

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
им. М.И. Калинина

На правах рукописи

И В Л Е В

Юрий Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР К БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ ПОСТОЯННОГО ТОКА 3,3 кВ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(05.22.09-электрификация железнодорожного транспорта)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1975г.

НТБ
ДНУЖТ

СССР - М П С

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМ. М.И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

И В Л Е В

Юрий Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР К БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ ПОСТОЯННОГО ТОКА 3,3 кВ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(05.22.09—электрификация железнодорожного транспорта)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1975г.

НТБ
ДНУЖТ

64962

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров
железнодорожного транспорта имени М.И. К а л и н и н а.

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент МИХА. Ю. Е. А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ФИГУРНОВ Е.П.

кандидат технических наук, доцент КОСТИН Н.А.

Ведущее предприятие - Главк электрификации и энергетического
хозяйства МПС

Автореферат разослан "___" _____ 1975г.

Защита состоится "___" _____ 1975г. на заседании

Ученого совета Днепропетровского института инженеров желез-
нодорожного транспорта имени М.И. Калинина

(320629, г. Днепропетровск - 10, ул. Университетская, 2)

с диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
КАНДИДАТ ХИМИЧЕСКИХ НАУК

Д О Ц Е Н Т -

ПЛАХОТНИК В.Н.

УЧЕБНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
национального

НТБ
ДНУЖТ

В материалах XXIV съезда КПСС подчеркнуто, что основным направлением в развитии железнодорожного транспорта является увеличение пропускной и провозной способности железных дорог.

Неуклонный рост грузооборота вызывает увеличение мощности элементов устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог, что в свою очередь ставит ряд сложных электротехнических задач в плане усовершенствования электротяги. Одной из таких задач является проблема разработки выключателей постоянного тока 4 кВ.

В условиях возросших мощностей устройств электроснабжения эксплуатируемые в настоящее время на тяговых подстанциях быстродействующие выключатели типа АБ-2/4 не отвечают требованиям надежности, о чем свидетельствует статистика их повреждений.

На электрифицированных дорогах Советского Союза большинство тяговых подстанций постоянного тока обслуживает весьма грузонапряженные участки.

Таким образом, актуальность указанной проблемы является очевидной.

Выполнение поставленной задачи может быть достигнуто только путем комплексного решения вопросов усовершенствования как выключателя так и дугогасительной камеры к нему.

В направлении разработки более совершенной конструкции выключателя проводятся исследования на заводе "Уралэлектротяжмаш". Реферируемая же работа посвящена вопросу гашения дуги постоянного тока. Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования процесса гашения дуги проведены Г.В. Буткевичем.

А.М.Залесским, О.Б. Ероном, Г.А.Кукековым, И.С.Таевым и др.

Тем не менее практика коммутации и защиты электрических цепей все время ставит новые задачи построения выключателей с более совершенными характеристиками по уровням тока и напряжения, быстродействию, устойчивости в эксплуатации и пр.

В Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта ДИИТе в результате многолетних исследований Е.А. Михайленко были созданы мощные дугогасящие устройства постоянного тока на 4 и 6 кВ.

В настоящей работе изложены результаты проведенного автором исследования оптимальных условий гашения дуги и разработки рациональных параметров дугогасительной камеры и инженерной методики расчета процесса гашения дуги.

ГЛАВА I АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ МОЩНОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Анализ условий гашения дуги постоянного тока определяет основные направления в выборе способов гашения дуги.

В разработанной В.Д. Радченко и И.И. Рыковым дугогасительной камере использован принцип удлинения дуги с одновременным увеличением градиента напряжения в ее столбе. Камера успешно гасит дугу при ограниченных токах короткого замыкания. Однако в условиях возросшей мощности устройств электроснабжения ее разрывная способность окажется недостаточной, о чем свидетельствует статистика повреждений выключателей.

Проведенный анализ показал, что основной причиной повреждений при больших отключаемых токах является возникновение в устье

камеры повторных зажигания дуги в процессе заполнения камеры дугой. Поэтому в таких камерах нельзя обеспечить достаточно высокую скорость роста напряжения в дуге, что вызывает сильный износ элементов камеры, а иногда и полное ее повреждение. Введение последовательно с дугой активного сопротивления позволит часть энергии, запасенной в индуктивности цепи, рассеять в сопротивлении, уменьшить ток в дуге и тем самым облегчить ее гашение. Но попытки использовать этот принцип в виде рогов из материала, обладающего большим удельным сопротивлением оказались неудачными. Не решает поставленной задачи и предложение Ратковского заменить электроды в дугогасительной камере на контакты, между которыми включается активное проволочное сопротивление. В данном случае при больших токах исключается возможность ввода сопротивления достаточной величины.

