

# Применение управляемых тиристорных выпрямителей в системах метрополитена и легкорельсового транспорта

Ключевые слова: тяговые сети, управляемый тиристорный выпрямитель, VCR, выходное напряжение, выпрямленный ток, номинальное напряжение.

**В** статье на примере проекта тяговой подстанции «Arninge» (г. Стокгольм, Швеция) рассматривается опыт работы Компании «Плутон» в создании и внедрении управляемых тиристорных выпрямителей для питания контактных тяговых сетей рельсового транспорта, приводится сравнение управляемых тиристорных выпрямителей и диодных выпрямителей для тяги, выделены основные специфичные для тяги требования к управляемым тиристорным выпрямителям.

Использование управляемых тиристорных выпрямителей для электроприводов и электроснабжения рельсовых систем постоянного тока всегда представляло большой интерес, поскольку они способны поддерживать стабильное напряжение на шинах подстанций при любых тяговых нагрузках, включая максимальные. Внедрение управляемых тиристорных выпрямителей (далее – VCR, voltage controlled rectifier) для обеспечения питания тяговых сетей электротранспорта имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными диодными системами, а именно:

- экономия энергии за счёт уменьшения потерь в тяговой сети постоянного тока;
- экономия энергии за счёт возможной рекуперации энергии торможения от транспортных средств в сеть питания переменного тока;
- возможность внедрения системы управления энергией и управления нагрузкой с настройкой параметров онлайн в системе дистанционного управления;
- возможность модернизации существующих диодных систем электропитания;
- возможность обеспечения тягового электроснабжения транспорта с полностью автономным движением;
- возможность решения системных вопросов обеспечения безопасности

Following the example of the project of Arninge traction substation (Stockholm, Sweden), this article highlights PLUTON's experience in development and implementation of controlled thyristor rectifiers for power supply of rail transport contact networks, a comparison between controlled thyristor rectifiers and diode rectifiers, as well as main traction-specific requirements to controlled thyristor rectifiers.

объектов общественного транспорта и управления транспортом в целом;

- сокращение затрат на строительство подстанций при значительном уменьшении их количества.

## Примеры применения VCR для питания тяговых сетей электротранспорта

Опираясь на информацию из зарубежных источников, приведём несколько примеров успешного применения VCR в мире:

1. Швеция, г. Стокгольм. Модернизация системы электроснабжения скоростного трамвая линии «Nockeby» с помощью VCR (начало 1984 года);
2. Швеция, г. Стокгольм. Применение VCR с целью модернизации системы электроснабжения пригородной линии «Roslagsbanan» (начало 1995 года);
3. США, г. Даллас. Оснащение первой линии скоростного трамвая системой питания, состоящей из 16 подстанций, оборудованных VCR. Линия была открыта для коммерческой эксплуатации летом 1996 года;
4. Республика Корея, г. Пусан. Оснащение второй линии метро системой электроснабжения, состоящей из 9 подстанций с применением VCR. Первый этап с 6 подстанциями находится в коммерческой эксплуатации с середины 1999 года, а второй этап – с начала 2002 года;
5. Республика Корея, г. Пусан. Оснащение первого этапа третьей линии метро системой электропитания, состоящей из 6 подстанций, оборудованных VCR (конец 2004 года);

6. Швеция, г. Стокгольм. Поставка управляемого тиристорного выпрямителя производства «Плутон» для пригородной линии «Roslagsbanan» (2019 год).

На примере модернизации системы электроснабжения пригородной линии «Roslagsbanan» в 1995 году рассмотрим преимущества применения VCR. Сама линия «Roslagsbanan» представляет собой старую узкоколейную пригородную линию с уникальной шириной колеи – 891 mm. В течение 1993-1994 годов существующую систему электроснабжения заменили пятью новыми подстанциями, каждая из которых оснащена двумя VCR, позволяющими использовать новые, более мощные поезда с более высокими скоростями.

