

Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформаторов повышенной частоты

На электроподвижном составе переменного тока низкой частоты тяговый трансформатор имеет большую массу, требует много места для размещения и обладает сравнительно невысоким КПД. В качестве альтернативы может служить трансформатор повышенной частоты, имеющий значительно меньшие массу и объем, а также более высокий КПД. В Техническом университете Брауншвейга (Германия) разработан демонстрационный преобразователь с таким трансформатором мощностью 1 МВт. После соответствующей доработки был также создан преобразователь, близкий к серийному и имеющий мощность 1,5 МВт.

Электрический тяговый подвижной состав, питаемый от контактной сети однофазного переменного тока напряжением от 10 (на ряде частных железных дорог Швейцарии) до 50 кВ (на некоторых грузовых дорогах Северной Америки), имеет тяговые агрегаты, в которых в качестве классического входного звена преобразователя используется главный трансформатор. Такая схема, созданная около 100 лет назад, используется и сейчас, постепенно вытесняя систему постоянного тока, имеющую ограничение по уровню напряжения. Ее преимущество состоит в наличии разделения потенциалов между контактной сетью и оборудованием подвижного состава, а также в более низких входных токах, что позволяет разрабатывать оборудование тягового подвижного состава пониженной массы и меньшего объема.

На электроподвижном составе, работающем на частотах 16,7 или 25 Гц, трансформатор является самым тяжелым и громоздким элементом тягового оборудования. В связи с этим его установленная мощность жестко ограничена, так

как связанная с нею масса определяет величину осевой нагрузки, которая не должна выходить за пределы допуска. Потенциал снижения массы здесь в основном исчерпан. В частности, уже невозможно дальнейшее облегчение системы охлаждения и применение более легких материалов, а концентрация оборудования в небольших объемах связана с растущими потерями мощности.

Новая концепция преобразования энергии должна основываться на таких технических решениях, которые позволят решить названные проблемы и тем самым повысить экономическую эффективность железных дорог. Все дискуссии о новой концепции преобразователей прежде всего затрагивают аспекты КПД и массы, которые в конечном итоге определяют величину энергозатрат на тягу поездов. Эта проблема особенно актуальна для многосистемного подвижного состава, который все больше используется в международных перевозках.

Не менее важна новая концепция и для электропоездов местного сообщения, у которых с целью увеличения пассажировместимости

тяговое оборудование размещают под кузовом, а в вагонах с низким уровнем пола—на крыше. В Германии вопрос разработки новой концепции тягового агрегата стоит особо остро в связи с тем, что тяговые трансформаторы, работающие на частоте 16,7 Гц, имеют особо большие массу и объем.

Кремний вместо железа

Развитие полупроводниковой техники и применение новых электротехнических материалов позволяют существенно уменьшить массу и объем преобразовательных систем тягового подвижного состава, а также повысить их КПД. Современные силовые полупроводниковые вентили, новые изолирующие материалы, а также высокопроизводительные микропроцессоры позволяют реализовать такую концепцию преобразователя, которая даст возможность выполнить все поставленные требования и будет приемлемой по уровню затрат.

Представители науки и железнодорожной промышленности ведут дискуссии о различных путях решения этой задачи. Наряду со сверхпроводящими трансформаторами рассматриваются также различные варианты схем силовой электроники, которые позволяют вообще отказаться от использования трансформатора. В этом случае должны быть разработаны тяговые двигатели нового типа, имеющие надежную высоковольтную

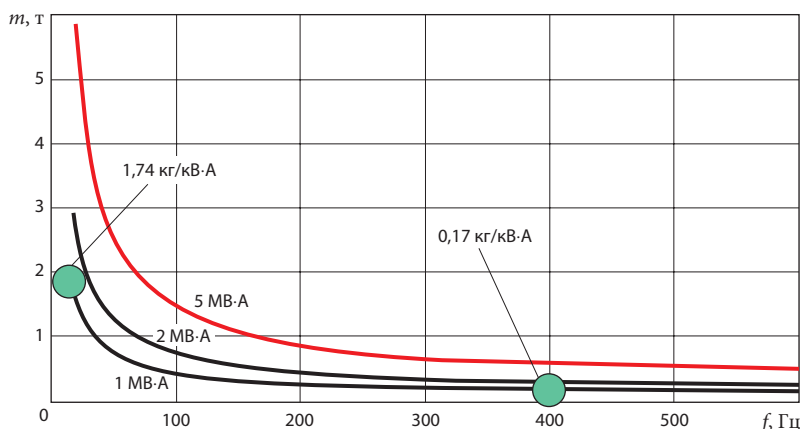


Рис. 1. Зависимость активной массы классического однофазного силового трансформатора от рабочей частоты

изоляция. Возможно также применение дополнительных ступеней преобразования, с помощью которых можно реализовать развязку между частотами контактной сети и рабочей частотой специального трансформатора. Рабочая частота последнего может быть выбрана достаточно большой, что существенно снизит его массу.

