

Днепропетровский институт инженеров  
железнодорожного транспорта

---

ПИВНЕНКО А.Д.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
КОММУТАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО  
СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Днепропетровск 1973

СССР - МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА

---

На правах рукописи

Александр Дмитриевич ПИВНЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОММУТАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность 05.22.09 - Электрификация железнодорож-  
ного транспорта

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Днепропетровск

1973

6936a

**Работа** выполнена на кафедре теоретической и общей электротехники Сиваотопольского приборостроительного института и в лаборатории электротехнических стендовых испытаний Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения (Рижский филиал)

**Научный руководитель** - кандидат технических наук,  
доцент **МАРАКТАНОВ В.А.**

**Официальные оппоненты:**

заслуженный деятель науки и техники УССР,  
доктор технических наук, профессор  
**ВОЛОТКОВСКИЙ С.А.**

кандидат технических наук, доцент  
**МИХАЙЛЕНКО Е.А.**

**Ведущее предприятие** - Рижский ордена Трудового  
Красного Знамени вагоностроительный  
завод.

**Автореферат** рассмотрен "        " \_\_\_\_\_ 1978 г.

**Защита** состоится 24 января 1974 года на заседании  
Ученого совета Днепропетровского института инженеров желе-  
знодорожного транспорта по адресу 820629, г. Днепропетровск,  
ул. Университетская 2, ДИИТ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
института

**Ученый секретарь совета**

/ ЛОГВИН А.Ф. /

## ВВЕДЕНИЕ

Обширные масштабы электрификации железных дорог, непрерывное увеличение мощности устройств электроснабжения и электроподвижного состава (ЭПС) ведут к широкому применению разнообразного электрического оборудования, среди которого значительное место занимает коммутационная аппаратура.

Анализ работы оборудования ЭПС показал — современные потребности электроэнергии на подвижном составе предъявляют повышенные требования к процессам коммутации, что связано со специфическими условиями работы электрифицированного транспорта, с улучшением условий работы самого электрооборудования. К таким требованиям может быть отнесено снижение перенапряжений при одновременном уменьшении времени коммутации, бездуговое и безискровое отключение, снижение и в конечном итоге, полное устранение импульсных радиопомех при осуществлении операций включения — отключения.

Исследование коммутационных перенапряжений имеет большое практическое значение, т.к. на основе этого анализа могут быть установлены обоснованные требования к электрической прочности изоляции, решаться вопросы ее уменьшения, т.е. уменьшения веса, габаритов и стоимости оборудования. Сокращение времени переключений позволяет увеличить срок службы выключателей, расширить пределы коммутационной способности последних, повысить чувствительность электрооборудования и команд управления.

Использование телесигнализации и телеуправления объектами на электрифицированных железных дорогах, передача информации по радио требуют снижения и, в конечном, итоге, полного устранения импульсных радиопомех.

На основании вышеизложенного в данной работе поставлена цель - исследовать явления, сопровождающие процессы коммутации цепей ЭПС и на основе этого анализа определить оптимальные по быстродействию условия отключения нагрузки, разработать бездуговой квазиоптимальный выключатель и практическое использование результатов, позволяющее снизить коммутационные перенапряжения, повысить быстродействие аппаратов.

В ГЛАВЕ ПЕРВОЙ рассмотрены достоинства и недостатки возможных методов и систем коммутации цепей ЭПС постоянного тока. На основе анализа установлено, что при разработке и проектировании коммутационной аппаратуры значительное внимание уделяется решению проблем надежного отделения нагрузки от источника питания, устранению дуги из процесса отключения и т.д. В связи с созданием равнообразных и надежных выключателей и возросшими требованиями, предъявляемыми к операциям переключений, возникает необходимость решать ряд вопросов, связанных с улучшением качественной стороны коммутации цепей. Сюда могут быть отнесены задачи снижения перенапряжений при одновременном уменьшении времени отключения, создание полностью управляемых систем коммутации, обеспечивающих бездуговое отключение по заданному закону изменения тока в цепи и напряжения на выключателе, рациональное уменьшение электрической прочности изоляции на основе анализа факторов, влияющих на величину перенапряжений и т.д. В связи с этим была поставлена задача анализа процесса коммутации в цепях ЭПС с целью улучшения условий работы электрооборудования и выполнения вышеперечисленных требований.

ГЛАВА ВТОРАЯ посвящена исследованию электрических и энергетических параметров цепи в процессе отключения и определе-

нию критериев успешного отделения нагрузки от источника энергии. Все вопросы, связанные с качественной и количественной оценкой явлений при коммутации цепей ЭПС, в данной работе рассматриваются на примере отключения активно-индуктивной нагрузки по схеме, представленной на рис.1. Данная схема является

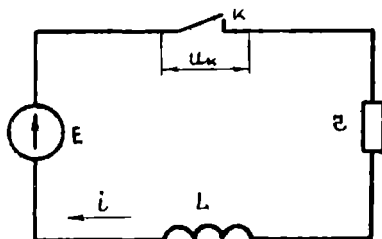


Рис. 1

частным, но не единственным случаем. Установлено, что она позволяет рассмотреть отключение многих потребителей на ЭПС, к ней сводится ряд более сложных цепей, например, отключение параллельно работающих нагрузок с одинаковыми электромагнитными постоянными времени. Случай перетекания тока из контактов в активно-индуктивный или полупроводниковый шунт так же может быть рассмотрен при помощи данной схемы, т.е. в большинстве реальных цепей электромагнитная постоянная времени цепи нагрузки во много раз превышает время перетекания тока в шунт и электромагнитную постоянную времени цепи шунта. Принятая к рассмотрению схема позволяет проводить анализ процессов при отключении двух параллельно включенных активно-индуктивных нагрузок с резко отличным электромагнитными постоянными времени. Переход к рассматриваемой схеме осуществляется путем замены источника тока на эквивалентный

относительно выключателя источник напряжения. Таким образом, результаты, полученные при рассмотрении процессов коммутации в схеме, представленной на рис.1, могут быть распространены на

более широкий класс цепей.

