

6
А-61
авт
2

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Инженер Е.И. БОЯДЖИЕВ

На правах рукописи

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРО-
ВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СТАТИЧЕСКИМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

(05.433 - подвижной состав и тяга поездов)

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва

1971

2

Работа выполнена на кафедре "Электрический транспорт"
Московского ордена Ленина энергетического института.

Научный руководитель:

д.т.н., профессор Л.М. ТРАХТМАН.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Б.Н. ТИХМЕНЕВ (ЦНИИ МПС),

к.т.н., доцент Д.Д. ЗАХАРЧЕНКО (МИИТ).

Ведущее предприятие:

Тбилисский электровозостроительный завод.

Автореферат разослан " 8 " мая 1971 г.

Защита диссертации состоится " 11 " ИЮНЯ 1971 г.
на заседании Совета факультета Электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского ордена Ленина энергетического института.

Отзывы (в двух экземплярах) просим направлять по адресу: Москва, Е-250, Красноказарменная ул., д. 14,
Ученый совет МЭИ.

О дне защиты будет объявлено в газете "Вечерняя Москва".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Ученый секретарь
Совета МЭИ

(Н.А. КОЧЕМАРОВ)

Рекуперативное торможение является важным средством повышения технико-экономических показателей электрического подвижного состава. Рекуперация на электровозах применяется в основном для поддержания равномерной скорости движения на уклонах. В эксплуатации, однако, возникает также необходимость использования рекуперативного торможения для снижения скорости движения. Применяемое до настоящего времени неавтоматическое управление не может обеспечить достаточно эффективного использования рекуперации в обоих этих режимах и обладает рядом существенных недостатков. К ним относятся, в первую очередь, необходимость визуального контроля за работой системы со стороны машиниста и невозможность осуществить эффективное регулирование по ограничениям тормозной области. Колебания напряжения сети вызывают тяжелые переходные процессы и необходимо соблюдать большой запас по величине тормозной силы, что особенно нежелательно при высоких скоростях, когда механическое торможение малоэффективно.

Для устранения этих недостатков необходимо применить систему автоматического регулирования (САР). Однако при вращающемся преобразователе, который используется в настоящее время для питания обмоток возбуждения, использование САР осложняется большой инерционностью преобразователя, затрудняющей стабилизацию регулируемых параметров в динамических режимах. Применение вращающегося преобразователя имеет также ряд других недостатков: низкий к.п.д. рекуперации, пониженная эксплуатационная надежность и др.

Значительного повышения эффективности рекуперативного торможения можно достигнуть путем замены вращающегося преобразо-

вателя статическим в сочетании с системой автоматического регулирования. Высокая надежность и практическая безынерционность статического преобразователя значительно увеличивают возможности автоматизации подвижного состава. В частности, использование статического преобразователя позволяет реализовать ряд качественно новых функций: быстродействующую реакцию на колебания напряжения сети, осуществление независимого возбуждения в режиме тяги, принудительное размагничивание двигателей в качестве защиты от коротких замыканий и т.д.

При построении системы автоматического регулирования, обеспечивающей выполнение перечисленных функций, целесообразно выбрать способ фазового регулирования угла открывания тиристорov возбуждателя, который имеет перед способом регулирования напряжения выбором числа периодов проводимости следующие преимущества:

1. Значительно меньшие колебания тормозного тока вследствие непрерывного сравнения истинной величины регулируемого параметра с заданной.

2. Более высокое быстродействие и лучшее качество переходных процессов при колебаниях напряжения сети, достигаемое в результате

а) меньшей величины периода квантования при одинаковой частоте переменного напряжения;

б) возможности приложения отрицательного напряжения к обмоткам возбуждения для обеспечения быстрого спада тока возбуждения.

3. Более высокая надежность и сравнительная простота схемы и ее наладки.

Реферируемая работа, состоящая из четырех глав, посвящена исследованию проблем, связанных с использованием статического преобразователя и его совместной работой с системой автоматического регулирования в режиме рекуперативного торможения. В диссертации рассмотрены и решены следующие вопросы:

1. Разработка новой системы автоматического регулирования рекуперативного торможения и методика расчета некоторых ее элементов с учетом специфических требований на магистральных электровозах.

2. Исследование статического преобразователя в квазистационарном режиме и методика расчета параметров и нагрузок элементов преобразователя с учетом особенностей, вносимых выпрямительной нагрузкой.

3. Анализ динамики замкнутой системы автоматического регулирования, включающей статический преобразователь, влияния последнего на динамические характеристики системы и разработка способов коррекции.

4. Исследование бесконтактной защиты тяговых двигателей от короткого замыкания в режиме рекуперации с использованием статического преобразователя для форсированного размагничивания двигателей.

В первой главе рассмотрены ограничения тормозной области. Показано, что ограничения скорости, тормозной силы, максимального тока якоря и максимального тока возбуждения позволяют хорошо использовать тормозную область, но не достаточно для обеспечения надежной работы рекуперативного тормоза. Система автоматического регулирования должна поддерживать не только

максимальные значения, но и любые другие в пределах тормозной области, причем машинист должен иметь возможность менять эти значения простым изменением уставки.

При увеличении уставки скорости, САР должна уменьшать ток возбуждения до уровня, соответствующего новой уставке, однако в силу того, что электрохимическая постоянная времени поезда намного больше электромагнитных постоянных времени двигателей и САР, изменение тока возбуждения произойдет значительно быстрее, чем повышение скорости, вследствие чего возникнет режим, близкий к короткому замыканию.

Поэтому необходимо ввести дополнительное ограничение минимального тока якоря, которое замыкало бы тормозную область и предупреждало переход в тяговый режим. Если уставка минимального тока равна нулю, САР будет поддерживать равенство э.д.с. двигателей и напряжения сети; разгон состава до новой скорости происходит при этом на выезде при плавающем режиме возбуждения. Вместо ограничения по минимальному току можно выполнить ограничение по тяговому току. Это позволило бы непосредственно переходить из режима тяги в режим рекуперации и наоборот при чередовании уклонов и подъемов без переключений в силовой схеме.

Для реализации такой системы регулирования необходимо иметь устройство, реагирующее на изменение направления тока якоря. Целесообразно использовать в качестве датчика тока якоря трансформатор постоянного тока по "беспробальной" схеме с постоянным смещением. Последнее необходимо для поддержания нулевого тока якоря, так как в противном случае выходной сигнал датчика при отсутствии входного тока слишком мал. Кроме того,

такая схема дает возможность использовать один датчик для двух каналов ограничения - максимального и минимального тока якоря.

В системе применено косвенное регулирование скорости без непосредственного ее измерения или вычисления, на основании уравнения

$$U_k \approx E = c \Phi v \quad (1)$$

При $v = const.$, согласно (1) стабилизация скорости сводится к обеспечению пропорциональности величин U_k и $c \Phi$. Практически это достигается непрерывным сравнением сигналов, пропорциональных напряжению на коллекторах и потоку. Напряжение на коллекторах измеряется с помощью трансформатора постоянного напряжения, а сигнал, пропорциональный потоку получается на выходе функционального преобразователя, моделирующего кривую намагничивания двигателя, с использованием кусочно-линейной аппроксимации.

