Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Иркутский государственный университет путей сообщения
ФГБОУ ВО ИрГУПС

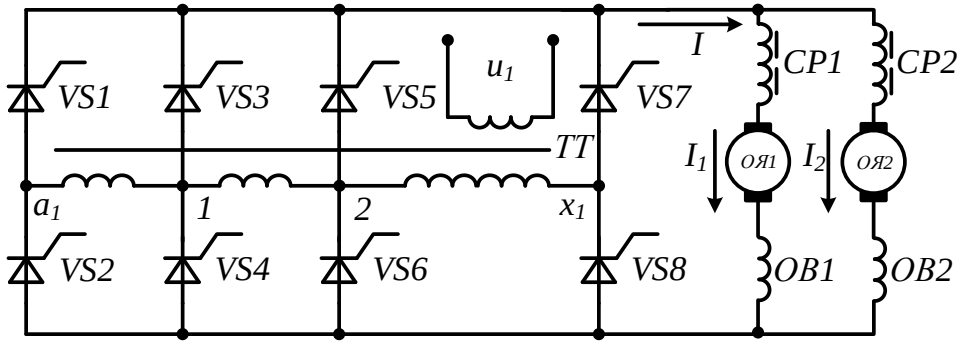
ЗНАЕНОК Вячеслав Николаевич

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧАМ ВИП ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО ИрГУПС
Мельниченко Олег Валерьевич

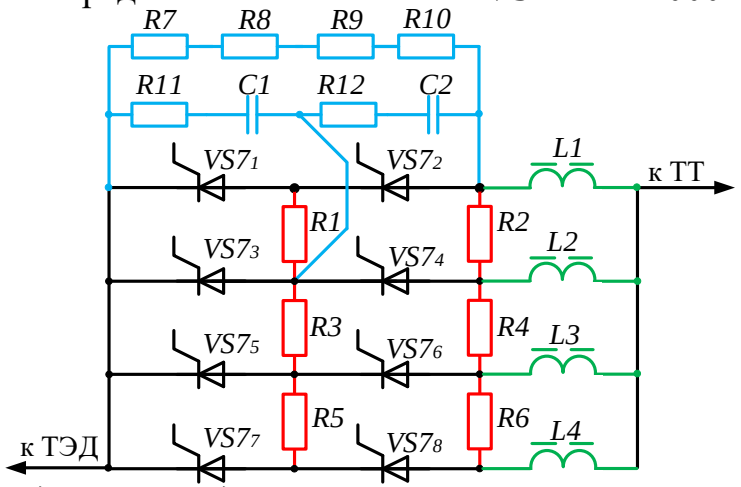
ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ВЫРАВНИВАНИЯ ТОКОВ В ПЛЕЧАХ ВИП ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА БАЗЕ ТИРИСТОРОВ

Принципиальная электрическая схема тележки электровоза с ВИП на базе тиристоров



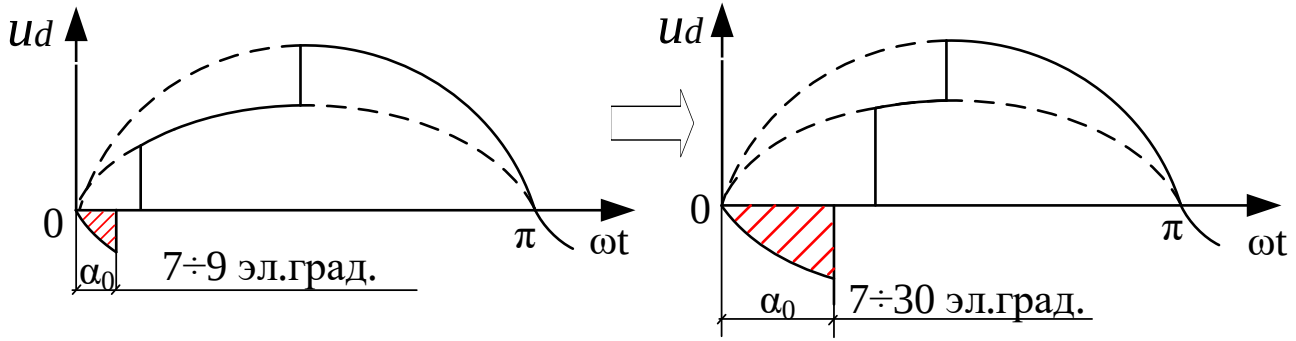
Для обеспечения запаса по току в плечах ВИП применяется параллельное соединение СПП. Симметрирование токов в ветвях достигается за счёт *индуктивных делителей, диагонального подвода тока и подбором СПП по ВАХ.*

На рисунке представлена схема плеча VS7 ВИП 4000М



L1-L4 – индуктивные делители тока; R1-R6 – резисторы для выравнивания падения напряжения на последовательно соединённых тиристорах; R7-R12, C1,C2 – снабберные цепи;

Неотпирание одной или нескольких ветвей плеча ВИП из-за недостаточных потенциальных условий на тиристорах при снижении напряжения в КС было решено за счёт автоматического увеличения минимального угла открытия тиристоров



Также известны технические решения, повысившие равномерность распределения токов в плече ВИП:

- заменены СПП на более мощные: первые серии ВИП насчитывали в плечах по 10 параллельных ветвей, современные – 4;
- усовершенствованы цепи управления (применение экранированных проводов, переход на цифровой БУВИП, модернизированы СФИ, УК и др.);

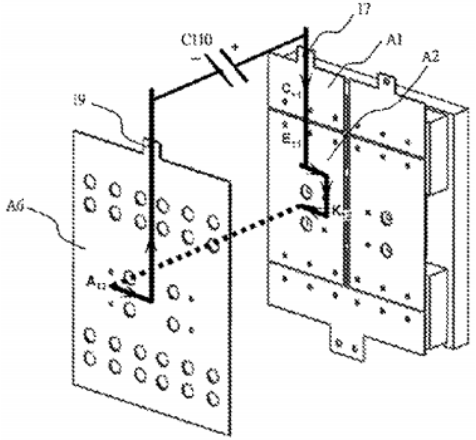
Недостатки:

- увеличение минимального угла открытия значительно снижает коэффициент мощности электровоза (для современных серий электровозов серии «ЕРМАК» не превышает 0.81);
- использование индуктивных делителей ведёт к увеличению индуктивности в цепи, повышению перенапряжений при коммутации, росту габаритов преобразователя и дополнительным затратам на медь;
- диагональный подвод тока не обеспечивает равномерного распределения токов между «крайними» и «внутренними» ветвями.