Исследование явлений при переключениях весьма удобно проводить на фазовой плоскости. Последняя позволяет определить все электрические и энергетические параметры цепи в любой момент отключения, проследить их качественные изменения и тем самым наметить более рациональные пути их изменения при проектировании новых выключателей или модернизации существующих систем коммутации. При базисных значениях  $U_k = E$ ;  $I_k = \frac{E}{Z}$ ;  $t_k = \frac{L}{Z}$  уравнение процесса отключения в принятой схеме в относительных единицах принимает вид

$$\frac{di}{dt} + i + u_k = 1. \quad (1)$$

На фазовой плоскости с осями  $x = i$ ;  $y = \frac{di}{dt}$  выражение (1) преобразуется в уравнение фазовой траектории

$$y = 1 - u_k - x. \quad (2)$$

Совместный анализ выражения (2) и производной  $\left(-\frac{dy}{dx}\right)$ , пропорциональной тангенсу угла  $\alpha$  наклона касательной к фазовой траектории к отрицательной полуоси абсцисс, позволяет качественно оценить изменение напряжения на выключателе в процессе отключения. Так при

- а)  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ ;  $-\frac{dy}{dx} > 1$ ;  $\frac{du_k}{dt} < 0$  и напряжение на выключателе  $u_k$  убывает;
- б)  $-90^\circ < \alpha < 45^\circ$ ;  $-\frac{dy}{dx} < 1$ ;  $\frac{du_k}{dt} > 0$  —  $u_k$  растет;
- в)  $\alpha = 45^\circ$ ;  $-\frac{dy}{dx} = 1$ ;  $\frac{du_k}{dt} = 0$ ; напряжение  $u_k$  достигает своего экстремума.

---

\* ) в дальнейшем все процессы с математической стороны рассматриваются в относительных единицах.

Если на некотором участке фазовая траектория представляет собой прямую линию, то в зависимости от угла наклона последней к отрицательной полуоси абсцисс, ток в коммутируемой цепи убывает:

- а) при  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  - по закону вогнутой экспоненты,
- б) при  $-90^\circ < \alpha < 0^\circ$  - по закону выпуклой экспоненты,
- в) при  $\alpha = 0^\circ$  - по прямой линии.

Для оценки электрических и энергетических параметров коммутируемой цепи в любой момент отключения уравнение (2) необходимо представить в виде

$$\dot{x} = yx + x^2 + u_k x, \quad (3)$$

Составляющие в выражении (3) представляют собой в относительных единицах:

$$yx = E \cdot i = P_a \quad - \text{мощность источника напряжения,}$$

$$yx = L \frac{di}{dt} \cdot i = \frac{d}{dt} \left( L \frac{i^2}{2} \right) \quad - \text{скорость увеличения магнитной энергии нагрузки (при отключении эта величина имеет отрицательный знак),}$$

$$x^2 = z \cdot i^2 = P_r \quad - \text{мощность потерь в нагрузке,}$$

$$u_k x = u_k(i, t) = P_k \quad - \text{мощность потерь в коммутирующем аппарате.}$$

Рассматриваемое отключение заключается в плавном снижении проводимости выключателя -  $g_k$ , которая стремится к нулю и в последний момент коммутации имеет конечную скорость убывания. В ряде случаев именно эти последние моменты времени определяют условия успешного отключения цепи и величину коммутационных



перенапряжений. Для определения максимальных всплесков напряжений необходимо иметь решение уравнения (1) относительно  $u_k$ , которое с учетом  $i = g_k \cdot u_k$  принимает вид:

$$u_k = \exp \left[ - \int \frac{1}{g_k} \left( 1 + g_k + \frac{dg_k}{dt} \right) \cdot dt \right] \times \quad (4)$$

$$\times \left\{ \int \frac{1}{g_k} \exp \left[ \int \frac{1}{g_k} \left( 1 + g_k + \frac{dg_k}{dt} \right) dt \right] dt + A \right\}$$

Полученное выражение для  $u_k$  позволяет определить напряжение на выключателе в любой момент коммутации. В большинстве существующих выключателей  $u_k$  достигает максимального значения в последний момент отключения -  $t_{от}$ , что позволяет определить перенапряжения как:

$$U_k = \lim_{t \rightarrow t_{от}} u_k$$

В результате чего выражение (4) приобретает вид:

$$U_k = \frac{1}{1 - \beta} \quad (5)$$

В выражении (5)  $\beta$  - относительная скорость убывания проводимости выключателя в последний момент процесса отключения.

Анализ формулы (5) показывает, что успешное отделение источника энергии от нагрузки возможно при определенных значениях  $\beta$ , т.е. при  $\beta \geq 1$  (в абсолютных единицах при  $\left. \frac{dg_k}{dt} \right|_{t=t_{от}} \geq \frac{1}{L}$ )

$U_k = \infty$  и отключение цепи заведомо невозможно. Для подтверждения приведенных теоретических положений было проведено сравнение коммутационных перенапряжений, рассчитанных по выражению (5) и полученных экспериментально. Результаты такого сравнения

представлены в таблице 1.