На рис. 1 приведены кривые, отражающие зависимость активной массы (медь и железо) классического трансформатора от рабочей частоты. Их анализ показывает, что с увеличением рабочей частоты с 16,7 до 400 Гц снижение активной массы трансформатора может достигнуть 90%. Дальнейшее повышение частоты вряд ли целесообразно, поскольку тактовую частоту импульсов, управляющих работой силовых полупроводниковых вентиляей,

можно увеличивать лишь в определенных пределах.

С разработкой ферритов и аморфных материалов для сердечников появилась возможность повышения рабочей частоты силовых трансформаторов до 3 кГц и более. На их базе можно было реализовать преобразовательные схемы, работающие на принципе резонансной коммутации вентиляей.

Одним из примеров может служить преобразователь, построенный на новых быстродействующих биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). В последнее время эти силовые электронные приборы получили широкое распространение, при этом повысились их надежность и переключаемая мощность. IGBT с запирающим напряжением до 6,5 кВ успешно заменяют в большом диапа-

зоне мощностей запираемые тиристоры (GTO). Это связано с рядом достоинств IGBT: простотой схем управления, отсутствием снабберных цепей, высокой частотой переключений и способностью надежно защищать тяговый преобразователь при возникновении аварийных режимов.

Концепция преобразователя с пониженной массой

В Институте электрических машин, приводов и железнодорожного подвижного состава Технического университета в Брауншвейге разработана концепция облегченного преобразователя для системы однофазного переменного тока напряжением 15 кВ, частотой 16,7 Гц. Был создан многомодульный преобразовательный агрегат с трансформатором повышенной частоты, отвечающий всем современным требованиям в отношении массы, КПД, надежности и совместимости с уже используемыми компонентами.

Принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 2. С высоковольтной стороны она имеет входной каскад с функцией преобразователя частоты, который через сетевой дроссель ND подключается к контактной сети. Частота сети 16,7 Гц преобразовывается этим каскадом в частоту 400 Гц, которая обуславливает приемлемый компромисс между массой/объемом трансформатора, с одной стороны, и потерями мощности в силовых вентиляях преобразователя, с другой.

Преобразователь состоит из включенных последовательно каскадных модулей, каждый из которых образован входным четырехквadrантным регулятором (4QS₁ — 4QS_n), промежуточным звеном постоянного напряжения (ZK₁ — ZK_n) и выходным четырехквadrантным инвертором (UWR₁ — UWR_n). Последние подключены к отдельным секциям первичной обмотки трансформатора.

Секции первичной обмотки всех каскадов магнитно связаны с общей вторичной обмоткой транс-

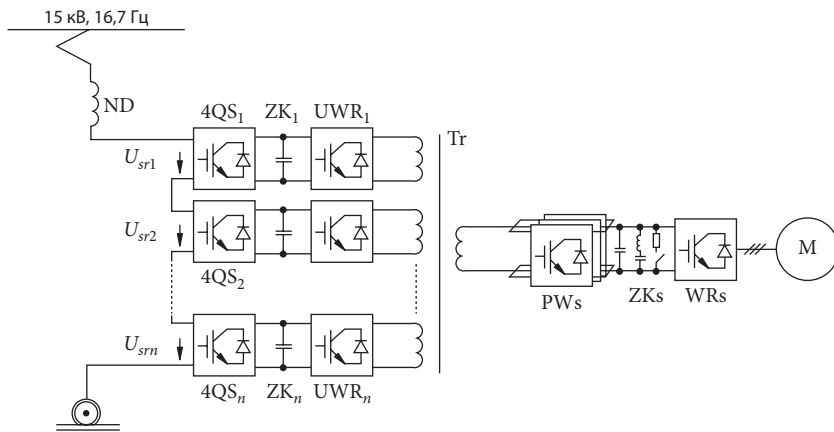


Рис. 2. Принципиальная схема многомодульного преобразователя с трансформатором повышенной частоты:

