

**Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта**

***Evolution Directions and Electric Drive System Optimization for Hybrid and Electric City Vehicles***

к.т.н. АЛЯМКИН Д.И., к.т.н. АНУЧИН А.С., д.т.н. КОЗАЧЕНКО В.Ф., к.т.н. ЛАШКЕВИЧ М.М., д.т.н. ОСТРИРОВ В.Н.

Dmitriy Alyamkin, Alecksey Anuchin, Vladimir Kozachenko, Maxim Lashkevich, Vadim Ostrirov

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

*В статье рассмотрено текущее состояние дел в области отечественного гибридного транспорта. Показаны возможные пути улучшения показателей гибридных трансмиссий за счет оптимизации тягового электропривода, числа колес, тягового генератора и объема суперконденсаторных накопителей, создания новых типов аккумуляторных батарей и полностью электрического транспорта с зарядкой на остановках и резервным источником питания в виде двигателя внутреннего сгорания ограниченной мощности. Рассмотрены особенности оптимизации по типовым циклам и показана необходимость рассмотрения реальных циклов работы трансмиссии для задач оптимизации.*

This paper considers the current state in the field of Russian hybrid vehicle development and production. The possible ways of the hybrid powertrain optimization are shown including: traction drive and the number of driving wheels optimization, generator type optimization, variation of the super-capacitor size and use of the novel types of batteries. The advantages of fully electrical buses with charging on the bus stops with the auxiliary internal combustion engine as an emergency energy source are shown. The features of the optimization on typical driving cycles are considered and the advantages of the real driving cycle for optimization are given.

***Ключевые слова:** гибридный и электрический транспорт, оптимизация структуры электротрансмиссии, накопитель энергии, гибридная трансмиссия.*

***Key words:** hybrid and electric vehicles, powertrain structure optimization, energy storage, hybrid powertrain.*

## **Введение**

Одним из направлений, которыми активно занимаются научные коллективы кафедры автоматизированного электропривода и малые инновационные предприятия, созданные сотрудниками кафедры, является гибридный транспорт. Первым проектом, выполненным в этом направлении, стала НИР «Крымск», где совместно с кафедрой ЭКАО НИУ «МЭИ» была разработана и испытана электромеханическая часть гибридной трансмиссии 8-колесного транспортного средства [1]. Достаточно подробно алгоритмы работы трансмиссии описаны в [2] и [3].

Если за рубежом гибридный и полностью электрический автономный транспорт уже активно отвоевывает рынок у традиционных решений [4, 5], то в России успешных проектов пока относительно немного. Различные модернизации стандартных автобусов не пошли в серию [6], а амбициозный проект с Ё-мобилем закрылся в апреле 2014 года [7]. Неудачи отечественных разработчиков объясняются несколькими факторами.

Во-первых, модернизация по частям дает не очень большое преимущество. Сейчас лидеры рынка уже имеют хорошие решения и занимаются их оптимизацией [4]. Чтобы конкурировать с ними, необходимо полная переработка кузова, подвески, идеологии трансмиссии. Во-вторых, отечественные решения часто содержат спорные решения в самой идеологии трансмиссии. Например, в автобусе ЛиАЗ-5292 с гибридной энергоустановкой [6] и в Ё-мобиле [8] суперконденсаторный накопитель подключен к звену постоянного тока без промежуточного силового преобразователя. Данное решение нельзя считать оптимальным для асинхронного электропривода и оно совершенно не подходит для электропривода с синхронной машиной с постоянными магнитами. Рассмотрим почему.

К началу разгона автомобиля необходимо иметь полностью заряженный суперконденсатор. В процессе разгона он будет разряжаться и, снизив свое напряжение в два раза, отдаст  $\frac{3}{4}$  начальной энергии. В Ё-мобиле установлены тяговые двигатели с постоянными магнитами, которым для работы на высоких скоростях нужно большое напряжение инвертора, но подключенный к нему суперконденсатор наполовину пуст. Аналогичная ситуация наблюдается и с автобусом ЛиАЗ-5292, однако здесь ситуация значительно лучше из-за возможности регулирования потока асинхронного двигателя.

