

МПС - СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

И. Я. РАНЬКИС

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ИМПУЛЬСНОГО  
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ТЯГОВОГО  
ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

( СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.435 - „ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРО-  
СНАБЖЕНИЕ Ж.Д. ТРАНСПОРТА“ )

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ДНЕПРОПЕТРОВСК  
1970

4270 а

НТБ  
ДНУЖТ

Днепропетровский институт инженеров  
железнодорожного транспорта

---

На правах рукописи

И.Я.РАНЬКИС

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ  
ИМПУЛЬСНОГО РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ТЯГОВОГО  
ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

( специальность 05.435 - "электрификация и электроснабже-  
ние ж.д. транспорта")

4270<sub>н</sub>

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Днепропетровск  
1970

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре электрификации промышленности и транспорта Рижского политехнического института и в лаборатории электрооборудования Рижского филиала ВНИИ вагоностроения.

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
доцент Л.В.БИРЗНИЕК.

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники Украинской ССР, профессор, доктор технических наук С.А.ВОЛОТКОВСКИЙ,  
доцент, кандидат технических наук Н.Г.ВИСИН.

Ведущее предприятие – Рижский электромашиностроительный завод.

Автореферат разослан "11" *февраля* 1970 г.

Защита диссертации состоится " *марта* 1970 г.  
на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г.Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, ДИИТ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета ДИИТа

КЛИМОВСКИЙ Б.М.

НТБ  
ДНУЖТ

В связи с большими масштабами электрификации железных дорог в СССР важное значение приобретают вопросы совершенствования электрического подвижного состава (ЭПС). Одной из основных тенденций технического развития ЭПС является широкое применение рекуперативного торможения тягового привода.

Применение рекуперативного торможения позволяет значительно улучшить тягово-энергетические показатели электроподвижного состава за счет уменьшения удельного расхода электроэнергии. При этом особое значение рекуперативное торможение имеет на транспортных устройствах с автономными источниками питания, как, например, на контактно-аккумуляторных электропоездах и электровозах. В этом случае применение рекуперативного торможения позволяет существенно улучшить зарядно-разрядный баланс аккумуляторной батареи и при неизменной емкости аккумуляторов увеличить радиус действия подвижной единицы.

Однако, поскольку условием рекуперации является превышение уровня суммарной э.д.с. цепи тяговых двигателей над уровнем противо-э.д.с. приемника энергии, рекуперативное торможение без специальных повышающих "трансформаторов" постоянного тока возможно только в области сравнительно высоких скоростей ЭПС. Это особенно ограничивает применение рекуперативного торможения на аккумуляторном электроподвижном составе с невысокими скоростями движения.

Развитие полупроводниковой техники в настоящее время позволяет создать мощные преобразователи постоянного тока, повышающие уровень напряжения источника питания постоянного тока. Тем самым появляется возможность осуществления остановочного рекуперативного торможения электроподвижного состава без ограничения по минимальной скорости подвижной единицы.

Наиболее целесообразно при этом создание повышающих преобразователей постоянного тока на базе тиристорных прерывателей без явно выраженного звена переменного тока, т.е. осуществление системы импульсного рекуперативного торможения.

В настоящее время вопросам импульсного рекуперативного торможения электроподвижного состава уделяется большое

внимание как в СССР, так и за рубежом. Исследования по вопросам импульсного рекуперативного торможения проводятся в МЭИ под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора, д.т.н. И.С.Ефремова и профессоров, д.т.н. В.Е.Розенфельда и Л.М.Трахтмана, в Рижском филиале ВНИИ вагоностроения, в ЦНИИ МПС, Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта, в ЛИИЖТе и в ряде других научно-исследовательских учреждений.

Учитывая широко развернутые работы по созданию электроподвижного состава с тиристорными импульсными преобразователями, в настоящее время необходимо уделить особое внимание анализу режимов работы систем импульсного регулирования, в частности, режима рекуперативного торможения.

Целью диссертационной работы является аналитическое и экспериментальное исследование электромагнитных процессов в системе импульсного рекуперативного торможения тяговых двигателей постоянного тока последовательного возбуждения электроподвижного состава постоянного тока. В работе рассматривается случай, когда режим торможения осуществляется при помощи тиристорного прерывателя, включенного параллельно цепи тяговых двигателей.

Исследование электромагнитных процессов предусматривается в двух основных режимах работы такой системы импульсного торможения: в области низких скоростей подвижной единицы (при полном поле возбуждения тягового двигателя) и в области высоких скоростей подвижной единицы (при ослабленном поле тягового двигателя).

В первом случае суммарная э.д.с. якорей цепи двигателей меньше противо - э.д.с. приемника энергии и режим рекуперации осуществляется за счет электромагнитной энергии, периодически накапливаемой в обмотках цепи двигателей.

Во втором случае суммарная э.д.с. якорей цепи двигателей может быть больше противо-э.д.с. приемника и для осуществления устойчивого режима рекуперативного торможения необходимо производить ослабление магнитного поля двигателей. В диссертационной работе рассматриваются две схемы ослабления

поля: при помощи активного сопротивления, включаемого параллельно последовательной обмотке возбуждения двигателя, и шунтирующего вентиля (так называемого диода Ферстера).

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В первой главе рассматривается обобщенная схема системы импульсного рекуперативного торможения и приводятся некоторые способы регулирования поля возбуждения тягового двигателя при рекуперативном торможении в области высоких скоростей ЭПС.