Для изменения уставки скорости достаточно изменить любой масштабный коэффициент - проще всего сопротивление нагрузки датчика напряжения на коллекторах.

Аналогичным образом осуществляется и регулирование тормозной силы.

$$B = k c \Phi I_a \quad (2)$$

При $B = const.$, $c \Phi = k_1 / I_a$. Следовательно, для обеспечения постоянства тормозной силы сигнал, пропорциональный потоку, нужно сравнивать с сигналом, обратно пропорциональным току якоря. Для получения такого сигнала используется решающее устройство, работающее по "вертикальному" принципу.

Для первого этапа модернизации электровоза ВД-10 разрабо-

тана упрощенная система автоматического регулирования, при которой вместо стабилизации скорости предусмотрено замкнутое регулирование тока возбуждения и создание определенной степени противокомпаундирования для уменьшения жесткости тормозных характеристик. При этом каждая ступень регулирования соответствует определенной позиции тормозного контроллера.

На существующем электровозе ВЛ-10 с вращающимся возбудителем для уменьшения жесткости характеристик используется дополнительная обмотка встречного возбуждения возбудителя, через которую проходит ток якоря. Ампервитки этой обмотки вычитаются из ампервитков независимой обмотки возбудителя, которые меняются в зависимости от ступени регулирования.

При этой схеме степень компаундирования различна для разных позиций и характеристики при высоких скоростях и малых токах возбуждения получаются значительно мягче характеристик при низких скоростях, что затрудняет их использование даже для грубого регулирования скорости.

При автоматическом регулировании для создания эффекта противокомпаундирования сигналы датчиков тока якоря и тока возбуждения складываются и их сумма сравнивается с постоянной уставкой. Изменение заданной величины тока возбуждения и переход с одной тормозной характеристики на другую достигается изменением величины нагрузочного сопротивления датчика тока возбуждения.

При определенном токе якоря напряжение на нагрузке датчика тока якоря постоянно и составляет определенный процент от напряжения уставки, т.е. степень противокомпаундирования не зависит от позиции. Наклон зависимости тока возбуждения от тока

якоря будет постоянным. В результате жесткость всех характеристик значительно более стабильна и их можно использовать для приближенного регулирования скорости. Степень противокомпаундирования, а следовательно и жесткость всех характеристик, можно регулировать изменением сопротивления нагрузки датчика тока якоря.

В схеме первого этапа также предполагается ограничение величины тормозного тока. Ограничение функций упрощенной системы автоматического регулирования позволяет осуществить ее с минимальными изменениями существующей схемы электровоза.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с работой статического преобразователя в квазиустановившемся режиме.

Для питания обмоток возбуждения электровоза выбрана схема преобразователя с выведенной средней точкой источника питания (рис. I), отличающаяся минимальным количеством тиристоров и диодов и относительно хорошим использованием трансформатора. К недостаткам схемы относится сравнительно высокий процент потерь из-за больших циркулирующих токов в процессе возвращения реактивной энергии в сеть.

Такая схема рассматривалась в литературе в предположении, что нагрузка активно-индуктивная и обтекается переменным током. Между тем, подключение нагрузки через выпрямитель сильно влияет на условия работы инвертора и в первую очередь приводит к увеличению нагрузок его элементов. Поэтому возникла необходимость в создании инженерной методики расчета преобразователя с учетом специфики его работы на электроподвижном составе.

При рассмотрении работы преобразователя сделаны следующие

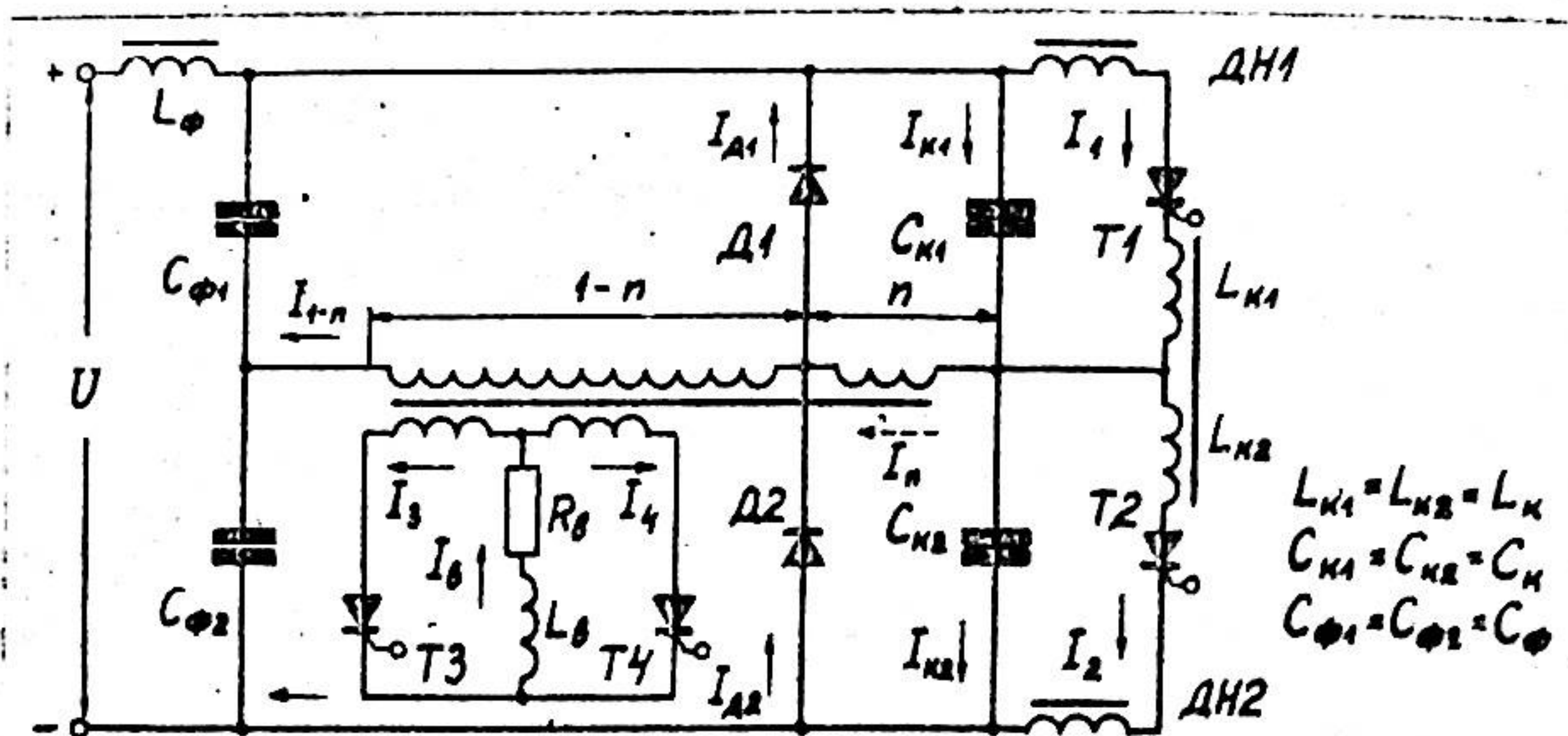


Рис. 1

допущения: напряжение на фильтровых конденсаторах $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ постоянно; вентили идеальны; ток нагрузки полностью сглажен; активными сопротивлениями и намагничивающими токами трансформатора и коммутирующего дросселя, а также временем перемagnetизации дросселей насыщения, можно пренебречь; коэффициент трансформации равен единице.

