

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО ИРГУПС)

II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием
«Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава»

УЛУЧШЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Докладчик:

Самойлова Анастасия Сергеевна
аспирант кафедры «ЭПС»

Научный руководитель:

Мельниченко Олег Валерьевич
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «ЭПС»

Красноярск 2025 г.

Повышение эффективности современных отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счёт расширения области регулирования выпрямленного напряжения инвертора на четвёртой зоне

Цель: повышение эффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счёт расширения его регулировочной характеристики при увеличении возврата электрической энергии в контактную сеть.

Научная новизна:

- предложен способ повышения эффективности работы электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения, основанный на определении максимально-возможной величины выпрямленного напряжения прикладываемого к ТЭД при постоянном контроле за величиной тока якоря генератора, позволяющий расширить область регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя на четвёртой зоне в режиме рекуперативного торможения;
- предложена методика расчёта угла регулирования α_p открытия тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, в зависимости от скорости движения поезда по спуску в диапазоне максимально-возможного расширения области регулирования выпрямленного напряжения прикладываемого к ТЭД при постоянном контроле за величиной тока якоря генератора.

Текущих потерь напряжения на ББР $\Delta U_{РББР}^{тек}$:

$$\Delta U_{РББР}^{тек} = R_{ББР} \cdot I_{Яmax}^{тек},$$

где $I_{Яmax}^{тек}$ – текущая максимальная величина тока якоря ТЭД, А;
 $R_{ББР}$ – сопротивление ББР типа ББР-64, 0,143 Ом.

Величина добавочного напряжения $U_{доб}^{тек}$:

$$U_{доб}^{тек} = \Delta U_{РББР}^{max} - \Delta U_{РББР}^{тек} = R_{ББР} \cdot I_{Яmax}^{огр} - \Delta U_{РББР}^{тек},$$

где $\Delta U_{РББР}^{max}$ – максимальные потери напряжения на ББР при максимальном ограничении значения тока якоря ТЭД $I_{Яmax}^{огр}$, В;

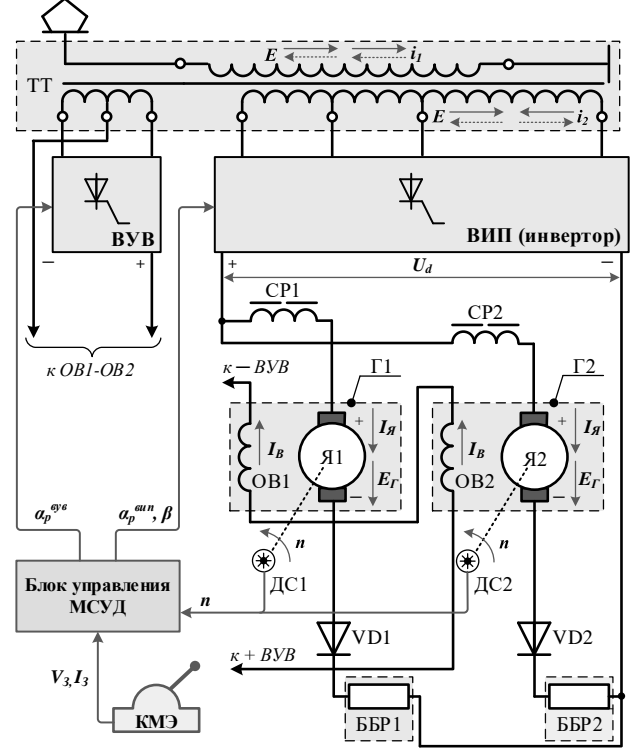
Максимально-возможная величина выпрямленного напряжения U_{dmax} :

$$U_{dmax} = U_{d3,5} + U_{доб}^{тек}.$$

Результаты расчёта расширения области регулирования выпрямленного напряжения инвертора на четвёртой зоне за счёт разработанного способа