9

Таблица 1

Скорость убывания проводим. $\delta$	расчет. $U_k$	экспер. $U_k$	ош %ка
0,615	2,60	2,675	2,80%
0,470	1,90	2,120	10,30%
0,115	1,19	1,100	2,73%

Электрические цепи электровозов и электропоездов содержат большое количество различных обмоток, обладающих значительными индуктивностями. Частые коммутационные переключения и срабатывание защитных аппаратов при перегрузках и коротких замыканиях являются одной из главных причин возникновения в схемах подвижного состава внутренних перенапряжений. Для анализа максимальных значений последних и путей их уменьшения, проведенного в ГЛАВЕ ТРЕТЬЕЙ, важно выявить главные факторы, определяющие их величину. Если влияющие факторы допускают количественную оценку, то следующим шагом является построение зависимости величины перенапряжений от уровней, принимаемых соответствующими количественными факторами. В условиях разброса параметров коммутационного аппарата, отключаемой цепи и окружающей среды эти зависимости носят очевидно статистический характер, что дает возможность для решения поставленной задачи использовать методы математической статистики. Наиболее перспективным в этом смысле по мнению автора представляется использование дисперсионного анализа для выяснения значимости влияния рассматриваемых факторов и регрессионного анализа для построения соответ-

ствующих зависимостей. Было исследовано влияние некоторых факторов из общего количества действующих с использованием двухфакторного дисперсионного анализа (факторы А и В). При этом величина перенапряжений  $u(A;B)$  допускает при различных уровнях исследуемых факторов (число уровней соответственно К и J) следующее разложение с учетом истинного среднего  $U$  и раздельного -  $\Delta U(A)$ ;  $\Delta U(B)$  и совместного -  $\Delta U(A;B)$  влияния факторов:

$$u(A;B) = U + \Delta U(A) + \Delta U(B) + \Delta U(A;B) + \ell. \quad (6)$$

Составляющие  $\Delta U(A)$ ;  $\Delta U(B)$ ;  $\Delta U(A;B)$  измеряются на дискретных уровнях факторов, поэтому для них вводится дискретный ряд оценок средних с наименьшей дисперсией для соответствующих уровней факторов. В результате с учетом того, что  $\ell$  (случайная величина, отражающая влияние иных неучтенных факторов) имеет нулевое математическое ожидание, выражение (6) приобретает вид:

$$\begin{aligned} u(A;B) = & \frac{1}{K \cdot J \cdot N} \sum_{k,j,n} u_{k,j,n} + \left( \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j,n} u_{k,j,n} - \frac{1}{K \cdot J \cdot N} \sum_{k,j,n} u_{k,j,n} \right) + \\ & + \left( \frac{1}{K \cdot N} \sum_{k,n} u_{k,j,n} - \frac{1}{K \cdot J \cdot N} \sum_{k,j,n} u_{k,j,n} \right) + \left( \frac{1}{N} \sum_n u_{k,j,n} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j,n} u_{k,j,n} - \frac{1}{K \cdot N} \sum_{k,n} u_{k,j,n} - \frac{1}{K \cdot J \cdot N} \sum_{k,j,n} u_{k,j,n} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Оценка влияния исследуемого фактора проводилась при помощи сравнения наблюдаемой и табличной статистики  $F$  (критерий Фишера), согласно которому при  $F_{наблюд} < F_{табл}$  исследуемый фактор не оказывает существенного влияния на изменчивость величины  $u(A;B)$ . При использовании данного метода для анализа коммутационных

перенапряжений при отключении цепи наиболее распространенным на ЭПС выключателем — контактным аппаратом и в исследуемых факторов на величину  $U(A, B)$  влияет ток нагрузки —  $I$  и вл. магнитная постоянная времени нагрузки —  $T_n$ . На рис. 2;3 представлены графики изменения оставляющих в выражении (7) в зависимости от уровней, принимаемых влияющими факторами. Там же пунктиром показан доверительный интервал, в котором с 95% вероятностью будут лежать величины  $\Delta U(A)$ . Проведенные теоретические исследования, подтвержденные экспериментальными данными, показывают перспективность применения методов математической статистики для анализа перенапряжений. Рассмотренные в данной главе существующие методы ограничения всплесков напряжения  $U_n$  при отключении цепей ЭПС требуют искусственного изменения течения процесса и существенно увеличивают время коммутации. Очевидно с точки зрения уменьшения перенапряжений оптимальный закон отключения может быть сформулирован следующим образом — минимальное время коммутации при заданной кратности перенапряжений на выключателе.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ посвящена определению оптимальных по воздействию условий отключения и реализации данных условий. Согласно поставленной задаче напряжение на выключателе ограничено величиной допустимых перенапряжений, которое в общем случае может быть представлено как