Предположим, что за счет работы ДВС и генератора мы все-таки зарядили суперконденсатор и звено постоянного тока инверторов и разогнались до максимальной скорости в 130 км/ч. Хотим затормозить, но суперконденсатор полностью заряжен и энергию приходится рассеивать в механических тормозах. Опять с суперконденсатором что-то не так. Никак не получается его использовать, а проблема исключительно в структуре силового канала — в ней отсутствует жизненно необходимый преобразователь для обеспечения правильной работы суперконденсаторного накопителя.

Третий фактор чисто экономический. Любая разработка в данной области, пусть и направленная на ликвидацию отставания от западных коллег (что значительно проще), — это длинные инвестиции со сроком окупаемости не менее пяти лет. При этом необходимо вложить относительно большие средства, пусть и на порядки меньшие, чем вкладывают передовые в этой области компании (догонять проще).

Четвертая проблема в том, что последние 25 лет профильные институты существовали прошлыми достижениями и не развивали гибридную составляющую.

В настоящее время за рубежом уже активно производятся гибридные транспортные средства (автобусы), построенные по схеме последовательного гибрида. Представленная на рис. 1 схема является типовой и с минимальными вариациями используется многими производителями [2, 4].

Основными параметрами для оптимизации в этой схеме являются:

- количество ведущих колес и тяговых приводов;
- тип тяговых электроприводов и генератора;
- мощность силовых преобразователей;
- размер супер-конденсаторного накопителя;
- объем и тип аккумуляторных элементов.