$I_{Яmax}^{тек}, A$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$\Delta U_{РББР}^{тек}, B$	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100,1	114,4	128,7	135,85
$U_{доп}, B$	121,55	107,25	92,95	78,65	64,35	50,05	35,75	21,45	7,15	0
U_{dmax}, B	1063,57	1036,52	1009,47	982,42	955,37	928,32	901,27	874,22	847,18	833,65

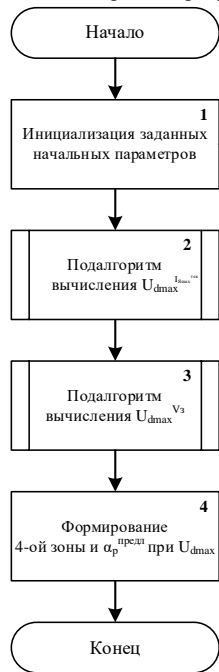
Упрощённая принципиальная электрическая силовая схема электровоза переменного тока серии 2ЭС5К на тележку в режиме рекуперативного торможения



Примечание: ТТ – тяговый трансформатор; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; ВВИ (инвертор) – выпрямительно-инверторный преобразователь; СР1-СР2 – сглаживающий реактор; Г1-Г2 – генератор независимого возбуждения; Я1-Я2 – якорь генератора; ОВ1-ОВ2 – обмотка возбуждения генератора; VD1-VD2 – диод; ББР1-ББР2 – блок балластных резисторов; ДС1-ДС2 – датчик скорости; КМЭ – контроллер машиниста электровоза.

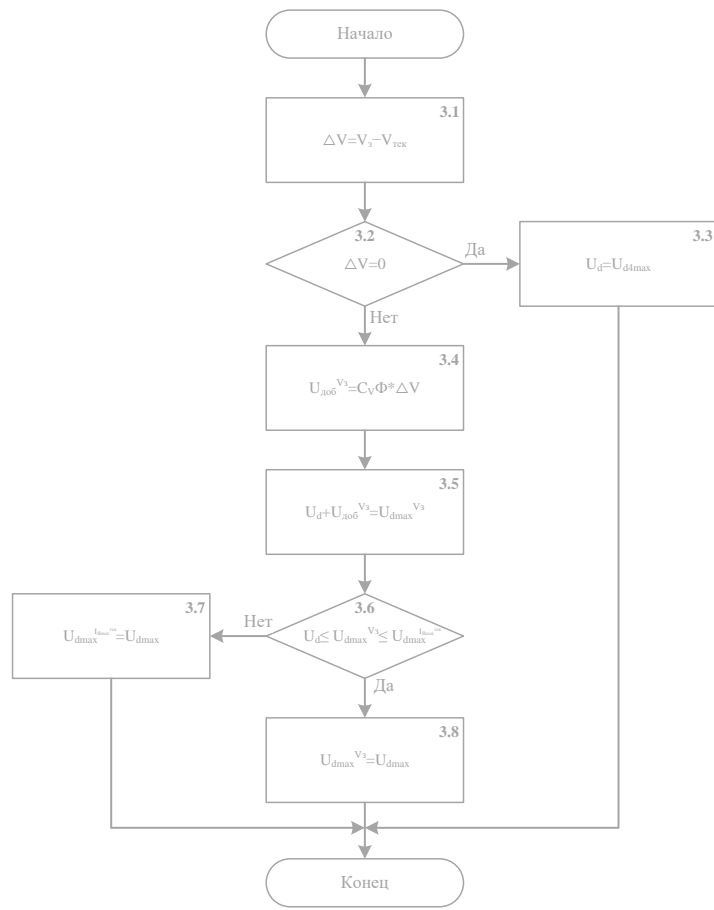
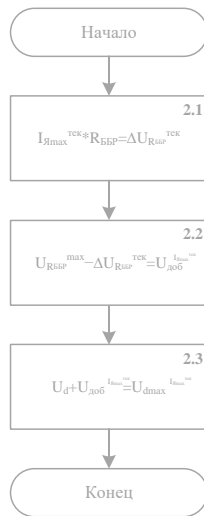
Предлагаемый алгоритм с разработанным способом регулирования выпрямленного напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Алгоритм регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