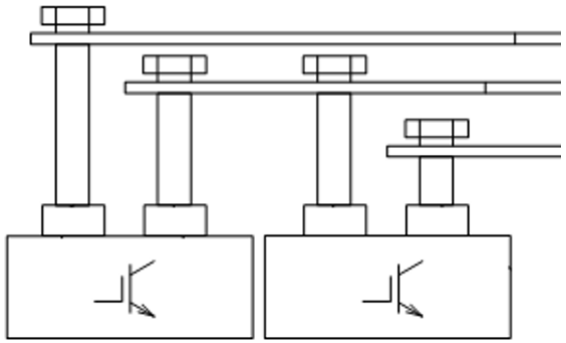
СИММЕТРИРОВАНИЕ ТОКОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ. ЗАРУБЕЖНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для преобразователей на базе IGBT-транзисторов с использованием их параллельного соединения производителями зачастую применяется специальная конструкция силовых шин для конкретных схем преобразователей, обеспечивающая снижение индуктивности в цепи и улучшение распределения токов. Подобные решения характерны решения характерны для таких компаний, как Semikron, Siemens, IXIS, Hitachi, DELTA Electronics, Bombardier Transportation и др.

Многослойная шина для преобразователей



Исполнение подвода тока для фазного модуля

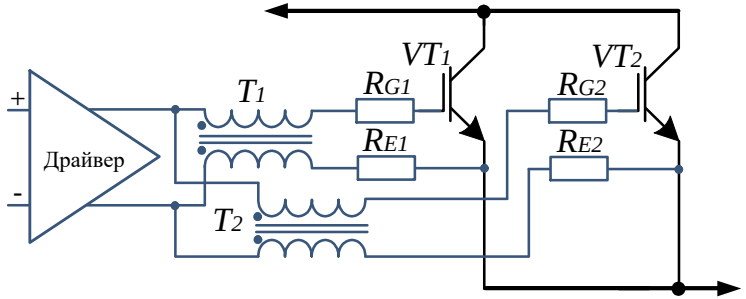


Недостатки:

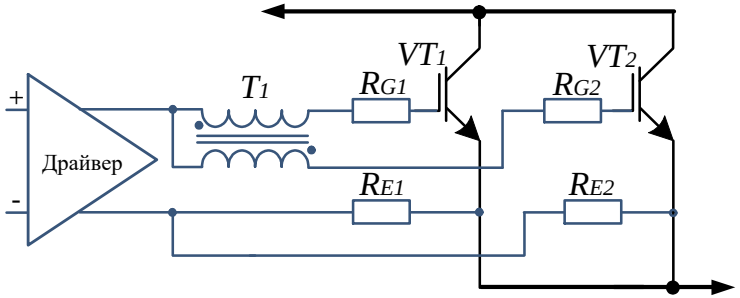
- применение специальных конструкций силовых шин лимитировано ограниченными габаритами внутри электровоза, при изменении их строгой геометрии заложенный производителями эффект исключается;

- включение дополнительных индуктивных элементов в цепь управления параллельно соединенных IGBT-транзисторов приводит к увеличению индуктивности в ней и, как следствие, ухудшению коммутации.

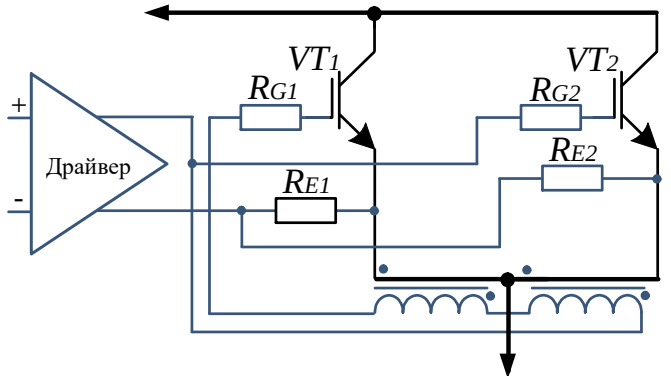
Включение синфазных дросселей в цепь управления затворами для снижения синфазных помех



Применение дифференциальных дросселей в цепи управления исключает рассогласование токов в цепи затворов



Использование дополнительной схемы «детектирования» для уменьшения неравномерности распределения токов



ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель:

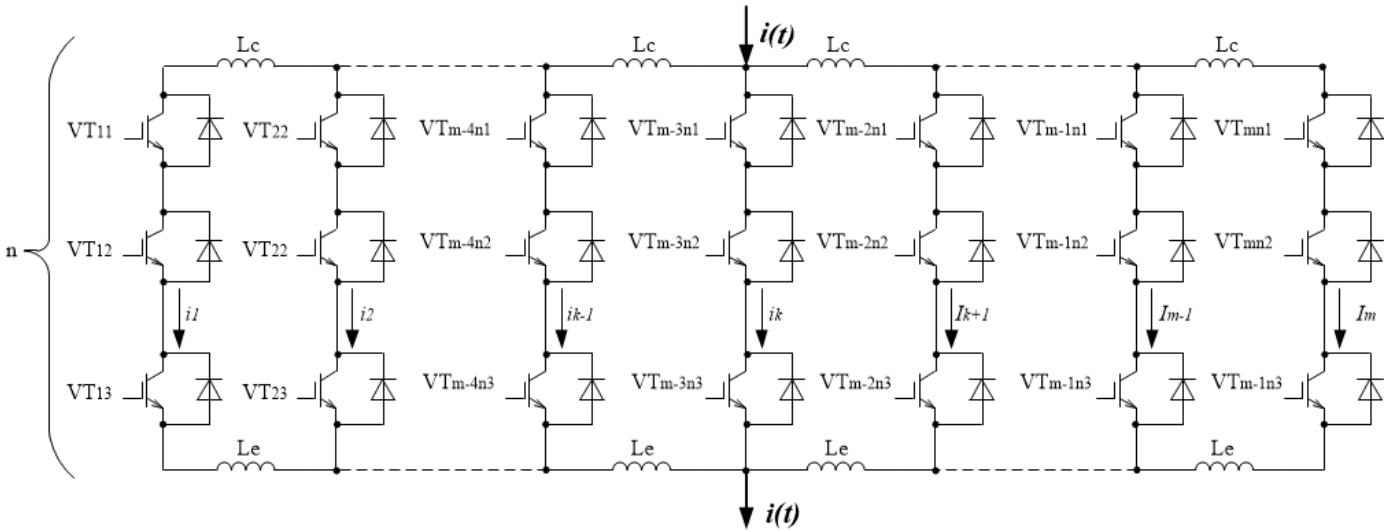
Разработать способ подвода тока, обеспечивающий его равномерное распределение по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