Все выражения и результаты представлены в относительных единицах, что делает возможным их использование для расчета преобразователей с разными номинальными данными.

Выполненный анализ электромагнитных процессов в преобразователе, основанный на математическом описании процессов в течение одного периода питающего напряжения, позволяет сделать вывод, что преобразователь может работать в разных режимах в зависимости от соотношения параметров и величины нагрузки.

При выборе расчетного режима работы учитывались два основных требования: обеспечение трапецеидальной формы переменного напряжения, которая наиболее удобна для фазового регулирования, и достаточного времени, отводимого на восстановление управляющих свойств тиристоры инвертора, во всем диапазоне изменения нагрузки, возможном в процессе эксплуатации. Доказано, что в режиме, в котором соблюдаются указанные условия, процесс перезаряда коммутирующих конденсаторов не зависит от величины нагрузки. Следовательно, время, отводимое на восстановление тиристоры инвертора, остается постоянным.

На рис. 2 показана зависимость времени восстановления $\varphi_0 = \varphi_0(Z, n)$, где n - относительное число витков;

$$Z_1 = \frac{i_{\delta 0}}{\omega_0 R_{\delta} C_{\kappa}} = \frac{i_{\delta 0}}{R_{\delta} \sqrt{\frac{C_{\kappa}}{2L_{\kappa}}}} \quad (3)$$

- безразмерный параметр, характеризующий режим работы инвертора и зависящий от параметров схемы и величины нагрузки;

$$i_{\delta 0} = \frac{I_{\delta 0} R_{\delta}}{U} \quad - \text{относительный ток;}$$

$I_{\delta 0}$ - максимальный ток нагрузки, при котором соблюдается условие постоянства угла восстановления φ_0 . При расчете приравниваем его максимальному току нагрузки в процессе эксплуатации;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2L_{\kappa} C_{\kappa}}} \quad - \text{собственная круговая частота контура коммутации.}$$