$$-U_n^{\min} \leq u_n \leq U_n^{\max}$$

Уравнение процесса отключения принятой схемы может быть записано

$$\frac{di}{dt} + i = 1 - u_n = u \quad (8)$$

Приняв правую часть (8) за обобщенный управляющий сигнал, дан-

ную задачу можно свести к задаче линейного оптимального управления, для решения которой удобно воспользоваться принципом максимума Понтрягина. Сопряженная система имеет вид  $\dot{\Psi} = \frac{2}{L} \Psi$ . ее решение  $\Psi = A e^{\frac{2}{L} t}$ . Постоянная  $A$  не поддается определению ввиду отсутствия начальных условий для сопряженной системы. Однако ясно, что функция  $\Psi$  не изменяет знака при любом изменении  $t$ . Ввиду постоянства знака функции  $\Psi$  обобщенный управляющий сигнал так же не меняет знак. При этом сигнал может принимать 2 крайних значения. Из физических соображений следует, что для выполнения условий оптимального отключения необходимо, чтобы управляющее воздействие удовлетворяло условию  $u = 1 - U_{\kappa}^{\max}$ , т.е. в противном случае управление действует согласно э.д.с. источника и ток возрастает. Таким образом, для обеспечения минимального времени коммутации при заданной кратности перенапряжений напряжение на выключателе должно в первый момент отключения достигать своего максимума и оставаться постоянным в течение всего процесса, а ток при этом должен убывать по вогнутой экспоненте, т.е.

$$\left. \begin{aligned} u_{\kappa} &= U_{\kappa}^{\max} = U_{np} = \text{const.} \\ i &= I + U_{\kappa}^{\max} (e^{-t/\tau} - 1) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Длительность коммутации определяется при этом как

$$\tau = L_n \frac{U_{np}}{U_{np} - I} \quad (10)$$

В реальных условиях за управляющее воздействие следует принимать не напряжение, а проводимость выключателя. Для выбора путей реализации подученного закона отключения было проведено сравнение процесса коммутации цепи контактным и статическим выключателями. Успешное отключение контактным аппаратом возможно при соблюдении неравенства:

$$u_g(t) > 1 - \frac{di}{dt} - i \cdot z \quad (11)$$

Согласно (11) с уменьшением тока в период отключения напряжение на дуге —  $u_g(t)$  возрастает. Установлено, что  $u_g(t)$  находится в прямой зависимости от скорости среза тока —  $\frac{di}{dt}$ . Проведенные исследования поведения  $\frac{di}{dt}$  показали, что в процессе коммутации цепи контактным аппаратом при подходе к нулю тока наблюдается резкое увеличение скорости деионизации дугового столба, что приводит к значительному росту скорости среза тока. В результате напряжение на выключателе достигает максимального значения в последний момент процесса, т.е. данный тип коммутационного аппарата не пригоден для реализации подученного закона отключения. Использование контакторов с деионной решеткой позволяет подучить напряжение на аппарате близкое к постоянному при горении дуги в решетке. Однако данный метод приемлем при отключении цепи с большими индуктивностями, когда время вхождения дуги в решетку несоизмеримо мало по сравнению со временем горения ее в решетке. Статические контакторы на базе тиристоров так же не позволяют реализовать данный закон, т.к. запираение силового тиристора в большинстве таких выключателей происходит за счет разряда гасящей емкости. Подробное сравнение и анализ процессов коммутации существующими аппаратами показал, что для решения поставленной задачи требуется полностью управляемый выключатель. В роли ключа в таком аппарате может выступать магнитный усилитель, электронная лампа, полупроводниковый триод. Исследования режимов работы перечисленных элементов свидетельствуют, что для реализации данного закона наиболее приемлем транзистор. С учетом таких возможностей были разработаны схемы выключателя на базе транзисто-

ра, в которых для выбора положения рабочей точки на характеристике последнего используется источник питания коллекторной цепи (рис.4,а). Как следует из осциллограммы (рис.5,а), при использовании такого выключателя закон отключения приближается к оптимальному. Для сравнения на рис.5,в приведена осциллограмма процесса отключения той же цепи контактным аппаратом. Скорость убывания проводимости управляемого ключа, а следовательно, величину предельного напряжения на выключателе -  $U_{пр}$  можно регулировать, изменяя скорость нарастания запирающего напряжения на базе транзистора. Это достигается шунтированием разрыва в цепи коллектор - база различными по величине емкостями. При этом режим остается близким к оптимальному. Данный выключатель не свободен от общих недостатков, присущих всей группе статических контакторов. Комбинирование контактного аппарата с данной схемой (рис.4,в) позволяет частично устранить последние.

В ГЛАВЕ ПЯТОЙ рассматриваются пути расширения пределов мощности, коммутируемой управляемым выключателем, поскольку выпускаемые в настоящее время отечественной промышленностью транзисторы имеют относительно низкие допустимые токи и напряжения. Один из таких путей - использование перегрузочной способности при кратковременном режиме работы транзистора. Такой метод реализуется при помощи комбинированного выключателя. Основными параметрами, определяющими величины допустимых токов и мощностей транзистора в данном режиме, являются его тепловые постоянные. С целью исследования перегрузочной способности полупроводникового триода в работе проведен анализ тепловых процессов в транзисторе, при котором

использовался ряд упрощений. Введение упрощений возможно по следующим причинам: а) тепловой режим транзистора в основном определяется максимальной температурой р-п-перехода; б) можно принять, что поле температур внутри каждого элемента прибора отсутствует и элемент может быть охарактеризован средней температурой; в) можно принять условие одномерности распространения теплового тока от р-п-перехода к массивному основанию. Исследования показывали, что для оценки работы транзистора в режиме кратковременных перегрузок можно воспользоваться тепловой постоянной времени р-п-переход - корпус -  $T_{пк}$ , причем длительность перегрузочного импульса -  $t_{и}$  должна лежать в пределах

$$t_{и} \leq t_{и} \leq T_{пк} \quad (12)$$

Согласно расчетам при  $t_{и} > T_{пк}$  выигрыш в импульсном значении тока незначительным. Нижний предел в (12) -  $t_{и}$  при использовании комбинированной системы коммутации складывается из времени перетекания тока из контактов в щунт и времени выбора провала контактов. Определение времени перетекания тока осложнялось тем, что в общем случае при размыкании напряжения на контактах -  $u_{и}$  является сложной нелинейной функцией времени, состоящей из четырех качественно отличных участков. При таком характере изменения  $u_{и}$  во времени получение строгих аналитических выражений, связывающих параметры контура контакты - щунт и время перетекания не представлялось возможным. В связи с этим были проведены теоретические и экспериментальные исследования по выявлению приемлемых для приближенного анализа допущений относительно закона  $u_{и}(t)$ . Исследования показали, что в условиях работы данной системы