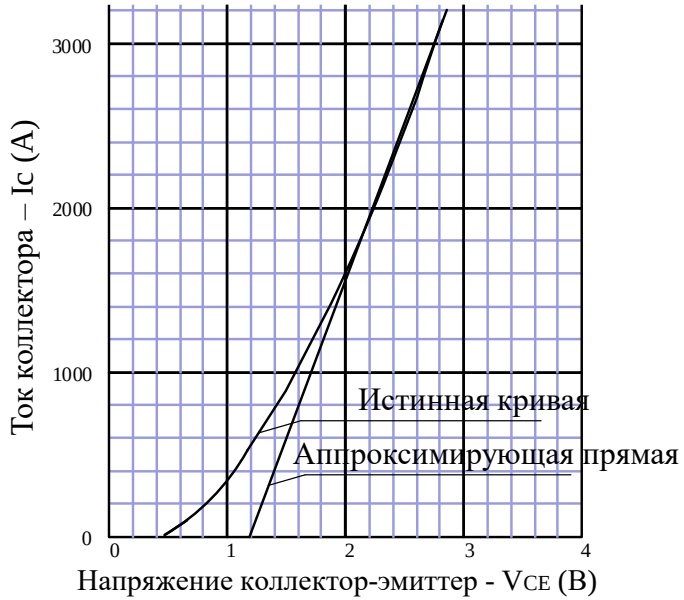
- выполнен анализ технических решений и способов повышения работоспособности преобразователей в России и за рубежом;
- проведён анализ процессов распределения токов по параллельным ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов;
- разработан способ подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий его равномерное распределение по параллельным ветвям без применения выравнивающих устройств;
- проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа с помощью программного комплекса *MatLab/Simulink;*
- выполнено физическое моделирование распределения токов по параллельным ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока в условиях лаборатории ИрГУПС;
- выполнено изготовление опытных образцов плеч ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов;
- произведён монтаж опытных образцов ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов на электровоз Э5К-015;
- проведены экспериментальные исследования предложенных способов на электровозе Э5К-015 приписки к эксплуатационному локомотивному депо Иркутск-Сортировочный, оборудованным выпрямительно-инверторными преобразователями на базе IGBT-транзисторов на полигоне ВСЖД – ОАО «РЖД».

РАЗРАБОТКА ПЛЕЧА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И СИСТЕМА УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчётная схема параллельного соединения IGBT-транзисторов в плече ВИП



Спрямлённая ВАХ IGBT-транзистора



Среднее падение напряжения на СПП

$$U=\frac{\pi+\gamma}{2\pi}u_0+IR_\partial-\Delta U,$$

γ - угол коммутации;
u_0 - пороговое падение напряжения;
$R\partial$ - динамическое сопротивление СПП;
ΔU - поправка;
I - средний ток СПП.

Система уравнений для расчётной схемы по законам Кирхгофа

$$\left.\begin{aligned} u^*_{01}+i_1R^*_{\partial 1}=u;\\ u^*_{0m}+i_mR^*_{\partial m}=u;\\ i_1+\ldots+i_m=i(t). \end{aligned}\right\}$$

u^*_{0j} - суммы пороговых падений напряжения;
$R^*_{\partial j}$ - суммы динамических сопротивлений;
i_m - мгновенное значение тока в параллельной ветви;
u - падение напряжения на плече преобразователя.

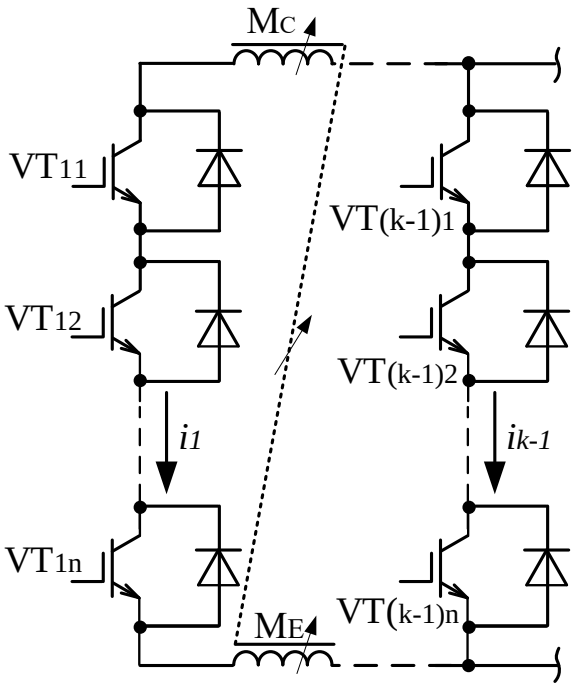
Система уравнений для расчётной схемы по законам Кирхгофа с учетом индуктивности и взаимоиндукции силовых шин

$$\left.\begin{aligned} L\frac{di_1}{dt}+i_1\left(R+R^*_{\partial 1}\right)+u^*_{01}-M\frac{di_1}{dt}=u;\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ L\frac{i_m}{dt}+i_m\left(R+R^*_{\partial m}\right)+u^*_{0m}-M\frac{di_m}{dt}=u;\\ L\frac{di_1}{dt}-M\frac{di_1}{dt}+\ldots+L\frac{di_1}{dt}-M\frac{di_m}{dt}=0;\\ i_1+\ldots+i_m=i(t). \end{aligned}\right\}$$

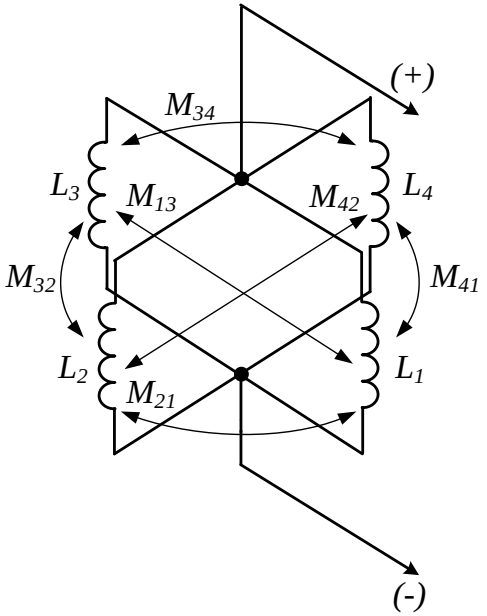
L,M – индуктивность и взаимоиндукция силовых шин;
i_m - мгновенное значение тока в параллельной ветви;
u^*_{0j} - сумма пороговых падений напряжения;
$R^*_{\partial j}$ - сумма динамических сопротивлений;
$i(t)$ - ток плеча;

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ШИН ПЛЕЧА ВИП НА ВЕЛИЧИНУ ИХ ИНДУКТИВНОСТИ И ВЗАИМОИНДУКТИВНОСТИ

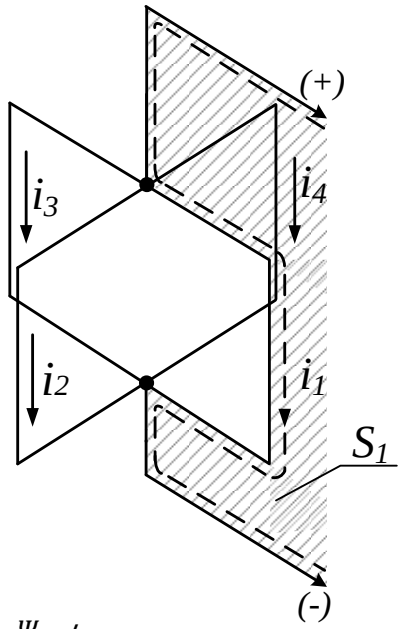
Взаимоиндукция силовых шин в плече ВИП на базе IGBT-транзисторов