Исследованный Г.А. Кукековым способ использования предварительно заряженной емкости для гашения дуги постоянного тока не применим в наших условиях. Так как высокую частоту колебательного контура LC применить нельзя из-за больших перенапряжений при гашении дуги с высокой скоростью спада тока к нулю, то при значительных величинах отключаемого постоянного тока устройство LC получается очень громоздким.

Очень высокой разрывной способностью обладает дугогасящая решетка М.О.Доливо-Добровольского. При помощи такой камеры О.Б.Брон обеспечивал гашение дуги с током до 40000А при напряжении источника питания 250В. Однако, получив широкое распространение в выключателях постоянного тока напряжением до 500В, дугогасительная решетка не нашла применения на высоком напряжении (в частности на 3,3кВ) Дело в том, что с увеличением напряжения замедляется

заход дуги в промежутки между пластинами решетки, что приводит к оплавлению пластин и повреждению выключателя.

Способ, сочетающий положительные качества дугогасительной решетки и ограничения тока короткого замыкания вводимым в цепь дуги сопротивлением, был предложен и реализован в дугогасительной камере Е.А. Михайленко. Камера представляет собой дугогасительную решетку, набранную из U-образных скобок, изготовленных из фехраля с удельным сопротивлением $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Атором проведен подробный анализ влияния этой дугогасительной камеры на эффективность ее работы для различной индуктивности в цепи короткого замыкания и тока срабатывания выключателя. В данном случае под эффективностью работы дугогасительной камеры подразумевается её ограничивающая по току способность, перенапряжение, создаваемое камерой в процессе гашения дуги и время её гашения.

В результате проведенного исследования установлено, что с точки зрения уменьшения времени гашения дуги и увеличения ограничивающей по току способности целесообразно использовать камеры с максимально возможным сопротивлением скобок. Однако по условию максимально допустимого напряжения на контактах выключателя в процессе гашения дуги это сопротивление ограничивается 1 Ом в режиме работы одной камеры и 0,4 Ом в режиме работы двух последовательно соединенных камер при индуктивности в цепи короткого замыкания 11 мГ и токе срабатывания выключателя 7000А.

Необходимость ограничивать сопротивление скобок камеры вызывает увеличение времени гашения дуги. Это в свою очередь приводит к тому что камера успевает полностью заполниться дугой до момента ее угасания и окончательный этап гашения происходит при неподвижном положении дуги, вызывая интенсивный износ элементов камеры. Следовательно, возникает задача теоретического и экспериментального

поиска такой конструкции дугогасительной камеры, которая обеспечила бы непрерывное движение дуги до её угасания.

ГЛАВА II ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ДУГОВОГО РАЗРЫВА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

В зависимости от конструкции камеры процесс гашения дуги будет различный по характеру изменения напряжения на дуге, времени ее гашения и т.д. При этом лучшей конструкцией камеры будет та, которая при заданном допустимом перенапряжении обеспечит минимум времени гашения дуги. Следовательно возникает задача оптимального управления процессом дугового разрыва цепи. Ниже приводится краткое описание хода решения этой задачи и результаты решения.

Роль управляемого объекта в нашем случае выполняет дуга отключения. В качестве фазовых координат, характеризующих состояние объекта, приняты напряжение и ток в дуге. За управляющий параметр принята скорость изменения напряжения на дуге. Тогда движение объекта может быть описано уравнениями:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri + U(t) = U_{\mu} \\ \frac{dU(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (1)$$

Вводим обозначения $x_1 = i(t)$; $x_2 = U(t) - U_{\mu}$, при которых система уравнений I принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{R}{L} x_1 - \frac{1}{L} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (2)$$

при начальных условиях

$$x_1(0) = i_0; \quad x_2(0) = -U_{\mu}$$

конечных условиях

$$x_1(t') = 0 \quad 0 < x_2(t') \leq \bar{U} - U_{\mu}$$

НТБ
ДНУЖТ

ограничении на управляющий

$$0 \leq v(t) \leq \bar{v};$$

ограничении на фазовые координаты

$$x_1(t) \geq 0, \quad -U_{11} \leq x_2(t) \leq \bar{U} - U_{11}$$

Данная задача является задачей оптимального управления с подвижным правым концом и ограничениями на фазовые координаты.