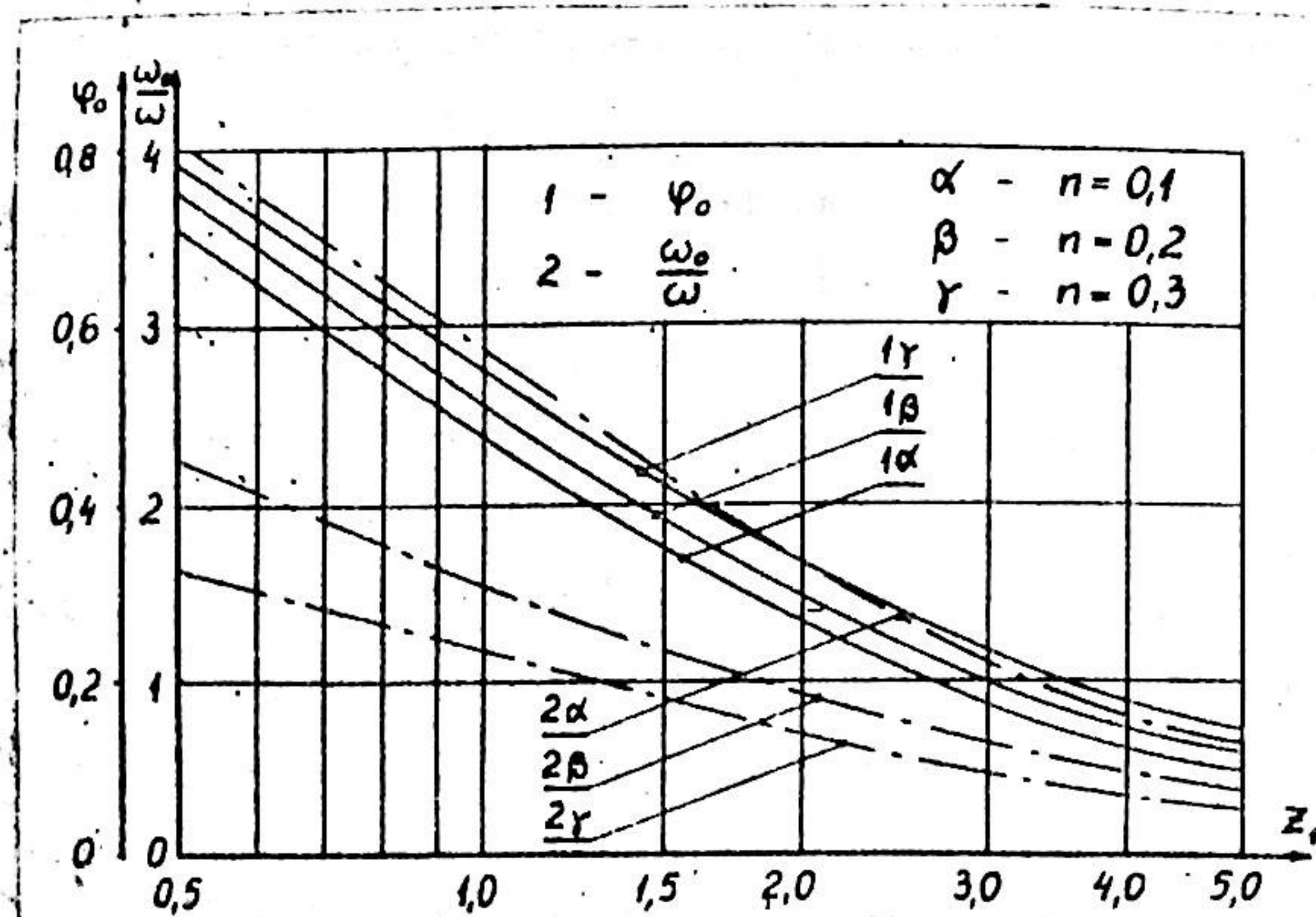


Рис. 2

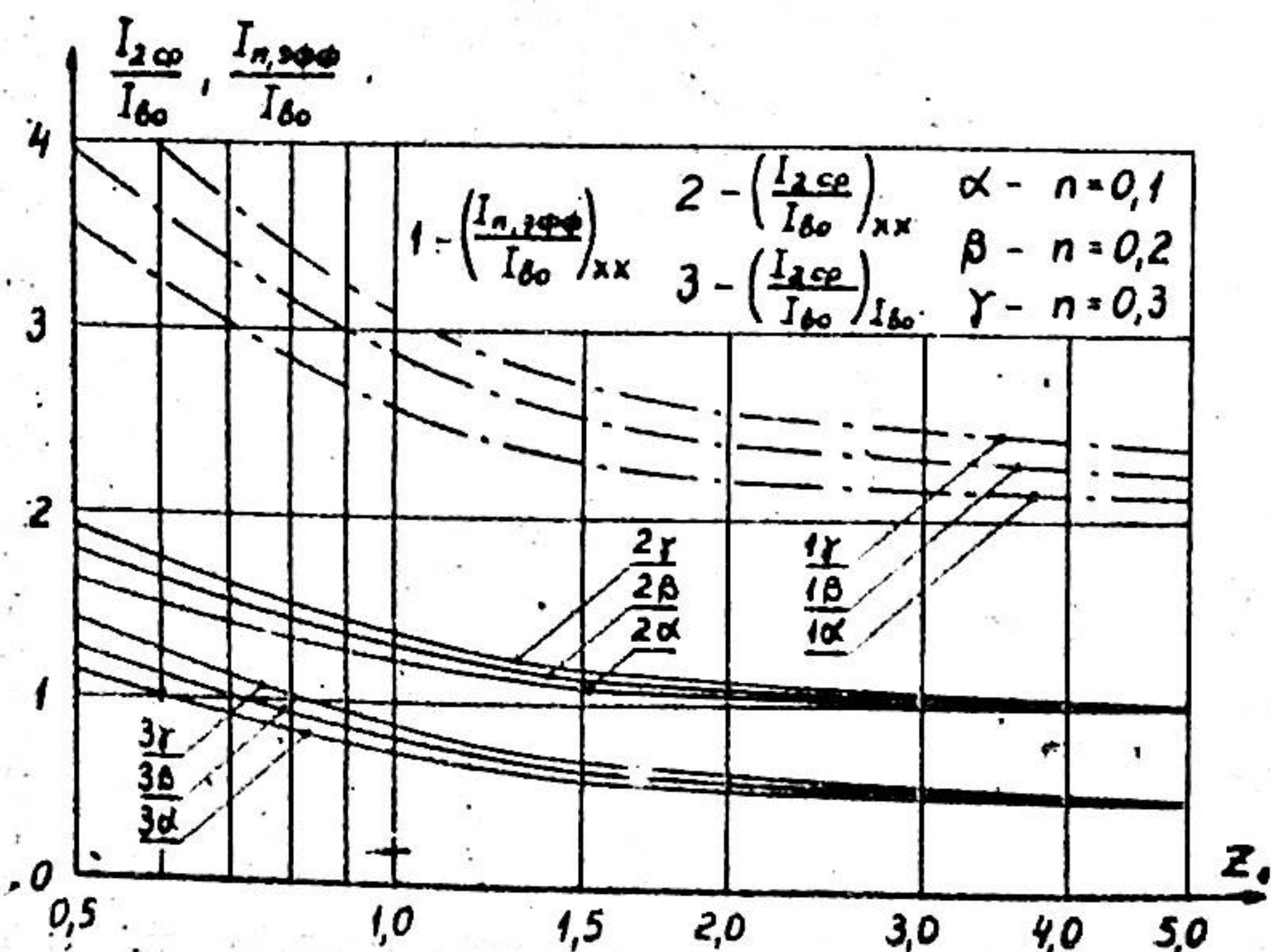


Рис. 3

На рис. 2 показаны также кривые $\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\omega_0}{\omega} (Z_1, n)$, где ω — основная круговая частота.

При расчете преобразователя предполагаются известными следующие величины: номинальный (максимальный) ток нагрузки, активное сопротивление нагрузки R_g и напряжение питания инвертора U .

В условиях эксплуатации на подвижном составе возможны изменения напряжения сети в широких пределах. Для обеспечения надежной работы преобразователя следует учитывать минимальное значение U_{min} . Величины U и I_{g0} пропорциональны. Следовательно, если приравнять номинальный ток нагрузки граничному току I_{g0} для минимального напряжения, то при больших напряжениях он будет меньше граничного. В противном случае при уменьшении напряжения номинальный ток становится больше граничного, преобразователь переходит из рассматриваемого режима в режим, при котором дальнейший рост тока нагрузки связан с уменьшением угла φ_0 и возможным нарушением запаса времени на восстановление тиристоров.

Для расчета контура коммутации необходимо задать основную частотой ω и выбрать такое значение Z_1 , чтобы соответствующие ему по кривым рис. 2 значения φ_0 и ω_0 удовлетворяли условию

$$\frac{\varphi_0}{\omega_0} \geq K_3 t_b \quad (4)$$

где t_b — время восстановления управляемости тиристоров;

K_3 — коэффициент запаса.

Тогда C_K и L_K определяются из равенств

$$\left. \begin{aligned} C_k &= \frac{I_{\theta 0}}{\omega_0 R_{\theta} Z_1} \\ L_k &= \frac{1}{2 C_k \omega_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Согласно рис. 2, значения $\varphi_0(Z_1)$ и $\frac{\omega_0}{\omega}(Z_1)$ почти пропорциональны. Следовательно, их отношение, равное $K_3 t_{\theta} \omega$, мало меняется при изменении Z_1 . Например, при $n = 0,1$ и $K_3 t_{\theta} = 100$ мксек получается частота инвертора $f = 225 \div 270$ гц при $Z_1 = 1 \div 5$. Если целесообразно иметь большую частоту, то нужно увеличить n .

Указанное соотношение приводит к тому, что если условие (4) соблюдается для одного значения Z_1 , то оно будет соблюдаться и для других значений, т.е. оно не может служить достаточным критерием для выбора Z_1 .

При малых значениях Z_1 получаются большие значения ω_0 , что соответствует меньшим C_k и L_k . С другой стороны, нужно обращать внимание еще на нагрузку элементов схемы, в частности тиристоры инвертора, обратных диодов и части первичной обмотки трансформатора с относительным числом витков n . Токи всех этих элементов максимальны при холостом ходе преобразователя. Это следует из рис. 1, где для общей точки коммутирующих конденсаторов при открытых тиристорах Т2 и Т3

$$I_2 = 2 |I_{k2}| - I_{1-n} \quad (6)$$

Поскольку I_{1-n} пропорционален току I_{θ} , а I_{k2} , как было указано выше, не зависит от нагрузки, то I_2 будет максимальным при $I_{\theta} = 0$. По той же причине будут иметь максимальное

значение и токи обратных диодов и части первичной обмотки с числом витков n .

На рис. 3 показаны кривые зависимости нагрузок указанных элементов от величины Z_1 , из которых видно, что при увеличении Z_1 до 3 нагрузки значительно уменьшаются (при $Z_1 > 3$ ординаты практически не меняются). Следовательно, в каждом конкретном случае при выборе Z_1 нужно искать компромиссное решение в пределах от 1 до 3 с учетом исходных данных.

Для сравнения на рис. 3 построены также кривые $\frac{I_{2cp}}{I_{\theta 0}}(Z_1)$ при номинальной нагрузке. Ординаты последних отличаются от ординат кривых для холостого хода на величину 0,5. Значения I_{2cp} для промежуточных значений тока нагрузки можно получить с помощью линейной интерполяции. При холостом ходе I_{2cp} и I_{42cp} практически равны.