$U_{sr1} - U_{srn}$ — напряжения на входах модулей высоковольтного каскада

форматора повышенной частоты Tr. Эта обмотка подключена к компонентам вторичной схемы, а именно к импульсному преобразователю PWs, который через промежуточное звено постоянного напряжения ZKs питает выходной инвертор WRs, подающий напряжение на тяговые двигатели М. Чтобы избежать затрат на дополнительные компоненты фильтров в первичных промежуточных звеньях постоянного напряжения, токи гармоника 33,4 Гц подавляют на вторичной стороне с помощью общей поглощающей цепочки, включенной параллельно батарее конденсаторов вторичного промежуточного звена. Эта цепочка образована последовательно соединенными индуктивностью и емкостью.

Система управления и регулирования разделена на две зоны (рис. 3). Входные каскады регулируют напряжение промежуточных звеньев первичной схемы. При этом сигналы входного тока I_{netz} и входного напряжения U_{netz} подаются на вход широтно-импульсного регулятора А. На их основе формируются сигналы для регулирования амплитуды и фазы входного напряжения U_{sr} на входе первичного каскада.

Последующее регулирование промежуточного звена повышенной частоты с помощью блока В, с одной стороны, определяет величину напряжения вторичного промежуточного звена U_{ZK} , устанавливаемую за счет варьирования потоков мощности через трансформатор Tr, а с другой — симметрирует нагрузку модулей входного каскада. При этом с выходных инверторов первичной стороны снимается напряжение частотой 400 Гц. Поток мощности, стабилизирующий напряжение промежуточного звена вторичной (нагрузочной) цепи, определяется схемой регулирования вторичного преобразователя (блок С).

Высокая эксплуатационная готовность такого преобразователя может быть достигнута в том

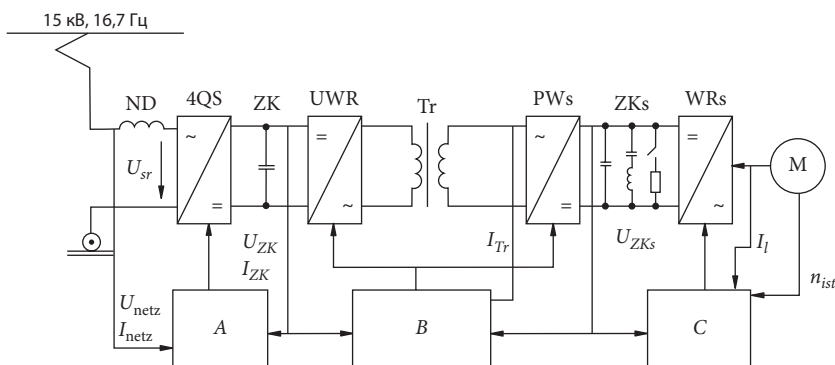


Рис. 3. Схема регулирования преобразователя:

U_{ZK} — напряжение промежуточного звена в модулях высоковольтного каскада; I_{Tr} — ток повышенной частоты, протекающий через вторичную обмотку трансформатора; I_I — ток нагрузки на выходе преобразователя; М — тяговый двигатель; n_{ist} — реальная величина частоты вращения двигателя как один из задаваемых параметров регулирования. Обозначение остальных позиций, как на рис. 2

случае, если при определении его параметров будет предусмотрена возможность безболезненного отключения в процессе эксплуатации неисправных модулей. Это может выполняться с помощью выключателей с рабочим напряжением 2 кВ, которые переключают накоротко входные клеммы неисправного модуля и отключают его от обмотки трансформатора. На базе силовых полупроводниковых вентилях с запирающим напряжением 3,3 кВ можно собрать преобразователь с 16 каскадными модулями на первичной стороне, содержащими 128 транзисторов IGBT при условии, что в случае возникновения неисправности будет обеспечена возможность отключить два модуля без ущерба для работы схемы.

Демонстрационный преобразователь мощностью 1 МВт

При разработке компонентов опытного преобразователя ориентировались на полупроводниковые вентиля и материалы для изготовления трансформаторов, соответствовавшие уровню 1996 г., т. е. того периода, когда начались первые разработки.