на преддуговых стадиях перетекает весьма незначительная часть тока отключения. Кроме того в случае успешного отключения дуги на размыкающихся контактах столь малы, что падением напряжения в столбе дуги можно пренебречь в сравнении с приэлектродным -  $U_э$ . Это дает основание принять в течение всего процесса перетекания тока в дугу  $u_k = U_э = const$ , что позволяет по выражению (10) определить длительность перетекания тока. Время выбора провала определялось опытным путем. Для исследовавшихся контактных групп значение  $t_n$  с большим запасом укладывалось в 10 мсек. С учетом выражения (12) величина максимального перегрузочного тока в комбинированной системе коммутации в зависимости от скажности импульсов и  $t_n$  определяется выражением

$$I_{км} = I_{км} \frac{1 - \exp\left(-\frac{Q t_n}{C_{км}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_n}{C_{км}}\right)} \quad (13)$$

Экспериментальные исследования перегрузочной способности данной системы проводились при помощи схемы, представленной на рис.6. В последней длительность перегрузочного импульса определялась параметрами  $\pi C$ -генератора пилообразного напряжения, который служит для управления статическим выключателем на базе тиристора Т2. Скажность импульсов  $Q$  регулировалась блоком управления тиристорами Т5; Т6, собранным на базе несимметричного мультивибратора. На рис.7 приведены расчетные и экспериментальные данные перегрузочной способности комбинированной системы коммутации на базе одного из исследовавшихся транзисторов (тип П4).

ГЛАВА ШЕСТАЯ посвящена практическому использованию рассмотренного управляемого выключателя в поварных цепях. Для

улучшения тяговых и тягово-экономических показателей ЭПС в настоящее время получают все более широкое применение различные системы на полупроводниковых приборах. Использование послед-

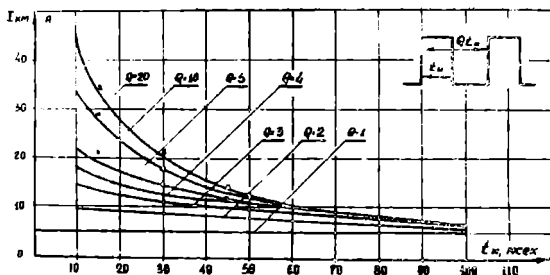
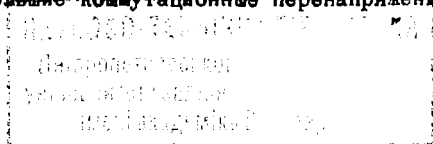


Рис. 7

Зависимость максимального тока коллектора от величины перегрузочного импульса при различных  $Q$  ( $I_m = 5A$ ):

- - экспериментальные данные для  $Q = 5$
- △ - экспериментальные данные для  $Q = 10$
- \* - экспериментальные данные для  $Q = 20$

ных в цепях со значительными индуктивностями, которые характерны для поездных цепей управления, требуют специальной защиты от коммутационных перенапряжений. Очевидно наиболее рациональным решением вопроса защиты полупроводниковых приборов явилось бы полное устранение источника перенапряжений или, по крайней мере, снижение всплесков напряжений. На основании исследований, проведенных на отечественных электропоездах (ЭР2; ЭР22; ЭР9), установлено, что наибольшие коммутационные перенапряжения име-



6936a

ют место при отключении включающих катушек контакторов КМВ-104, КМБ-3Б, КМ-3Е и удерживающей катушки быстродействующего выключателя при срабатывании дифференциального реле - ДР или оперативным отключением. Сравнение процесса отключения катушек перечисленных аппаратов различными коммутационными элементами позволяет сделать вывод, что наиболее эффективное снижение  $U_{\text{н}}$  дает рассмотренный выше статический выключатель на базе транзистора. Опытно-промышленные испытания данного выключателя на электропоезде ЭР2М-830, подтвержденные соответствующим актом, показали, что использование статического контактора на базе транзистора снижает всплески напряжений в цепях управления с 700-500В (отключение быстродействующего выключателя типа БВП-105А-1) до 100-80В при напряжении питания 50В. Такое значительное снижение величины  $U_{\text{н}}$  приводит к увеличению времени коммутации, что неприемлемо для защитных аппаратов, в частности, для быстродействующего выключателя. Вопросы повышения быстродействия защитной аппаратуры особенно актуальны для систем импульсного регулирования безреостатного пуска и электрического торможения ЭПС, где максимальные значения и продолжительность токов короткого замыкания не должны превышать допустимых значений для полупроводниковых преобразователей и где режим глухого короткого замыкания может быть вызван срывом процесса импульсного регулирования. В системах импульсного регулирования на электропоездах постоянного тока основным защитным аппаратом является быстродействующий выключатель типа БВП-105А-1. При срабатывании последнего от ДР по существующей схеме магнитный поток удерживающей катушки полностью уничто-