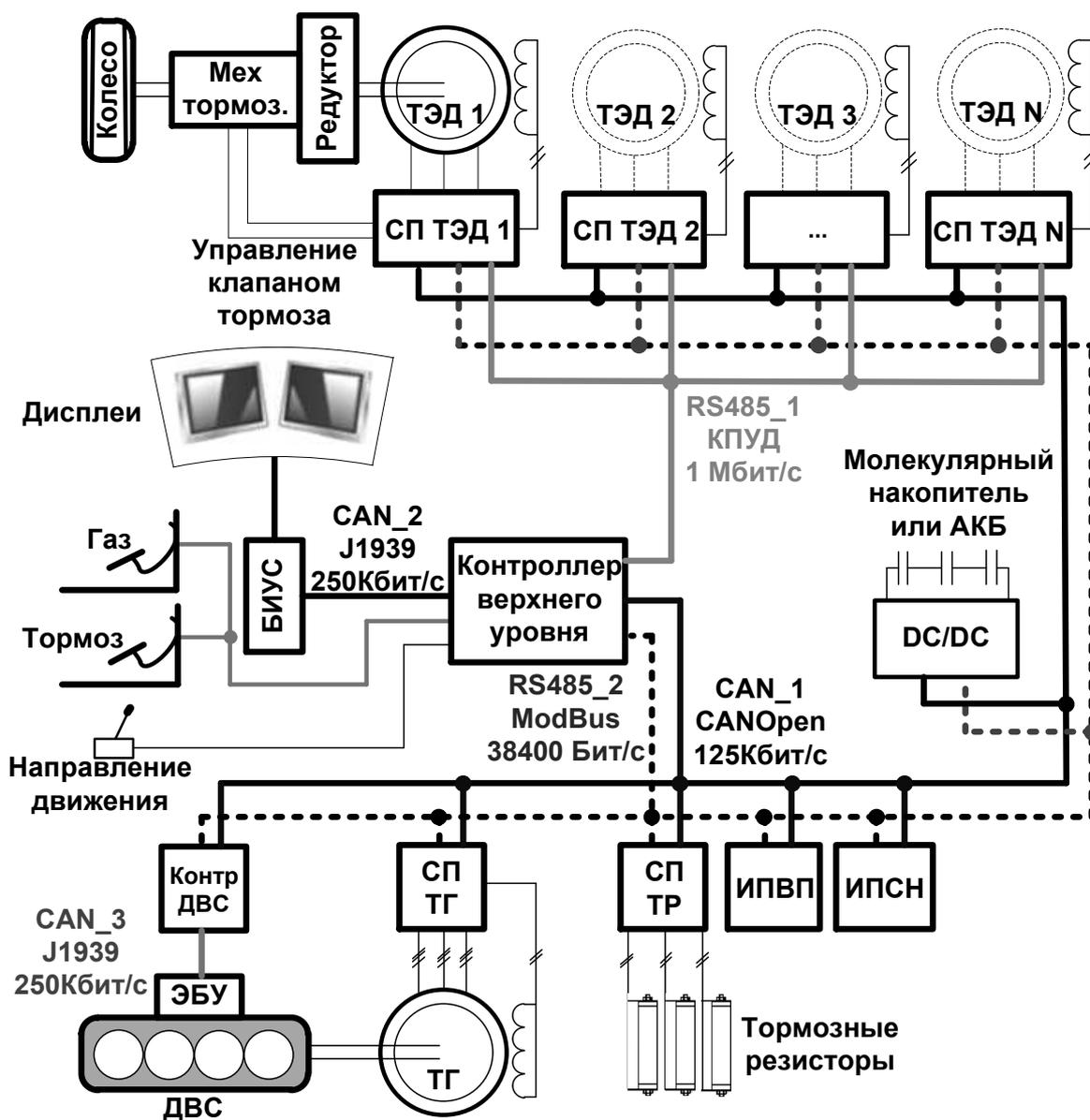


Рис. 1. Типовая схема последовательного гибрида

## **Оптимизация в области тягового электропривода и генератора**

Производимые сейчас городские автобусы фирмы Siemens имеют два ведущих задних колеса с индивидуальным асинхронным приводом на каждом. Генератор выполнен в виде синхронной машины с постоянными магнитами [4]. Такое решение оптимально с точки зрения реализации антиблокировочных и противобуксовочных систем, так как позволяет сделать их чисто электрическими, экономя ресурс механических тормозов. Однако срабатывание систем помощи водителю в обычных автобусах происходит крайне редко, и экономический анализ показал, что выгоднее вернуться назад и сделать один тяговый двигатель с дифференциалом на оба колеса, а системы помощи водителю реализовать с использованием механических систем. Схема с двумя независимыми электроприводами считалась более надежной, но требовала использования электродвигателя с регулируемым возбуждением, чтобы в случае неисправности допускать буксировку или перемещение на одном рабочем двигателе. При переходе к решению с одним двигателем и дифференциалом появилась возможность использовать в качестве тяговой более энергоэффективную синхронную машину с постоянными магнитами. Она допускает двукратное ослабление поля, а возможные проблемы с аварийными отключениями на высоких скоростях решаются специальными цепями защит и механическим расцеплением с дифференциалом и ведущими колесами.

Применение синхронной машины с постоянными магнитами в качестве генератора оправдано, если оптимизация энергетических параметров трансмиссии достигла того уровня, когда ДВС выводится на фиксированные значения скорости и нагрузки и для типового цикла перемещения автобуса все девиации тяги компенсируются запасом энергии суперконденсаторов и аккумуляторов. Если эти условия не выполнимы на практике, то может быть целесообразно использовать в качестве генератора машину с регулируемым возбуждением, чтобы иметь возможность регулировать скорость ДВС при изменении нагрузки.

Оптимизация мощности силовых преобразователей производится с учетом особенностей и возможностей тяговых электроприводов. Так, их мощность не должна быть равна мощности ДВС в аналогичном транспортном средстве. Во-первых, тяговый электропривод может работать с кратковременной перегрузкой на разгоне, так как это относительно небольшое время по отношению к общей длине цикла. Во-вторых, характеристика ДВС с коробкой передач очень строго соответствует режиму постоянства мощности, в то время как электродвигатели, спроектированные под максимальную мощность при максимальной скорости (в режиме ослабления поля), имеют значительный запас по мощности в районе средних скоростей. Например, характеристика тягового двигателя с постоянными магнитами в самом начале обеспечивает момент, аналогичный работе традиционной механической трансмиссии на, приблизительно, второй передаче, однако на этой «передаче» он может работать вплоть до 60 км/ч и немного выше без снижения момента, что покрывает диапазон городских скоростей.