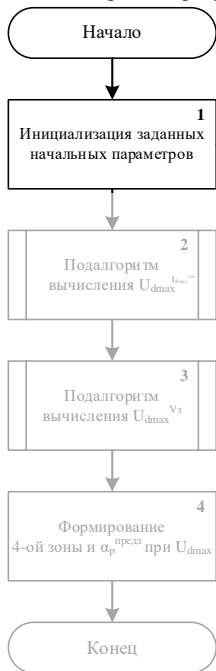
4-ая зона
 $\alpha_p = 90^\circ$
 U_d

Предлагаемый алгоритм заключается в расширении области регулирования напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при формировании величины управляющего импульса α_p более 90 эл. град. за счёт определения величины добавочного напряжения по максимальному напряжению прикладываемому к коллекторному ТЭД с учётом текущих потерь напряжения на ББР, посредством контроля за величиной тока якоря ТЭД, в зависимости от задаваемой скорости движения поезда.



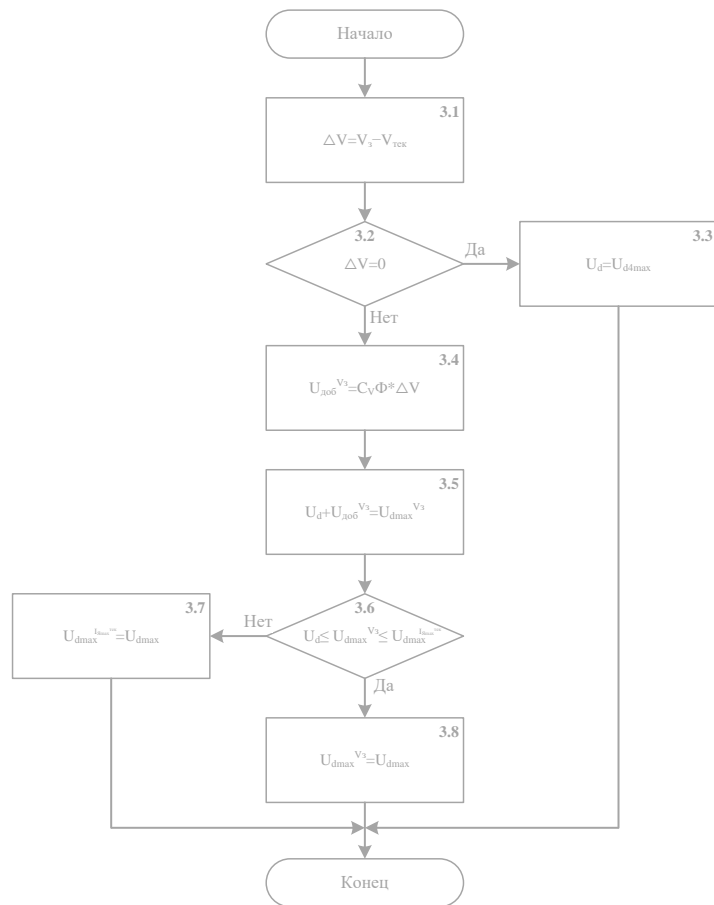
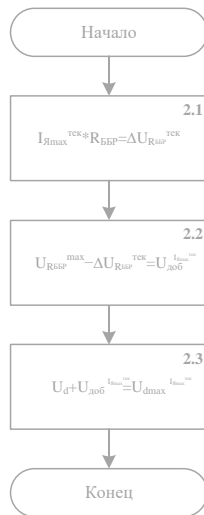
Предлагаемый алгоритм с разработанным способом регулирования выпрямленного напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Алгоритм регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