Две подстанции были оснащены VCR мощностью 2,5 MW и три подстанции – VCR мощностью 1,25 MW. Все подстанции имели полностью контролируемое выходное напряжение со следующим регулированием:  $U_d = 1650 + 150 \cdot I_d / 175$ , где  $U_d$  – фактическое DC-напряжение в вольтах, а  $I_d$  – фактический ток нагрузки в процентах от номинального выходного тока подстанции. Однако, при токах нагрузки выше 175 %  $U_d$  уменьшается в соответствии с параметрами преобразовательного трансформатора. Если бы была использована система с обычными диодными выпрямителями, то для обеспечения потребности поездов в электроэнергии потребовалось бы восемь подстанций, а благодаря внедрению управляемых тиристорных выпрямителей их количество сократилось до пяти.

Также и на третьей линии метро в Пусане (Республика Корея) применение системы на основе VCR позволило увеличить расстояние между подстанциями и снизить их количество с 8 до 6 (каждая из подстанций была оснащена тремя VCR мощностью 3,3 MW). Все подстанции имели полностью регулируемое (стабилизируемое) выходное напряжение 1650 V постоянного тока при холостом ходе с линейным увеличением напряжения до 1750 V постоянного тока при номинальной нагрузке 200 %.

## Технические характеристики VCR

В международной публикации IEC 60146 «Полупроводниковые преобразователи постоянного тока прямого питания (импульсные преобразователи постоянного тока)» говорится, что нормальные условия эксплуатации для подвижного состава равны номинальному напряжению постоянного тока +20 % и -30 %. Номинальное постоянное напряжение представляет собой среднее значение за период напряжения пульсации. Однако относительный коэффициент пульсации (от пика до пика) не должен превышать 15 %. Эти значения являются определяющими параметрами для проектирования выпрямителей и системы электропитания.

Когда диодные выпрямители используются для преобразования переменного тока в постоянный, следует учитывать изменения напряжения в питающей сети переменного тока, а также повышение напряжения до напряжения питания переменного тока при отсутствии нагрузки ( $U_{d0}$ ). Учитывая разницу в 5 % при изменении

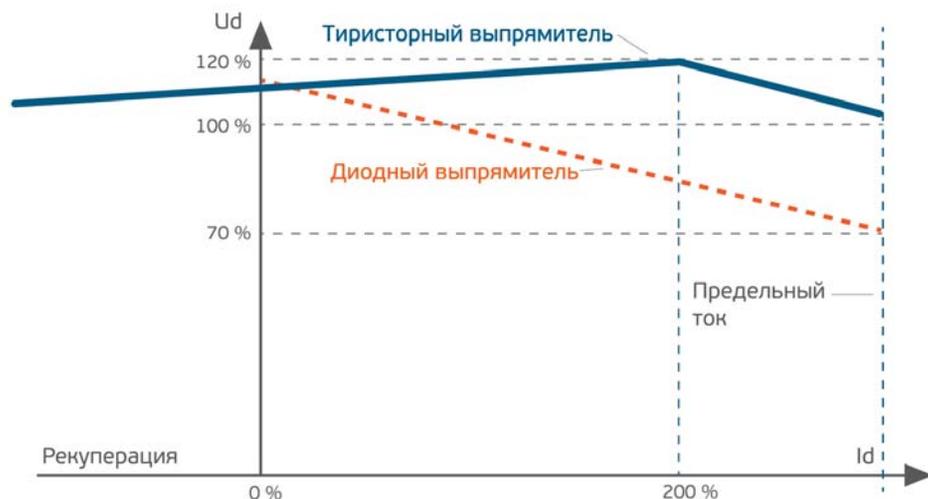


Рис. 1. Внешние характеристики диодного и тиристорного выпрямителей

напряжения переменного тока, эквивалентное напряжение постоянного тока при малой нагрузке, непрерывном токе и номинальном переменном напряжении будет примерно на 9 % выше номинального постоянного напряжения. Затем напряжение постоянного тока уменьшается при увеличении тока нагрузки в зависимости от общего реактивного сопротивления питающей сети переменного тока и трансформатора, по так называемой «внешней характеристике».