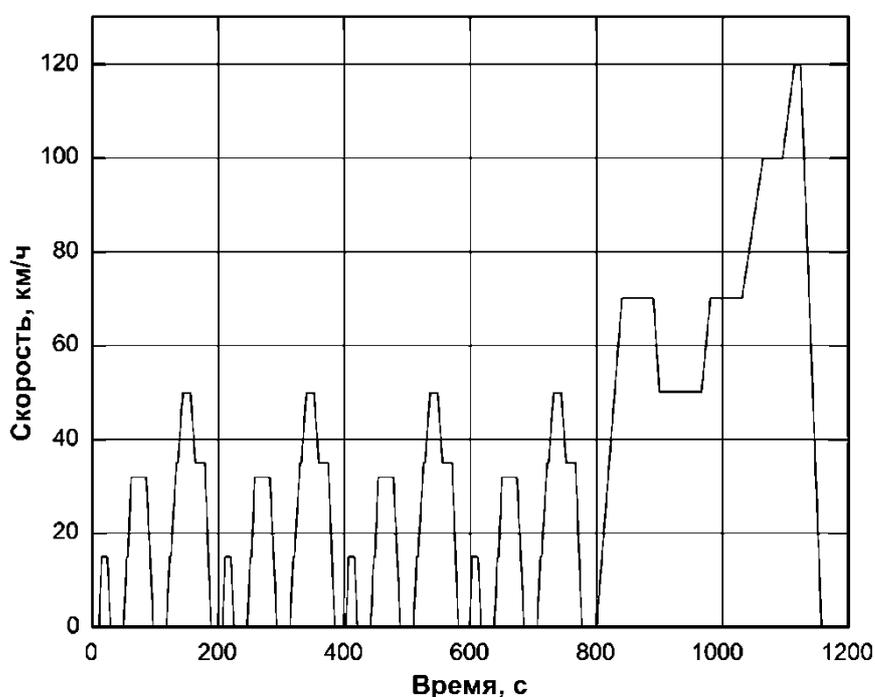
### **Оптимизация в области накопителей энергии**

Наибольший простор для оптимизации представляют накопители энергии. Их можно разделить на суперконденсаторы и аккумуляторы, которые различаются, прежде всего, емкостью, рабочими токами заряда/разряда и числом циклов. Как минимум, емкость суперконденсатора должна соответствовать возможному запасу кинетической энергии транспортного средства, чтобы иметь возможность зарядить накопитель при торможении и вернуть энергию при последующем разгоне. Дальнейшее увеличение объема накопителя должно производиться исходя из цикла использования транспортных средств, однако может оказаться, что масса транспортного средства увеличивается настолько, что это приводит к снижению энергоэффективности перевозки.

Сегодня в Европе принят стандартный цикл для испытаний трансмиссий по их экономичности (рис. 2). Он разбит на две части: до 780 секунд четыре раза повторяется условно городской цикл, а затем следует загородный однократный цикл [12]. Очевидно,

что он один не может быть использован для обоснования применения тех или иных технических решений и, например, для автобусов емкость суперконденсатора лучше выбирать исходя из их маршрута с учетом изменения нагрузки и дорожной ситуации от времени суток и дня недели.

В идеале емкости суперконденсатора должно хватать для питания автобуса на цикле от остановки до остановки. Тогда мощность ДВС и генератора может быть выбрана по средней мощности за цикл. В этом случае она будет существенно ниже, чем у традиционной трансмиссии, так как все пики будут скомпенсированы суперконденсаторным накопителем.