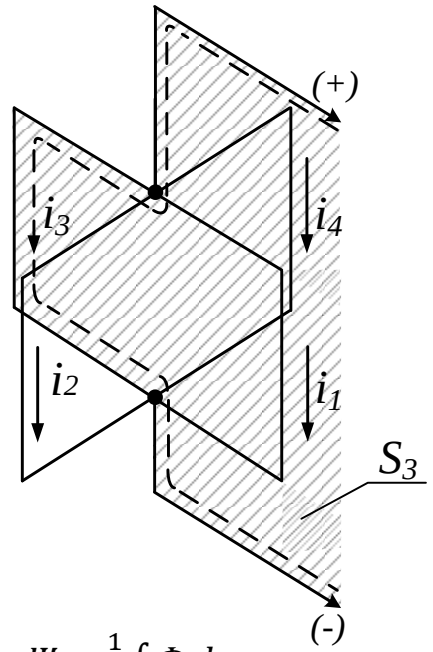


Пространственная модель плеча ВИП с равноудаленным подводом тока



Пример различия площадей контуров протекания токов *i1* и *i3* в соответствующих параллельных ветвях, приводящий к отличию по величине индуктивности в них





$$L_n = {}^{\Psi_{Ln}}/_{i_n};\ M_{mn} = {}^{\Psi_n}/_{i_m};\ M_{nm} = {}^{\Psi_m}/_{i_n},$$

$$\Psi = \frac{1}{s}\int \Phi\, ds,$$

L_n – собственная индуктивность контура n, Гн;

M_{mn} – взаимная индуктивность контура *n* от контура *m*, Гн;

M_{nm} – взаимная индуктивность контура *m* от контура *n*, Гн;

Ψ_{Ln} – поток самоиндукции контура *n*, Гн;

i_m i_n – токи в контурах *n* и *m*, А;

Ψ_m, Ψ_n – потоки взаимной индукции контуров *n* и *m* соответственно, обусловленные токами i_m i_m, Вб.

ds – элемент площади *s* поперечного сечения провода;

Ф – магнитный поток, Вб.

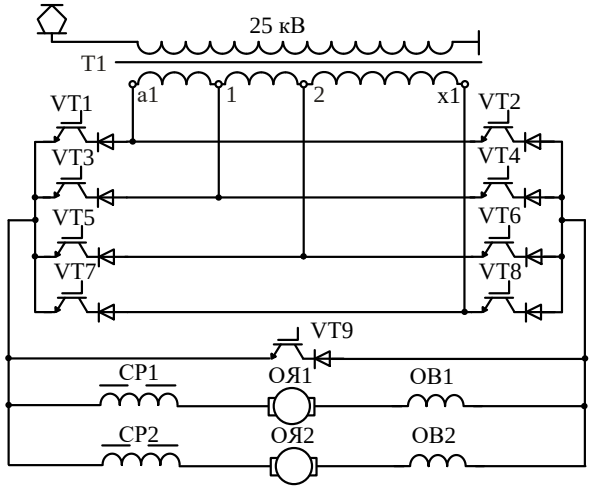
$$\Phi = \int_{S_k} B dS_k,$$

B – поток вектора магнитной индукции, Тл;

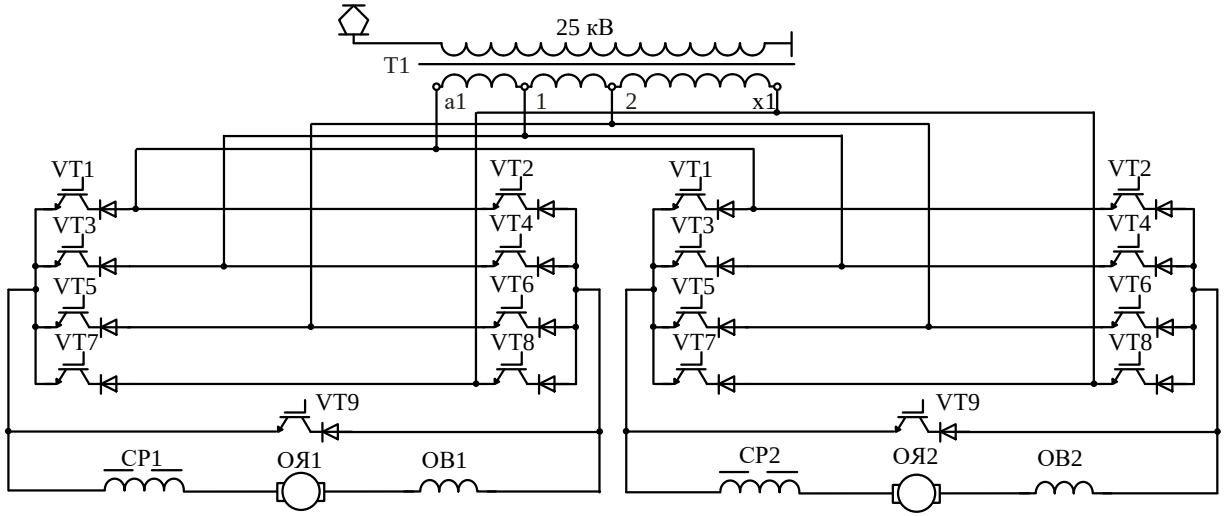
S_k – площадь контура, мм^2.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПЛЕЧ ВИП НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

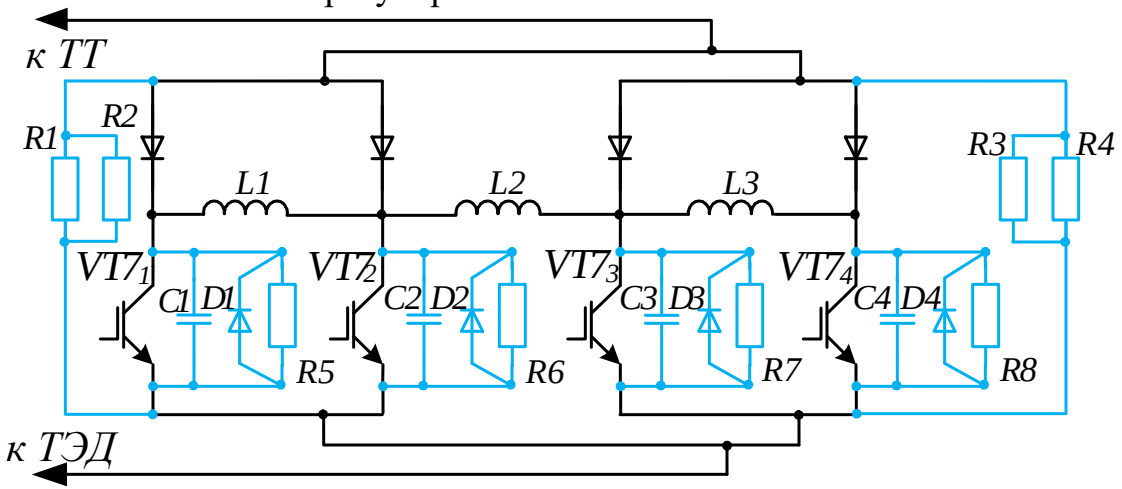
Упрощенная схема электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов с потележечным регулированием силы тяги