Показано, что в зависимости от схемы соединения тиристорных прерывателей и тяговых двигателей все системы можно разделить на

- 1) системы с общим однофазным или многофазным прерывателем и
- 2) системы с автономными прерывателями для каждой параллельной ветви тяговых двигателей (рис. I).

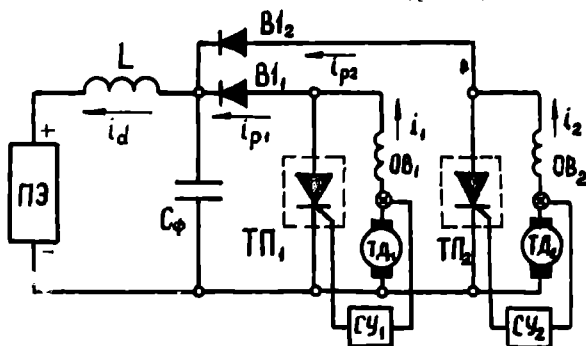


Рис. I. Принципиальная схема системы импульсного рекуперативного торможения с двумя автономными тиристорными прерывателями (ТП<sub>1</sub> и ТП<sub>2</sub>) для двух параллельных ветвей тяговых двигателей (ТД<sub>1</sub> и ТД<sub>2</sub>). ПЭ - приемник энергии; СУ<sub>1</sub> и СУ<sub>2</sub> - электронные системы управления прерывателями; L и C<sub>Ф</sub> - дроссель и конденсатор фильтра; В1<sub>1</sub> и В1<sub>2</sub> - разделительные вентили

Системы с автономными прерывателями имеют ряд преимуществ, из которых необходимо отметить следующие:

- а) возможность осуществления синхронизированной работы  $\alpha$  параллельных ветвей двигателей при одинаковом временном сдвиге переключений прерывателей и
- б) возможность регулирования тормозного тока каждой из параллельных ветвей и обеспечения тем самым равенства тормозных токов двигателей.

Первое позволяет в  $\alpha$  раз увеличить частоту поступления импульсов тока рекуперации в приемник по сравнению с частотой переключений прерывателей. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить вес и габариты сглаживающего фильтра на входе приемника энергии, который является одним из наиболее громоздких элементов системы.

Показано, что наиболее предпочтительно для принятой системы торможения с автономными прерывателями применение прерывателей, в которых запирающие тиристоры осуществляется подключением емкостного накопителя энергии. При этом наиболее целесообразно управление работой прерывателя осуществлять по широтно-импульсному принципу с неизменной частотой переключений прерывателя.

Широтно-импульсный принцип управления позволяет осуществлять:

- регулирование по среднему значению тормозного тока,
- синхронизацию работы параллельных автономных прерывателей и
- отстройку от помех, создаваемых работой преобразователей в линиях связи и локомотивной сигнализации.

В случае применения указанных прерывателей и широтно-импульсного принципа управления возможно создание преобразователя с минимальными весом и габаритами, что имеет существенное значение для моторвагонного подвижного состава.

В работе показано, что устойчивое рекуперативное торможение при полном поле и заданном среднем значении тормозного тока  $I_{ср}$  возможно только в определенном диапазоне ско-

ростей, ограниченном так называемой критической скоростью

$$v_{кр} = \frac{E_d + I_{ср}(R + \alpha R_d)}{\pi c \Phi_{ср}}, \quad (1)$$

при которой суммарная э.д.с. якорей цепи двигателей и напряжение на зажимах приемника примерно равны, и минимальной скоростью

$$v_{мин} = \frac{I_{ср} R}{\pi c \Phi_{ср}} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $R$  - активное сопротивление цепи двигателя,  $\pi$  - число последовательно соединенных двигателей,  $c$  - постоянная, учитывающая параметры двигателя и привода,  $E_d$  и  $R_d$  - э.д.с. и активное сопротивление приемника энергии и  $\Phi_{ср}$  - среднее значение магнитного потока при токе возбуждения, равном  $I_{ср}$

Торможение в области скоростей подвижной единицы, большей  $v_{кр}$ , необходимо производить при ослаблении поля возбуждения двигателя. В настоящее время известен ряд решений по осуществлению режима ослабления поля двигателя. Как показали исследования, наиболее простым решением является шунтирование последовательной обмотки возбуждения нерегулируемым или регулируемым активным сопротивлением  $R_{ш}$  (рис.2), а также полупроводниковым вентилем В2 (диодом Ферстера), которое и рассматривается в настоящей работе.

Вторая глава посвящена аналитическому исследованию электромагнитных процессов в цепи тягового двигателя. При этом анализ производится как для режима полного поля возбуждения, так и для режима ослабленного поля.



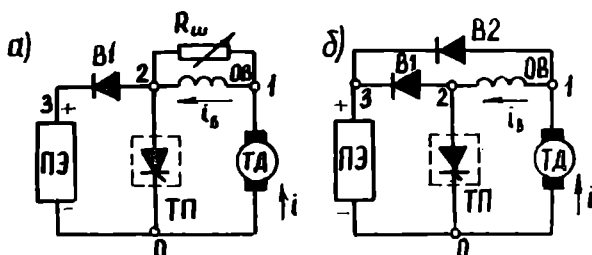


Рис. 2. Принципиальные схемы ослабления поля тягового двигателя (ТД). а - при шунтировании последовательной обмотки возбуждения (ОВ) активным сопротивлением; б - при шунтировании диодом Ферстера (B2).