Пунктирной линией на Рис. 1 отмечена типичная характеристика выходного напряжения от диодного выпрямителя. Когда для выпрямления используются VCR, напряжение постоянного тока всегда регулируется как функция тока нагрузки. На трансформаторах не требуются переключения или же устройства для регулирования напряжения на трансформаторах под нагрузкой (РПН).

Жирная линия на Рис. 1 показывает выходное напряжение как функцию тока нагрузки для VCR со 110 % на-

пряжением без нагрузки и линейным увеличением выходного напряжения до 118 % при токе 200 % нагрузки.

Такое регулирование оптимизирует систему электропитания в отношении изменений, разрешенных в публикации IEC 60146.

Основной причиной положительного наклона характеристики напряжения/тока является компенсация части резистивного падения напряжения в контактной сети и ходовых рельсах. Такое регулирование напряжения уменьшает потери в тяговой сети постоянного тока, что позволяет увеличить расстояние между питающими станциями. Включение инверторных мостов позволяет стабилизировать напряжение тяговой сети и рекуперировать энергию торможения от транспортных средств в сети питания переменного тока.

Пульсация выходного напряжения от управляемого тиристорного выпрямителя выше, чем от диодного выпрямителя. При использовании 6-пульсных тиристорных выпрямителей амплитудное значение напряжения будет превышать величину 15 % и потребуются низкочастотные DC-фильтры. Использование 12-пульсных тиристорных выпрямителей уменьшает пульсацию напряжения постоянного тока, а также гармонические токи со стороны питающего напряжения. Таким образом, размеры и сложность DC- и AC-фильтров будут уменьшены, а необходимость в DC-фильтрах может даже отсутствовать.

Для питающих тяговых систем с номинальным напряжением 1500 V постоянного тока наиболее эффек-

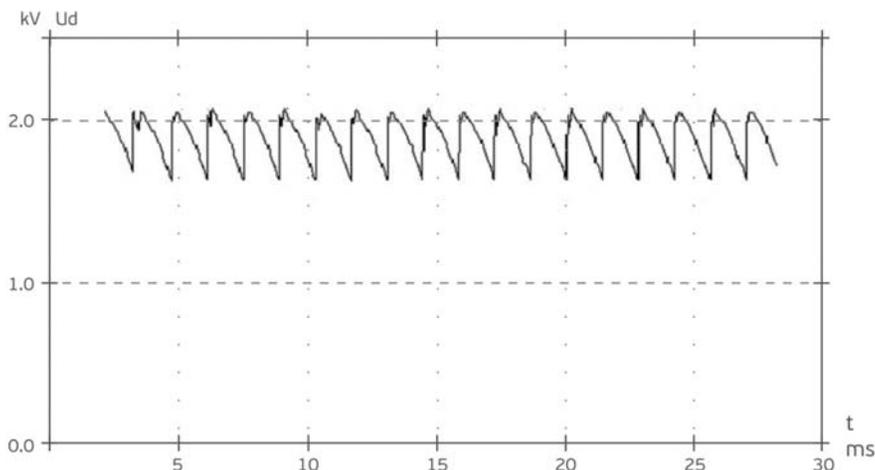


Рис. 2. Выходное напряжение постоянного тока 12-пульсного выпрямителя 1500 В

тивными являются 12-типульсные выпрямители. Система управления и регулирования нового поколения управляемых тиристорных выпрямителей полностью компьютеризирована, однако для интерфейса с внешним оборудованием по-прежнему используются и реле.

### Энергосбережение путём уменьшения потерь электроэнергии в электрических сетях

Выходное напряжение VCR увеличивается или сохраняется стабильно по мере увеличения нагрузки, но выходное напряжение диодных выпрямителей уменьшается по мере увеличения нагрузки, как показано на Рис. 1. При одинаковой потребляемой мощности относительно высокое напряжение от VCR приводит к более низкому току в тяговой сети постоянного тока. Потери в тяговой сети пропорциональны квадрату тока нагрузки, следовательно, при использовании VCR потери значительно снижаются.

