad \frac{di_c}{dt} \rightarrow 0$$

При этом набегающий край щетки работает при больших плотностях тока и имеет характеристику (ВАХ) близкую к $\Delta U = \text{const}$, а сбегающий край, работающий при очень малых плотностях тока имеет ВАХ близкую к $R_e = \text{const}$.

Т.о. оптимальная коммутация – нормально ускоренная коммутация.

Причины искрения:

1) Электромагнитного характера – искрение возникает, если к. з. секция в момент размыкания имеет достаточный запас электромагнитной энергии $L i_c^2 / 2$ в результате воздействия e_L и e_k .

В результате разряда этой энергии возникает искрение на сбегающем крае щетки.

Искрение на набегающем крае щетки возникает при резко ускоренной коммутации, при значительном преобладании e_k и больших плотностях тока j_1 .

Коммутация в машинах постоянного тока

Причины искрения:

2) Потенциального характера – при *неравномерном распределении индукции* в зазоре между некоторыми соседними коллекторными пластинами возможно появление большого напряжения, которое определяется ЭДС, наводимой в секциях, присоединенных к этим пластинам

$$e = 2B_x l v_a$$

Предельные значения $U_{k \max}$: 25 ÷ 28 В – в ЭМ большой мощности;
30 ÷ 35 В – в ЭМ средней мощности;
50 ÷ 60 В – в ЭМ малой мощности.

3) Механического характера –

а) коллектор: – эксцентрическое расположение коллектора на валу;
– плохая балансировка вращающихся частей;
– неровности поверхности коллектора;
– выступающие края изолирующих прокладок между пластинами.

б) щеточный аппарат: – недостаточно точное закрепление щеткодержателя на щеточном пальце;
– неравномерное распределение пальцев по окружности коллектора;
– недостаточно жесткое крепление щеточной траверсы;
– неправильный выбор марки щетки.

Коммутация в машинах постоянного тока

Способы улучшения коммутации

1). Уменьшение ЭДС e_L – достигается уменьшением числа витков секции (стремятся к $W_c = 1$), снижением магнитной проводимости паза (пазы выполняют меньшими по высоте и большими по ширине)

2). Создание в зоне коммутации коммутирующего поля:

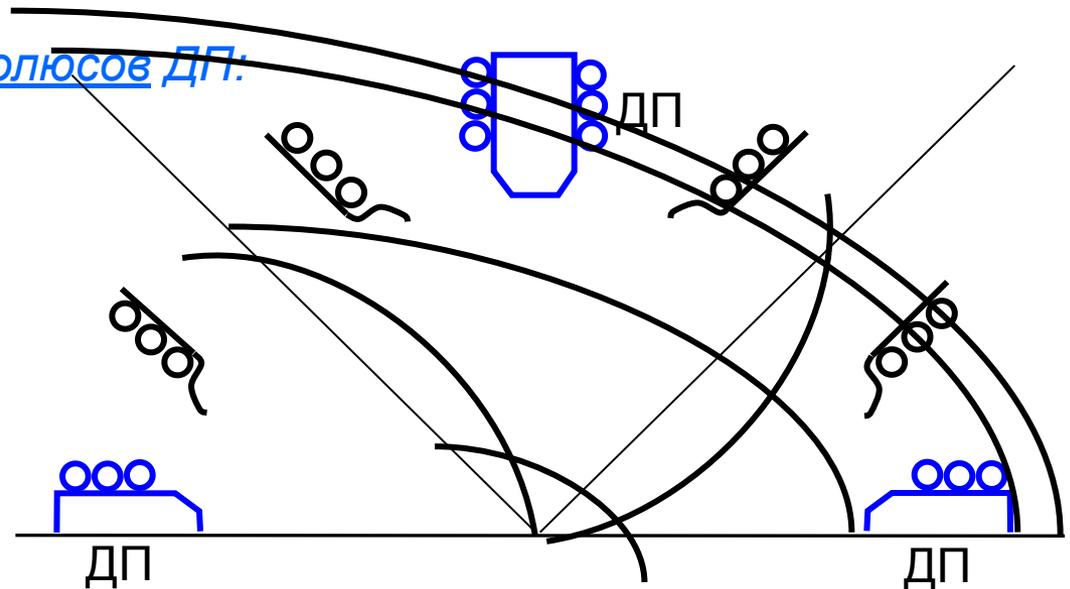
а) сдвигом щеток с геометрической нейтрали – в МПТ небольшой мощности, не имеющих ДП.

В генераторах щетки сдвигают по направлению вращения, в двигателях – против направления вращения.

Недостаток: требуемый угол сдвига изменяется в зависимости от нагрузки.

б) применением добавочных полюсов ДП:

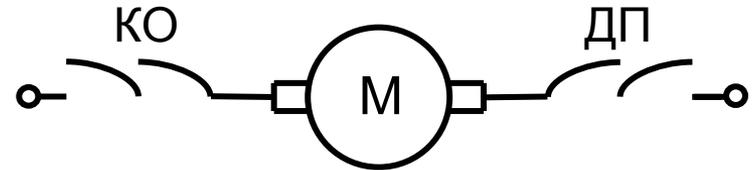
ДП устанавливаются между главными полюсами МПТ.



Коммутация в машинах постоянного тока

Способы улучшения коммутации

Обмотка ДП соединяется последовательно с обмоткой якоря.



При последовательном соединении обмоток магнитный поток ДП пропорционален току нагрузки и компенсация достигается при всех режимах работы МПТ.

Магнитная цепь ДП должна быть не насыщена.

Для этого: 1) увеличивают зазор под ДП по сравнению с зазором под ГП;

2) индукцию в сердечнике ДП выбирают не более 0,8 – 1,0 Тл при номинальной нагрузке.

в) применением компенсационной обмотки:

Компенсационная обмотка позволяет устранить искажение основного магнитного поля, вызванное реакцией якоря.

Проверка коммутации МПТ

В соответствии с ГОСТ 183-74 - [визуальная оценка](#).

Шкала из [пяти степеней](#): 1, $1\frac{1}{4}$, $1\frac{1}{2}$, 2 и 3 балла.

Степень искрения 1 : [Полное отсутствие искрения](#) – «темная» коммутация.

Степень искрения $1\frac{1}{4}$: [Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки](#). Почернение коллектора не происходит, следы нагара на щетках отсутствуют.