Исходя из принципа максимума с необходимостью имеем, что при отсутствии ограничений на фазовые координаты $v(t)$ — кусочно постоянная, так как функция Гамильтона-Понтрягина

$$H = \psi_1 \left(-\frac{R}{L} x_1 - \frac{1}{L} x_2 \right) + \psi_2 \cdot v$$

линейна и максимальное значение по v достигает на границе,

т.е. для любого момента t , $t_0 \leq t \leq t$ выполнено условие максимума

$$H(\psi(t), x(t), v(t)) = \max_{v \in U} H(\psi(t), x(t), v),$$

$(v(t), x(t))$ — оптимальный процесс.

Следовательно

$$v = \begin{cases} 0, & \text{если } \psi_2(t) < 0 \\ \bar{v} & \text{если } \psi_2(t) > 0 \\ \text{произвольное значение,} & \\ & \text{если } \psi_2(t) = 0 \end{cases}$$

Используя условия трансверсальности, находим:

$$\psi_2(t) = C \exp\left(\frac{R}{L} t'\right) \left[\exp\left(-\frac{R}{L}(t'-t)\right) - 1 \right]$$

Так как функция $\psi_2(t)$ не меняет знака при любом t , то при отсутствии ограничений на фазовые координаты переключений управления не может быть.

Но при наложении на фазовые координаты ограничений количество переключений является неизвестным. В связи с этим исследовано поведение фазовых траекторий, когда управляющий параметр $v(t)$ принимает граничные значения и произведен анализ возможных

изменений управления с точки зрения быстрого перевода базовой точки из начального в конечное положение. Этот анализ дал возможность сформулировать и доказать теорему об оптимальном быстром действии.

В результате решения поставленной задачи доказано, что для реализации оптимального быстрого действия процесса дугового разрыва цепи постоянного тока необходима такая конструкция дугогасительной камеры, которая обеспечит максимальную скорость роста напряжения на контактах выключателя и затем поддержание этого напряжения в процессе гашения дуги на уровне допустимых значений.

ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОШНОЙ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Падение напряжения в столбе дуги, как известно, растет с уменьшением тока и достигает наибольшего значения в момент погасания дуги. Иначе обстоит дело в приэлектродных участках дуги. Катодное и анодное падение напряжения практически не зависит от величины тока. Поэтому в дугогасительной решетке, где основное падение напряжения приходится на электроды, уменьшение тока практически не приводит к изменению напряжения в камере.

Таким образом, для реализации оптимального закона изменения напряжения на дуге при её гашении следует ориентироваться на камеру, использующую принцип дугогасительной решетки.

Во избежание повреждения элементов дугогасительной камеры необходимо создать условия непрерывного движения дуги до ее угасания. Это приобретает особую важность в условиях гашения

дуги в камере с малыми габаритами и большой индуктивностью в отключаемой цепи.

В результате экспериментальных исследований разработана дугогасительная камера (в дальнейшем — камера ДИИТа), представляющая собой набор 12-ти одинаковых последовательно соединенных элементов, один из которых показан на рис. 1.

Дуга на входе в элемент в сечении „ $\alpha-\delta$ “ поворачивается на 90° из вертикальной плоскости в плоскость чертежа и далее движется между электродами 1, увеличиваясь в длине. По мере проникновения дуги в решетку, составленную из электродов 1, 3, 4 и скобок 2, она дробится на ряд коротких последовательно соединенных участков. В процессе движения дуга в сечении „ $\beta-\varepsilon$ “ разбивается на основную,двигающуюся справа налево в решетке, образованной электродами 3, 4 и скобками 2, и на управляющие,двигающиеся по каналам 5 между электродами 1 и 3 слева направо. Как только управляющие дуги достигают до концов электродов 1 и 3, они возбуждают в сечении „ $\varepsilon-\eta$ “ две дуги между электродами 1 и скобкой 2. Так как для поддержания горения дуг Π и III требуется меньшее напряжение, чем для поддержания горения дуги в решетке, последняя угасает, а вновь возникшие дуги повторяют описанный выше цикл.

Таким образом реализовано непрерывное движение дуги до ее угасания, что позволяет избежать оплавления электродов и подгорания асбестоцемента.