**Рис. 2.** Типовой цикл испытаний городского транспорта

Интересно, что значительное влияние на мощность ДВС и генератора в этом случае оказывает продолжительность остановок в цикле. За рубежом с целью сокращения простоя транспорта на остановках стали выпускать автобусы с низким полом. Россия пошла своим путем и в Москве, где весь наземный общественный транспорт оборудован турникетами, посадка и высадка занимает значительно больше времени. Так, посадка пассажиров на станциях рядом с метро длится от 2 до 5 минут. Получается, что от организации процедуры высадки и посадки должна зависеть и емкость накопителя, и мощность ДВС.

В последнее время появилась возможность решать оптимизационные задачи с применением симуляторов. Так, в Технологическом университете Лаппеенранты по заказу компании Visedo [9] был спроектирован симулятор рабочих машин, который позволяет отрабатывать типовые циклы работы, например, погрузчика, который должен погрузить камни в самосвал. Управление и работа на погрузчике приближена к реальности с применением проекционного оборудования для отображения трехмерного виртуального пространства, активной подвески кабины водителя с частичной передачей ускорений и вибраций при наезде на препятствия. Аналогичные решения для городского наземного транспорта помогут проводить более точную оптимизацию всех элементов системы.

Использование аккумуляторов для приема энергии торможения ограничивается максимальным током их заряда. Пожалуй, только в автомобилях Tesla, имеющих аккумулятор большой емкости, удается достаточно полно использовать рекуперацию при торможении. Определенный прорыв в области аккумуляторов для транспортных средств намечился с изобретением литий-титанатных аккумуляторов [11]. Они сохраняют не менее 80% ёмкости при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  и могут заряжаться до 90% за 10 минут, однако пока они дороги и имеют плотность энергии всего 48 Вт·ч/кг против 150÷180 Вт·ч/кг у литий-ионных аккумуляторов.

### **Зарядка гибридного транспорта и автономные транспортные средства**

Развитие технологий аккумуляторов и суперконденсаторов приводит к изменению роли ДВС в гибридном транспорте. При увеличении ёмкости накопителя он из основного источника энергии может превращаться в аварийный/запасной источник. Так, трансмиссия БТР (НИР «Крымск») преодолевает на одном заряде суперконденсаторов около 500 метров [1, 2]. Для автобусов это расстояние необходимо увеличить до 1 км с учетом городского рельефа, стартстопного режима в пробках и среднего расстояния между остановками около 700 метров. Для такого автобуса заряд накопителей можно осуществлять

на остановках в процессе высадки и посадки пассажиров. ДВС может пригодиться лишь тогда, когда накопитель по каким-либо причинам разрядился до прибытия на остановку.

Для заряда накопителей можно применить один из двух способов: контактную [12] и бесконтактную зарядку. Контактная зарядка имеет недостатки, связанные с необходимостью достаточно точного позиционирования автобуса на остановке. Кроме того, проблемы могут быть вызваны неблагоприятными погодными условиями (обледенение, снег).

Бесконтактная зарядка имеет преимущества с точки зрения удобства, но ее КПД существенно ниже. Сейчас такие зарядные станции и приемники энергии на стороне транспортных средств активно разрабатываются европейскими компаниями. И хотя излучения, производимые данными устройствами, вписываются в стандарты и «безопасны» для человека, необходимо проводить дальнейшие исследования по влиянию беспроводного способа передачи энергии на здоровье людей не только сейчас, но и в далекой перспективе, на несколько поколений вперед [13, 14].

### **Заключение**

Сейчас, анализируя опыт внедрения гибридного транспорта за рубежом, можно с относительно небольшими затратами вывести на рынок конкурентно способный общественный городской гибридный транспорт отечественного производства. Надо понимать, что современные решения в этой области вбирают в себя огромное число технологий — двигатели внутреннего сгорания, подвеска, гидравлика, силовая электроника, микроконтроллерная техника, программное обеспечение, сети реального времени и многое другое, и дают импульс к развитию данных направлений внутри страны, что важно с точки зрения импортозамещения и экономической независимости.

В разработанных отечественных решениях, таких как НИР «Крымск», достигнута топливная экономичность до 50% по сравнению с механической трансмиссией, разработаны и выверены алгоритмы взаимодействия отдельных устройств гибридной трансмиссии и получен диапазон регулирования и тяговые характеристики, сравнимые с характе-

ристиками механической трансмиссии и даже превосходящие их. Оптимизация комплектного электропривода для конкретных условий эксплуатации даст еще больший эффект.