Степень искрения $1\frac{1}{2}$: [Слабое искрение под большей частью щетки](#). Могут появляться следы нагара на щетках и почернение коллектора, легко устранимые протиранием его поверхности.

Степень искрения 2 : [Искрение под всем краем щетки](#). Появление нагара на щетках и почернения коллектора, не устранимого протиранием поверхности.

Степень искрения 3 : [Значительное искрение под всем краем щетки](#) с крупными вылетающими искрами. Почернение коллектора, не устранимое протиранием, подгар и разрушение щеток.

Оценку степени искрения осуществляют [по сбегающему краю щетки](#).

Проверка коммутации МПТ

Допускаемая степень искрения зависит от условий работы машины, и указывается в стандартах или ТУ на конкретные типы ЭМ.

Если степень искрения не оговорена, то считается, что в нормальном режиме она не должна быть выше $1\frac{1}{2}$ балла.

Недостаток визуального метода – субъективность.

Инструментальные методы исследования коммутации

В качестве диагностических сигналов используются:

- видимое искрение (фотоэлектрические приборы);
- уровень ионизации околощеточного пространства;
- импульсы коммутационной реакции якоря (измерительная обмотка на главном полюсе);
- высокочастотные пульсации тока в цепи якоря или между бракетами одной полярности;
- высокочастотная составляющая напряжения на выводах якоря;
- измерение импульсов падения напряжения на сбегавшем крае щетки.

Инструментальные методы исследования коммутации

Наибольшее применение получили следующие методы:

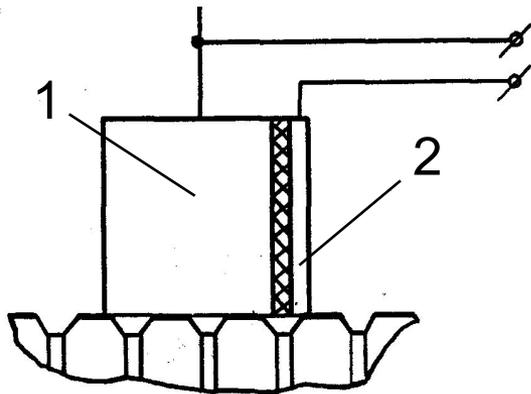
1) Регистрация видимого искрения с помощью фотоэлементов.

Преимущества – идентичность исследуемого сигнала стандарту, относительная простота построения устройства.

Недостатки – несоответствие интенсивности светового излучения износу, влияние атмосферных условий, зависимость от материалов контакта и зависимость показаний приборов от спектральной характеристики фотопреобразователей.

2) Измерение падения напряжения на сбегающем крае щетки

осуществляется с помощью - потенциальной щетки-датчика,
- бесконтактного емкостного датчика.



Контактная щетка-датчик (2) устанавливается на сбегающем крае щетки (1).

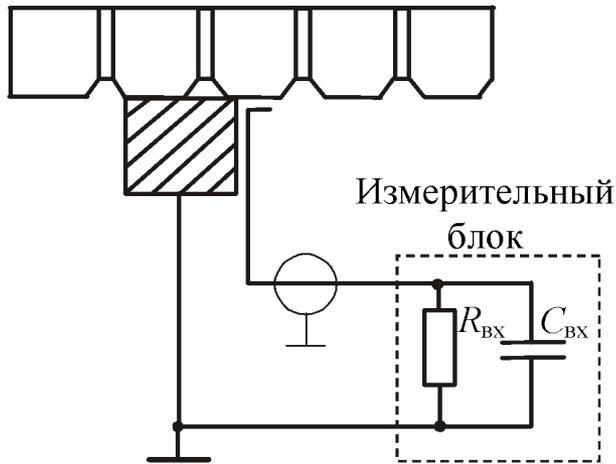
Щетка-датчик должна иметь ширину контактной поверхности не более промежутка между коллекторными пластинами.

Импульсы падения напряжения со щетки-датчика содержат наиболее достоверную информацию о процессе коммутации.

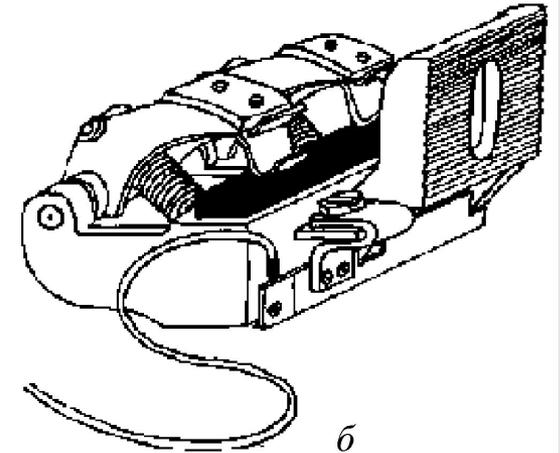
Недостаток: установка щетки-датчика и периодическая ее настройка требуют значительного времени и определенных навыков испытателя.

Инструментальные методы исследования коммутации

Бесконтактный емкостный преобразователь – металлическая пластина, устанавливаемая на сбегающем крае щетки.



а

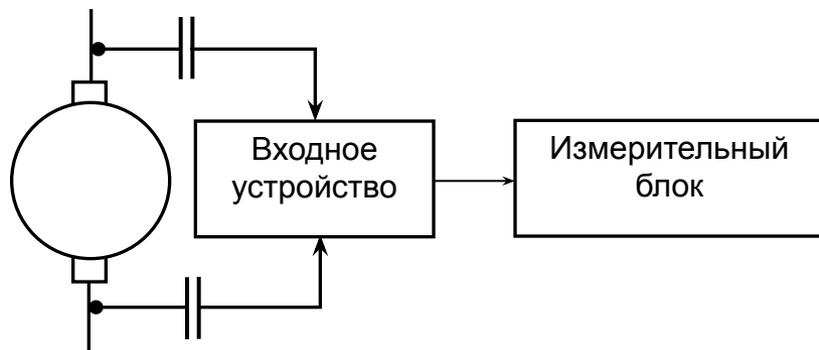


б

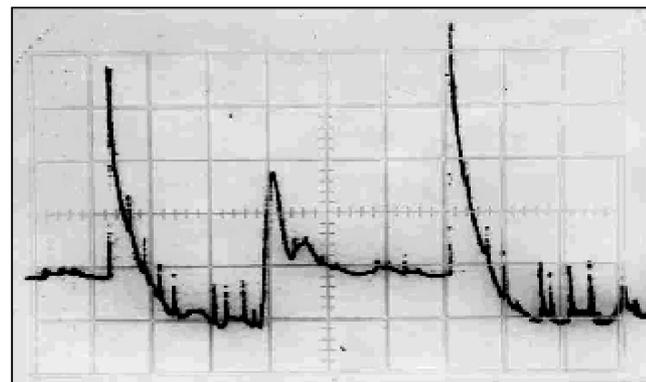
Обеспечивает значительное сокращение времени на подготовку ЭМ к испытаниям. Однако для оценки степени искрения всей машины в целом необходимо устанавливать датчики на всех bracketах ЭМ, что является достаточно трудоемкой операцией.