В процессе разработки конструкции элемента дугогасительной камеры автором проведены исследования:

а) допустимой величины угла между расходящимися электродами I с точки зрения исключения повторных заливог дуги в процессе ее движения;

б) условий прохода дугой воздушного промежутка между электродами I и 3 в сечении „ $\beta-\varepsilon$ “;

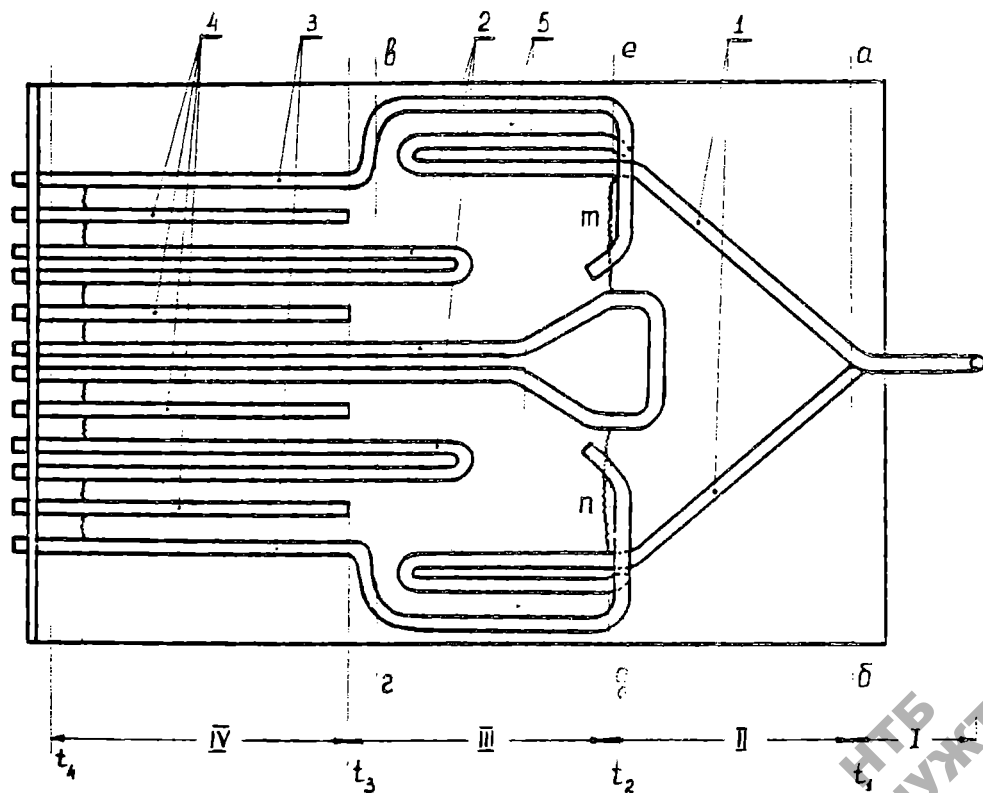


Рис 1
Элемент камеры

в) влияние конструкции дугогасительной решетки на движение дуги;

г) восстанавливающейся прочности дуговых промежутков в горловине камеры.

Результаты экспериментальных исследований показали, что повторные зажигания дуги при движении ее по расходящимся электродам I, замкатым изолирующими стенками, исключаются, если угол между этими электродами не превышает 60° с устройством в стенках выпуклых отверстий типа малези.

Теоретическое рассмотрение процесса прохода дугой воздушно-го промежутка между электродами I и 3 в сечении $\beta-\delta''$ элемента позволило установить, что этот промежуток не вызовет остановки дуги при ее гашении. Экспериментальная проверка подтвердила правильность сделанного вывода.

Чередование в элементе U-образных скобок со стержневыми электродами обеспечило независимость движения отдельных участков дуги в дуговых каналах друг от друга. Такое конструктивное решение дало возможность устранить серьезный недостаток обычной дугогасящей решетки, в которой несинхронное движение участков дуги между пластинами вызывало обратный ход отставших дуг, что приводило к повреждению аппарата.

Одним из важных факторов, определяющих дугогасительную способность аппарата, является характер изменения восстанавливающейся электрической прочности дуговых промежутков.

При превышении напряжения на горячей дуге постоянного тока над напряжением сети существование дуги становится невозможным. При таком условии повторное возникновение дуги в месте ее погасания исключается. Но при магнитном дутье следом за двигающейся дугой остается некоторая область, заполненная еще недостаточно

деионизированным газом. Это создает возможность пробоя нарастающим на дуге напряжением коротких дуговых промежутков между разнопотенциальными электродами в горловине камеры.