жается, что сопряжено с появлением значительных  $U_k$ , при этом время коммутации относительно велико. Анализ работы ВВП-105А-1 показал, что для повышения его быстродействия от сигнала с ДР при одновременном сохранении полученной кратности перенапряжений (100-80В) магнитный поток в зоне якоря следует не уничтожать, а вытеснять в сердечник размагничивающего витка. Для этой цели можно использовать дополнительную обмотку, намотанную на сердечник размагничивающего витка согласно с последним. Эта обмотка при срабатывании ДР получает питание через тиристор от источника питания цепей управления. Поездные испытания показали, что время срабатывания ВВП-105А-1 по рассмотренной схеме может быть доведено до 1,0-1,5 мсек, что приближается к собственному времени срабатывания рассматриваемого типа выключателей. Поскольку дополнительная обмотка обладает незначительной индуктивностью, перенапряжения при ее отключении достигают небольшой величины (90-80В). Оперативное отключение удерживающей катушки выключателя при этом осуществляется статическим контактором на базе транзистора.

Применение импульсного регулирования требует срабатывания быстродействующего выключателя и от других аварийных датчиков, что требует логической схемы управления тиристором в цепи дополнительной обмотки. С учетом таких требований была разработана схема повышения быстродействия ВВП-105А-1 (рис.8), в которой последний разрывает силовую цепь при срыве фазы регулирования (два плеча) и при срабатывании ДР. В такой схеме для формирования импульса управления и надежного срабатывания тиристора использованы логические элементы серии "Т", которые находят все более широкое применение в цепях автоматики и те-

лемеханики ЭПС. В настоящее время данная схема повышения быстродействия защитного аппарата проходит промышленные испытания на электропоезде с тиристорно-импульсным регулированием режимов работы ЭР22-104 с целью внедрения ее на новом поезде ЭР22И.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, освещенные в данной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1) Успехи отечественного электроаппаратостроения по созданию разнообразных и надежных коммутационных аппаратов позволяют большее внимание обратить на улучшение качественной стороны процесса отключения и выполнение требований, которые предъявляют потребители электроэнергии к таким процессам.

2) Принятая к рассмотрению схема отключения активно-индуктивной цепи является частным, но не единичным случаем. Она позволяет рассмотреть процессы при отключении многих потребителей на ЭПС, а результаты анализа коммутационных явлений в такой схеме могут быть распространены на более широкий класс цепей.

3) Исследование процессов отключения весьма наглядно и удобно проводить на фазовой плоскости, на которой по траектории точки можно не только определить качественные показатели изменения напряжения на выключателе и тока в цепи, но и оценить все электрический и энергетические параметры в любой момент коммутации.

4) Проведенные исследования показали, что в ряде случаев коммутационные перенапряжения зависят от скорости убывания проводимости выключателя в последний момент коммутации. Существует определенный предел такой скорости, при превышении которого отключение цепи заведомо невозможно.

5) Для выбора рациональных путей уменьшения значений  $U_k$  в процессе коммутации необходимо определить главные влияющие факторы. Если они допускают количественную оценку, для анализа необходимо построить зависимости величины перенапряжений от уровней этих факторов. Исследование таких зависимостей позволяет качественно и количественно оценить степень влияния того или иного анализируемого параметра. В реальных условиях эти зависимости в силу ряда причин носят статистический характер. Применение методов математической статистики позволяет без постановки дополнительных экспериментов выделить из общей группы действующих факторов основные влияющие, что в значительной мере способствует анализу перенапряжений.

6) Обеспечение минимального времени при заданной кратности перенапряжений возможно при строго определенном законе изменения напряжения на выключателе и убывания тока в цепи в течение всего времени отключения. Для принятой к рассмотрению схемы такой закон требует, чтобы напряжение на выключателе в первый момент коммутации достигало своего максимального значения и оставалось постоянным в течение всего процесса, а ток в цепи при этом убывал по закону вогнутой экспоненты.

7) На основании анализа установлено, что для реализации полученного закона отключения необходим полностью управляемый выключатель. Рассмотренные схемы статического и комбинированного коммутационных аппаратов позволяют получить квазиоптимальный по быстрдействию закон отключения. Данный выключатель допускает простое схемное решение регулирования кратности перенапряжений.

8) Комбинированная система коммутации практически исключает дугу на контактах при отключении, включении и вибрации кон-

тактов. Последнее положение позволяет уменьшить расход цветного металла на изготовление контактов за счет уменьшения их износа (практически износ контактов доходит до уровня механического); а также значительно сократить время на замену контактов и профилактический осмотр коммутационной аппаратуры, что значительно снижает число простоев электрооборудования электроподвижного состава

9) Комбинированная система позволяет расширить пределы отключаемой мощности за счет использования перегрузочной способности транзистора при кратковременном режиме работы. Определение нижнего предела длительности перегрузочного импульса позволяет оценить допустимое значение коммутируемого тока при использовании различных контактных групп при заданной кратности перенапряжений.

10) Применение рассмотренных систем коммутации на базе транзистора в поездных цепях управления позволяет значительно снизить всплески напряжений при выполнении операций отключения в данных цепях. Совместное использование транзисторного ключа и предложенной схемы аварийного срабатывания быстродействующего выключателя позволяет сохранить низкое значение  $U_c$  в цепях управления и уменьшить полное время срабатывания аппарата до 1,0-1,5 мсек, что приближается к собственному времени срабатывания исследуемого типа выключателя.

