

СССР — МПС

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Инженер ПАШКОВ Ф. Е.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТЯГОВОМ ДВИГАТЕЛЕ
ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ
НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность № 05.435 — Электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК

1970

4240a

НТБ
ДНУЖТ

4240a

Шамков В. Ф.

Учебная записка № 04

в Т. 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.

1970 - авторская

1.06.99 печать 1970

	72	1320

НТБ
ДНУЖТ

Инженер ПАШКОВ Ф. Е.

ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТЯГОВОМ ДВИГАТЕЛЕ
ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ
НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность № 05.435 — Электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1970

НТБ
ДНУЖТ

4240a

Работа выполнена на кафедре «Электроподвижной состав» Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент **К. Г. Кучма**.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **В. Е. Скобелев**,
кандидат технических наук, доцент **В. В. Магидсон**.

Ведущее предприятие: Днепропетровский электровозостроительный завод.

Автореферат разслан «*4*» *марта* 1970 г.

Защита состоится «*6*» *апреле* 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 кандидат технич. наук, доцент **Б. М. Климковский**.

НТБ
ДНУЖТ

ВВЕДЕНИЕ

Весьма прогрессивным мероприятием, обеспечивающим техническое развитие электроподвижного состава постоянного и переменного тока, является внедрение силовой полупроводниковой техники. Эта техника позволяет эффективно решить проблему плавного, безреостатного и автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях.

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме применения полупроводниковых вентилях на электроподвижном составе постоянного тока для импульсного регулирования напряжения, подводимого к тяговым двигателям.

Одной из систем такого регулирования напряжения постоянного тока на тяговых двигателях и тем самым регулирования скорости движения электровозов является система широтно-импульсного регулирования.

Проблема создания электроподвижного состава постоянного тока с широтно-импульсным регулированием напряжения привлекает в настоящее время большое внимание как в Советском Союзе, так и за границей. В настоящее время над этой проблемой работают многие научно-исследовательские, проектные и учебные институты: ЦНИИ МПС, МЭИ, ЛИИЖТ, МИИТ, ДИИТ, Рижский электромашиностроительный завод, РФВНИИВ, физико-энергетический институт Академии наук Латвийской ССР и др.

Первые работы, посвященные теоретическому анализу электромагнитных процессов в электродвигателях при импульсной системе регулирования постоянного тока, были опубликованы в период с 1930 по 1948 гг. К. Блауфусом, В. С. Кулебакиным, Е. А. Розенманом. Теория импульсного регулирования с применением транзисторов широко освещена в трудах В. Д. Нагорского, Т. А. Глазко, О. А. Коссова, О. П. Хасаева, Л. В. Берзниека и др. Работы указанных авторов посвящены в основном исследованию электромагнитных процессов в модуляторах и промышленном электроприводе постоянного тока малой мощности.

Несмотря на известные преимущества широтно-импульсной системы регулирования напряжения перед реостатной, ей присущ существенный недостаток — ухудшаются условия работы тяговых двигателей вследствие значительной пульсации выходного напряжения широтно-импульсных преобразователей. Импульсная форма питающего напряжения при определенных условиях может сильно влиять на надежность работы тяговых двигателей.

Выполненные к настоящему времени исследования по широтно-импульсному регулированию напряжения постоянного тока не могут дать исчерпывающего ответа на ряд вопросов, встречающихся при разработке и проектировании современных электровозов с таким регулированием. В частности, еще недостаточно освещен вопрос влияния этой системы на работоспособность мощных тяговых двигателей.

В основу приведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в тяговом двигателе при широтно-импульсном регулировании напряжения постоянного тока автором положена общая теория электромагнитных процессов в тяговых двигателях пульсирующего тока при питании от выпрямителей однофазного тока, которая в настоящее время достаточно хорошо разработана.

Большой вклад в теорию расчета и проектирования тяговых двигателей пульсирующего тока внес доктор технических наук, профессор В. Е. Скобелев. Этой же проблеме посвящены работы А. С. Курбасова, В. С. Хвостова, М. Д. Находкина, Д. Д. Захарченко, А. Б. Иоффе, П. А. Золотарева, Г. Я. Корепанова, Ю. Г. Тарасова и др.