Разработчикам удалось создать компактный преобразователь новой концепции. Все каскадные мо-

дулы разместили в двух стеклопластиковых контейнерах (по восемь в каждом), которые расположили с обеих сторон трансформатора.

Технические данные трансформатора в схеме демонстрационного преобразователя

Номинальная мощность, МВ-А	1,1
Рабочая частота, Гц	400
КПД при номинальной нагрузке	0,975
Активная масса, кг	160
Общая масса, кг	450
Напряжение короткого замыкания, %	30
Коэффициент трансформации	16:1

Активная масса 160 кг составляет всего десятую часть массы классического трансформатора такой же мощности с рабочей частотой 16,7 Гц.

Высоковольтные вводы первичной стороны и выходные зажимы вторичной разместили на передней панели общего корпуса преобразователя, имеющего стальной каркас с алюминиевой листовой обшивкой. В задней части корпуса размещены масляные насосы и теплообменник, предназначенный для трех отдельных контуров, которые охлаждают трансформатор и два контейнера с каскадными модулями. Преобразователь вторичной стороны, входной сетевой дроссель и поглощающая цепочка не были интегрированы в общий корпус демонстрационной установки.

Кривые тока и напряжения первичной стороны представлены на рис. 4. Кривая входного напряже-

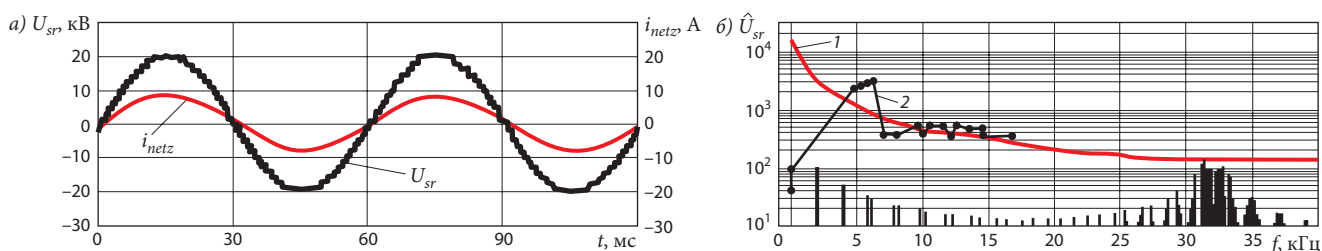


Рис. 4. Электрические характеристики входного каскада:

a — кривые входных значений тока и напряжения; *б* — спектр высших гармоник; U_{sr} — входное напряжение; i_{netz} — ток в контактной сети; t — время; \hat{U}_{sr} — амплитудное значение гармоник; f — частота; 1 — огибающая для режима синхронной тактовой частоты; 2 — предельная кривая для индуктивности рассеяния 56 мГн

ния высоковольтного каскада представляет собой достаточно правильную синусоиду, образованную ступенчатой линией (см. рис. 4, *a*). Наличие ступеней обусловлено тем, что управление модулями каскада осуществляется со сдвигом во времени. Высшие гармоники спектра, который включает частоту 32 кГц, имеющую наибольший уровень, в значительной степени подавляются (рис. 4, *б*). В результате коэффициент искажения кривой напряжения не превышает 3%. Благодаря этому для снижения воздействия преобразователя на сеть до приемлемого уровня достаточно в сетевом фильтре иметь дроссель с индуктивностью 55 мГн. Это значит, что общая масса и объем фильтра будут значительно меньше, чем пассивного фильтра в схеме с традиционным трансформатором.

Общая масса демонстрационного преобразователя составила 1,25 т, т. е. более чем вдвое меньше, чем в традиционной схеме (2,6 т) при той же мощности. Как видно из рис. 5, КПД нового преобразователя равен 93,5%, однако здесь не учитывались потери в преобразователе вторичной стороны и сетевом фильтре.

Развитие концепции преобразователей на базе резонансных схем

Следующий этап развития силовых электронных систем, начавшийся в конце 2001 г., связан с появлением на рынке биполярных транзисторов IGBT с запирающим напряжением 6,5 кВ. Силовые электронные приборы с такими характеристиками позволили строить преобразователи рассматриваемой концепции всего лишь с 8 модулями в первичном каскаде вместо 16. Это способствовало упрощению схемы, однако в модулях, используемых на вторичной стороне, т. е. работающих на повышенной частоте, увеличилась термическая нагрузка полупроводниковых вентиляей и построенных на них модулей. Для снижения этой нагрузки потребовались дополнительные схемные мероприятия, снижающие коммутационные потери.