Расчетные значения токов, полученные с использованием описанной методики, отличаются от экспериментально снятых в реальной схеме не более, чем на 5%. Погрешность появляется в основном из-за того, что ток нагрузки и напряжение на фильтре не идеально сглажены. Конденсаторы фильтра обтекаются током первичной обмотки трансформатора. При расчете фильтра преобразователя нужно учесть, что надежная работа преобразователя и удовлетворительная точность расчета обеспечиваются при пульсациях напряжения на конденсаторах фильтра до 20%. Требования к величине пульсаций тока, потребляемого из сети, более жесткие, так как переменная составляющая этого тока оказывает мешающее влияние на линии связи. Для определения величины индуктивности фильтра предложено следующее выражение:

$$L_{\Phi} = \frac{\pi}{8\omega} \frac{\Delta U_{\Phi 2}}{\Delta I_L} \quad (7)$$

где $\Delta U_{\Phi 2}$ - максимальный размах пульсаций напряжения на одной емкости фильтра;

ΔI_L - максимальный размах пульсаций тока, потребляемого из сети.

В выражении (7) величина ΔI_L соответствует двойной амплитуде реальной кривой переменной составляющей потребляемого тока. Для упрощения расчета можно подставить в (7) значение ΔI_L , равное удвоенному эффективному значению допустимого мешающего тока. При этом величина L_{Φ} получится с некоторым запасом.

Третья глава посвящена исследованию динамики замкнутой системы автоматического регулирования, включающей статический преобразователь, и способов коррекции. Поскольку наиболее тяжелые режимы работы системы появляются при колебаниях напряжения сети, основная задача корректирующих устройств заключается в том, чтобы обеспечить быстродействующую реакцию на такого рода возмущения, а также требуемый вид переходного процесса в цепи якоря. В соответствии с этим выбран следующий ход решения: определение передаточных функций всех звеньев системы, нахождение передаточной функции скорректированной системы на основании предварительного построения желаемого вида переходной кривой тока якоря и вычисление характеристик корректирующих звеньев, обеспечивающих получение желаемой кривой.

При составлении выражения для передаточной функции двигателей учтено влияние вихревых токов. Трансформаторы постоян-

ного тока (измерительные элементы) считаются безынерционными.

В качестве фазосмещающего устройства используется магнитный усилитель с самонасыщением, входным сигналом которого считается ток управления, а выходным - угол открывания α тиристоров возбудителя. Такой фазорегулятор рассматривается как импульсный элемент второго рода с фазоимпульсной модуляцией, а запаздывание при большом приведенном сопротивлении обмоток управления принимается постоянным и равным половине периода питающего напряжения. Передаточная функция фазорегулятора определяется выражением

$$W_{\Phi p} = \frac{d\alpha}{dI_y} = K_{\Phi p} e^{-p\tau} \quad (8)$$

где $\tau = T/2$; $K_{\Phi p}$ - коэффициент усиления, получаемый путем линеаризации динамической кривой размагничивания, соответствующей частоте питающего напряжения. Постоянная времени цепи управления фазорегулятора отнесена к линейной части системы.

Тиристорный возбудитель рассматривается как модулятор второго рода, который не вносит фазового сдвига. Входным сигналом является угол α открывания тиристоров, а выходным - напряжение возбуждения. При составлении выражения для передаточной функции тиристорного возбудителя учтено влияние напряжения сети на его выходное напряжение, а также влияние инерционности нагрузки (обмоток возбуждения). Этому вопросу уделено специальное внимание, так как в литературе он не освещен. Показано, что влияние нагрузки на динамические свойства тиристорного возбудителя проявляется посредством угла коммутации.

В результате графического решения системы уравнений, опи-

сывающей замкнутую систему автоматического регулирования, для передаточной функции тиристорного возбудителя получается следующее выражение:

$$W_{TB} = \frac{dU_\delta}{d\alpha} = - \frac{2}{\pi} U_2 \frac{K(\rho)}{(1 + \rho T_{\delta 1})(1 + \rho T_{\delta 2})} \quad (9)$$

где U_2 - напряжение на вторичной стороне преобразовательного трансформатора;

$T_{\delta 1}, T_{\delta 2}$ - постоянные времени цепи возбуждения с учетом вихревых токов, соответствующие первой и высшим гармоникам потока.

Наиболее трудные условия и жесткие требования к работе САР при скачке напряжения сети имеют место при регулировании на постоянство тока якоря, поскольку при этом требуется наибольшее быстродействие. Во всех остальных случаях (регулирование тормозной силы, тока возбуждения и т.д.) установившееся значение тока якоря после изменения напряжения сети отличается от начального, причем знак разности совпадает с первоначальным направлением изменения тока. Например, при понижении напряжения сети, установившееся значение тока якоря больше начального и наоборот.

Первоначальное изменение тока на величину этой разности требует некоторого времени, определяемого в основном индуктивностью цепи якорей, что создает запас времени, облегчающий работу САР по сравнению с режимом регулирования тока якоря.

Поэтому получение удовлетворительного качества регулирования в режиме стабилизации тока якоря позволяет сделать вывод о хорошей работе системы в остальных режимах.

При выборе методики расчета характеристик корректирующих звеньев нужно иметь в виду, что известные в общей теории автоматического регулирования методы синтеза основаны на косвенных оценках, как правило, отличаются малой точностью и требуют дополнительных уточнений. С.Я. Березин предложил графо-аналитический метод, основанный на предварительном построении кривой переходного процесса. Этот метод отличается от остальных тем, что в качестве исходного пункта в нем принят конечный результат процесса регулирования - вид переходного процесса. По нему вычисляется передаточная функция скорректированной системы, а затем известными способами определяются корректирующие звенья. Однако в указанном способе, во-первых, объем графической работы слишком велик и трудно поддается автоматизации, а во-вторых, не представляется правильным раздельное рассмотрение систем автоматического регулирования и систем автоматической стабилизации и получение для них разных расчетных формул. Это затрудняет расчет в тех случаях, когда оба способа регулирования объединены в одной системе, как это имеет место в системе автоматического регулирования рекуперативного торможения.

В реферируемой работе разработан упрощенный метод синтеза, также основанный на предварительном построении кривой переходного процесса, в котором графическая часть сводится к тому, чтобы задать вид переходного процесса $f(t)$ с учетом всех требований: величины перерегулирования, времени затухания и т.д. и построить кривую

$$g(t) = f(\infty) - f(t) \quad (10)$$

Далее, кривая $g(t)$ аппроксимируется n трапециями, ко-

торые характеризуются следующими параметрами: t_{oi} - большее основание; t_{di} - меньшее основание; g_{oi} - высота трапеции; $\mu_i = t_{di}/t_{oi}$ - коэффициент наклона, где i - номер трапеции.

Для передаточной функции скорректированной системы, которая обеспечивает получение построенной кривой переходного процесса, получаем:

$$P(\omega) = f(\infty) - \sum_{i=1}^n g_{oi} + \sum_{i=1}^n g_{oi} \frac{\sin \omega t_{oi} - \sin \mu_i \omega t_{oi}}{\omega t_{oi} (1 - \mu_i)} \quad (11)$$

$$Q(\omega) = \sum_{i=1}^n g_{oi} \frac{\cos \omega t_{oi} - \cos \mu_i \omega t_{oi}}{\omega t_{oi} (1 - \mu_i)} \quad (12)$$

где $\sum_{i=1}^n g_{oi} = g(0)$; $f(\infty) - g(0) = f(0)$.