С учетом особенностей электромагнитных процессов в тяговом двигателе при широтно-импульсном регулировании напряжения по сравнению с двигателями пульсирующего тока в диссертации автором приведены:

- анализ этих процессов в тяговом двигателе при питании импульсным напряжением;
- анализ магнитных полей;
- результаты исследования особенностей коммутации;
- результаты исследования потенциальных условий на коллекторе тягового двигателя.

Диссертация состоит из пяти глав.

В первой главе дан обзор развития техники и теории импульсного регулирования.

Вторая глава посвящена анализу электромагнитных процессов в тяговом двигателе последовательного возбуждения при широтно-импульсном регулировании напряжения постоянного тока.

В третьей главе освещается исследование пульсирующих

магнитных полей в тяговом двигателе постоянного тока при широтно-импульсном регулировании напряжения.

В четвертой главе анализируются особенности коммутации тяговых двигателей постоянного тока при импульсном регулировании напряжения.

В пятой главе приводится анализ потенциальных условий на коллекторе тягового двигателя постоянного тока при питании импульсным напряжением.

Ниже приводится краткое изложение содержания указанных глав.

Анализ электромагнитных процессов в тяговом двигателе последовательного возбуждения при импульсном регулировании напряжения

При анализе электромагнитных процессов в тяговом двигателе приняты следующие допущения:

тиристоры и диоды приняты идеальными, т. е. их обратный ток и прямое падение напряжения равны нулю;

индуктивность в цепи двигателя на заданном интервале пульсирующего тока принята постоянной, соответствующей среднему току возбуждения в этом интервале;

период коммутации тока якоря значительно меньше электро-механической постоянной времени, что позволяет считать в этот период скорость вращения якоря величиной постоянной;

активное сопротивление и индуктивность источника питания пренебрежимо малы по сравнению с активным сопротивлением и индуктивностью двигателя и приняты равными нулю;

тяговый двигатель в расчетных схемах заменен эквивалентной нагрузкой.

При решении нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение тока в тяговом двигателе последовательного возбуждения автором использован приближенный метод с помощью линеаризации кривой намагничивания тягового двигателя в промежутке малых отклонений тока от среднего значения. Решив дифференциальные уравнения относительно токов в период импульса и паузы получены выражения, описывающие изменения мгновенных значений токов в эти периоды с учетом пульсации э. д. с. якоря.

Из работ В. Е. Скобелева известно, что в двигателе пульсирующего тока переменная составляющая э. д. с. вращения якоря ничтожно мала. Поэтому можно принять, что э. д. с. якоря в двигателе при импульсном регулировании напряжения $e = E = const$. С учетом допущения, что переменная составляющая э. д. с. вра-

щения якоря ничтожно мала, в работе получены формулы для определения мгновенных, экстремальных, средних и эффективных токов двигателя, а также амплитуды и коэффициента пульсаций тока. Все они справедливы при условии непрерывности тока двигателя.

В диссертации рассмотрен также режим прерывистых токов, при котором ток в период паузы не только успевает уменьшиться до нуля, но и некоторую часть паузы равен нулю. Такая форма тока резко ухудшает условия работы двигателя и в первую очередь его коммутацию.

Определено условие, при котором в цепи якоря не должен возникнуть режим прерывистых токов. Для избежания этого режима необходимо, чтобы величина среднего тока в цепи якоря не была меньше среднего граничного значения тока, выражаемого формулой

$$I_{ср. зр.} = \frac{U_0}{r} \left[\alpha - \frac{(1 - \alpha e^{-\delta T_u}) e^{-\delta T_n}}{1 - e^{-\delta T}} \right],$$

где

U_0 — напряжение источника питания;

r — суммарное активное сопротивление в цепи двигателя;

α — скважность импульсов;

$\delta = \frac{r}{L}$ — коэффициент затухания;

T_u — период импульса;

T_n — период паузы.