ПЭ - приемник энергии; ТП - тиристорный пре-  
рыватель;

В1 - разделительный вентиль

Поставленная задача является весьма сложной, так как при ее решении необходим учет ряда сложных явлений, как, например, действие вихревых токов в массивном магнитопроводе двигателя. При этом точные методы аналитического расчета электромагнитных процессов приводят к громоздким математическим выражениям, непригодным для исследования. Поэтому учет действия вихревых токов в настоящей работе производится по упрощенной эквивалентной схеме замещения, где цепь обмотки главных полюсов представлена состоящей из магнитной индуктивности  $L_\mu$  (рис. 3), шунтированной активным сопротивлением  $R_{\omega\delta}$ , характеризующим потери в магнитопроводе от вихревых токов, активного сопротивления  $R_b$  обмотки возбуждения и индуктивности рассеяния  $L_s$

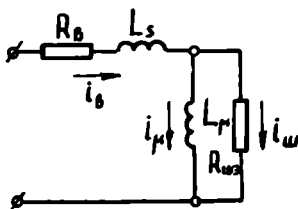


Рис.3. Упрощенная эквивалентная схема замещения цепи обмотки главных полюсов двигателя.

Значение  $L_\mu$  здесь находится по кривой намагничивания машины, а значение  $R_{wz}$  - исходя из известного соотношения

$$i_{\text{вхр}} = i_w w_c = w_c (i - i_\mu) = \lambda \Phi \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  - коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя,  $\Phi$  - мгновенное значение магнитного потока,  $w_c$  - число витков катушки возбуждения главного полюса,  $i$  -  $i_{\text{вхр}}$ ,  $i_\mu$  - полный, вихревой и намагничивающий токи двигателя.

Если принять, что в выражении (3)  $d\Phi/dt$  можно представить как

$$\frac{di_\mu}{dt} \cdot \frac{d\Phi}{di_\mu} \approx k\delta \frac{di_\mu}{dt} \quad (4)$$

а мгновенное значение магнитного потока  $\Phi$  приближенно принять равным  $\Phi_{cp}$ , то значение  $R_{wz}$  определится как

$$R_{\omega} = \frac{L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt}}{i_{\omega}} \approx \frac{L_{\mu} \omega_c}{\lambda \Phi_{cp} k \delta} \quad (5)$$

Здесь  $k$  — коэффициент линеаризации кривой намагничивания, а  $\delta$  — коэффициент, равный соотношению пульсационной и динамической магнитных проницаемостей ( $\delta \leq 1$ ).

С учетом эквивалентной схемы замещения в работе проведен анализ изменения мгновенных значений токов цепи двигателя при полном поле, откуда следует, что

1) при рабочих частотах 100 гц и более пульсации намагничивающего тока незначительны и приближенно можно представить намагничивающий ток сглаженным;

2) при этих частотах ток якоря двигателя в обоих основных рабочих режимах системы — короткого замыкания (К) зажимов двигателя и рекуперации (В) — меняется приблизительно линейно в функции времени;

3) удельные пульсации вихревого тока на один виток катушки возбуждения приближенно соответствуют пульсациям тока якоря.

На основании эквивалентной схемы замещения получено приближенное выражение для определения полного размаха пульсации тока якоря двигателя в режиме полного поля:

$$\Delta I = \frac{U(1-\delta)\delta T}{L_0 + k_{\delta} L_{\mu}} \quad (6)$$

где  $U$  — среднее значение напряжения на зажимах приемника энергии,  $\delta$  — относительная продолжительность включения прерывателя,  $T$  — период повторения импульсного процесса,  $L_0$  — суммарная индуктивность линейной части цепи двигателя (индуктивности обмотки якоря, рассеяния главного полюса и сглаживающего реактора),  $k_{\delta}$  — коэффициент демпфирования намагничивающего тока, определяемый как

$$K_d = \frac{(1-\delta)\delta T(L_o + L_\mu)(1-e^{\delta}) - \tau_b L_o(1-e^a)(1-e^b)}{(1-\delta)\delta T(L_o + L_\mu)(1-e^{\delta}) + \tau_b L_o(1-e^a)(1-e^b)} \quad , \quad (7)$$

где  $\tau_b = L_\mu / R_\omega$ ;  $a = -(L_o + L_\mu)\delta T / \tau_b L_o$ ;  $b = -(L_o + L_\mu)(1-\delta)T / \tau_b L_o$ ;  
 $\delta = -(L_o + L_\mu)T / \tau_b L_o$ .

Исследования показали, что значение коэффициента демпфирования зависит от частоты  $f$  переключений прерывателя, а также от величины  $\tau_b$  (рис.4). С ростом  $f$  демпфирующее действие вихревых токов усиливается и значения  $K_d$  стремятся к нулю. Таким образом, и значение индуктивности цепи двигателя с ростом частоты  $f$  убывает по закону, близкому к экспоненциальному, стремясь в пределе к значению  $L_o$ .

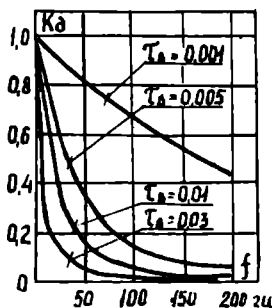


Рис.4. Зависимость значений коэффициента демпфирования намагничивающего тока от частоты переключений прерывателя при различных постоянных ( $\tau_b = L_\mu / R_\omega$ ) тягового двигателя.

Из рис.4 видно, что в области рабочих частот системы импульсного регулирования значения  $K_d$  для двигателей с

$\tau_b$  более 0,01 (мощные тяговые двигатели имеют  $\tau_b$  порядка 0,02 и более) близки к нулю. Таким образом, рассматривая работу мощных тяговых двигателей, можно приближенно считать, что индуктивность цепи двигателя примерно равна  $L_0$ , а индуктивность обмотки возбуждения  $L_b$  примерно равна индуктивности рассеяния  $L_s$ .