3) Для оценки интенсивности искрения при приемосдаточных испытаниях однотипных ЭМ наиболее целесообразно использовать сигнал с разнополярных щеток, содержащий информацию об искрении всей ЭМ в целом и не требующий установки каких-либо первичных преобразователей.

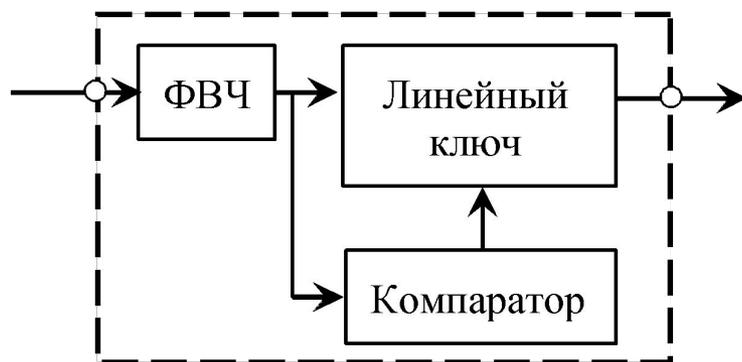
Использование сигнала с разнополярных щеток для оценки интенсивности искрения щеток



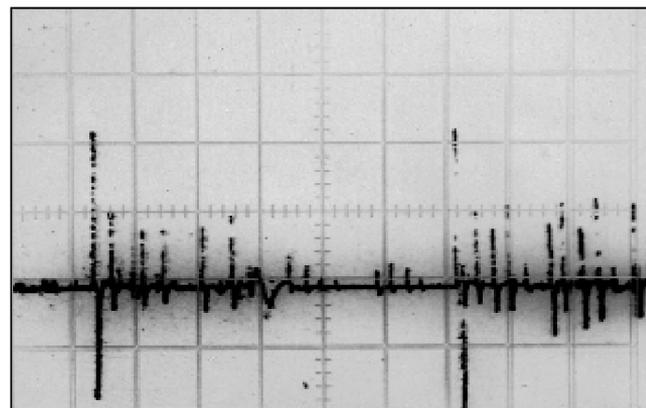
Функциональная схема приборов контроля коммутации



Осциллограммы напряжения на разнополярных щетках при уровне искрения $1\frac{1}{2}$ балла