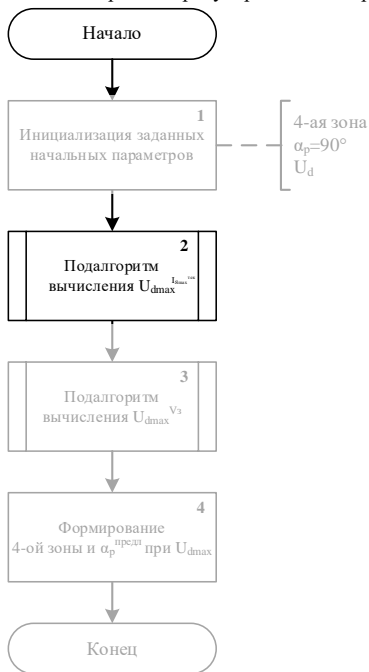
4-ая зона
 $\alpha_p = 90^\circ$
 U_d

В блоке 1 инициализируются заданные начальные параметры для выполнения дальнейших операций основной программы, такие как: четвёртая зона регулирования, угол регулирования α_p равный 90 эл. град., значение выпрямленного напряжения U_d .



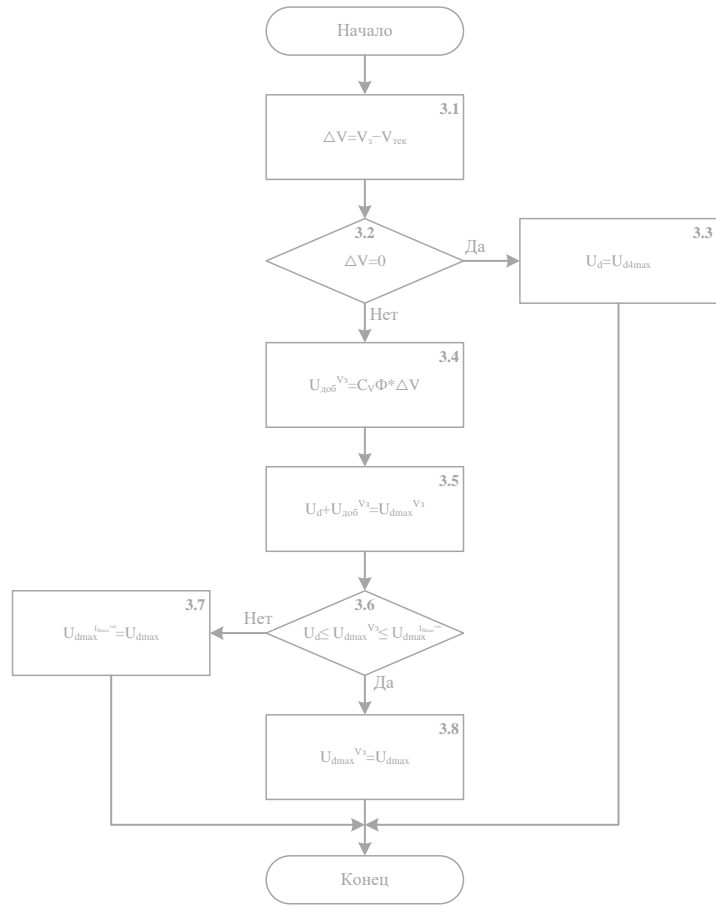
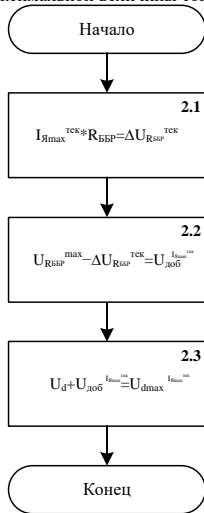
Предлагаемый алгоритм с разработанным способом регулирования выпрямленного напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Алгоритм регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