Несмотря на весьма упрощенное представление эквивалентной схемы замещения, экспериментальная проверка выражений (6) и (7), проведенная при частотах от 100 до 500 гц на различных тяговых двигателях, дала совпадение расчетных и экспериментальных результатов с ошибкой менее 20%.

В работе получены также выражения для определения мгновенных значений напряжения на обмотках якоря и возбуждения двигателя. При этом наибольшее экстремальное значение напряжения возникает на обмотке возбуждения двигателя:

$$U_{b\max} \approx -2 \frac{L_b}{L} U - I_{cp} R_b, \quad (8)$$

которое в ряде случаев может значительно превысить номинальное напряжение двигателя.

С целью уменьшения амплитуды напряжения на обмотке возбуждения в цепь якоря целесообразно включать реактор, увеличивающий общую индуктивность  $L$  цепи двигателя.

В работе получено уравнение для расчета регулировочной характеристики  $\gamma = f(\psi)$ , которое имеет следующий вид:

$$\gamma = 1 - \frac{E_a - I_{cp} R}{U} = 1 - \frac{cn \cdot b_{cp} \psi - I_{cp} R}{U} \quad (9)$$

Получены также выражения для расчета среднего значения напряжения на зажимах двигателя, а также действующего значения и коэффициента формы тока двигателя.

Показано, что при  $I_{cp} = \text{const}$  в ходе торможения и  $U = \text{const}$ , регулировочная характеристика представляет собой прямую с конечными координатами  $\gamma = 1$ ;  $V_{\min}$  и  $\gamma = 0$ ;  $V_{kp}$ .

Проведенные исследования электромагнитных процессов в цепи тягового двигателя в режиме ослабленного поля при обмотке возбуждения, шунтированной активным сопротивлением (рис.2), позволяют считать, что пульсации тока возбуждения в этой схеме значительно меньше пульсаций тока якоря. Так, при соотношении постоянной времени обмотки возбуждения ( $L_b/R_b$ ) и периода переключений прерывателя, большего 2, в диапазоне  $R_{ш}/R_b \leq 10$  пульсации тока возбуждения не превышают 0,2 от пульсаций  $\Delta I$  тока якоря двигателя.

Пульсации тока якоря двигателя в рассматриваемой схеме больше, чем в случае работы двигателя при полном поле, и определяются как

$$\Delta I = \frac{U(1-\gamma)\delta T - L_b(I_{bzo} - I_{bko})}{L_a}, \quad (10)$$

где  $I_{bzo}$ ,  $I_{bko}$  - значения тока возбуждения в начале режимов В и К, а  $L_a$  - индуктивность ветви якоря двигателя (включая сглаживающий реактор). Поскольку пульсации тока возбуждения малы, в случае коэффициента ослабления поля, меньшего 0,9, пульсации тока якоря приблизительно могут быть определены как

$$\Delta I \approx \frac{U(1-\gamma)\delta T}{L_a} \quad (11)$$

В работе получено также выражение для определения максимального значения полного размаха пульсаций тока возбуждения при заданном  $\Delta I$  (определяется при  $\gamma = 0,5$ )

$$\Delta I_{\text{в макс}} = \frac{\Delta I R_w}{R_w + R_b} \left[ 1 - \frac{4\tau_1}{T} \ln \left( 1 + \frac{T}{4\tau_1} \right) \right], \quad (12)$$

где  $\tau_1 = \frac{L_b}{R_b + R_w}$

Исследования показали, что, неомотря на импульсный режим работы, коэффициент ослабления поля  $\alpha$  определяется только активными сопротивлениями  $R_w$  и  $R_b$ :

$$\alpha = \frac{I_{\text{в ср}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{R_w}{R_w + R_b}, \quad (13)$$

где  $I_{\text{в ср}}$  - среднее значение тока возбуждения.

Одним из известных способов ослабления поля рекуперирующего двигателя является шунтирование последовательной обмотки возбуждения полупроводниковым вентилем В2 (диодом Ферстера). Такая схема отличается простотой и надежностью, обеспечивает бесконтактное автоматическое регулирование тока возбуждения и перевод тягового двигателя при  $V \approx V_{\text{кр}}$  с режима ослабленного на режим полного поля. Аналитическое исследование процессов в такой схеме автором было проведено впервые.

Установлено, что процессы в схеме Ферстера при  $V > V_{\text{кр}}$  отличаются малой относительной продолжительностью включения тиристорного прерывателя, определяемой как

$$\delta = \frac{I_{\text{в ср}} R_b}{U} \quad (14)$$

При этом среднее значение э.д.с. якоря  $E_a$  тягового двигателя соизмеримо с напряжением на зажимах приемника энергии, т.е.

$$E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (15)$$

где  $R_{\text{я}}$  - активное сопротивление цепи якоря двигателя.

Малые значения  $\delta$  требуют увеличения в случае широтно-импульсного управления периода повторения импульсного процесса. Это связано с тем, что продолжительность  $\delta T$  режима короткого замыкания должна быть достаточной для перезаряда коммутационного конденсатора прерывателя.

В данной схеме имеет место своеобразный характер изменения тока якоря двигателя (рис.5). Как видно из рис.5, экстремальные значения тока  $i$  не соответствуют моментам начала и конца режимов К и В.