**Пример:** две подстанции расположены на расстоянии 4 km друг от друга, сопротивление петли в тяговой сети составляет 0,04  $\Omega$ /km, два поезда мощностью по 3 MW каждый находятся на середине дистанции между двумя подстанциями. Если обе подстанции оснащены диодными выпрямителями, потери в цепных/направляющих рельсах будут составлять 13 % от передаваемой мощности. Если же обе подстанции оснащены VCR, потери будут уменьшены до 10 % от передаваемой мощности из-за более низкого тока (около 11 %) в тяговой сети. Напряжение постоянного тока, питающее непосредственно поезд, при питании от VCR будет выше номинального напряжения. Однако в диодном выпрямителе напряжение, питающее поезда, будет примерно на 10 % ниже номинального напряжения, что может ограничить их работу.

### Энергосбережение путём рекуперации

В современных железнодорожных подвижных системах энергия торможения, подаваемая обратно в тяговую сеть постоянного тока от тормозящих поездов, поглощается в основном

другими движущимися поездами. Однако часто бывает, что поблизости нет электропоезда или ток торможения превышает ток, потребляемый находящимися поблизости поездами. Обычная диодная выпрямительная система не может передать избыточную энергию из сети тяги постоянного тока. Во избежание этой ситуации и для обеспечения стабильного рекуперативного торможения и максимального использования энергия торможения на подстанции устанавливаются инвертирующие преобразователи (те же VCR, но работающие в инверторном режиме).

### Снижение затрат на строительство подстанций

Системы электропитания с применением VCR предполагают относительно высокое выходное напряжение от подстанций и меньшие потери в тяговой сети постоянного тока. В обычных транспортных системах такое решение позволяет значительно увеличить расстояние между подстанциями, что зависит от наклона характеристики напряжения от тока, сопротивления контура сети постоянного тока и интенсивности движения поездов. Принимая во внимание этот факт, при применении энергоэффективной системы питания на базе VCR можно существенно уменьшить количество подстанций, необходимых в случае применения обычной системы с диодными выпрямителями, что позволит значительно снизить затраты на материалы и их строительство.

### Управляемый тиристорный выпрямитель производства «Плутон» нового поколения – инновационное решение для обеспечения тягового электроснабжения транспорта, (включая транспорт с полностью автономным движением)

В 2019 году «Плутон» выполнил поставку оборудования для муниципальной компании «Storstockholms Lokaltrafik AB» (SL) в рамках проекта тяговой подстанции «Arninge», запитывающей линию пригородного скоростного поезда Стокгольма. Для данного проекта специалисты «Плутон» реализовали уникальное техническое решение – управляемый тиристорный выпрямитель В-ТПЕ-2,1к-1500-12П на ток 2133 А и напряжение 1500 V, выполненный по 12-пульсной схеме выпрямления с параллельным соединением тиристорных мостов и оснащенный микропроцессорной системой управления.

При его разработке и изготовлении были применены самые современные технологии, материалы и комплектующие ведущих мировых производителей – это касается как конструкции шкафа и силовой части, так и программного обеспечения, систем защит, диагностики и управления выпрямителем, электрического монтажа, технологии обслуживания и ремонта.

Конструктивно выпрямитель состоит из двух шкафов с силовыми тиристорами, предохранителями, элементами защиты, управления, контроля (Рис. 3). Его питание осуществляется от сухого трехобмоточного преоб-