11) Материалы исследований, изложенные в работе, могут быть использованы при проектировании новых или модернизации существующих типов выключателей и комбинированных систем коммутации, а также при разработке новых систем защиты электрооборудования электроподвижного состава.

Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены:

1. На 7-8-9-ой научно-технических конференциях Севастопольского приборостроительного института, г. Севастополь, 1970 - 1972 г.

2. На 4-ой научно-технической конференции Севастопольского Морского завода, г. Севастополь, 1972 г.

3. На 3-й заводской научно-технической конференции завода "Криворожсталь", г. Кривой Рог, 1972 г.

4. На республиканской научно-технической конференции молодых специалистов металлургических предприятий и организаций министерства черной металлургии УССР, г. Днепропетровск, 1972 г.

5. На заседании научного семинара кафедр электроподвижного состава, электротехники, электрических машин и преобразователей ДИИТа, г. Днепропетровск, 1972 г.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. МАРАКТАНОВ В.А., ПИВНЕНКО А.Д., "Исследование качества работы коммутационных аппаратов на фазовой плоскости", сб. "Приборостроение", вып.13, изд-во "Техника", Киев, 1972 г.

2. ПИВНЕНКО А.Д., МАРАКТАНОВ В.А., "Анализ перенапряжений при отключении цепей электроподвижного состава постоянного тока" сб. "Исследование и производство транспортных конструкций", изд-во "Звайгзне", Рига, 1973 г.

3. МАРАКТАНОВ В.А., ПИВНЕНКО А.Д., СКЛЯРОВ Ю.С., КАРПУК А.Я., "Статистические методы анализа перенапряжений в электрических аппаратах", сб. "Приборостроение", вып.14, изд-во



"Техника", Киев, 1973 г.

4. МАРАКТАНОВ В.А., ПИВНЕНКО А.Д., "О возможности создания выключателя, работающего с заданным законом коммутации"; ЭП. Аппараты низкого напряжения, науч.-техн. сб.

ВНИИЭМ, вып.7, М., 1971 г.

5. МАРАКТАНОВ В.А., ПИВНЕНКО А.Д., КАРПУК А.Я., "Коммутационная опосредность комбинированного выключателя"; сб.

"Приборостроение", вып.15, над-во "Техника", Киев, 1973 г.

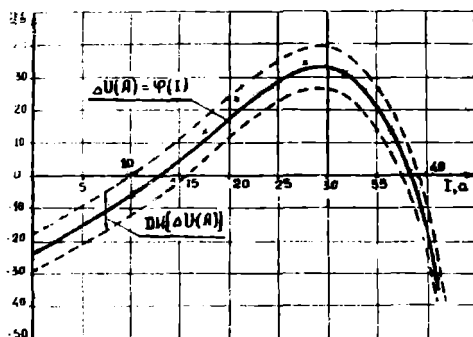


Рис. 2  
Изменение составляющей  $\Delta U(A)$  при различных уровнях исследуемого фактора - тока нагрузки.

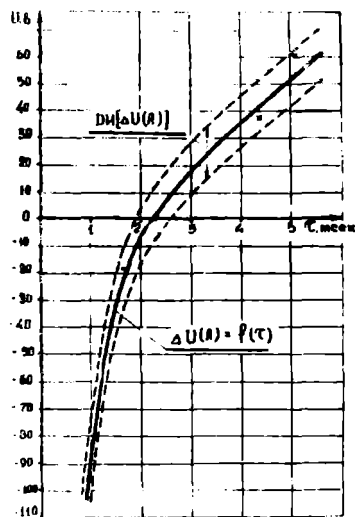
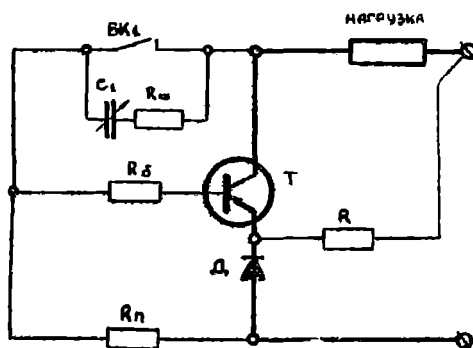


Рис. 3  
Изменение составляющей  $\Delta U(A)$  при различных уровнях исследуемого фактора - эл. магнитной постоянной времени нагрузки.

а)



б)

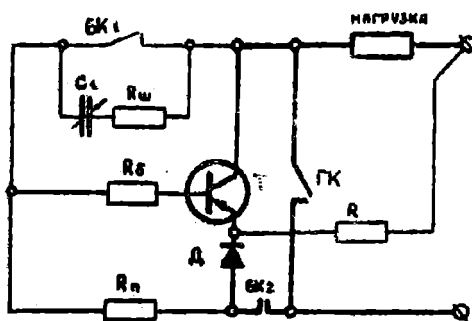


Рис. 4

Схемы управляемого выключателя:

- а) статический контактор,
- б) комбинированный выключатель.