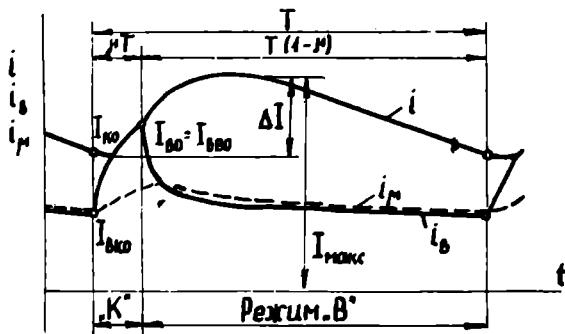


Рис.5. Характерные диаграммы тока якоря ( $i$ ), тока возбуждения ( $i_b$ ) и намагничивающего тока ( $i_{\mu}$ ) в схеме с диодом Ферстера при скорости подвижной единицы, большей критической.

Исследования показали, что для такой схемы более целесообразным является двухпозиционный релейный принцип управления по заданным мгновенным значениям тока якоря двигателя. Контроль мгновенных значений тока в этом случае исключает возможность включения прерывателя до спада тока  $i$  ни-



же заданного среднего значения, как это может иметь место при широтно-импульсном управлении и вызвать неустойчивость тормозного режима.

В случае двухпозиционной релейной системы управления в данной схеме максимальное и минимальное значения тока якоря соответственно больше и меньше заданных максимальной и минимальной уставок тока переключения прерывателя. Таким образом, в этом случае возникают "перерегулирования" тока якоря над заданными. Следует отметить, что полный размах пульсации тока якоря в этой схеме достигает больших абсолютных значений, что в ряде случаев недопустимо. С целью уменьшения пульсаций тока следует стремиться к увеличению частоты переключений прерывателя и индуктивности цепи якоря двигателя.

Частота переключений может быть увеличена включением последовательно в цепь обмотки возбуждения дополнительного активного сопротивления, приводящего к увеличению значения  $\gamma$ .

Третья глава посвящена анализу установившихся электромагнитных процессов в тиристорном импульсном преобразователе, включающем в себя прерыватель и сглаживающий фильтр приемника энергии.

Проведены исследования процессов как в упрощенной схеме тиристорного прерывателя (рис.6,а), так и в схеме прерывателя с включенными защитными дросселями для ограничения скорости изменения тока вентильных цепей (рис.6,б).

Показано, что в упрощенной схеме имеют место четыре характерных рабочих режима:

А - когда отпирается главный тиристор Т1 и происходит прямой перезаряд коммутационного конденсатора  $C_K$ ;

А - когда включен только главный тиристор;

Б - когда отпирается тиристор Т2 и происходит прямой перезаряд  $C_K$  практически неизменным по величине током;

В - когда вентиль В1 находится в проводящем состоянии и протекает рекуперация энергии.

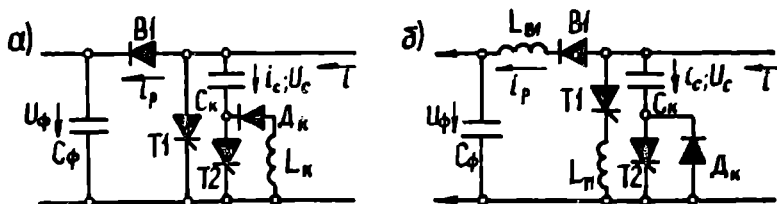


Рис.6. Принципиальные схемы рассмотренных тиристорных прерывателей.

а - упрощенная схема прерывателя;

б - схема прерывателя с включенными защитными дросселями ( $L_{B1}$  и  $L_{T1}$ ).

Отличительной особенностью схемы рис.6,б является зависимость скорости роста тока главного тиристора Т1 при включении только от уровня напряжения на зажимах  $C_k$  и величины индуктивности дросселя  $L_{T1}$ . Благодаря этому при включении тиристора Т1 можно обеспечить сравнительно малые коммутационные потери и улучшить тем самым условия работы главного тиристора.

Из-за наличия защитных дросселей в реальной схеме прерывателя возникает ряд новых режимов коммутации тока с одной ветви на другую. Так, после отпирания тиристора Т2 возникает режим коммутации  $K'$ , в ходе которого ток главного тиристора убывает до нуля, а ток тиристора Т2 возрастает до значения тока двигателя. В конце режима Б возникает другой режим коммутации  $K''$ , в ходе которого ток с ветви тиристора Т2 плавно переходит на ветвь вентили В1. Третий режим коммутации  $K'''$  возникает при переводе тока с вентили В1 на ветвь главного тиристора Т1.

В результате режима коммутации  $K'$  несколько уменьшается уровень напряжения на зажимах коммутирующего конденсатора, что приводит к необходимости увеличения емкости последнего.

Требуемое увеличение емкости  $C_K$  по отношению к определенной по известному выражению  $C_K = I_{\max} t_{\text{восст}} / U_{\text{сб0}}$  должно быть равно:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{I_{\max}^2 L_{T1}}{C_K U_{\text{сб0}}^2}}} \quad (16)$$

Здесь  $I_{\max}$  и  $U_{\text{сб0}}$  - ток главного тиристора и напряжение на зажимах  $C_K$  в момент отпирания тиристора  $T_2$ , а  $t_{\text{восст}}$  - время, необходимое для восстановления запирающих свойств главного тиристора.

Ввиду того, что соотношение  $U_{\text{сб0}}$  и  $L_{T1}$  определяет максимальную скорость роста тока тиристора  $T_2$ , можно показать, что стремление к уменьшению  $(di_{T2}/dt)_{\max}$  приводит к росту установленной емкости  $C_K$ .