Для анализа влияния различных факторов на скорость восстановления электрической прочности автором разработана схема ее измерения. Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективными мерами для увеличения скорости восстановления электрической прочности является устройство выхлопных отверстий для выброса ионизированных газов из камеры и ограничение размеров дуги.

ГЛАВА IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДУГОВОГО РАЗРЫВА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ КАМЕРЫ ДИИТА.

С целью оценки эффективности работы камеры ДИИТа автором составлены расчетные выражения для определения тока в дуге, напряжения на контактах выключателя в процессе гашения дуги и времени ее гашения.

Для цепи постоянного тока, содержащей индуктивность L , активное сопротивление R и дугу, баланс напряжений имеет вид:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u(t) = U_{\text{и}} \quad (3)$$

где $u(t)$ - напряжение в дуге камеры.

Установление закономерности изменения $u(t)$ позволит определить ток в дуге и время ее гашения. Так как дугогасительная камера ДИИТа состоит из набора одинаковых элементов, то рассмотрим закон изменения напряжения $u(t)$ для одного элемента, распространив затем полученный результат на остальные.

Дуга при движении в элементе (рис. I) пробивается на отдельные участки, а также вводит активное сопротивление вначале электродов 1, затем скобок 2 и электродов 3. Так как вводимое дугой ак-

тивное сопротивление камеры и сумма приэлектродных падений напряжения являются независимыми величинами, можно воспользоваться методом наложения, рассмотрев отдельно влияние указанных факторов на характер изменения $U(t)$.

Допустим, что дуга в элементе движется равномерно, а напряжение на ней меняется кусочно-линейно. Тогда без учета влияния активного сопротивления электродов и скобок характер изменения напряжения на элементе при движении дуги, изображенный на рис. 2, можно описать выражением вида:

$$U'_2(t) = A \sigma(t_1 - t) + [E(t - t_1) + A] [\sigma(t_2 - t) - \sigma(t_1 - t)] + \\ + \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-t_2}{\tau_u} \right]} \left\{ [B(t - t_2 - \tau_{uj}) + A + g\ell] [\sigma(t_3 + \tau_{uj} - t) - \sigma(t_2 + \tau_{uj} - t)] + \right. \\ \left. + Am [\sigma(t_4 + \tau_{uj} - t) - \sigma(t_3 + \tau_{uj} - t)] \right\},$$

где A - приэлектродные падения напряжения в одном дуговом промежутке;

m - количество дуговых промежутков;

g - градиент напряжения в дуге;

ℓ - длина дуги в момент времени t_2 ;

τ_u - продолжительность цикла движения дуги на участках III-IV до ее повторного зажигания в начале участка III

$$\tau_u = t_4 - t_2;$$

$\sigma(t)$ - единичная функция;

E - скорость нарастания напряжения в дуге на участке II

$$E = \frac{g\ell}{t_2 - t_1};$$

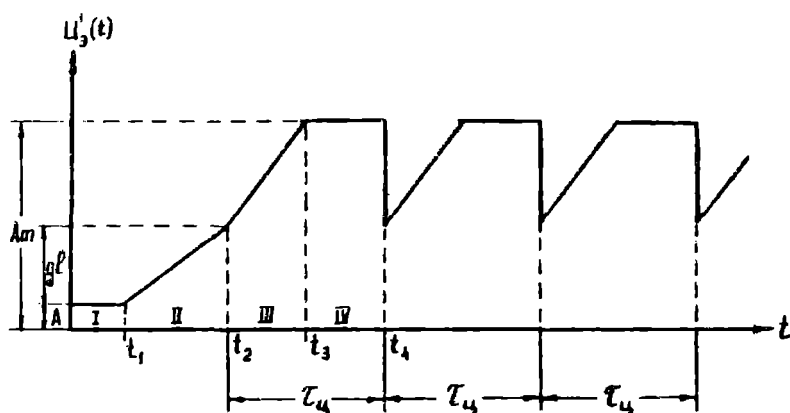


Рис. 2

Характер изменения $U'_3(t)$

НТБ
ДНУЖТ

B - скорость нарастания напряжения при движении дуги на участке III

$$B = \frac{A(m-1) - g\ell}{t_3 - t_2},$$

$\left[\frac{t-t_2}{\tau_{13}} \right]$ - верхний предел суммы равный целым числам выражения, заключенного в скобки.