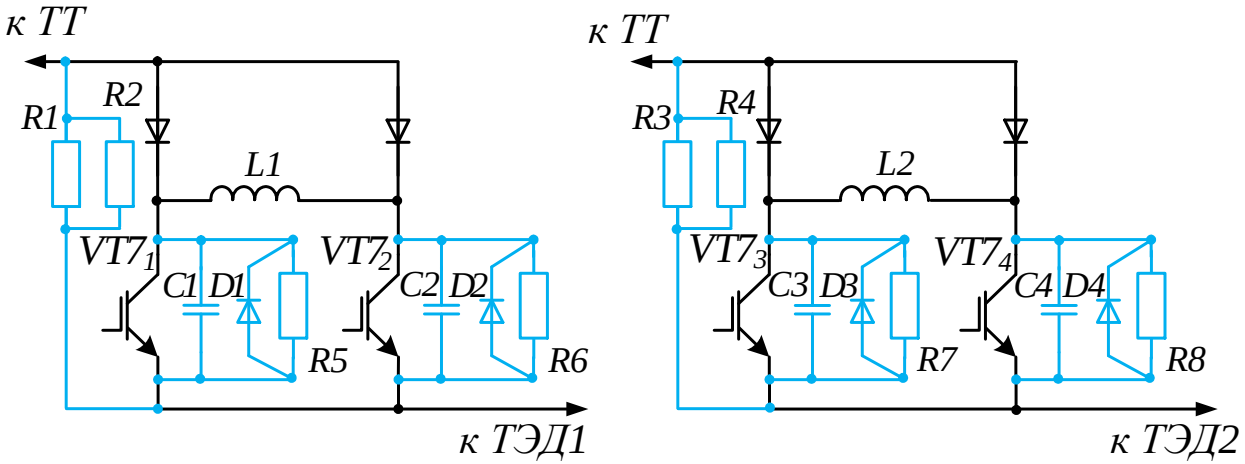
Упрощенная схема электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов с поосным регулированием силы тяги



Предлагаемая конструкция четырехтранзисторного плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов с потележечным регулированием силы тяги

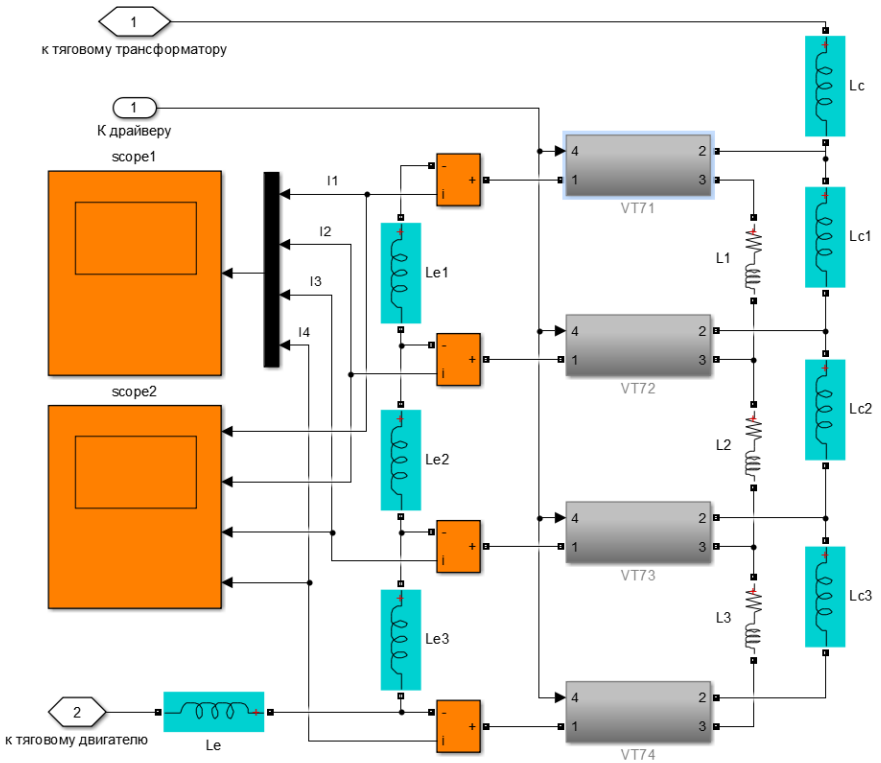


Для электровозов с поосным регулированием силы тяги предлагается использовать по две параллельные ветви в плече с диагональным подводом тока на каждый ТЭД



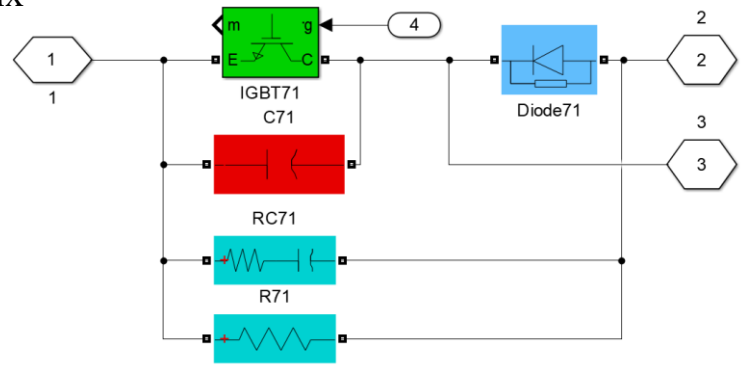
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВЕТВЯМ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛЕЧА ВИП В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB SIMULINK

Модель четырехтранзисторного плеча VT7 ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов с учетом индуктивности силовых шин с коллекторной и эмиттерной сторон



VT71-VT74 – параллельные ветви плеча, *Lc –Lc3*, *Le-Le3* – индуктивность силовых шин со стороны коллекторов и эмиттеров соответственно, *L1-L3* – дроссели выравнивания напряжения

Модель ветвиVT71 плеча VT7



IGBT71, – силовой транзистор ветви; *C71*, *RC71*, *R71* – снабберные цепи ветви; *1,2* – силовые выводы ветви со стороны коллектора и эмиттера соответственно; *3* – силовой вывод дросселя выравнивания напряжения; *4* – вывод драйвера управления затвором IGBT-транзистора

Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям плеча при *одностороннем* способе подвода тока

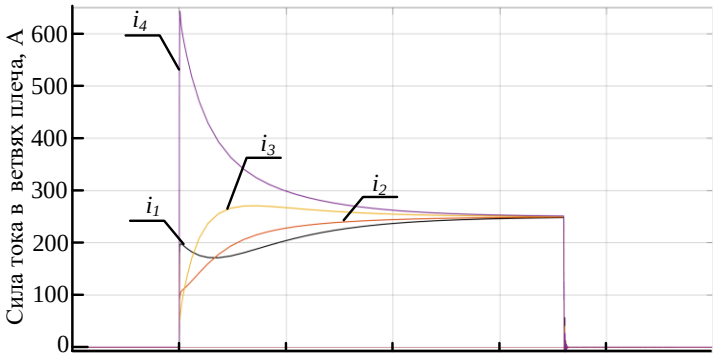


Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям плеча при *диагональном* способе подвода тока

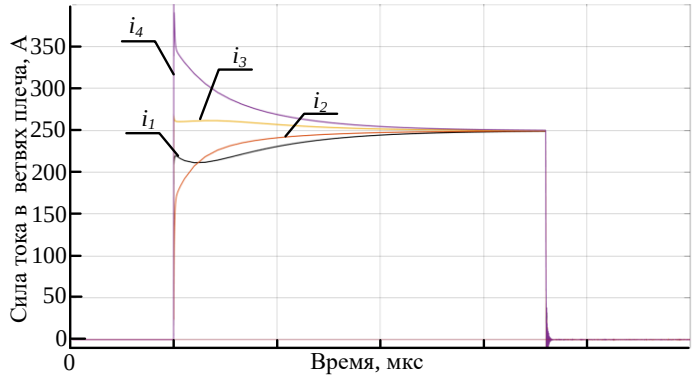
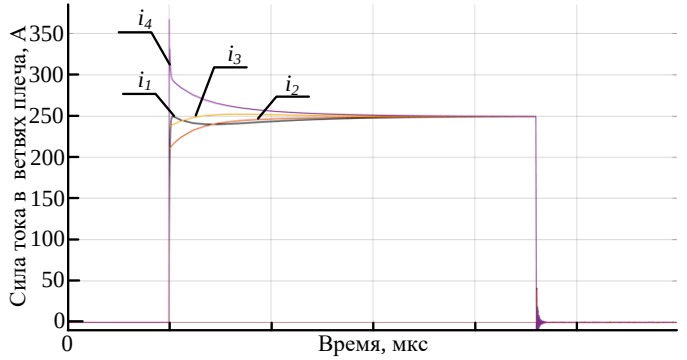
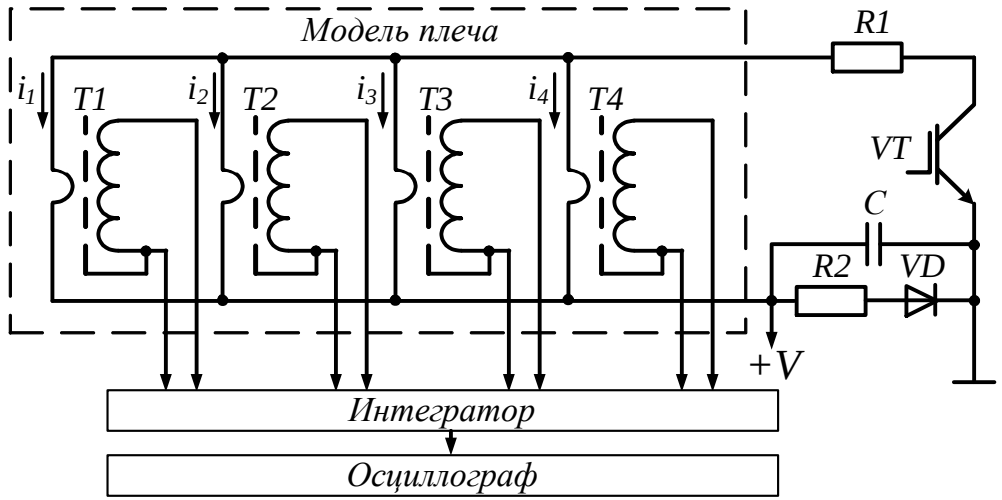


Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям плеча при *предлагаемом* способе подвода тока



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВЕТВЯМ ПЛЕЧА ВИП В УСЛОВИЯ ЛАБОРАТОРИИ

Упрощенная схема исследования распределения токов по параллельным ветвям плеча



VT – силовой ключ; R1 – нагрузочное сопротивление;
T1-T4 – катушки Роговского;

Моделирование распределения токов по параллельным ветвям плеча при *равноудаленном подводе* тока

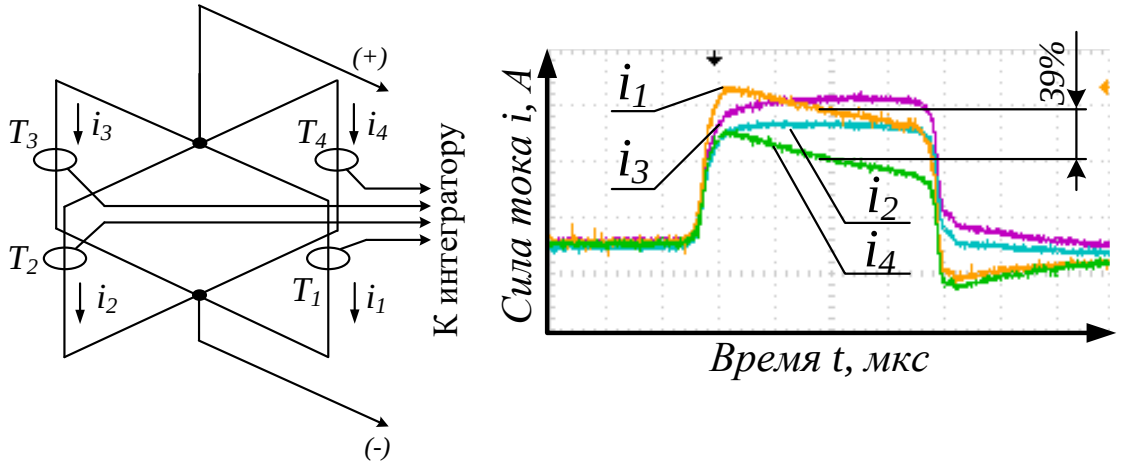


Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям плеча при *одностороннем* способе подвода тока