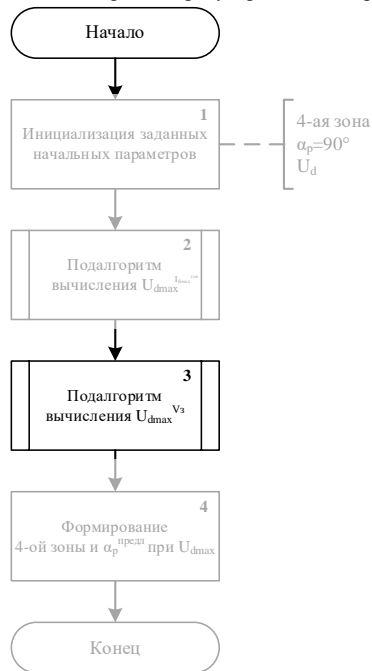
В блоке 2 начинается цикл выполнения подалгоритмом вычисления максимально возможной величины выпрямленного напряжения U_{dmax} относительно текущей максимальной величины тока якоря ТЭД $I_{яmax}^{тек}$ для возможности дальнейшего регулирования в диапазоне расширения зоны.

Подалгоритм вычисления максимальной величины выпрямленного напряжения относительно текущей максимальной величины тока якоря ТЭД



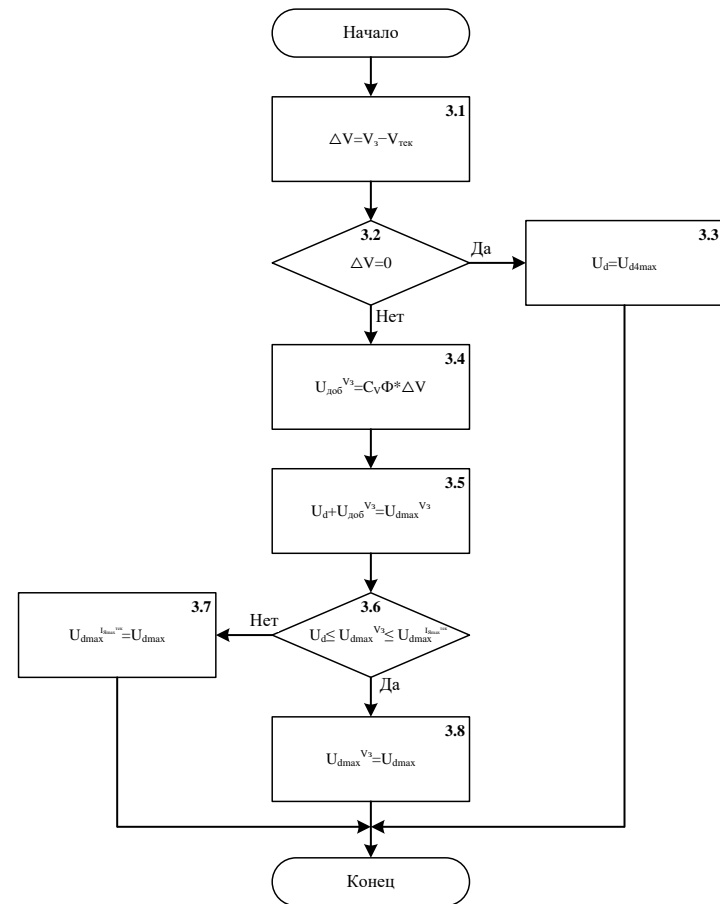
Предлагаемый алгоритм с разработанным способом регулирования выпрямленного напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Алгоритм регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



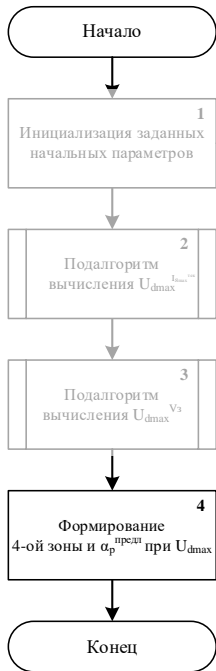
В блоке 3 начинается цикл выполнения подалгоритмом вычисления максимально допустимой величины выпрямленного напряжения U_{dmax} относительно задаваемого значения скорости движения электровоза V_3 для установления максимальной величины выпрямленного напряжения.