По мере движения в элементе дуга вводит активное сопротивление $Z(t)$ электродов и скобок, вызывая при этом дополнительное падение напряжения, равное

$$U_z''(t) = i(t) \cdot Z(t)$$

Характер изменения $Z(t)$ показан на рис.3, в соответствии с которым закон изменения активного сопротивления получает вид:

$$Z(t) = \alpha_1 t \sigma(t_2 - t) + z_1 \sigma(t - t_2) +$$

$$\sum_{j=0}^{\left[\frac{t-t_2}{\tau_{13}} \right]} \alpha_2 (t - t_2 - \tau_{13} j) \left[\sigma(t_1 + \tau_{13} j - t) - \sigma(t_2 + \tau_{13} j - t) \right],$$

где z_1 - сопротивление электродов I;

α_1 - скорость ввода дугой сопротивления z_1 ;

$$\alpha_1 = \frac{z_1}{t_2}$$

α_2 - скорость ввода дугой сопротивления γ_2 электродов и скобок элемента на участке III-IV

$$\alpha_2 = \frac{\gamma_2}{t_4 - t_2}$$

Полное падение напряжения на элементе $U_z(t)$ равно сумме $U_z'(t)$ и $U_z''(t)$

Полагая, что скорость движения дуги сохраняется постоянной за все время ее гашения. Тогда со смещением во времени t_c дуга начнет заполнять второй элемент, через время $2t_c$ - третий и т.д.

Таким образом, полное напряжение на дуге камеры $U(t)$ может быть представлено возрастающей суммой $U_z(t)$ как

$$U(t) = \sum_{k=0}^{\left[\frac{t}{t_c} \right]} \left\{ A \left[\sigma(t_1 + t_c k - t) - \sigma(t_c k - t) \right] + \left[E(t - t_1 - t_c k) + A \right] \left[\sigma(t_2 + t_c k - t) - \right. \right.$$

6496a

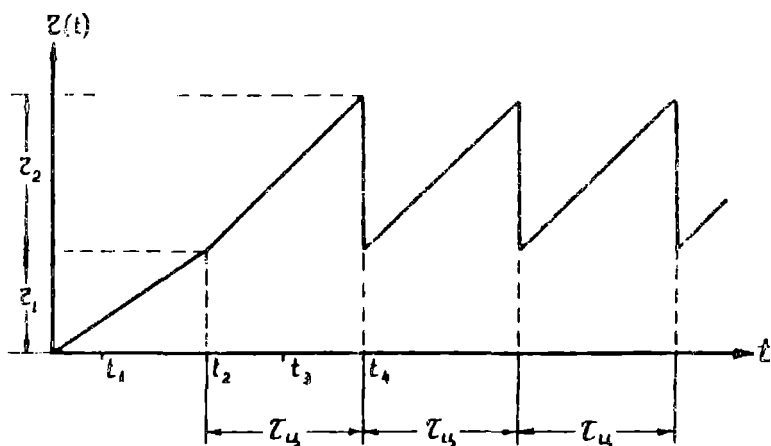


Рис 3

Характер изменения $z(t)$

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка Є. Пазаряна

НТБ
ДНУЖТ

$$\begin{aligned}
& -\sigma(t_1 + t_c \cdot K - t) \Big] + \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{t-t_2-t_c \cdot K}{T_{us}} \right\rfloor} \left\{ [B(t-t_2-t_c \cdot K - T_{us}j) + A + y^2] \sigma(t_3 + t_c \cdot K + T_{us}j - t) - \right. \\
& \left. \sigma(t_2 + t_c \cdot K + T_{us}j - t) \right\} + Am \left[\sigma(t_4 + t_c \cdot K + T_{us}j - t) - \sigma(t_3 + t_c \cdot K + T_{us}j - t) \right] \Big\} + \\
& i(t) \left\{ \alpha_1 (t - t_c \cdot K) [\sigma(t_2 + t_c \cdot K - t) - \sigma(t_c \cdot K - t)] + Z_1 \sigma(t - t_2 - t_c \cdot K) + \right. \\
& \left. \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{t-t_2-t_c \cdot K}{T_{us}} \right\rfloor} \alpha_2 (t - t_2 - t_c \cdot K - T_{us}j) [\sigma(t_4 + t_c \cdot K + T_{us}j - t) - \sigma(t_2 + t_c \cdot K + T_{us}j - t)] \right\} \dots (4)
\end{aligned}$$

Подставляя (4) в уравнение (3), можно рассчитать изменение тока в отключаемой цепи, напряжения на контактах выключателя в процессе гашения дуги и время ее гашения. Для этой цели разработана программа расчета на ЭВМ "Наири". Сравнение расчетных данных с экспериментальной осциллограммой отключения показало хорошее совпадение результатов.