Входное устройство прибора ИИ-РП

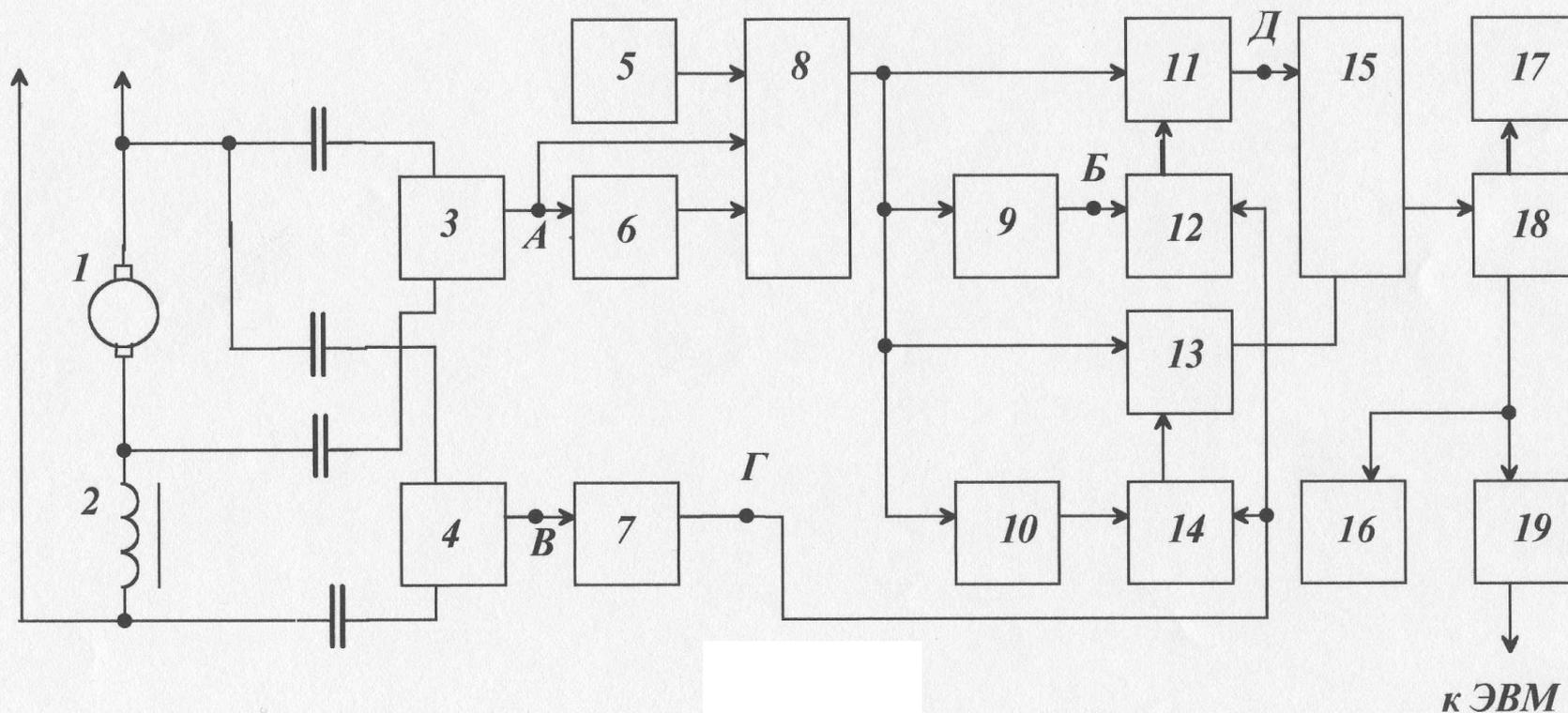


Осциллограммы напряжения на выходе ФВЧ при уровне искрения $1\frac{1}{2}$ балла



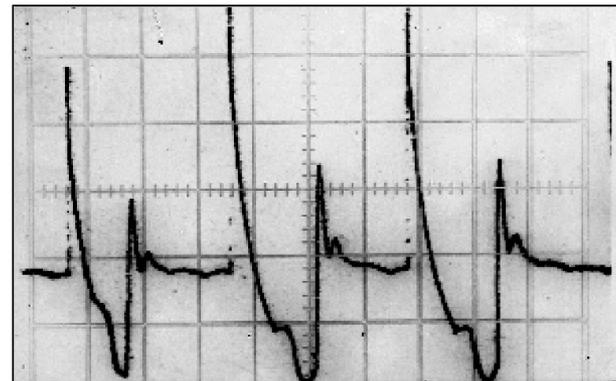
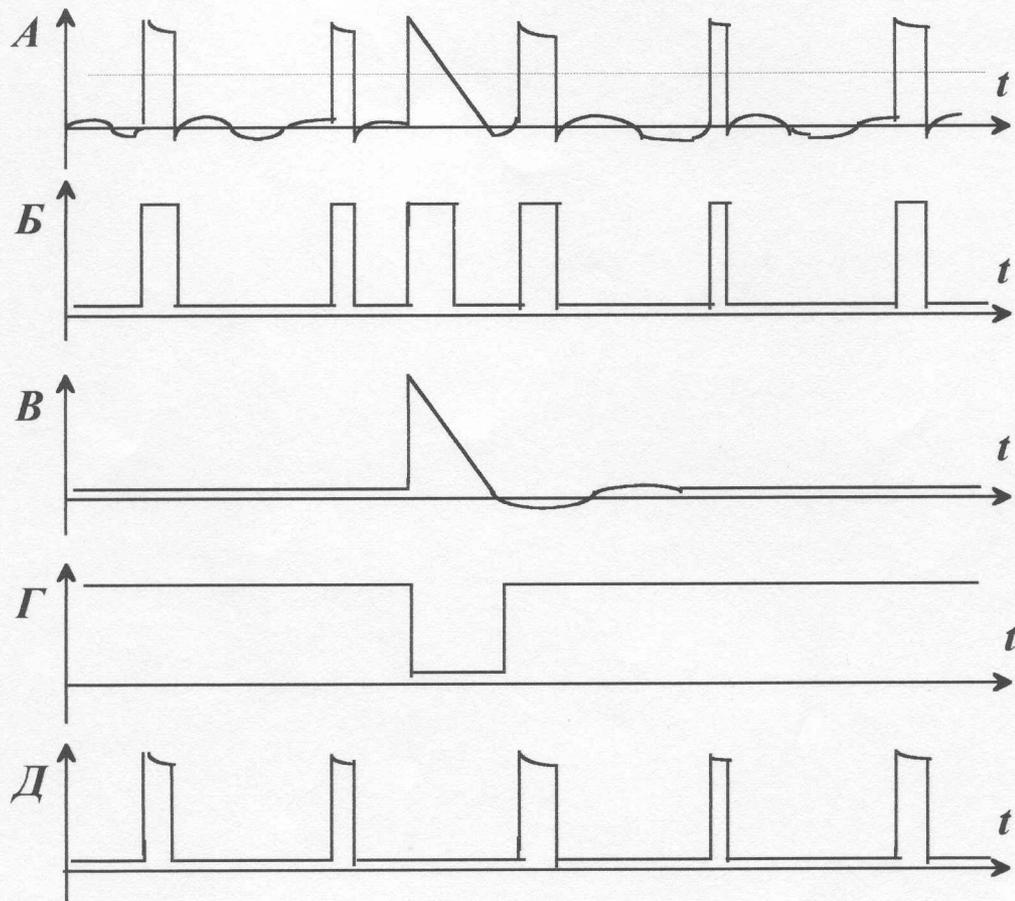
Прибор контроля качества коммутации по сигналу с разнополярных щеток ПКК-5