В диссертации приведен также анализ электромагнитных процессов в якоре и в обмотке возбуждения при их раздельном шунтировании диодами. В результате выполненного анализа получены выражения мгновенных и экстремальных токов в якоре и в обмотке возбуждения. При таком шунтировании и на основе их даны выражения для определения абсолютной и относительной пульсации тока.

На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при раздельном шунтировании якоря и обмотки возбуждения достигается меньшая пульсация тока и потока возбуждения по сравнению с пульсацией тока и потока возбуждения при общем шунтировании обмоток двигателя. В результате раздельного шунтирования якоря и обмотки возбуждения могут быть улучшены условия коммутации тяговых двигателей.

Исследование пульсирующих магнитных полей в тяговом двигателе постоянного тока при широтно-импульсном регулировании напряжения

Исследование пульсирующих магнитных полей (главного и коммутирующего) проводилось на тяговом двигателе типа ДК-105 мощностью 185 квт при неподвижном якоре на специальном стенде.

Для получения импульсного напряжения была смонтирована схема широтно-импульсного модулятора. При этой схеме имелась возможность регулировать ширину импульса напряжения, подводимого к зажимам испытуемого двигателя. Измерения главного и коммутирующего потоков проводились с использованием измерительных витков, расположенных на главном и дополнительном полюсах. При анализе несинусоидальных кривых тока, электродвижущих сил и напряжения использовался гармонический анализ и метод эквивалентных синусоид.

Опыт показывает, что эквивалентная амплитуда переменной составляющей потока возбуждения с возрастанием насыщения магнитной системы уменьшается. Возможно с учетом эквивалентной синусоиды представить пульсирующий поток возбуждения состоящим из постоянной и переменной составляющей. Угол магнитного запаздывания потока возбуждения относительно тока возбуждения для тягового двигателя ДК-105 составил $30^\circ - 64^\circ$, причем больший угол отвечает меньшей нагрузке машины. Коэффициент рассеяния переменной составляющей потока возбуждения значительно превышает коэффициент рассеяния постоянной составляющей потока и достигает значения $1,25 \div 1,8$, причем больший коэффициент отвечает большей нагрузке машины. Коэффициент пульсации потока возбуждения составил $0,068 \div 0,087$ от коэффициента пульсации тока. Уменьшение тока возбуждения двигателя при сохранении неизменной амплитуды переменной составляющей этого тока, вызывает увеличение переменной составляющей потока возбуждения.

Модуль эквивалентной амплитуды потока возбуждения может быть приближенно определен расчетом. Полученная формула имеет вид

$$\Phi_{m3} = \frac{w U_0 \alpha (1 - \alpha)}{2 Z f L},$$

где w — число витков обмотки возбуждения на полюс;
 U_0 — напряжение источника питания;
 α — скважность импульсов;
 f — частота коммутации;
 L — индуктивность в цепи двигателя;

Z — магнитное сопротивление переменной составляющей потока возбуждения.

Исследование пульсирующего магнитного поля в зоне коммутации показывает, что переменная составляющая коммутирующего потока имеет ориентацию, близкую к вектору тока якоря, а не дополнительных полюсов, как это необходимо для обеспечения надежной коммутации. Физическое обоснование явления «опрокидывания» коммутирующего потока впервые дано В. Е. Скобелевым. Угол магнитного запаздывания коммутирующего потока относительно вектора тока дополнительных полюсов для тягового двигателя ДК-105 составил $125 \div 160^\circ$, причем больший угол отвечает меньшей нагрузке машины.

Методы обеспечения необходимой ориентации переменной составляющей коммутирующего потока при импульсном напряжении соответствуют изложенным в известных работах В. Е. Скобелева и других авторов, касающихся двигателей пульсирующего тока.

Особенности коммутации тяговых двигателей постоянного тока при импульсном регулировании напряжения

Исследуя процесс коммутации, установлено, что в тяговых двигателях при импульсном регулировании напряжения так же, как и у двигателей пульсирующего тока, в коммутируемых секциях обмотки якоря кроме электродвижущих сил, соответствующих работе машины на постоянном токе, возникают добавочные переменные электродвижущие силы, вызванные пульсацией тока и магнитного поля.