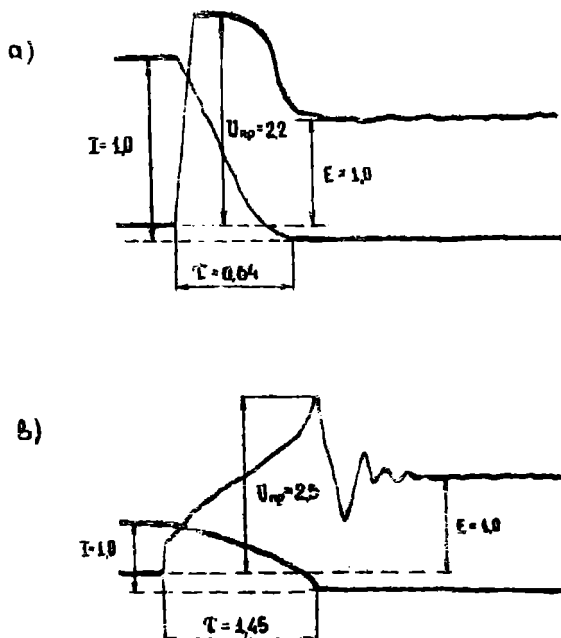


Рис. 5

Оциллограммы изменения напряжения на выключателе и убывания тока в цепи при отключении нагрузки

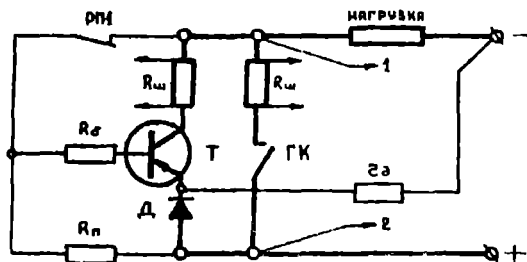
а) статическим выключателем  $T_{\text{рек}} = 0,618$

в) контактным аппаратом

при базисных величинах  $U_{\text{н}} = 50\text{В}$ ,  $I_{\text{н}} = 7\text{А}$ ,

$t_{\text{н}} = 3,32 \text{ мсек.}$

a)



**B)**

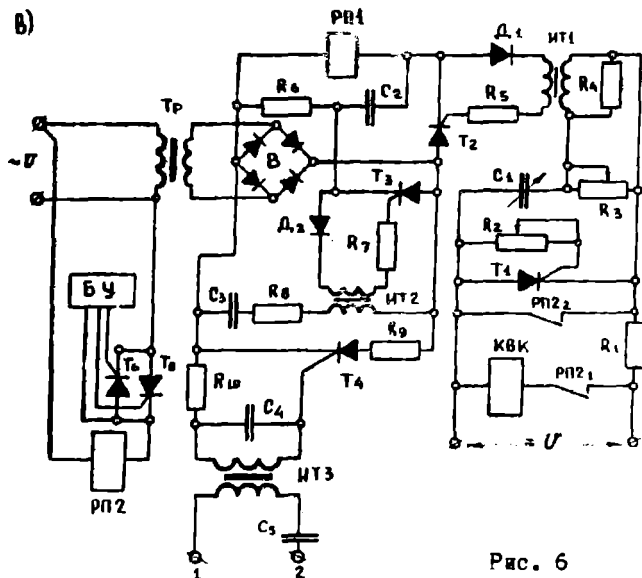


Рис. 6

Схема исследования перегрузочной способности комбинированной системы коммутации.

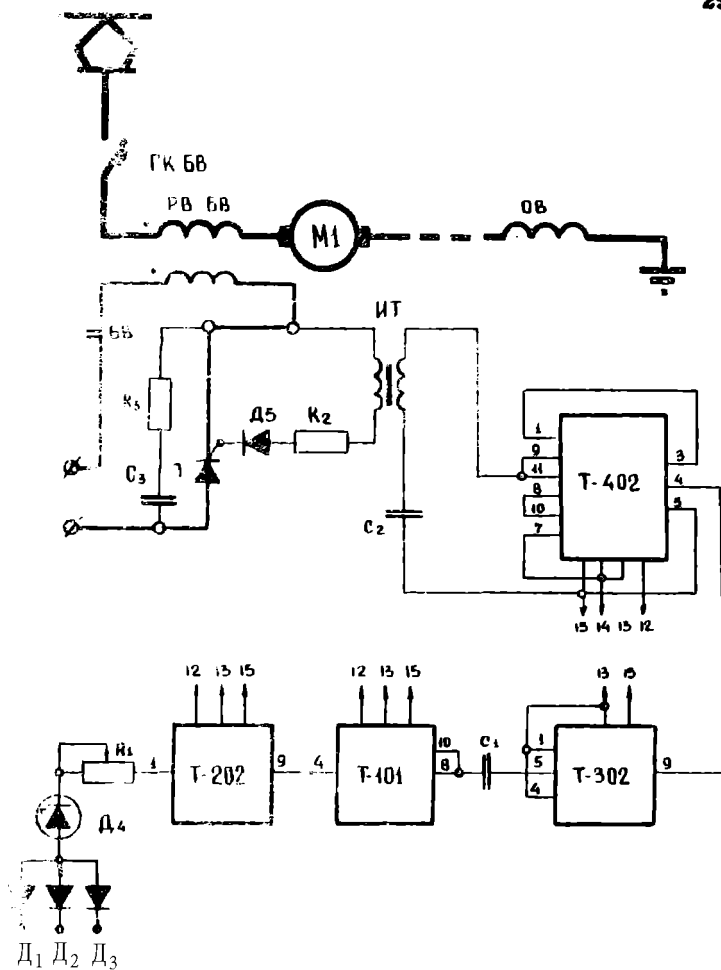


Рис. 8

Схема повышения быстродействия защитного аппарата типа БВП-105А-1.

---

**Б122286** Подписано и печать 4/ХП 1973 г.  
Ротановит ДИИТа  
Днепропетровск, 10, Университетская ул. 2.  
Заказ № 1346. Тираж 150 экз. 1973 г.