Суть этих мероприятий заключалась в использовании резонансных явлений в схеме с силовым трансформатором, имеющим ферритовый сердечник и работающим на частоте в несколько килогерц. В такой схеме (рис. 6) нагрузка на полупроводниковые вентиляей снижа-

ется за счет того, что их коммутация происходит в момент, когда ток, протекающий через вентиль, снижается до нуля. Для этого в каждом модуле последовательно с секцией первичной обмотки трансформатора включается конденсатор C_{rz} , через который протекает ток нагрузки. Этот конденсатор образует с индуктивностью рассеяния обмотки L_{σ} колебательный контур.

Технические требования к такой схеме должны предусматривать отсутствие уравнивающих токов между модулями первичного высоковольтного каскада, поскольку эти токи препятствовали бы коммутации вентиляей в момент прохождения кривой тока через ноль. Уравнивающие токи могут возникнуть при наличии асимметрии между выходными импедансами модулей каскада, а также из-за разности мгновенных значений напряжения промежуточных звеньев в модулях высоковольтного каскада. Связанные с уравнивающими токами дополнительные потери суммируются с уже существующими неизбежными потерями, возникающими и при бестоковой коммутации вентиляей. В результате из-за высокой тактовой частоты термическая нагрузка на IGBT выходных звеньев высоковольтного каскада может превысить допустимые значения и даже вызвать разрушение этих вентиляей. Устойчивая работа резонансного преобразователя должна обеспечиваться за счет жесткого симметрирования цепей, работающих на переменном токе.

Выходной импеданс инверторов высоковольтного каскада определя-

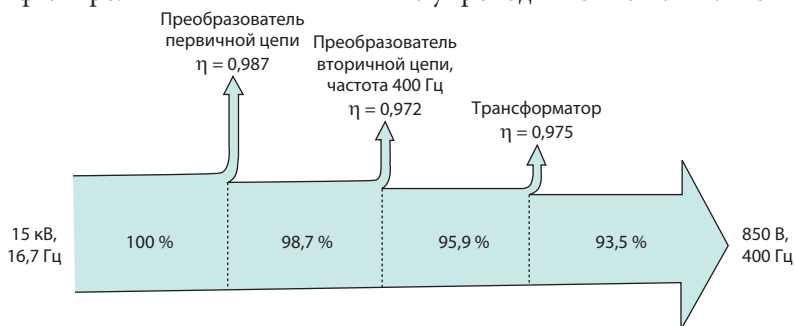


Рис. 5. Потери в демонстрационном преобразователе

ется электрическими и магнитными характеристиками соответственно резонансного конденсатора и индуктивности рассеяния секции первичной обмотки трансформатора. Таким образом, малые величины допусков для этих компонентов, а также симметричная схема трансформатора являются обязательным условием для обеспечения низкой статической асимметрии.

Для того чтобы система не была чувствительной к разнице напряжений в промежуточных звеньях модулей высоковольтного каскада, необходимо обеспечить максимально возможное действующее значение импеданса развязки между модулями. Это достигается, с одной стороны, выбором соотношения между резонансной частотой f_{rz} и частотой переключения полупроводниковых вентилей f_{tr} , с другой — величинами реактивного сопротивления конденсатора и индуктивности рассеяния. Если характеристики трансформатора выбраны такими, что условие $f_{tr} < f_{rz}$ достигается при малой емкости конденсатора и большой индуктивности рассеяния, импеданс развязки можно увеличивать до тех пор, пока уравнивающие токи не снизятся до величин, безопасных для полупроводниковых вентилей (рис. 7). При этом должно быть обеспечено разумное соотношение между необходимой величиной импеданса развязки и определяемым ею максимальным относительным напряжением короткого замыкания. Остаточная асимметрия, которая может возникать в результате старения компонентов схемы в эксплуатации, должна компенсироваться системой активного регулирования напряжения промежуточных звеньев в модулях высоковольтного каскада.