Подалгоритм вычисления максимальной величины выпрямленного напряжения относительно задаваемого значения скорости движения электровоза



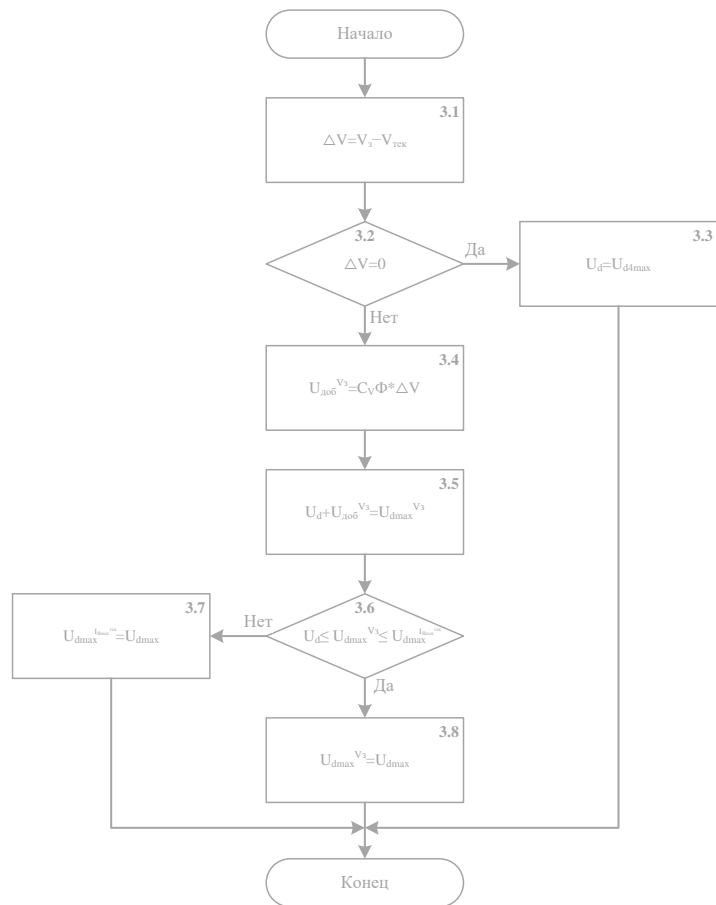
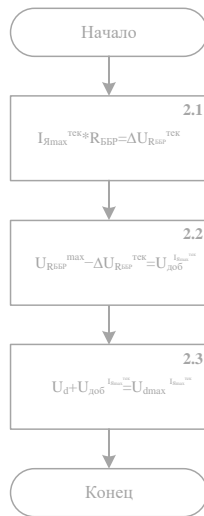
Предлагаемый алгоритм с разработанным способом регулирования выпрямленного напряжения на четвёртой зоне выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Алгоритм регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



В блоке 4 формируется четвёртая зона регулирования и величина предлагаемого угла регулирования $\alpha_p^{\text{предл}}$ при принятой ранее максимальной величине выпрямленного напряжения U_{dmax} .