Для облегчения расчета процесса гашения дуги и сокращения машинного времени на его производство можно воспользоваться разработанными автором упрощенными формулами, которые дают удовлетворительную инженерную точность результатов.

Заменяя изменяющееся за время цикла T_{us} напряжение на элементе и его сопротивление средневзвешенными значениями, получим

$$u(t) = (\alpha i + B) t \sigma(t_j - t) + (Z_K + D) \sigma(t - t_j) \quad (5)$$

где Z_K - активное сопротивление камеры $Z_K = Z_{cp} \cdot \delta_{3\delta} \cdot K$;

K - количество элементов камеры;

D - сумма приэлектродных падений напряжения в дуговых промежутках камеры $D = A_{cp} \cdot \delta_{3\delta} \cdot K$;

α - скорость ввода активного сопротивления камеры

$$\alpha = \frac{Z_K}{t_j},$$

B - скорость нарастания приэлектродных падений напряжения камеры
ры $B = D/t_3$,

t_3 - время заполнения камеры дугой $t_3 = t_c \cdot K$

Подставляя (5) в уравнение (3) получим

$$L \frac{di}{dt} + Ri + (\alpha i + B)t \sigma(t_3 - t) + (z_k i + D) \sigma(t - t_3) = U_n \quad (6)$$

Решением уравнения (6) в интервале времени $0 \leq t \leq t_3$ при начальных условиях $t=0$; $i=I_0$ будет выражение вида:

$$i = \left\{ \sqrt{\frac{2}{\alpha L}} e^{-\frac{R^2}{2\alpha L}} \left[\left(U_n + \frac{B \cdot R}{\alpha} \right) \int_{\frac{R}{\sqrt{2\alpha L}}}^{\sqrt{\frac{\alpha}{2L}} \cdot t + \frac{R}{\sqrt{2\alpha L}}} e^{x^2} \cdot dx - B \sqrt{\frac{L}{2\alpha}} e^{\frac{1}{L} (Rt + \frac{\alpha}{2} t^2)} \right] + \right. \\ \left. I_0 + \frac{B}{\alpha} e^{-\frac{R^2}{2\alpha L}} \right\} e^{-\frac{1}{L} (Rt + \frac{\alpha}{2} t^2)},$$

где I_0 - ток в цепи короткого замыкания в момент появления дуги на контактах выключателя.

Для интервала времени $t_3 \leq t \leq t_g$, где t_g - время гашения дуги, решение уравнения (6) при начальных условиях $t=t_3$; $i=i_{t_3}$ принимает вид:

$$i = \frac{U_n - D}{R + z_k} + \left(i_{t_3} - \frac{U_n - D}{R + z_k} \right) e^{-\frac{R + z_k}{L} (t - t_3)}$$

Разработанная уточненная и упрощенная методика расчета процесса дугогашения позволяет производить обоснованный выбор параметров дугогасительной камеры.

ГЛАВА У. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ ДИИТа НА ПРОЦЕСС ДУГОГАШЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КАМЕРЫ.

В основу дугогасительной камеры ДИИТа заложен принцип дробле-

ния дуги на большое количество коротких последовательно соединенных участков. По мере заполнения камеры дугой в цепь тока вводится также активное сопротивление электродов, которые выполнены из стали К1-10 Φ 8 мм. Однако величина активного сопротивления камеры мала и поэтому незначительно влияет на процесс дугогашения. Таким образом, основным параметром, определяющим процесс дугогашения, является количество дуговых промежутков.

Проведенные автором расчеты выявили следующие закономерности. Время гашения дуги t_g сокращается с увеличением количества дуговых промежутков наиболее заметно в том случае, когда сумма приэлектродных падений напряжения ΔU в дуговых промежутках немного превышает напряжение источника питания U_n . Если же ΔU значительно превосходит U_n , то увеличение количества дуговых промежутков мало влияет на время t_g .

Нарастание тока в дуге до своего максимального значения происходит за время меньшее времени заполнения камеры дугой. Поэтому ограничивающая по току способность камеры не зависит от количества дуговых промежутков.

Величина напряжения на контактах выключателя в процессе гашения дуги растет с увеличением количества дуговых промежутков и слабо зависит от тока в дуге и индуктивности в цепи короткого замыкания, что обусловлено незначительным сопротивлением камеры.

Экспериментальная проверка камеры подтвердила результаты расчета. Время гашения дуги составляет 20+30 мс в зависимости от индуктивности цепи и тока срабатывания выключателя.