Режим  $K''$  приводит к росту напряжения на зажимах конденсатора  $C_K$  выше минимального уровня напряжения на зажимах конденсатора фильтра  $U_{\text{фмин}}$ . При этом максимальное значение напряжения на зажимах коммутирующего конденсатора, определенное без учета затухания, равно:

$$U_{\text{смакс}} = U_{\text{фмин}} + I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{L_{\text{в1}}}{C_K}} = U_{\text{фмин}} + \Delta U_{\text{ск}}. \quad (17)$$

После режима  $K''$  происходит частичный обратный разряд  $C_K$  через приемник и вентиль  $D_K$  (режим  $B'$ ). В результате режима  $B'$  напряжение на  $C_K$  также уменьшается на значение  $\Delta U_{\text{ск}}$  ниже  $U_{\text{фмин}}$ .

Таким образом, если в упрощенной схеме напряжение на зажимах  $C_K$  в момент начала прямого перезаряда (т.е. отпирания  $T1$ ) было равно или больше  $U_{\text{фмин}}$ , то в схеме рис.6,б оно всегда меньше  $U_{\text{фмин}}$ . Это приводит к необходимости дополнительного увеличения емкости  $C_K$ .

В работе найдены также экстремальные, средние и действующие значения токов и напряжений элементов прерывателя.

Во второй части третьей главы исследованы электромагнитные процессы в сглаживающем  $LC$  - фильтре приемника энергии. При этом анализ процессов проводится с учетом влияния активного сопротивления  $R_d$  цепи приемника, что значительно усложняет расчет.

Для облегчения аналитического решения в данной работе принято допущение, что напряжение на зажимах конденсатора фильтра меняется (растет и убывает) линейно в функции времени. Такое допущение основано на том, что период повторения импульсного цикла для тока рекуперации  $i_p$  в случае обеспечения непрерывности и однонаправленности тока приемника  $i_d$  всегда меньше периода собственных колебаний для контура фильтра.

Исследованы мгновенные значения тока  $i_d$  и напряжения на зажимах конденсатора фильтра, и установлено, что активное сопротивление способствует затуханию процессов в фильтре и уменьшению полного размаха пульсации тока приемника  $\Delta I_d$  и напряжения на зажимах конденсатора фильтра  $\Delta U_\phi$ .

На рис.7 приведены характеристики, иллюстрирующие зависимость  $\Delta U_\phi$  и  $\Delta I_{d\max}$  (при относительной продолжительности  $\alpha \approx 0,5$  протекания тока  $i_p$  в течение периода повторения  $T_p$ ) от величины  $R_d$ . Здесь  $\Delta U_{\phi 0}$  - пульсации напряжения на обкладках  $C_\phi$  в случае идеально сглаженного тока приемника энергии.

$$\Delta U_{\phi 0} = \frac{I_{cp} (1 - \alpha) \alpha T_p}{C_\phi} \quad (18)$$

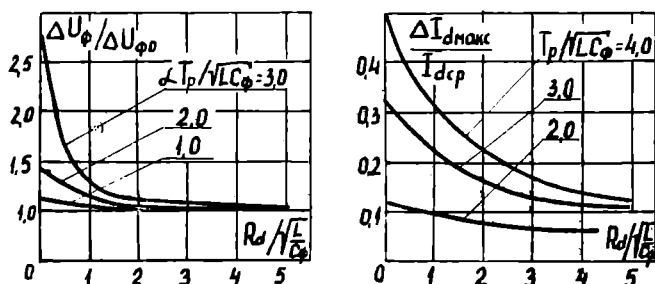


Рис.7. Расчетные зависимости  $\Delta U_{\phi}$  и  $\Delta I_{дмакс}$  на зажимах от соотношения активного и волнового сопротивления контура фильтра.  $I_{дср}$  - среднее значение тока приемника энергии;  $T_p$  - период повторения для тока рекуперации.

Как видно, с ростом  $R_d$  значения  $\Delta I_{дмакс}$  и  $\Delta U_{\phi}$  уменьшаются. При этом  $\Delta I_{дмакс}$  в пределе стремится к нулю, а значение  $\Delta U_{\phi}$  - к значению  $\Delta U_{\phi 0}$ .

В четвертой главе рассматриваются вопросы самовозбуждения тягового двигателя в начале режима торможения.

Процесс самовозбуждения может быть осуществлен непрерывно, когда самовозбуждение протекает при прямом короткозамыкании двигателя через постоянно открытые главные тиристоры прерывателя при отсутствии сигналов управления на тиристоры гашения или при импульсном управлении, когда в течение процесса самовозбуждения происходят переключения тириستоров прерывателя при включенной системе управления.

Непрерывное самовозбуждение обычно применяется при двухпозиционной релейной системе управления. Как показали исследования, трудности при непрерывном самовозбуждении возникают из-за малых значений остаточного э.д.с. якоря двигателя, соизмеримых с прямым падением напряжения на главных тиристорах прерывателя. Поэтому для надежного самовозбуждения применяются различного рода "подпитки" последовательной

обмотки возбуждения от посторонних источников питания (например, аккумуляторной батареи) или от приемника энергии через сопротивления "подпитки".

Однако, как показали исследования, больший эффект может быть достигнут введением в начале самовозбуждения последовательно в контур короткого замыкания дополнительного источника питания, повышающего общий уровень э.д.с. контура. Автором предложена схема конденсаторного стимулятора самовозбуждения (рис.8,а), когда в контур вводится предварительно заряженный с указанной на рисунке полярностью конденсатор С, в нормальном режиме работы зашунтированный вентилем Д.