Выражения (11) и (12) действительны для систем, реализующих как автоматическое регулирование, так и автоматическую стабилизацию определенного параметра. Соответствующие передаточные функции нескорректированной системы получаются непосредственно из блок-схемы или путем графического решения системы уравнений. Характеристики корректирующих звеньев получаются известными способами с использованием логарифмических частотных характеристик.

Для получения характеристик корректирующих звеньев при различных способах их включения и при разных исходных параметрах автоматического регулятора была составлена программа на языке "Алгол" применительно к ЭЦВМ "БЭСМ-4".

Для проверки описанного способа синтеза был использован макетный образец САР рекуперативного торможения, объектом которой является двигатель ДК 254Б мощностью 46 квт, связанный

посредством коробки передач с маховиком весом 3130 кг. Автоматический регулятор не отличается от предназначенного для установки на электровоз, за исключением параметров измерительных элементов (датчиков). Было установлено, что корректирующее звено, обеспечивающее затухание переходного процесса при изменении напряжения сети на 10% за 120 мсек без выхода системы из статической зоны, должно производить дифференцирование в диапазоне частот $\omega = 100 - 2000 \text{ сек}^{-1}$ (наклон л.а.ч.х. в этом диапазоне 40 - 50 дб/дек). При использовании пассивного звена из двух RC-контуров требуемый наклон л.а.ч.х. получается, но вследствие резкого снижения уровня постоянного сигнала появляется необходимость в установке дополнительного усилителя.

В четвертой главе исследована новая бесконтактная схема защиты тяговых двигателей электровоза от короткого замыкания в режиме рекуперации. Быстродействующий выключатель при генераторных токах к.з. не срабатывает, а при моторных, хотя и срабатывает, но в силу неодинаковости характеристик параллельных групп двигателей токи короткого замыкания через них могут достигать очень больших величин. Единственный способ активной защиты от к.з. - это быстрое гашение поля путем спада и реверсирования тока возбуждения. Необходимую для этой цели энергию можно получить либо за счет энергии самих двигателей, либо от постороннего источника (например, предварительно заряженной емкости).

В существующих схемах с использованием энергии двигателей для этой цели включены быстродействующие контакторы (БК), разрывающие все параллельные цепи в случае возникновения к.з. При

этом способе защиты после разрыва контактов и введения активных сопротивлений, напряжение на индуктивности якорной цепи меняет знак и складывается с э.д.с. двигателей, так что напряжение на контактах БК значительно превышает напряжение сети (под тем же напряжением находятся обмотки возбуждения двигателей). Помимо недостаточной эксплуатационной надежности и требуемой высокой точности настройки, БК имеют еще тот недостаток, что время их срабатывания ограничено величиной 6 - 7 мсек, в течение которых ток якоря может достигнуть опасной величины. По указанным причинам контакторы БК работают в очень тяжелых условиях, что приводит к частым повреждениям и отказам в процессе эксплуатации.

Применение схемы защиты с использованием предварительно заряженной емкости для размагничивания двигателей и реверсирования тока возбуждения приводит к чрезмерному увеличению габаритов и веса средств защиты. Поэтому при создании новой схемы защиты нужно стремиться к тому, чтобы использовать энергию самих двигателей для гашения их полей, но при этом исключить контакторные элементы БК и иметь возможность начать процесс реверсирования с момента к.з.

Эта идея реализована в предлагаемой схеме, показанной на рис. 4. Особенность схемы заключается в отсутствии гальванической связи между обмотками возбуждения и якорными цепями. Поэтому при к.з. передача энергии к обмоткам возбуждения осуществляется не непосредственно, а через статический преобразователь, который размагничивает все двигатели одновременно. Для этой цели вход преобразователя подключен непосредственно к двигателям.