Ограничивающая способность камеры по току, т.е. приращение тока в дуге с момента ее возникновения и до момента, соответствующего максимуму тока в дуге, не превышает 1200 А при токах срабатывания

выключателя до 10000 А и индуктивности цепи до 11 мГ. Дугогасительная камера надежно гасит дугу с током в ней 15 А (нормируемая ГОСТ 2585-69 минимальная величина тока отключения составляет 30 А), но при этом время гашения увеличивается до 1,3 с. Максимальное значение тока в дуге, которую надежно гасит камера, составляет 20000 А.

Напряжение на контактах выключателя, создаваемое камерой в процессе гашения дуги, может регулироваться путем набора того или иного количества элементов камеры. При 12-ти элементах камеры, составляющих ее, максимальное напряжение в процессе гашения дуги не превышает 6000 В при токах срабатывания выключателя до 10000 А и индуктивности в цепи до 11 мГ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1. В результате решения задачи оптимального управления процессом гашения дуги установлено, что для реализации оптимального быстрого действия дугового разрыва цепи постоянного тока необходима такая конструкция дугогасительной камеры, которая обеспечит максимальную (по условиям нарастания восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка) скорость роста напряжения на контактах выключателя в первые моменты времени и затем поддержание этого напряжения в процессе гашения дуги на уровне допустимых значений.

2. Выполненные исследования эффективности работы дугогасительной камеры, использующей принцип модернизированной дугогасящей решетки, показали, что для дугового разрыва мощной цепи короткого замыкания, содержащей индуктивность 8 мГ и более необходима камера, обеспечивающая непрерывное движение дуги по замкнутому циклу до ее угаса-

ния. Это позволит ограничить габариты камеры и значительно увеличить ее износостойчивость.

3. На основании экспериментальных исследований показано, что для избежания повторных зажиганияй вслед за дугой, двигающейся по рогаобразным электродам, зажатым изолирующими стенками, угол расхождения этих электродов должен быть не более 60° с максимальной площадью выхлопных отверстий типа жалюзи в изолирующих стенках.

4. В результате экспериментальных исследований разработана рациональная конструкция дугогасительной решетки, представляющая собой чередование U-образных и стержневых электродов.

5. Разработана схема для определения восстанавливающейся электрической прочности дуговых промежутков камеры, позволившая установить запас восстанавливающейся прочности наиболее ответственного узла дугогасительной камеры ДИИТа - горловины.

6. Разработанная подробная и упрощенная математическая модель процесса гашения дуги камерой с заданными конструктивными параметрами, позволяет рассчитать на стадии проектирования:

- а) время гашения дуги;
- б) напряжение на контактах выключателя в процессе гашения дуги;
- в) ограничивающую по току способность камеры.

7. На основании проведенных испытаний дугогасительной камеры ДИИТа установлено:

- а) камера надежно гасит дугу при отключении тока нагрузки 15 А при напряжении источника питания 4 кВ;
- б) предел по току отключающей способности камеры составляет не менее 20000 А в дуге;
- в) время гашения дуги составляет в среднем 20+30 мс.

8. Показано, что использование дугогасительной камеры ДИИТа

повышает надежность работы системы тягового электроснабжения электрифицированных участках постоянного тока.

В настоящее время дугогасительные камеры ДИИТа проходят опытную эксплуатацию на Львовской и Закарпатской железных дорогах.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

И.Михайленко Е.А., Ивлев Ю.К., Шевченко В.М. Метод определения электрической прочности дугогасительной системы. Труды ДИИТа, вып.163,1975г.

С.Михайленко Е.А., Ивлев Ю.К., Шевченко В.М. Экспериментальное определение градиента в дуге постоянного тока для различных углов между электродами. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 169/74 от 31.10.74г.

З.Босов А.А., Михайленко Е.А., Ивлев Ю.К. Оптимальный процесс дугового разрыва цепи постоянного тока. Рукопись депонирована в ЦНИИТЭИ МПС за № 174/74 от 23.12.74г.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ДОКЛАДЫВАЛИСЬ И ОБСУЖДАЛИСЬ:

-на научно-технической конференции ДИИТа, посвященной 50-летию образования СССР, Днепропетровск, 1972г.

-на научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1974г.

-на заседании научного семинара кафедр энергоснабжения электрических железных дорог, электроподвижного состава, электро-техники ДИИТа, Днепропетровск, 1975г.

Сканировала Камьянская Н.А.