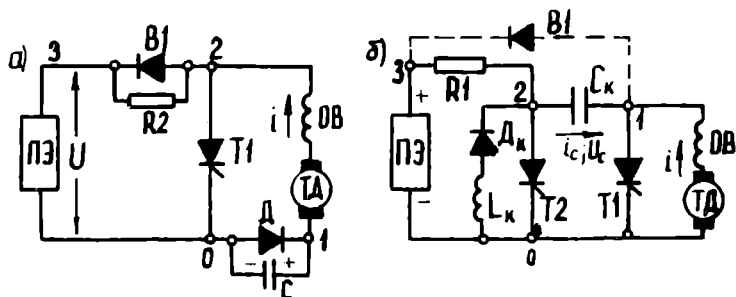


Рис.8.Принципиальные схемы начального самовозбуждения тягового двигателя. а - непрерывного с конденсаторным стимулированием процесса; б - импульсного с использованием энергии коммутирующего конденсатора

В этой схеме при отпирании главного тиристора происходит колебательный разряд конденсатора через цепь двигателя. При этом в момент отпирания вентиля Д ток в цепи двигателя имеет амплитудное значение  $I_{\max} = U_0 \sqrt{C/L}$ , где  $U_0$  - начальное значение напряжения на обкладках С, а  $L$  - индуктивность цепи двигателя.

Таким образом, процесс непрерывного самовозбуждения здесь начинается со значения тока якоря, равного  $I_{\max}$

что позволяет получить малые продолжительности процесса даже в области низких скоростей ЭПС. В работе показано, что продолжительность режима непрерывного самовозбуждения  $t_b$  в этой схеме при нулевом значении остаточного э.д.с. пропорциональна логарифму соотношения заданного конечного тока  $I_{уст}$  и значения  $I_{макс}$ , т.е.

$$t_b = K_1 \ln \left( K_2 \frac{I_{уст}}{I_{макс}} \right), \quad (19)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты, определяемые скоростью подвижной единицы и параметрами цепи двигателя.

В случае самовозбуждения при импульсном управлении в схему дополнительно вводится высокоомное сопротивление  $R_1$  (рис.8,б). В этом случае при закрытом вентиле В1 (т.е. при отсутствии режима рекуперации) схема рис.8,б представляет собой последовательный тиристорный прерыватель с нагрузкой  $R_1$  и напряжением питания  $U$  приемника энергии.

Задача анализа процессов в такой схеме сводится к определению таких условий переключения тиристоров Т1 и Т2, при которых за счет энергии коммутирующего конденсатора обеспечивается однопольный и непрерывный ток  $i > 0$  в цепи двигателя. Как показали исследования, такой режим работы может быть осуществлен и при неподвижном якоре двигателя, т.е. при  $\omega = 0$ , что создает дополнительный запас по надежности самовозбуждения в реальных условиях.

Возникновение непрерывного тока  $i > 0$  определяется моментом отпирания главных тиристоров Т1. Для обеспечения непрерывности и однопольности тока  $i$  отпирание импульс на Т1 должен быть подан в момент времени, когда  $i > 0$  и  $U_c < 0$  (рис.8,б).

Вторым условием, определяющим возможность самовозбуждения до заданного уровня тока, является необходимость обеспечения соответствующего значения напряжения  $U_c$  на обкладках  $C_K$  в момент отпирания тиристора Т2 ( $U_{сбо}$ ). Установлено, что значение  $U_{сбо}$  зависит от величины

сопротивления  $R_1$ . Чем  $R_1$  меньше, тем больше значение  $U_{сбо}$  и больше возбуждаемый в цепи тягового двигателя (при неподвижном якоре двигателя) ток.

В п я т о й г л а в е приведены основные результаты экспериментального исследования электромагнитных процессов в системе импульсного рекуперативного торможения.

Экспериментальные исследования, в основном, проводились на маломощной стендовой установке мощностью 6 квт при номинальном напряжении приемника энергии (аккумуляторной батареи) 110 в. Исследования процесса самовозбуждения проводились на тяговом двигателе типа УРТ-110 мощностью 200 квт, с номинальным напряжением 1500 в. На контактно-аккумуляторном поезде СРЗ-АБМ проводились, в основном, исследования общих соотношений в реальной системе торможения.

В ходе исследований проверялись полученные в работе расчетные выражения с целью определения их точности. Изучалось также влияние параметров отдельных элементов системы на характер электромагнитных процессов.

Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований подтвердило достаточную для инженерной практики точность полученных выражений, а также правомерность сделанных в ходе аналитического исследования допущений.

## З А К Л Ю Ч Е Н И Е

В результате проведенной работы получены аналитические выражения для определения мгновенных значений основных токов и напряжений в рассмотренных схемах. Найдены выражения для расчета основных параметров, характеризующих работу системы, в частности, пульсаций токов тягового двигателя и приемника энергии, пульсаций напряжения на зажимах конденсатора фильтра и максимальных значений прямых и обратных напряжений на вентилях элементах схемы, а также амплитуд прямых токов вентилях.

Предложены два способа осуществления режима начального самовозбуждения тягового двигателя - **непрерывный**, предусматривающий короткое замыкание зажимов двигателя через



постоянно включенные тиристоры и конденсаторный стимулятор процесса, и импульсный, обеспечивающий самовозбуждение тягового двигателя при работающем тиристорном прерывателе путем использования энергии коммутирующего конденсатора.