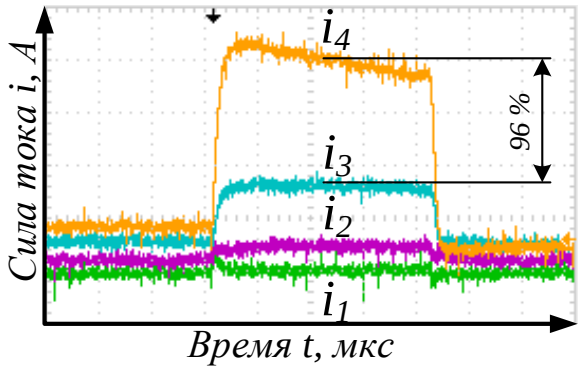
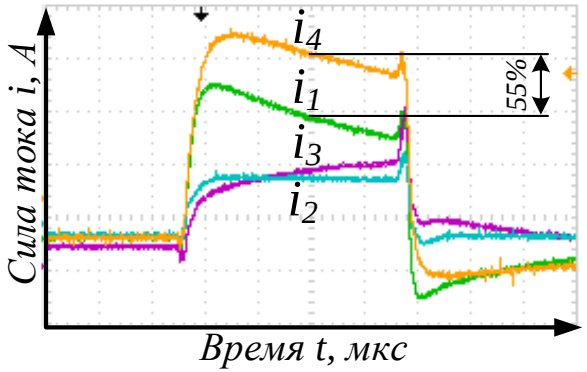
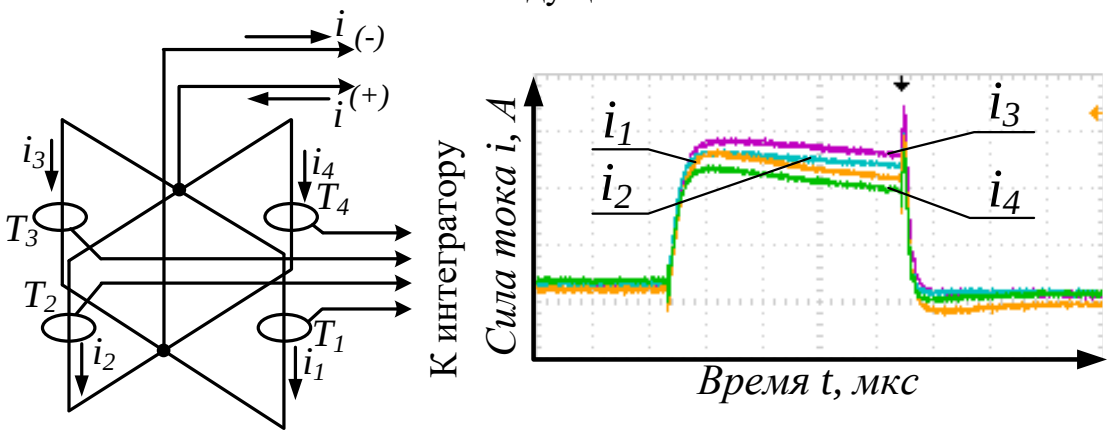


Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям плеча при *диагональном* способе подвода тока

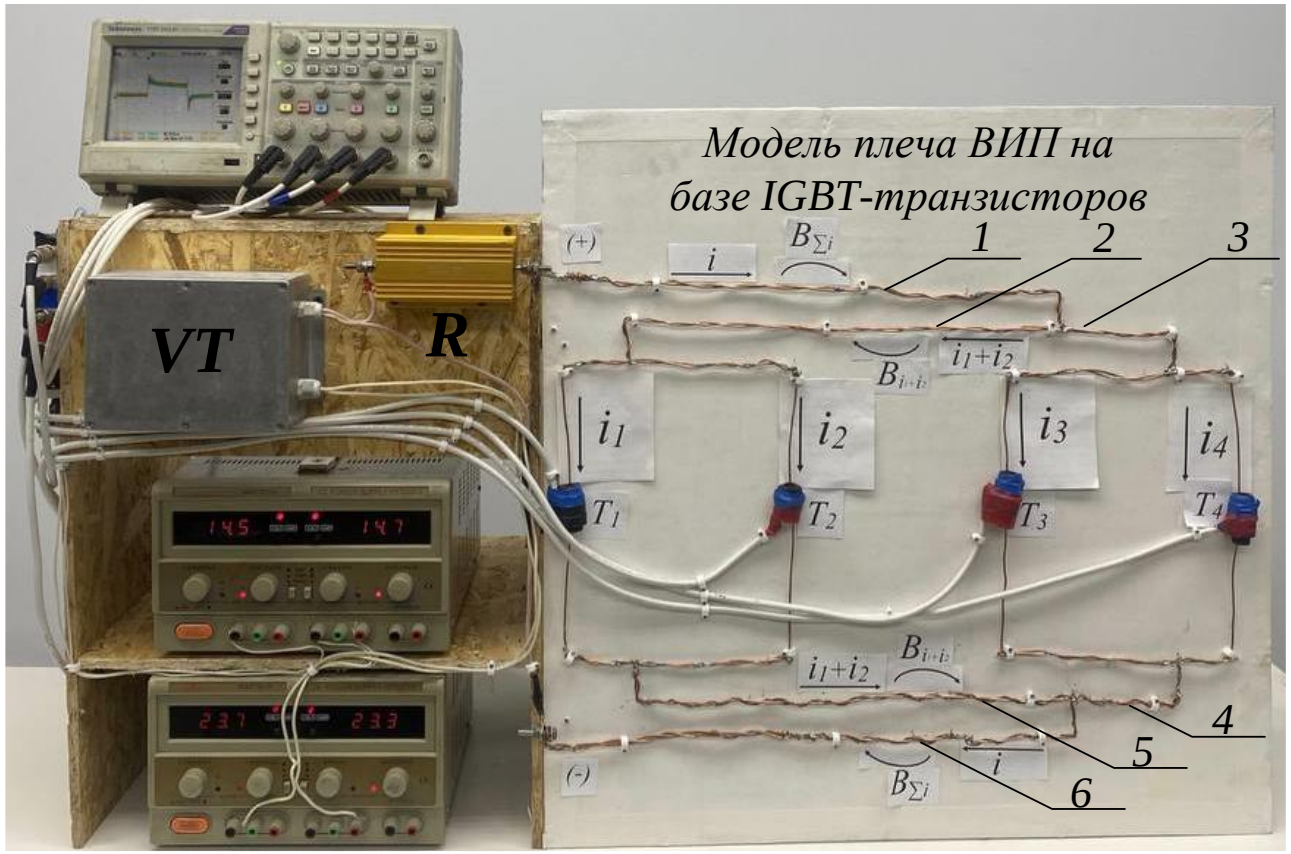


Моделирование распределения токов по параллельным ветвям плеча при *равноудаленном подводе тока* с изменённым положением токоведущих шин



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВЕТВЯМ ПЛЕЧА ВИП В УСЛОВИЯ ЛАБОРАТОРИИ