Используя рассмотренный принцип, компания SMA Technologie, Ништеталь, при участии Alstom LVH, Зальциттер, финансировавшей проект (обе Германия), разработала опытный образец преобразователя с продолжительной мощностью 1,5 МВт и рабочей частотой

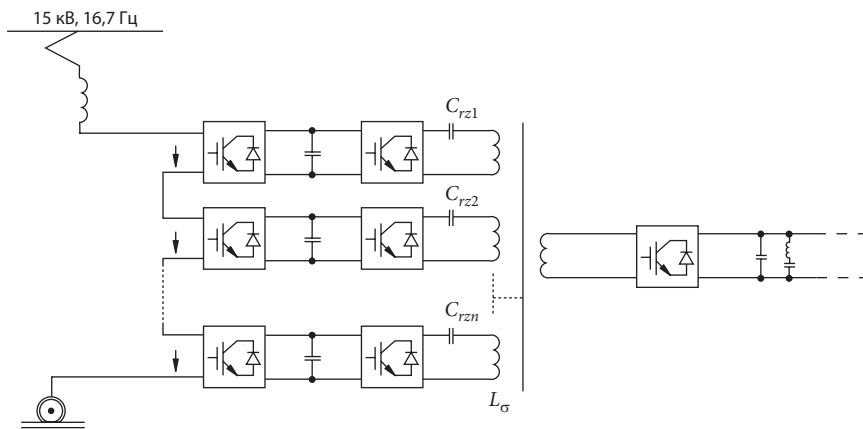


Рис. 6. Принципиальная схема преобразователя пониженной массы, в котором используются явления резонанса:

$C_{rz1} - C_{rzn}$ — резонансные конденсаторы модулей высоковольтного каскада

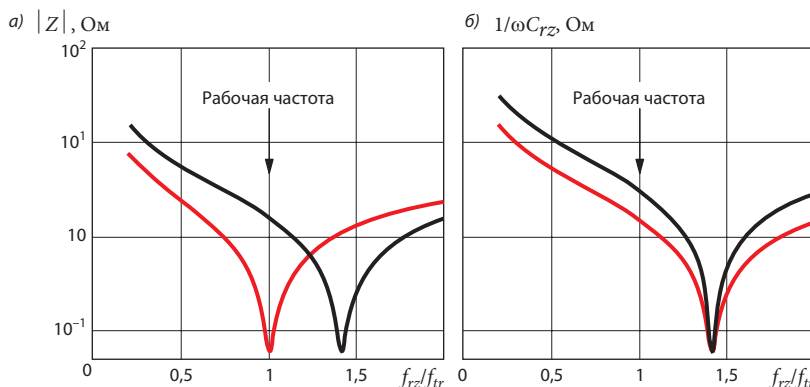


Рис. 7. Импеданс развязки между модулями высоковольтного каскада:

а — зависимость импеданса от величины соотношения f_{rz}/f_{tr} ; б — зависимость реактивного сопротивления конденсатора $1/\omega C_{rz}$ от соотношения f_{rz}/f_{tr} ; |Z| — импеданс развязки

4,5 кГц, во многом уже пригодный для промышленного серийного производства. Результаты его испытаний, проводившихся осенью 2003 и в начале 2004 г., опубликованы в печати.

Основные технические данные преобразователя мощностью 1,5 МВт

Номинальное напряжение в контактной сети, кВ	15
Частота сетевого напряжения, Гц	16,7
Напряжение промежуточного звена вторичной цепи, В	1650
Номинальная мощность, МВт	1,5
Общая масса, кг	3600
Рабочая частота трансформатора, Гц ..	4500
Число модулей в высоковольтном каскаде	8
Число транзисторов IGBT (6,5 кВ)	48

Сравнивая эту разработку с преобразователем на базе обычного трансформатора, следует учитывать, что общая масса 3,6 т включает в себя все компоненты, в том чис-

ле теплообменник, сетевой фильтр, преобразователь вторичной схемы и элементы поглощающей цепочки.

Выводы и перспективы

Преобразование однофазного переменного тока частотой 16,7 Гц в тяговую энергию частотой 4,5 кГц позволяет вдвое снизить массу преобразователя и значительно повысить его КПД. Исследования показали, что почти такой же эффект ожидается в сети с частотой 25 Гц, используемой на достаточно протяженной линии Восточного побережья США. Дальнейшие исследования и разработки покажут, какие перспективы в этом аспекте имеют тяговые системы с рабочими частотами 50 и 60 Гц.

М. Victor. Elektrische Bahnen, 2005, № 11, S. 505 – 510.