### **Библиографический список**

1. [http://www.rosinform.ru/2013/07/17/konstruktory-vpk-sozdali-shassi-krymsk-s-gibridnoyenergoustanovkoj-dlya-perspektivnogo-bronettransportera\\_01/](http://www.rosinform.ru/2013/07/17/konstruktory-vpk-sozdali-shassi-krymsk-s-gibridnoyenergoustanovkoj-dlya-perspektivnogo-bronettransportera_01/)
2. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М. Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением // Электротехника, изд. Знак, 2014, № 2, С. 54-60.
3. Лашкевич М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями // Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Москва, 2013. 55 с.
4. Helsper M., Rüger N. Requirements of hybrid and electric buses – a huge challenge for power electronics (Siemens AG) // European Conference on Power Electronics and Applications. 2014.
5. Tesla Motors. (2012, Sept. 25). Tesla Model S: Motor Trend's 2013 Car of the Year. [Online]. Available: [www.teslamotors.com](http://www.teslamotors.com)
6. Флоренцев С.Н., Макаров Л.Н., Менухов В. Экономичный экологичный городской гибридный автобус // Электронные компоненты. 2008. № 12. С. 24-39.
7. Прохоров продал государству проект Ё-мобиля, цена сделки - €1, РБК, <http://top.rbc.ru/economics/07/04/2014/916047.shtml>
8. Пробуем "начинку" Ё-мобиля на белорусском полигоне, <http://auto.vesti.ru/doc.html?id=484494>
9. <http://www.visedo.com/en/news-archive/> Hybrid work machine presentation at EPE 2014 conference (26.08.2014)
10. Kouji Kariatsumari. Toshiba's New Secondary Battery Squashed ... No Explosion, Fire ... Why? // Nikkei Electronics (Dec 12, 2007).

11. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/updates/R101r3e.pdf>, E/ECE/324/Rev.2/Add.100/Rev.3 or E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.100/Rev.3 (12 April 2013).
12. Hamilton T. Next Stop: Ultracapacitor Buses, A U.S. - Chinese venture is out to prove the benefits of quick-charge buses // MIT Technology Review. October 19, 2009.
13. Avendaño C., Mata A., Sanchez Sarmiento C.A., Doncel G.F. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation // Fertility and Sterility. 2012. № 97 (1), PP. 39-45.
14. Олейникова Т.Ю., Мельник И.В. Воздействие электромагнитного поля на плодовитость насекомых (на примере drosophila melanogaster) // Вестник АГТУ . 2011. № 1.



Анучин Алексей Сергеевич, заведующий кафедрой Автоматизированного электропривода ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент.

+ 7-495-362-70-21

e-mail: [anuchinas@mpei.ru](mailto:anuchinas@mpei.ru)



Алямкин Дмитрий Иванович, к.т.н. Защитил кандидатскую диссертацию на кафедре АЭП НИУ «МЭИ» в 2012 году, сотрудник ООО «НПФ ВЕКТОР» (руководитель отдела разработки ПО).

aliamkin@rambler.ru



Козаченко Владимир Филиппович, д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», ООО «НПФ ВЕКТОР», ген. директор,

[KozachenkoVF@mpei.ru](mailto:KozachenkoVF@mpei.ru),

+7-495-362-71-51



Лашкевич Максим Михайлович, к.т.н. Защитил диссертацию на кафедре АЭП НИУ «МЭИ» в 2013 году, сотрудник ООО "НПФ Вектор" (ведущий инженер-программист).

e-mail: [maxsoftpage@yandex.ru](mailto:maxsoftpage@yandex.ru)



Остриров Вадим Николаевич, д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», ООО НПП «Цикл+», ген. директор

[ostrirovvn@cycle-p.ru](mailto:ostrirovvn@cycle-p.ru),

+7-495-362-79-96