Функциональная схема прибора ПКК-5

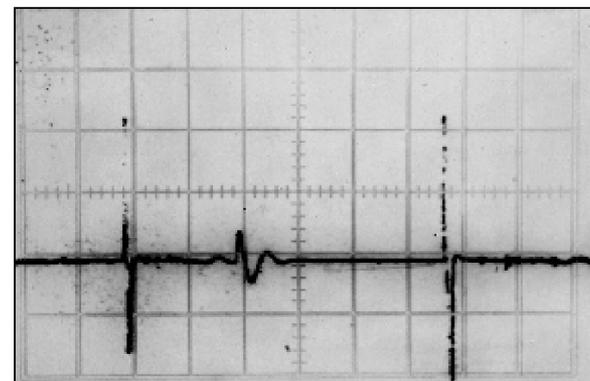


Прибор контроля качества коммутации ПКК-5

Временные диаграммы работы входного устройства

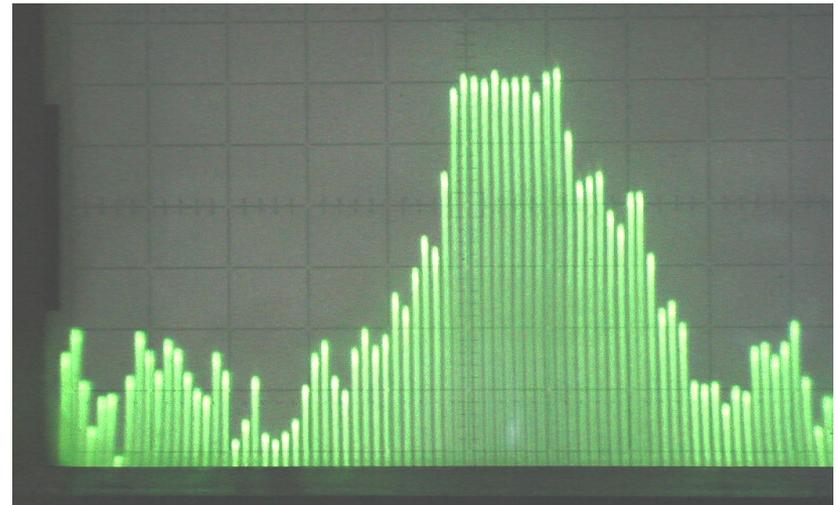
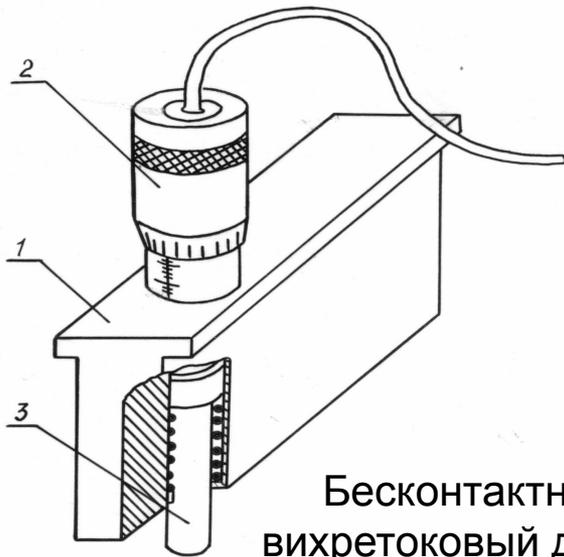
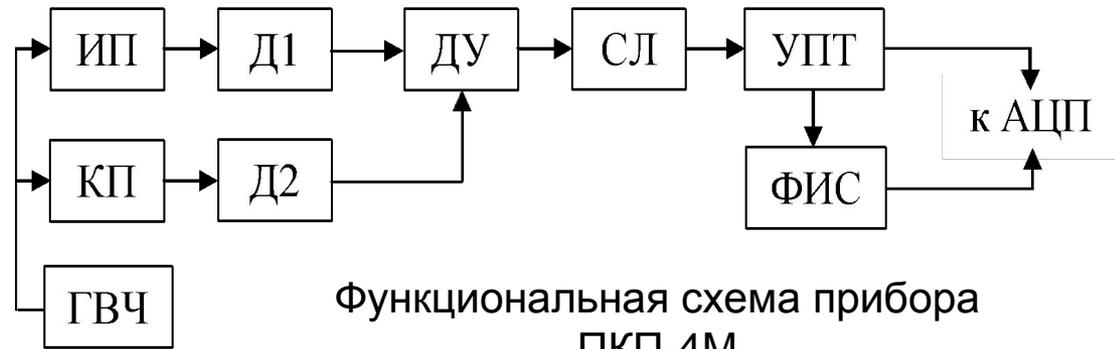