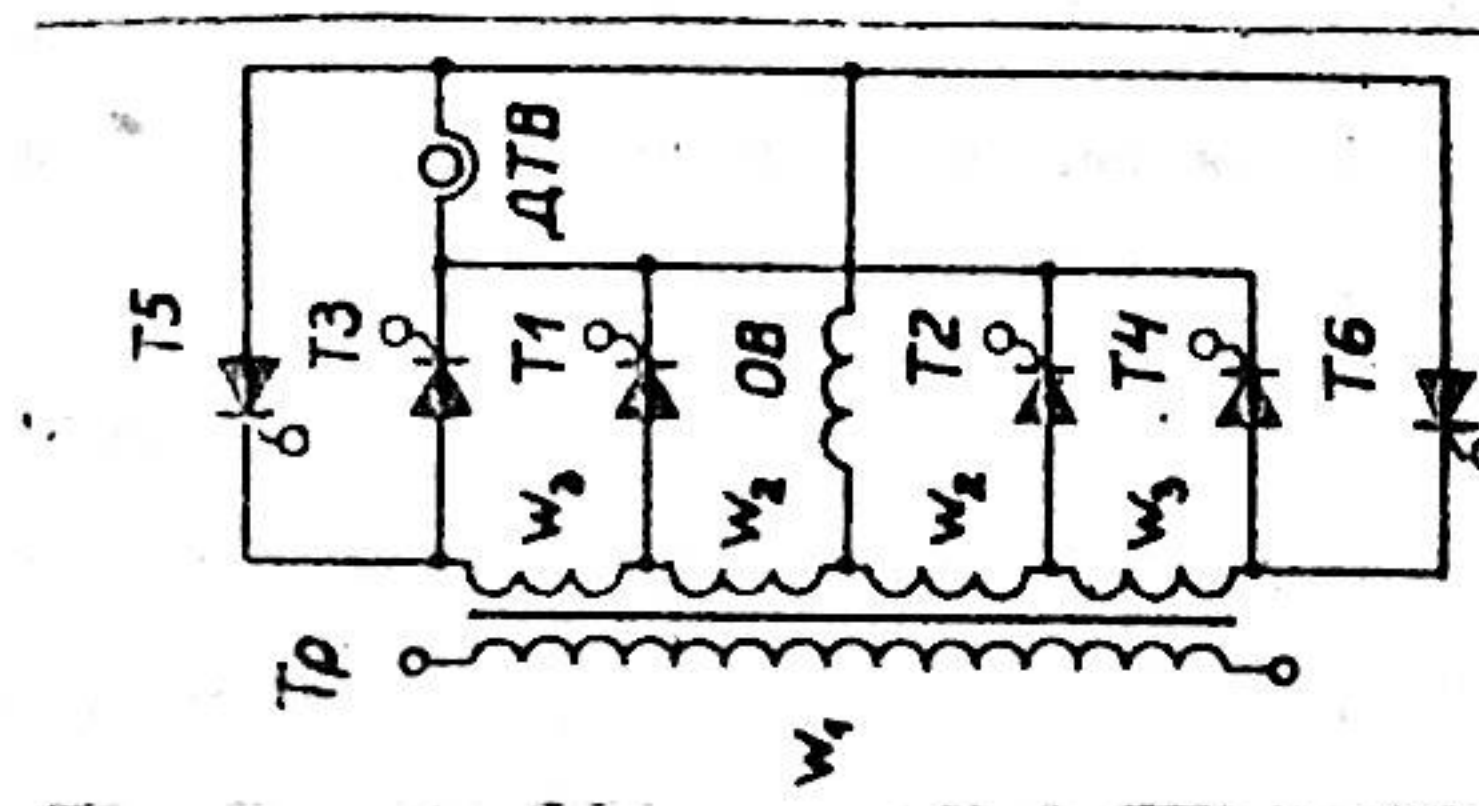


Рис. 5

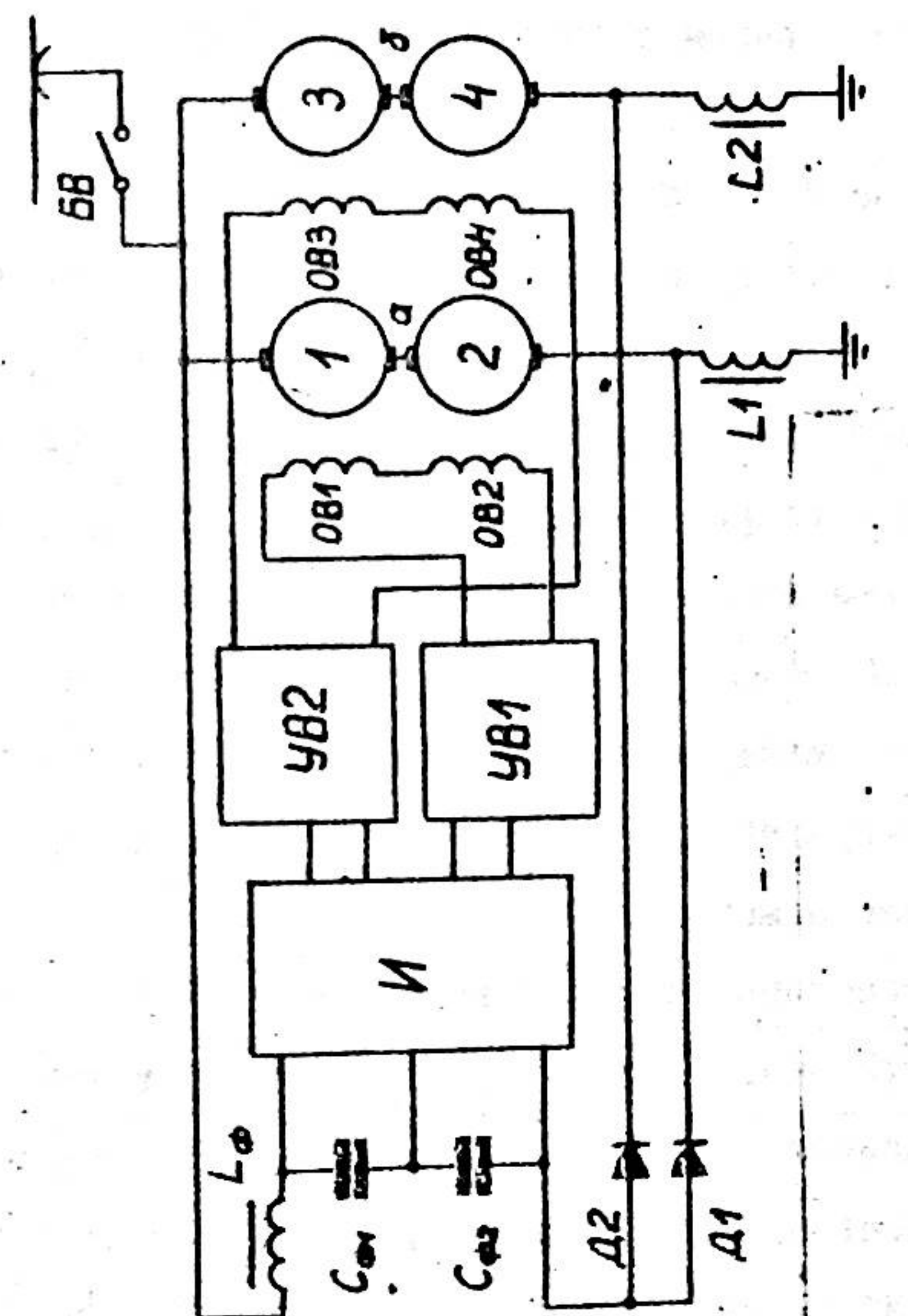


Рис. 4

Преобразователь должен быть выполнен таким образом, чтобы допускать протекание тока возбуждения в обратном направлении. Инвертор И соответствует схеме рис. 1. Один из управляемых выпрямителей показан на рис. 5 и включает основные тиристоры Т1 и Т2, форсировочные Т3 и Т4 и реверсивные Т5 и Т6. Вторичные обмотки преобразовательного трансформатора секционированы, при этом $W_3 > W_2$.

Управляемый возбудитель работает следующим образом. В нормальном режиме поочередно открываются основные тиристоры Т1 и Т2. Их угол открывания меняется плавно и определяется системой автоматического регулирования с учетом ограничений тормозного режима. При возникновении к.з. импульсы с инверторных тиристоров не снимаются и преобразователь продолжает работать. В момент к.з. снимаются импульсы с основных тиристоров и подаются открывающие импульсы на форсировочные тиристоры Т3 и Т4. Эти импульсы имеют максимальную фазу $\alpha_{max} = 140 - 160^\circ$, так что к обмоткам возбуждения прикладывается отрицательное результирующее напряжение, которое вызывает быстрое уменьшение тока возбуждения. Интервал $(\pi - \alpha_{max})$ должен быть достаточным для надежной коммутации тока между тиристорами Т3 и Т4. Для увеличения отрицательного напряжения Т3 и Т4 подсоединены к дополнительным обмоткам трансформатора.

Форсировочные тиристоры работают только до тех пор, пока ток возбуждения не уменьшится до нуля. В этот момент импульсы с них снимаются и начинают подаваться импульсы с минимальной фазой α_{min} на реверсивные тиристоры Т5 и Т6. При этом напряжение на обмотках возбуждения остается отрицательным, а ток меняет направление.

Для обеспечения необходимой очередности подачи импульсов на разные группы тиристоров разработана электронная схема управления на шести полупроводниковых триодах. При работе реверсивных тиристоров на нагрузке датчика тока возбуждения не должно появляться напряжение, т.е. по управляющей обмотке датчика не должен течь обратный ток. Место включения датчика показано на рис. 5.