Рис. 3. Внешний вид выпрямителя

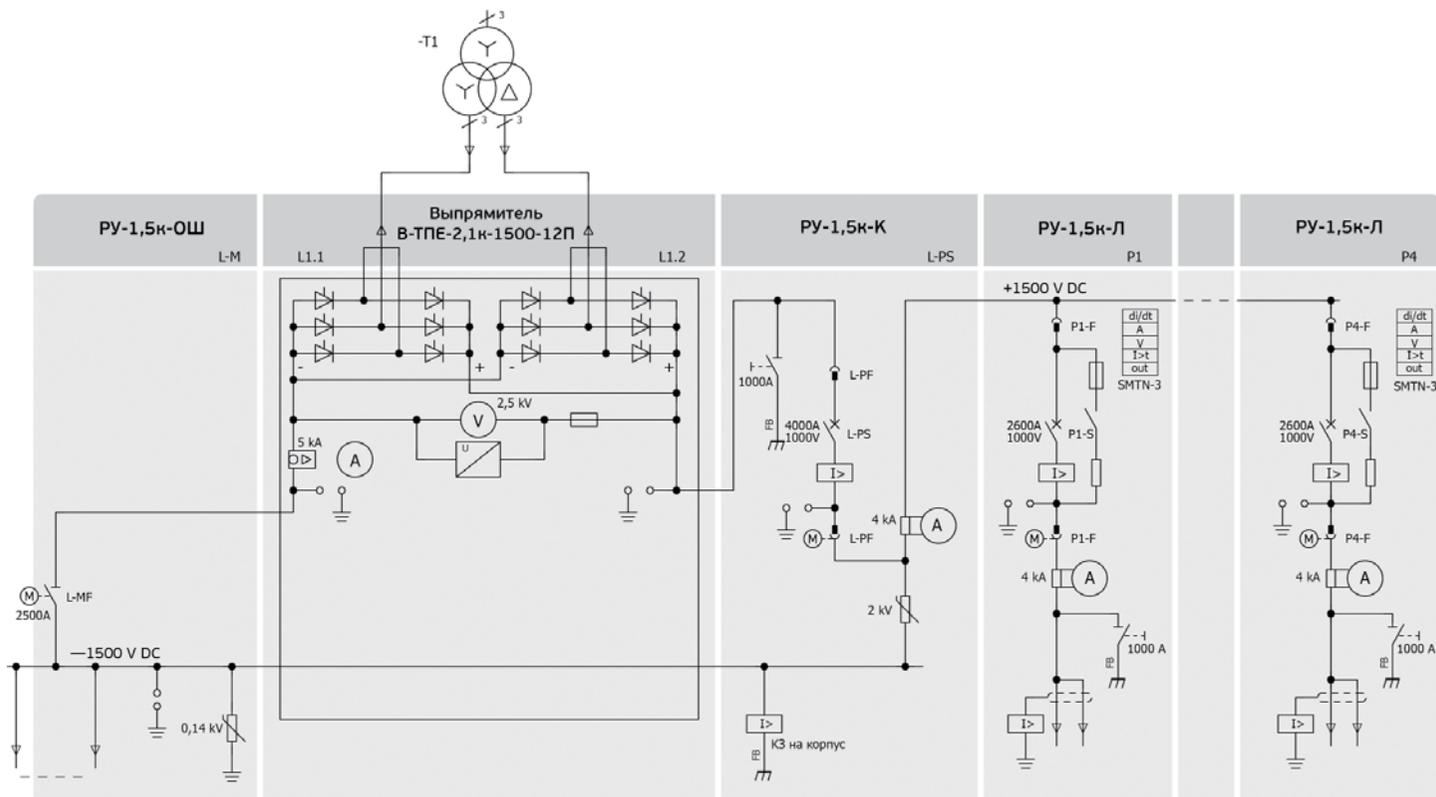


Рис. 4. Упрощённая схема тяговой подстанции с тиристорным выпрямителем

разовательного трансформатора с первичным напряжением 22 kV. В выпрямителе применены таблеточные силовые тиристоры производства «Дупех» 52 класса, а последовательно с каждым тиристором установлены силовые быстродействующие предохранители производства фирмы «Mersen», с помощью которых осуществляется защита от внутренних коротких замыканий. Охлаждение – естественное воздушное.

В выпрямителе В-ТПЕ-2,1к-1500-12П реализована защита силовых полупроводниковых приборов от внутренних и внешних коммутационных перенапряжений. От внутренних коммутационных перенапряжений защита обеспечивается RC-цепями, от внешних – комбинированно: RC-цепями и варисторами (располагаются на панели защиты от перенапряжений).