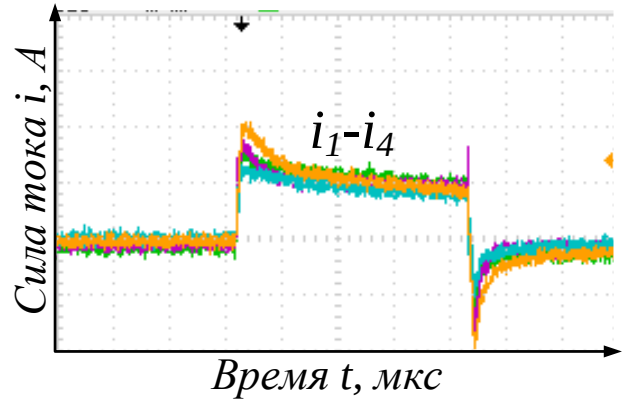
Установка для исследования распределения токов по параллельным ветвям плеча



VT – силовой ключ и его система управления; R – нагрузочное сопротивление; T1-T4 – катушки Роговского;

Плата интегратора сигнала с поясов Роговского

Диаграмма распределения токов по параллельным ветвям при *предложенном* способе подвода тока

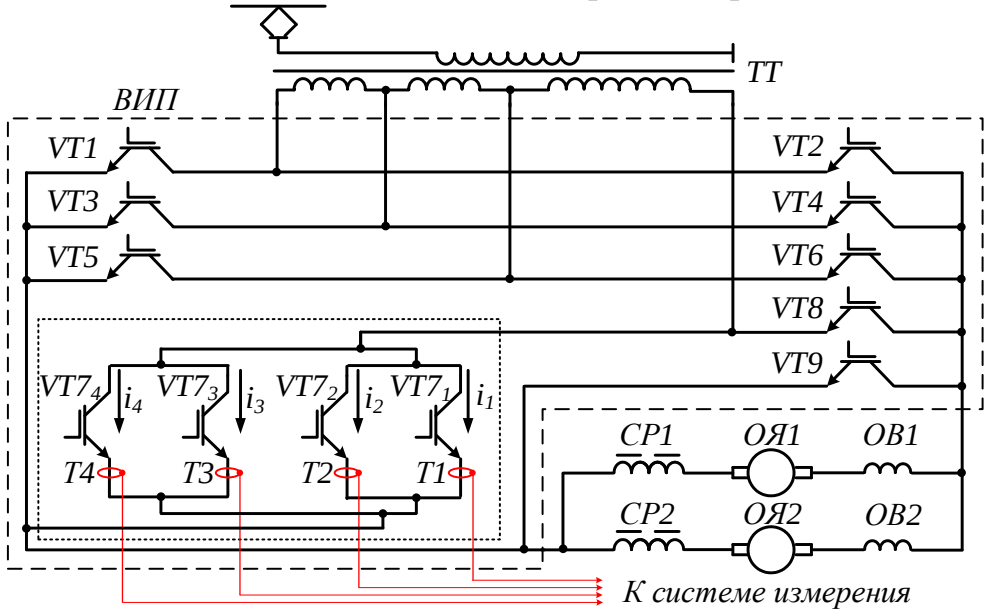


Разброс токов по параллельным ветвям плеча ВИП в зависимости от способа его подвода по результатам экспериментов

№	Способ подвода тока	Разброс токов, %
1	Односторонний	96
2	Диагональный	55
3	Равноудалённый	39
4	Предлагаемый	менее 5

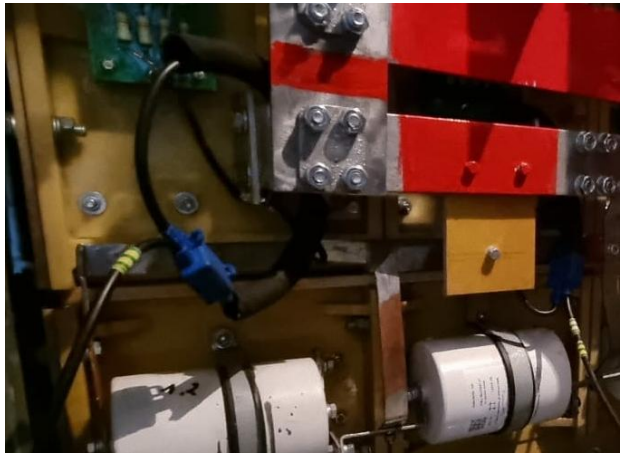
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОВОЗА Э5К-015

Упрощенная силовая схема тележки электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов

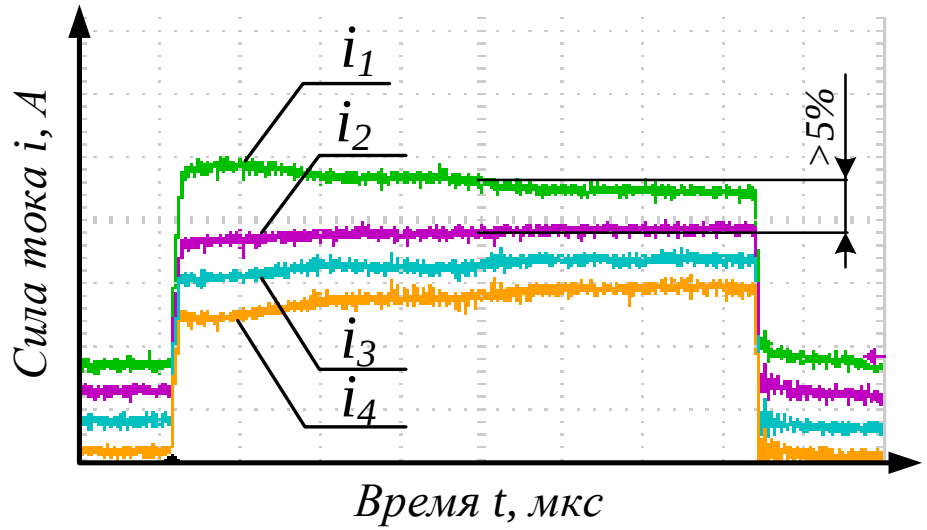


Катушка Роговского, применяемая для проведения измерений

Получение диаграмм протекания тока по параллельным ветвям плеча с помощью измерительных средств



Диаграммы распределения токов по параллельным ветвям плеча



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ способов и технический решений повышения симметрии токов при параллельном соединении силовых тиристоров в плечах выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока в России и преобразователей на базе IGBT-транзисторов за рубежом.

2. Предложен способ подвода тока к плечам ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по параллельным ветвям без применения выравнивающих устройств.

3. Доработана имитационная модель «тяговые подстанция - контактная сеть - электровоз» с ВИП на базе IGBT-транзисторов.

4. Выполнена проверка предлагаемого способа подвода тока на имитационной модели плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с помощью программного комплекса *MatLab/Simulink*, а также на физической модели плеча в условиях лаборатории.

5. Из результатов опытной эксплуатации электровоза Э5К-015 следует, что неравномерность распределения токов по параллельным ветвям плеча за счёт предложенного способа повышения их симметрии не превышает 5 %.