Осциллограммы напряжения на шинах питания



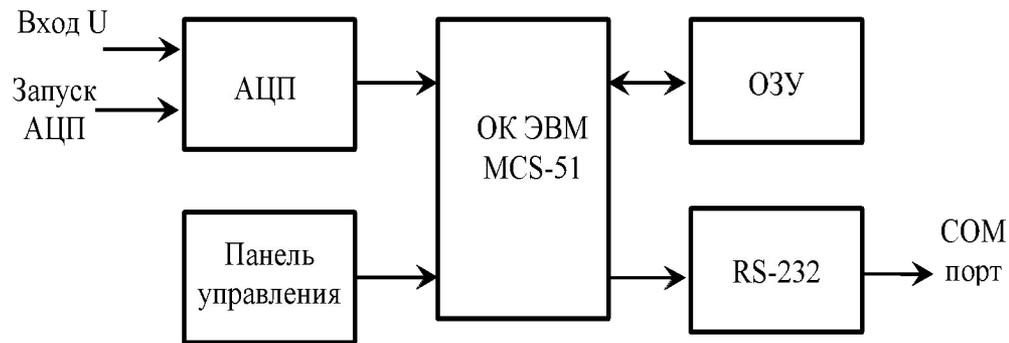
Осциллограммы напряжения на выходе ФВЧ2

Прибор контроля профиля коллектора тяговых электродвигателей ПКП-4М



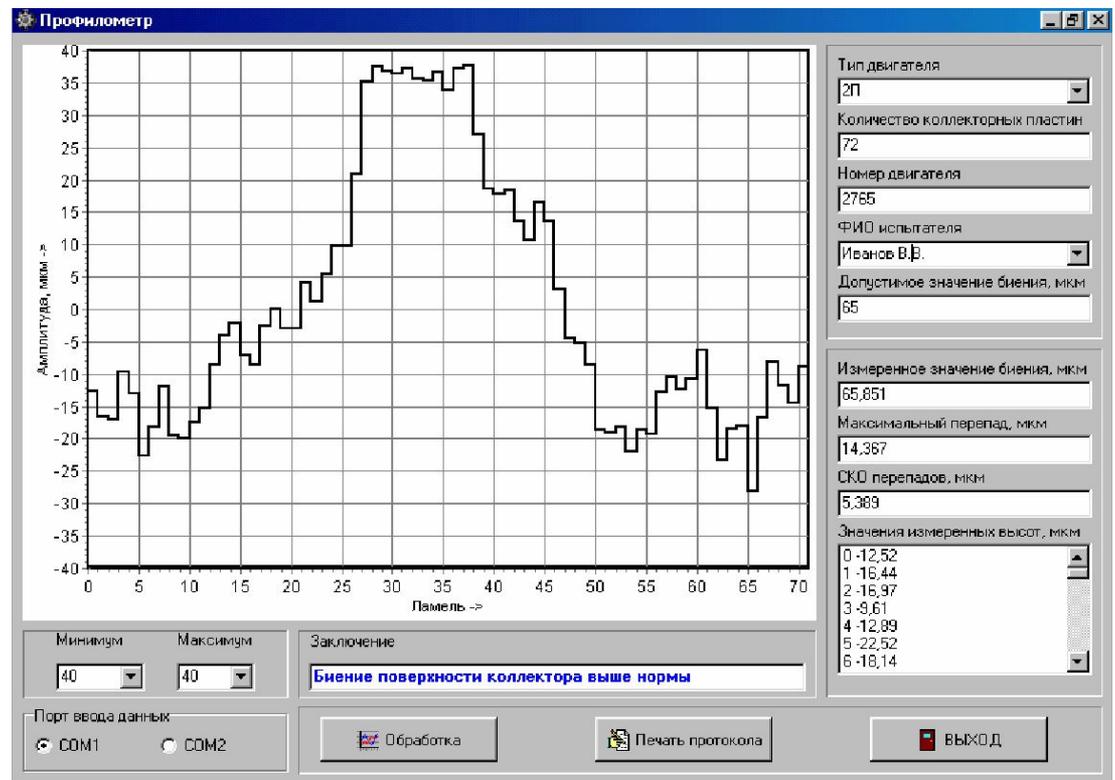
Профилограмма коллектора МПТ серии 2П

Прибор контроля профиля коллектора тяговых электродвигателей ПКП-4М

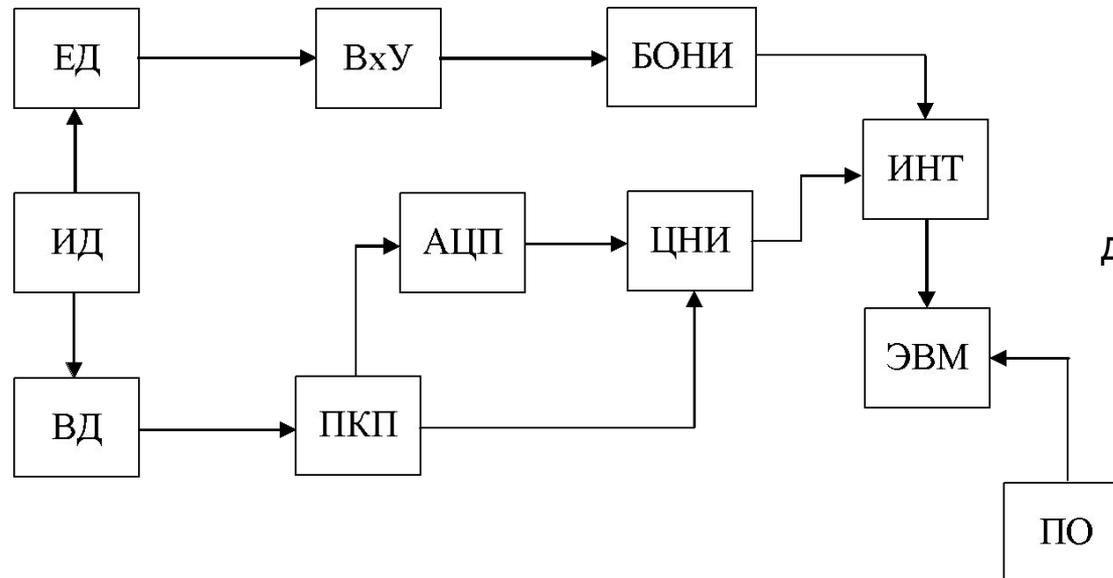


Структурная схема цифрового накопителя информации

Экран программного обеспечения прибора ПКП-4М



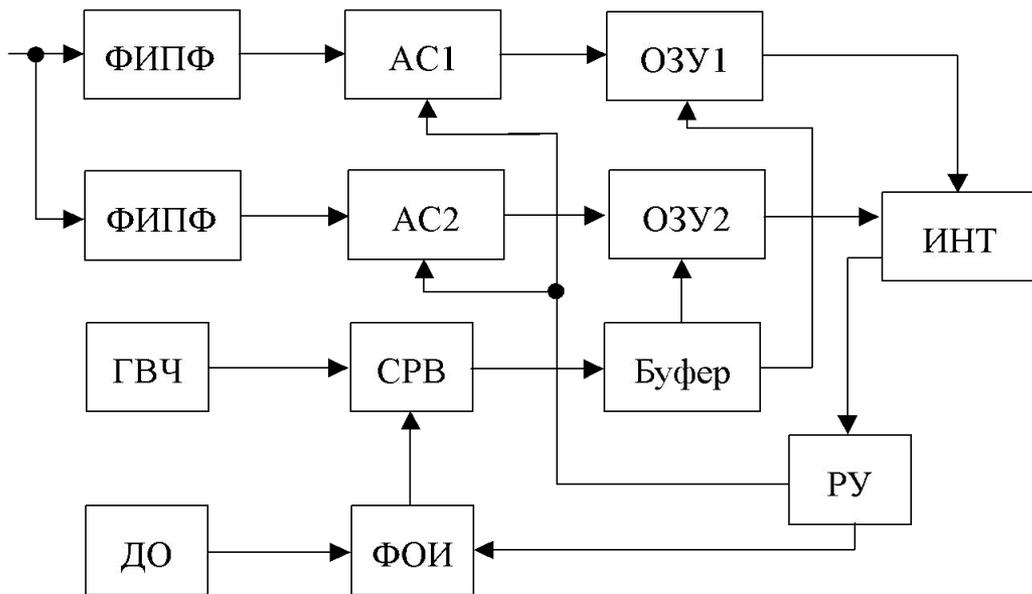
Диагностическая система контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД



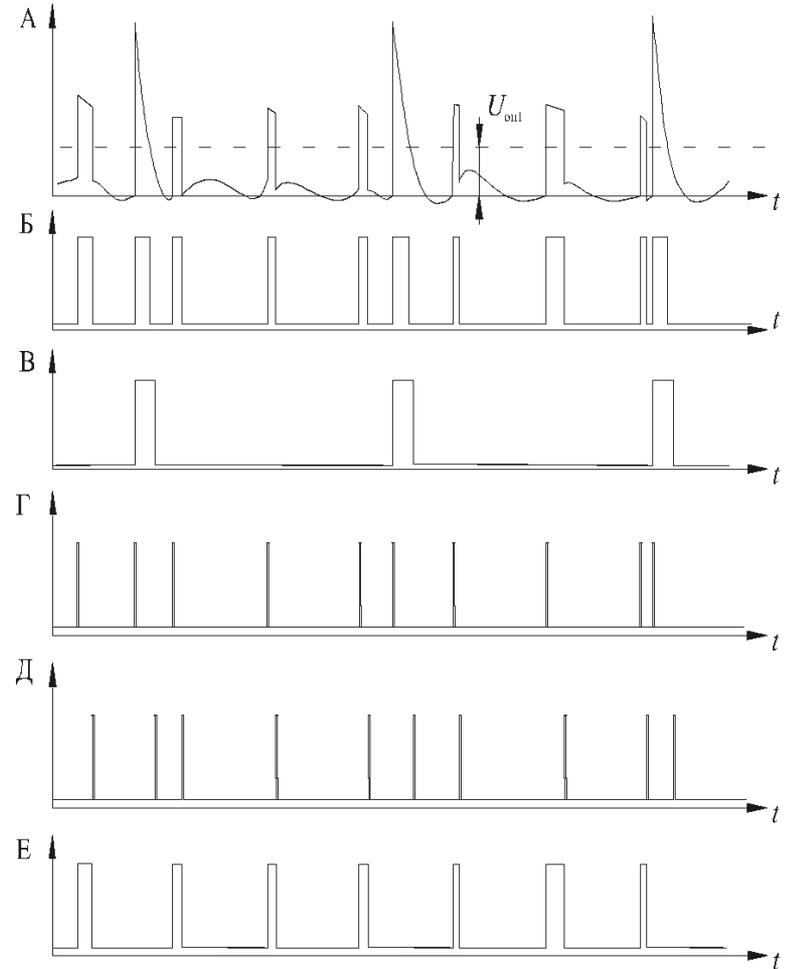
Функциональная схема
диагностической системы

Диагностическая система контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД

Блок обработки и накопления информации о распределении импульсов искрения



Временная диаграмма формирования информационных импульсов



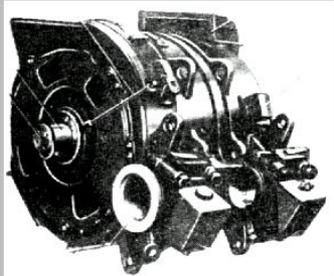
Диагностическая система контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД

Диагностическая система

Диагностическая система оценки технического состояния КЩУ ТЭД
ОмГУПС, кафедра ЭМ и ОЭ

Локомотивное депо Московка
Западно-Сибирская ж.д.

Испытуемый ТЭД



Тип двигателя
ТЛ-2К1

Номер двигателя
691

Условия испытаний
Часовой режим

Фамилия испытателя
Максимов В.Е.

База данных

Протокол

Выход

Профиль коллектора

Искрение щеток

Система | Профиль коллектора | Искрение щеток | Диагностирование КЩУ ТЭД | База данных | Протокол испытаний | Настройки системы

Экран диагностической системы
в режиме «Система»

Диагностическая система

Искрение щеток ТЭД

Распределение длительностей импульсов искрения по коллектору



Длительность, мкс

Номер ламели

Гистограмма распределения длительностей импульсов искрения



Количество импульсов

Длительность, мкс

Измерение

Главное меню

Тип двигателя
ТЛ-2К1

Номер двигателя
691

Дата испытания
17.01.2002

Испытатель
Максимов В.Е.

Условия испытаний

I_a , А
480

n вр./мин
798

I п/о, А
+30

Диагностические параметры

$\bar{\tau}$, мкс
16,62

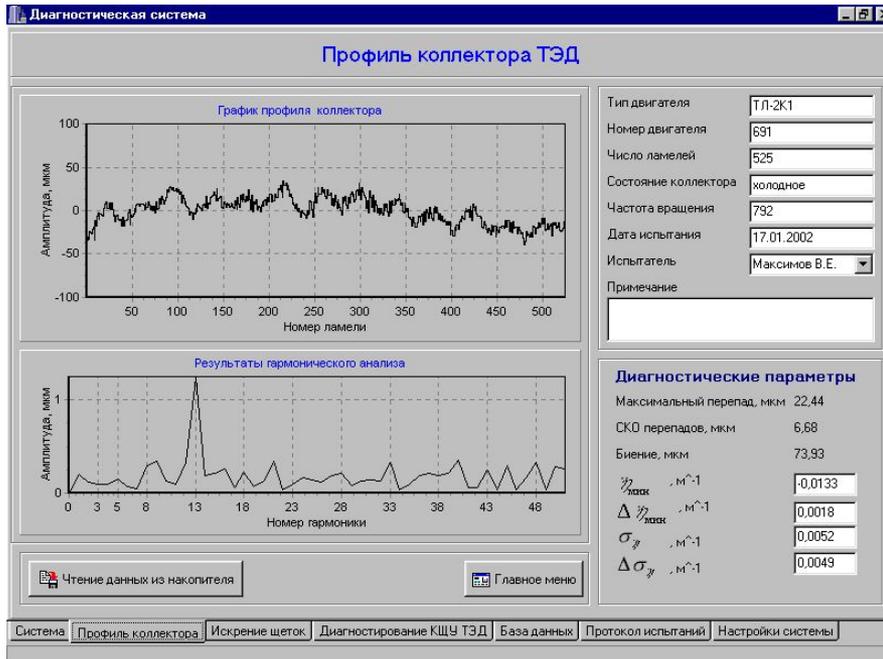
$N - \bar{\tau}^2$, мкс²
40089,12

τ_m , мкс
53,82

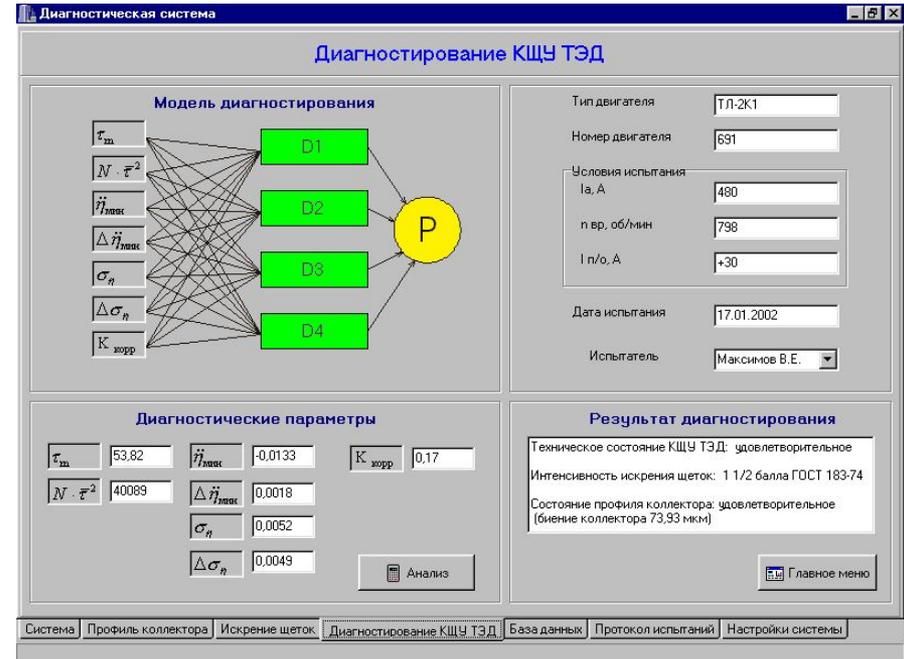
Система | Профиль коллектора | Искрение щеток | Диагностирование КЩУ ТЭД | База данных | Протокол испытаний | Настройки системы