В период спада тока возбуждения при больших углах α_{max} выпрямитель работает в режиме инвертора и осуществляет трансформацию магнитной энергии, накопленной в индуктивности нагрузки L_δ , в первичную цепь.

$$- \frac{d}{dt} \left(L_\delta \frac{I_\delta^2}{2} \right) = I_\delta^2 R_\delta + \frac{d}{dt} \left(C_\phi \frac{U_\phi^2}{2} \right) \quad (13)$$

т.е. часть энергии теряется в активных сопротивлениях цепи нагрузки, а другая часть переходит в конденсаторы фильтра C_ϕ . Следовательно, напряжение на них повышается. Величина повышения напряжения на одном конденсаторе фильтра ΔU_ϕ равна:

$$\Delta U_\phi = \frac{a_{12}}{\beta_2} + e^{-\alpha t} \left[-\frac{a_{12}}{\beta_2} \cos \omega_0 t + \left(\frac{a_{02}}{\beta_0 \omega_0} - \frac{\alpha a_{12}}{\beta_2 \omega_0} \right) \sin \omega_0 t \right] \quad (14)$$

$$\text{где } a_{02} = -n_\delta B_2 L_\delta I_\delta(0); \quad \beta_0 = C_\phi L_\delta;$$

$$a_{12} = -n_\delta B_2 B_3 U_\phi(0); \quad \beta_2 = n_\delta B_2 B_3;$$

$$\alpha = \frac{R_\delta}{2L_\delta}; \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{4C_\phi L_\delta B_2 B_3 n_\delta - (C_\phi R_\delta)^2}}{2C_\phi L_\delta};$$

$$B_2 = \frac{\pi(1+n) - 2\alpha_{max}}{2\pi(1-n)}; \quad B_3 \approx 2B_2;$$

n_s - число выпрямителей;

n - относительное число витков (см. рис. 1).

Максимальное отклонение $\Delta U_{\phi \max}$ наступает в момент прохождения тока возбуждения через нуль. Определение этого момента, однако, представляет некоторую трудность, поскольку известные методы учета вихревых токов не позволяют получить точный закон изменения тока возбуждения I_δ . В выражение для I_δ входят те же два инерционных звена с постоянными времени $T_{\delta 1}$ и $T_{\delta 2}$, но в начальный момент $t = 0$ функция имеет разрыв (т.е. допускает скачок тока возбуждения), чего в самом деле не наблюдается.

В действительности ток I_δ спадает с конечной скоростью, определяемой той частью потока рассеяния полюсов, которая не замыкается через сталь. Обусловленную этим потоком индуктивность можно измерить только экспериментальным путем. Если ее обозначить через L_δ , то максимальное отклонение $\Delta U_{\phi \max}$ получается после подстановки в (14) значения

$$t_0 = \frac{1}{\omega_0} \arctg \frac{a_{01} \omega_0}{a_{01} \alpha - a_{11}} \quad (15)$$

где $a_{01} = C_\phi L_\delta I_\delta(0)$; $a_{11} = U_\phi(0) C_\phi B_3$

Повышение напряжения на величину $\Delta U_{\phi \max}$ не должно приводить к насыщению преобразовательного трансформатора, что нужно учитывать при его проектировании.

В работе получены более общие выражения для постоянных времени $T_{\delta 1}$ и $T_{\delta 2}$ с учетом активного сопротивления цепи возбуждения R_δ .

Расчет переходного процесса в цепи якоря показывает, что

вынужденное размагничивание двигателей недостаточно для ограничения заброса тока якоря, особенно при большой постоянной времени цепи возбуждения с учетом вихревых токов; необходимо также ограничивать рост тока якоря с помощью индуктивного сопротивления (в существующей схеме защиты электровоза ВЛ-10 основным фактором ограничения тока к.з. является введение в цепь якоря большого активного сопротивления). Если принять, что максимальное отклонение тока якоря не должно превышать 1800 - 2000 а, можно рекомендовать величину индуктивности 70 - 80 мГн применительно к электровозу ВЛ-10 с двигателями ТЛ-2^к (постоянная времени $T_{\delta 1} \approx 1200$ мсек).

Основные результаты работы:

1. Разработана система автоматического управления процессом рекуперативного торможения с использованием принципа фазового регулирования угла открывания тиристоров статического возбудителя. Особенности разработанной системы являются

- а) стабилизация выбранного режима скорости;
- б) ограничение максимальной тормозной силы, максимального тока якоря и тока возбуждения;
- в) ограничение тормозной области со стороны минимального тока якоря, необходимое для автоматического перехода на повышенную уставку скорости.

2. В качестве первого этапа модернизации электровоза ВЛ-10 разработана система, реализующая эффект противокомпаундирования при питании обмоток возбуждения от статического возбудителя.

3. Разработана методика расчета статического преобразова-

теля, обеспечивающая получение трапецеидальной формы переменного напряжения. Установлена зависимость относительного числа витков трансформатора n от рабочей частоты преобразователя и получены кривые нагрузок разных элементов, а также номограммы для расчета элементов фильтра.

4. Выведены выражения для передаточных функций всех звеньев замкнутой системы автоматического регулирования. Особое внимание уделено зависимости динамических свойств статического возбудителя от характера нагрузки.

5. Усовершенствован графо-аналитический способ синтеза системы автоматического регулирования, при котором графическая работа сведена к минимуму.

6. Составлен алгоритм для нахождения характеристик корректирующих звеньев на ЭЦВМ "БЭСМ-4". Показано, что корректирующее звено, обеспечивающее устойчивую работу замкнутой системы автоматического регулирования и быструю реакцию на изменение напряжения сети величиной до 10% без выхода из статической зоны, должно производить дифференцирование в диапазоне средних частот ($\omega = 100 - 2000 \text{ сек}^{-1}$). Рекомендуется использовать последовательную коррекцию и включать корректирующее звено в главный контур непосредственно после узла сравнения.

7. Исследован новый способ бесконтактной защиты тяговых двигателей от короткого замыкания в режиме рекуперации с использованием статического преобразователя, при исключении быстродействующих контакторов. Защита сводится к форсированному размагничиванию двигателей без переключений в силовой схеме.

8. Показано, что использование индуктивных шунтов для увеличения индуктивности цепи якоря в режиме рекуперации не прием-

лемо в виду чрезмерно низких токов насыщения шунтов. Для нормальной работы защиты необходимо включение в силовую цепь линейной или не насыщающейся при токах до 1800 - 2000 а индуктивности.

9. В результате выполненной работы предложена методика расчета и практические пути применения системы автоматического регулирования режима рекуперативного торможения при статическом преобразователе.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. ТРАХТМАН Л.М., БОЯДЖИЕВ Е.И., КАРИБОВ С.И. Расчет электромагнитных процессов в инверторе, работающем на выпрямительную нагрузку. "Электричество", 1971, № 5.

2. ТРАХТМАН Л.М., ТУЛУПОВ В.Д., МАРЧЕНКОВ А.П., БОЛОТОВ Д.Я., БОЯДЖИЕВ Е.И. Система автоматического регулирования тормозной силы рекуперативно-реостатного тормоза электропоезда постоянного тока. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 гг. Подсекция электрического транспорта МЭИ, М., 1969.

3. БОЯДЖИЕВ Е.И. Способ защиты тяговых двигателей от короткого замыкания в режиме рекуперации. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1970 г. Подсекция электрического транспорта МЭИ, М., 1971 (в печати).

4. ТРАХТМАН Л.М., ТУЛУПОВ В.Д., БОЯДЖИЕВ Е.И., КАРИБОВ С.И., ЛИСИН А.В. Система автоматического регулирования процес-

са рекуперативного торможения электровоза постоянного тока при статическом возбудителе. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1970 г. Подсекция электрического транспорта МЭИ, М., 1971 (в печати).