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Электромагнитные процессы в системе импульсного торможения (включающей тяговые двигатели, приемник энергии, прерыватель и фильтр) целесообразно анализировать отдельно для каждой части системы, принимая при этом определенные допущения в отношении других звеньев системы.

2. При расчете пульсаций тока в цепи тягового двигателя необходимо учитывать действие вихревых токов в массивном магнитопроводе двигателя. Действие вихревого тока приводит к уменьшению индуктивности последовательной обмотки возбуждения при росте частоты переключений прерывателя. Установлено, что в мощных тяговых двигателях при рабочих частотах прерывателя больше 100-200 гц индуктивность обмотки возбуждения становится практически равной индуктивности рассеяния обмотки главных полюсов.

3. Исследования показывают, что при шунтировании последовательной обмотки возбуждения тягового двигателя активным сопротивлением  $R_{ш}$  коэффициент ослабления поля определяется только соотношением  $R_{ш}$  и суммарного сопротивления  $R_{ш}$  и обмотки возбуждения  $R_b$ . При этом пульсации тока возбуждения значительно меньше пульсаций тока якоря двигателя, которые по сравнению с режимом полного поля имеют увеличенные значения. С целью уменьшения пульсаций намагничивающего тока и трансформаторной э.д.с. двигателя целесообразно применять постоянное шунтирование обмотки возбуждения при коэффициенте ослабления поля около 0,95.

4. В схеме с шунтирующим вентилем Терстера в ходе торможения подвижной единицы осуществляется автоматический бесконтактный перевод двигателя с режима ослабленного поля на режим полного поля возбуждения. При этом режим ослаб-

ленного поля характеризуется малой относительной продолжительностью включения  $\gamma$  прерывателя, что требует уменьшения рабочей частоты прерывателя и может привести к недопустимо большим пульсациям тока двигателя.

Такой способ ослабления поля целесообразно осуществлять при двухпозиционной релейной системе управления работой прерывателя.

5. Процессы в реальных схемах тиристорных прерывателей характеризуются появлением своеобразных режимов коммутации, которые обусловлены наличием защитных дросселей для ограничения скорости нарастания тока тиристорov. Наличие этих дросселей приводит к необходимости увеличения емкости коммутирующего конденсатора прерывателя.

6. Исследования показывают, что при увеличении активного сопротивления цепи приемника энергии уменьшаются пульсации тока приемника и напряжения на зажимах конденсатора фильтра. С ростом сопротивления приемника энергии пульсации тока приемника стремятся к нулю, а пульсации напряжения на зажимах конденсатора фильтра — к значению, имеющему место при идеально сглаженном токе приемника.

7. Разработанная новая схема непрерывного самовозбуждения тягового двигателя с емкостным стимулированием позволяет увеличить надежность и уменьшить продолжительность процесса самовозбуждения. Малые габариты и вес емкостного стимулятора дает возможность рекомендовать его для практического применения на транспортных устройствах, особенно в случаях двухпозиционного релейного управления прерывателем.

8. Предложенный способ импульсного самовозбуждения (с применением в качестве стимулирующего процесс коммутирующего конденсатора) может быть рекомендован для применения в случаях широтно-импульсного управления прерывателем. Особенностью данного способа является возможность обеспечения протекания непрерывного тока через цепь двигателя при подбore соответствующих углов отпирания тиристорov прерывателя.

9. Теоретические и практические результаты проведенной работы могут быть использованы при проектировании перспективного электроподвижного состава постоянного тока и других транспортных установок с тиристорным импульсным регулированием.

Результаты диссертационной работы использованы Рижским филиалом ВНИИ вагоностроения при разработке электрооборудования для контактно-аккумуляторного поезда СРЗ-А6М.

Отдельные разделы работы докладывались и обсуждались:

1) на Республиканской научно-технической конференции РПИ и РИИГА, посвященной 50-летию Великой Октябрьской революции, октябрь, 1967 год;

2) на научном семинаре кафедр электроподвижного состава и электрических машин и преобразователей ДИИТа, г.Днепропетровск, май, 1969 год;

3) на Республиканской научно-технической конференции РПИ, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина, март, 1970 год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1) Бирзниекс Л.В., Ранькис И.Я. Пульсации тока тягового двигателя при импульсном регулировании скорости. Известия Академии Наук Латвийской ССР, серия физических и технических наук, 1968, №6.

2) Ранькис И.Я. Работа системы импульсного рекуперативного торможения при шунтированной активным сопротивлением последовательной обмотке возбуждения тягового двигателя постоянного тока. Известия Академии Наук Латвийской ССР, серия физических и технических наук, 1969, №1.

3) Ранькис И.Я. Устройство для торможения тягового двигателя последовательного возбуждения. Авторское свидетельство №255 978 от 15 января 1968 г. Бюллетень "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", Москва, 1969, №34.

4) Ранькис И.Я. Коммутация тока в схеме импульсного рекуперативного торможения тягового двигателя при наличии индуктивности в цепи приемника энергии. Ученые записки РПИ. "Электромеханика", выпуск 7, Рига, 1969 (находится в печати).

НТБ  
ДНУЖТ

Редактор И.Иващенко, художник Э.Розинъш, техн.ред. Э.Акис

Подписано к печати 4 февраля 1970 г. Формат 60х90/16.  
I,75 печ.л.; I,3 изд.л. Тираж 120 экз. Бесплатно. ЯТ 01028  
РИО РПИ. Ротапринт. Ул.Ленина, I. Зак. № 454/42

НТБ  
ДНУЖТ