Экран диагностической системы
в режиме «Искрение щеток»

Диагностическая система контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД



Экран диагностической системы в режиме «Профиль коллектора»

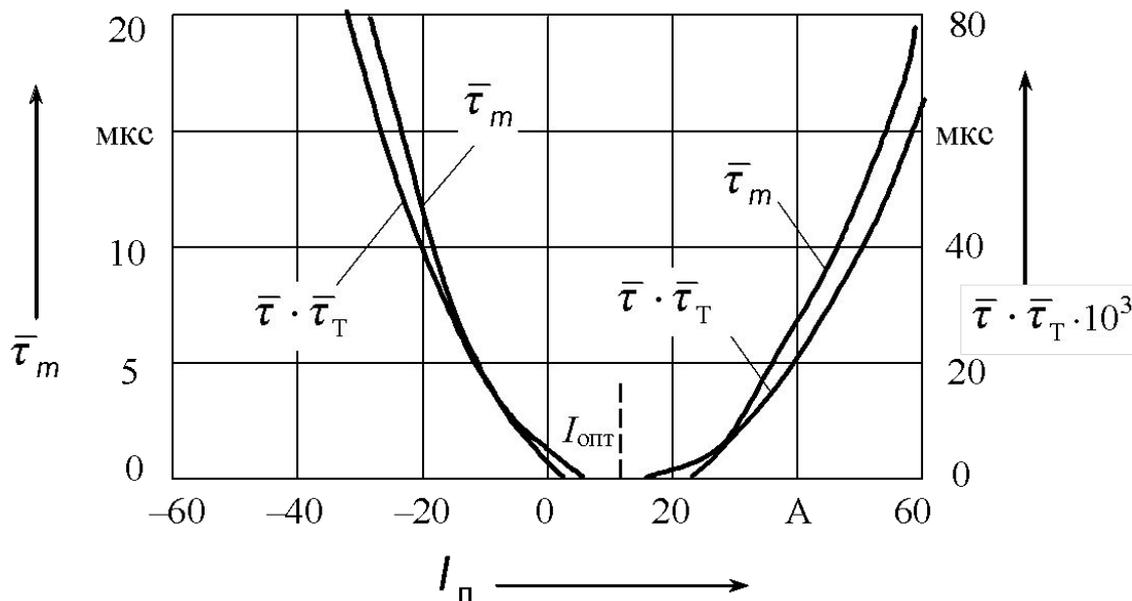


Экран диагностической системы в режиме «Диагностирование»

Диагностическая система контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД

Методика оптимальной настройки дополнительных полюсов

U-образные зависимости диагностических параметров от тока подпитки для тяговых двигателей ТЛ-2К1



Уравнения регрессии процесса коммутации тягового двигателя ТЛ-2К

перекоммутация

$$\bar{\tau}_T \bar{\tau} = -34,6 + 21588 I_n^* + 10,1 P^* + 7,4 \bar{U}_{\text{МИН}} + 46,9 \sigma_{\text{Щ}} - 6088 I_n^* P^* - 357,8 I_n^* \bar{U}_{\text{МИН}} + 24789 I_n^* \sigma_{\text{Щ}};$$

недокоммутация

$$\bar{\tau}_T \bar{\tau} = -29,1 + 19454 I_n^* + 8,6 P^* + 7,4 \bar{U}_{\text{МИН}} - 45,3 \sigma_{\text{Щ}} - 547,9 I_n^* P^* - 3689 I_n^* \bar{U}_{\text{МИН}} + 23789 I_n^* \sigma_{\text{Щ}}.$$

Методика оптимальной настройки дополнительных полюсов

Определим значение тока подпитки из регрессионных уравнений:

перекоммутация

$$I_{\text{п}}^* = \frac{\bar{\tau}_T \bar{\tau} + 34,6 - 8,1P^* - 7,4I_{\text{мин}} + 46,9\sigma_{\text{п}}}{21588 - 6088P^* - 357,8I_{\text{мин}} + 24789\sigma_{\text{п}}};$$

недокоммутация

$$I_{\text{п}}^* = \frac{\bar{\tau}_T \bar{\tau} + 29,1 - 8,6P^* - 7,4I_{\text{мин}} + 45,3\sigma_{\text{п}}}{19454 - 547,9P^* - 368,9I_{\text{мин}} + 23789\sigma_{\text{п}}}.$$

Оптимальное значение коммутирующего потока

$$\Phi_{\text{копт}} = \frac{(1 \pm I_{\text{п}}^*)(\gamma F_{\text{д}} + F_{\text{к}}) - F_{\text{а}}}{\gamma R_{\delta 2} + R_{\delta 1}}$$

магнитное сопротивление

$$R'_{\delta 2} = R_{\sigma} \frac{F_{\text{д}} + F_{\text{к}} - F_{\text{а}} - \Phi_{\text{копт}} R_{\delta 1}}{\Phi_{\text{копт}} (R_{\sigma} + R_{\delta 1}) + F_{\text{а}} - F_{\text{к}}}$$

оптимальное значение зазора у станины

$$\delta'_2 = \frac{\mu_0 b_{\text{пд}} I_{\text{пд}} R'_{\delta 2}}{1 - k_{\text{кр}2 \text{ пд}} \mu_0 R'_{\delta 2}}$$