4-ая зона
 $\alpha_p = 90^\circ$
 U_d

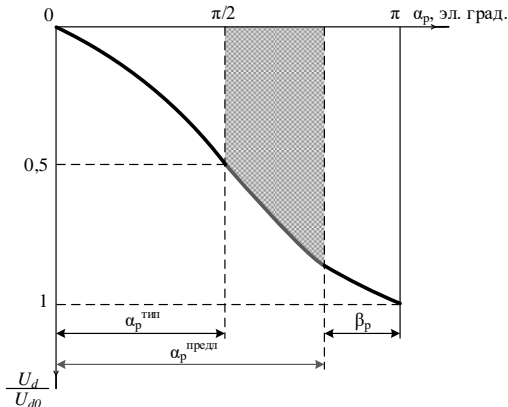
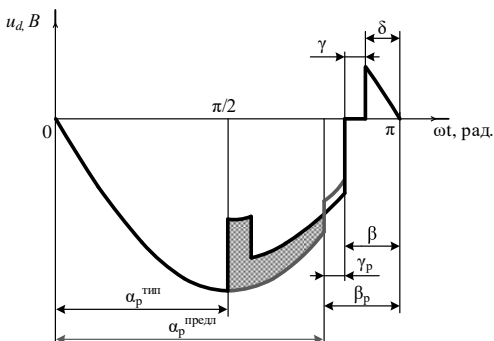


Расширение регулировочной характеристики выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения на четвёртой зоне

Диаграмма регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторным преобразователем на четвёртой зоне в режиме рекуперативного торможения

Регулировочная характеристика инвертора при работе на четвёртой зоне

Результаты расчёта работы разработанного алгоритма регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения



– добавочная часть области регулирования выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне при предлагаемом управляющем импульсе $\alpha_p^{\text{предл}}$.

Выводы

Применение разработанного алгоритма на электроподвижном составе в процессе эксплуатации позволит получить экономию денежных средств за счёт:

- повышения пропускной и провозной способностей железных дорог Восточного полигона при увеличении скорости движения поезда по спускам;
- сокращения время межпоездного интервала при использовании новой технологии «Виртуальная сцепка» в результате наращивания интенсивности движения поездов;
- обеспечение роста эффективности использования энергоресурсов при сокращении затрат электрической энергии на тягу поездов и снижении нагрузок на тяговых подстанциях за счёт увеличения возврата электрической энергии в контактную сеть;
- снижение расхода тормозных колодок и тормозного механического оборудования.

Инициализация (условия)						
Зона	4	$U_{d3,5}, B$	1102,5	$\alpha_p, \text{эл.град.}$	90	
$I_{я\text{max}}^{\text{тек}}, A$	100	200	300	400	500	600
U_d, B	942,02	929,27	916,52	903,77	891,02	878,27
Подпрограмма вычисления величины выпрямленного напряжения относительно текущей максимальной величины тока якоря						
Вычисление величины текущего падения напряжения на ББР						
$U_{\text{РББР}}^{\text{тек}}, B$	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8
Вычисление добавочного напряжения						
$U_{\text{доб}}^{\text{я}}, B$	121,55	107,25	92,95	78,65	64,35	50,05
Вычисление максимально возможной величины выпрямленного напряжения						
$U_{\text{dmax}}^{\text{я}}, B$	1063,57	1036,52	1009,47	982,42	955,37	928,32
Подпрограмма вычисления максимально допустимой величины выпрямленного напряжения относительно задаваемого значения скорости движения электровоза						
Вычисление разности скоростей между задаваемой и фактической скоростями движения электровоза						
$V_{\text{за}}, \text{км/ч}$	53,3	52	50,9	49,7	48,6	47,4
$V_{\text{тек}}, \text{км/ч}$	47,2	46,7	46,3	45,8	45,4	44,9
$\Delta V, \text{км/ч}$	6,1	5,3	4,6	3,9	3,2	2,5
Вычисление добавочного напряжения относительно разности скоростей						
$U_{\text{доб}}^V, B$	121,27	105,36	91,45	77,53	63,62	49,7
Вычисление максимально допустимой величины выпрямленного напряжения						
U_{dmax}^V, B	1063,29	1034,63	1007,97	981,3	954,64	927,97
Проверка соответствия условию ($U_d \leq U_{d\text{max}}^V \leq U_{d\text{max}}^{\text{эк}}$)						
Формирование четвёртой зоны регулирования и величины предлагаемого угла регулирования при задаваемой максимальной величине выпрямленного напряжения на выходе инвертора						
$\alpha_p^{\text{предл}}, \text{эл.град.}$	140	132	125	119	114	108