Экспериментальные исследования системы питания импульсным напряжением показали, что переменные составляющие реактивной и коммутирующей э. д. с. аналогичны таким же составляющим при питании двигателей пульсирующего тока. Вследствие чего указанные э. д. с., суммируясь создают значительную несбалансированную электродвижущую силу. Поэтому для улучшения коммутации тяговых двигателей при широтно-импульсном регулировании напряжения необходимы те же методы улучшения коммутации, которые применяются для тяговых двигателей пульсирующего тока при питании от выпрямителей однофазного тока.

На основании анализа аналитических выражений для средних по зоне коммутаций амплитуд переменных электродвижущих сил реактивной, коммутирующей и трансформаторной установлено, что с изменением скважности импульсов значения этих амплитуд изменяются.

Можно считать, что при постоянном значении тока первые две э. д. с. пропорциональны $\alpha^2(1 - \alpha)$ а трансформаторная $\alpha(1 - \alpha)$.

Из этого вытекает, что при изменении скважности импульсов от 0 до 1 переменные составляющие реактивной и коммутирующей э. д. с. достигают максимальных значений при $\alpha = \frac{2}{3}$ и трансформаторная электродвижущая сила — при $\alpha = \frac{1}{2}$. Следовательно, при изменении скважности α от 0 до 1 наибольшее влияние на коммутацию оказывает скважность импульсов в пределах

$$\alpha = \frac{1}{2} - \frac{2}{3}$$

На основании анализа аналитических выражений переменных составляющих реактивной и коммутирующей э. д. с. установлено, что при $L = \text{const}$ с увеличением частоты коммутации при пропорциональном уменьшении коэффициента пульсации тока условия коммутации улучшаются.

Анализ потенциальных условий на коллекторе тягового двигателя постоянного тока при питании импульсным напряжением

Потенциальные условия на коллекторе тяговых двигателей при питании импульсным напряжением осложняются вследствие появления в активных секциях обмотки якоря скачков напряжения в момент открытия главного тиристора и присоединения им двигателя к источнику питания и в момент перезаряда коммутирующего конденсатора при гашении этого тиристора.

Так как мгновенное напряжение на тяговом двигателе в момент импульса можно представить состоящим из постоянной и переменной составляющей, то и максимальное межламельное напряжение между смежными коллекторными пластинами состоит из таких же составляющих.

Использование для определения переменной составляющей межламельного напряжения у рассматриваемого двигателя известных формул, применяемых для расчета указанного напряжения у двигателей пульсирующего тока, оказалось невозможным. Поэтому был разработан новый метод расчета амплитуды переменной составляющей напряжения между смежными коллекторными пластинами, который учитывает скачки напряжения между ними.

Так как переменная составляющая импульсного напряжения распределяется по обмоткам двигателя пропорционально их индуктивностям, то амплитуда переменной составляющей напряжения, приходящаяся на якорь, соответствует отношению его индуктивности к суммарной индуктивности цепи.

Максимальное значение переменной составляющей напряжения между смежными коллекторными пластинами равно

$$\Delta U_{max} \sim \frac{2p}{k} \frac{U_o}{\Sigma L} (2 - \alpha) \frac{L_{\kappa}}{\Sigma L} k_{u\sim}$$

где ΣL — суммарная индуктивность в цепи двигателя;
 $k_{u\sim}$ — коэффициент искажения переменной составляющей индукции под главным полюсом.

Общее максимальное напряжение между смежными коллекторными пластинами соответствует сумме указанных двух составляющих.

Исходя из максимального допустимого межламельного напряжения и наихудшего значения скважности может быть определена необходимая суммарная индуктивность в цепи двигателя при известном значении индуктивности якоря.