Управление тиристорным выпрямителем осуществляется с помощью микропроцессорной системы MC-40 разработки «Плутон», реализованной на базе современного сигнального процессора. Система содержит аналоговые и дискретные входы и выходы, коммуникационный порт, часы и индикацию работы, и в своём составе имеет энергонезависимую память, позволяющую хранить журнал аварий, что

является удобным при исследовании причин технологических нештатных ситуаций. Предусмотрено дистанционное управление от системы управления подстанцией (верхнего уровня), а связь обеспечивается по протоколу Modbus TCP/IP. Система MC-40 позволяет реализовать все требования, предъявляемые к управлению, регулированию и защите выпрямителей,

а также требования технологических алгоритмов обеспечения электро-снабжения тяговой сети.

Реализация HMI осуществляется с помощью панели оператора, которая представляет собой сенсорный 7-дюймовый TFT-дисплей и даёт возможность пользователю обмениваться информацией с системой управления. Панель оператора обеспечивает:



Рис. 5. Внешний вид оборудования тяговой подстанции

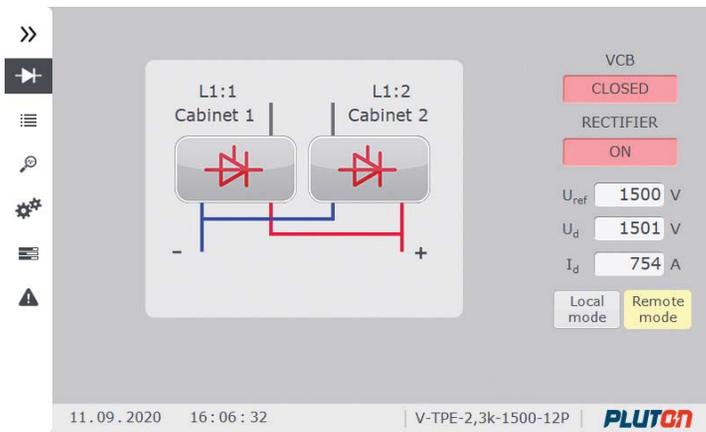


Рис. 6а. Главный экран панели оператора

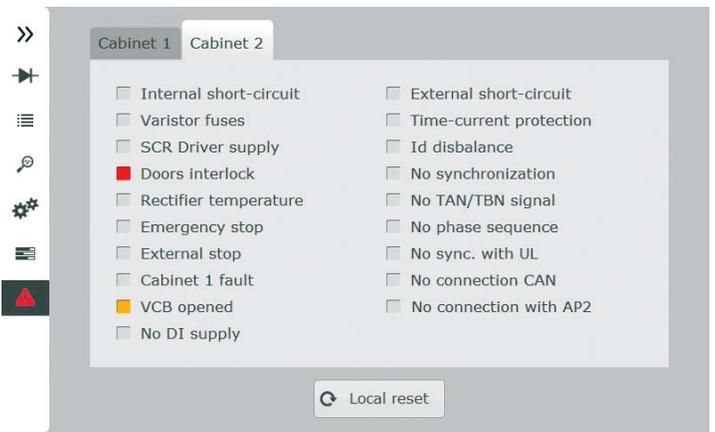


Рис. 6б. Окно аварий

- вывод сообщений о режимах работы;
- вывод предупредительных и аварийных сообщений;
- выбор режима управления выпрямителя;
- задание, изменение и сохранение параметров уставок;
- ведение журнала событий выпрямителя;
- тестирование отдельных узлов выпрямителя;
- обеспечение связи выпрямителя с системой телемеханики.

Примеры реализованных в управляемом тиристорном выпрямителе режимов стабилизации выходного напряжения 1650 V приведены на Рис.7. Показана расчётная внешняя (нагрузочная) характеристика VCR в случае стабилизации выходного напряжения  $U_d = 1500 \dots 1650$  V DC.

Синей жирной линией показана стабилизация выходного напряжения  $U_d = 1650$  V DC, при токе нагрузки от  $I_d = 0$  % до  $I_d = 150$  %. Дальнейший спад выходного напряжения при увеличении тока нагрузки VCR с  $I_d = 150$  % до  $I_d = 300$  % определяется значением параметра трансформатора.