Ухудшение потенциальных условий на коллекторе тягового двигателя при питании импульсным напряжением по сравнению с потенциальными условиями на коллекторе тягового двигателя при питании постоянным током может быть оценено коэффициентом, характеризующим соотношение межламельных напряжений при этих системах питания. Следовательно, чем меньше индуктивность якоря, тем меньше влияет на потенциальные условия импульсное напряжение.

Проведенные опыты показывают, что формулы для расчета межламельного напряжения, выведенные автором, являются корректными.

На основании теоретических и опытных исследований установлено, что улучшение потенциальных условий на коллекторе может быть достигнуто путем включения в цепь двигателя сглаживающего реактора и применения компенсационной обмотки, которая позволяет уменьшить индуктивность якоря.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В результате теоретического анализа и проведенных экспериментальных исследований на мощном двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением при широтно-импульсном регулировании напряжения установлено:

1. Пульсация тока в цепи двигателя зависит от величины напряжения источника питания, частоты коммутации, величины индуктивности в цепи двигателя и скважности импульсов напряжения. Получены аналитические выражения, позволяющие определить мгновенное, среднее, эффективное значение тока и входящие в него гармоники. Определены условия непрерывности тока якоря.

Получены выражения, позволяющие определить коэффициент пульсации тока в якоре и обмотке возбуждения при их раздельном шунтировании.

2. Пульсация тока, потребляемого двигателем, вызывает пульсацию потоков главных и дополнительных полюсов и якоря. Установлено, что переменная составляющая потока возбуждения отстает по фазе от переменной составляющей намагничивающей силы якоря на 30° — 64° и переменная составляющая коммутирующего потока отстает по фазе от переменной составляющей намагничивающей силы дополнительных полюсов на 125 — 160 электрических градусов. Получены соотношения, позволяющие определить амплитуду главного и коммутирующего потока в зависимости от величины напряжения источника питания, частоты коммутации, величины индуктивности в цепи двигателя и скважности импульсов.

3. В результате пульсации тока и магнитного потока в коммутируемых секциях якоря возникают добавочные переменные электродвижущие силы, которые создают нескомпенсированную переменную составляющую э. д. с. Установлено, что эта э. д. с. при известных параметрах двигателя зависит от скважности импульсов и достигает максимального значения при скважности

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{2}{3}.$$

Снижение величины нескомпенсированной э. д. с. в коммутируемых секциях якоря возможно достичь путем увеличения частоты коммутации, увеличения индуктивности в цепи двигателя, а также посредством применения компенсационной обмотки.

4. Потенциальные условия на коллекторе ухудшаются по сравнению с режимом работы на постоянном токе. Это ухудшение обусловлено главным образом скачками напряжения, возникающими между коллекторными пластинами в момент открытия и закрытия главного тиристора.

Получены выражения, позволяющие определить максимальное напряжение на якоре и между смежными коллекторными пластинами.

Установлено, что основными факторами, влияющими на потенциальные условия являются скважность импульсов, пульсация тока якоря и соотношение индуктивности якоря и полной индуктивности в цепи двигателя.

Основные положения работы докладывались:

1) на I республиканской конференции молодых ученых и специалистов «Научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте», г. Днепропетровск, ДИИТ, 1969 г.;

2) на юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, 1967 г.

Материалы настоящей работы положены в основу при разработке системы широтно-импульсного регулирования напряжения для контактно-аккумуляторного электровоза ВЛ26.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Кучма К. Г., Висин Н. Г., Пашков Ф. Е.** Тиристорно-импульсная система регулирования напряжения тяговых двигателей контактно-аккумуляторного электровоза постоянного тока. Труды ДИИТ, вып. 77, 1968 г.

2. **Пашков Ф. Е.** Влияние импульсного регулирования напряжения на работоспособность тягового двигателя постоянного тока. Труды ДИИТа, вып. 87, 1969

БТ 03175. Подписано к печати 16 февраля 1970 года.

Бумага 60x84¹/₁₆. Объем 0,6 печатных листа. Заказ № 1687 Тираж 250.

Городская типография № 3 областного управления по печати,
г. Днепропетровск-2, ул. Фрунзе, 6.