Серым цветом выделена область регулирования выходного напряжения в зависимости от тока нагрузки VCR. Для сравнения оранжевым цветом отмечена внешняя характеристика диодного выпрямителя.

После проведения всех необходимых комплексных пусконаладочных работ оборудование тяговой подстанции «Arninge» в составе с управляемым тиристорным выпрямителем В-ТПЕ-2,1к-1500-12П запущено в работу. Дальнейшая эксплуатация

тяговой подстанции позволит Заказчику оценить очевидные преимущества, полученные благодаря применению данного решения в составе подстанции.

Имеющийся опыт инженеров «Плутон» в разработке и внедрении тиристорного выпрямителя на тяговой подстанции не ограничивается только проектом «Arninge». В настоящее время специалисты компании осуществляют изготовление и поставку оборудования с управляемыми тиристорными выпрямителями с номинальным током 2,3 kA и напряжением 1500 V и усовершенствованными алгоритмами управления для двух новых подстанций – «Vallentuna» и «Lindholmen» (округ Стокгольма, Швеция), запуск которых запланирован на 2021 год.

### Закключение

Управляемые 12-пульсные тиристорные выпрямители производства Компании «Плутон» являются сов-

ременным решением для модернизации тяговых сетей метрополитена, легкорельсового транспорта, а также городского электротранспорта и железных дорог. Эффективность их применения для питания тяговых сетей с повышенным напряжением даёт возможность для разработки новых гибких решений, способных подстраиваться под нужды самых разнообразных Заказчиков, а также позволяет решать системные вопросы в области управления общественным транспортом и обеспечения безопасности его объектов (транспортная безопасность).

*Заместитель главного инженера по преобразовательной технике*

**Сумин Валерий Борисович**

*Valeriy.Sumin@pluton.ua*

*Начальник сектора новой техники Отдела привода и преобразователей*

**Лютый Юрий Анатольевич**

*Yuriy.Lyutyi@pluton.ua*

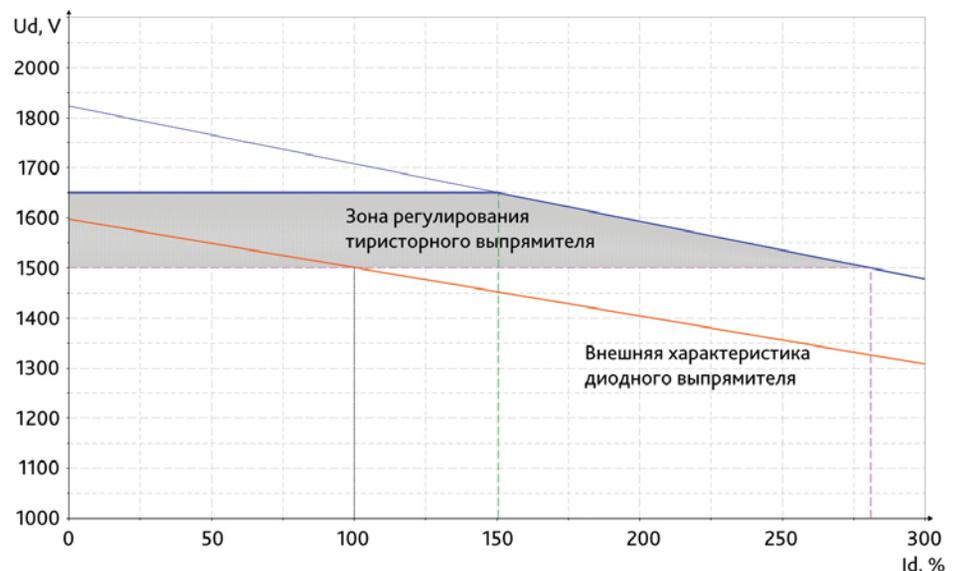


Рис. 7. Область регулирования выходного напряжения VCR