

## АВТОТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ

УДК 62-85+629.4.028.01

DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2020.46.0.19

## КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ГИБРИДОВ

Бороденко Ю. Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

**Аннотация.** Определены предпосылки использования пневматической тяги на автомобиле. Приведен сравнительный анализ альтернативных композиций гибридной силовой установки с пневматическим приводом. Рассмотрены конструктивные особенности пневмотрансмиссии с рекуперативным торможением. Сформулированы рекомендации по синтезу пневматической системы разгон–торможение.

**Ключевые слова:** пневмопривод, пневмоагрегат, гибридная силовая установка, рекуперация энергии торможения, критерии оптимизации, трансмиссия, ездовой цикл.

**Введение**

Применение пневматического привода на автомобилях, эксплуатируемых в условиях городского цикла, обусловлено его высокими экологическими показателями и малыми затратами на энергоноситель в сравнении с традиционными ДВС. Вторым достоинством пневматической тяги является возможность получения максимального крутящего момента и КПД на минимальных оборотах (начало движения автомобиля). Кроме того, пневматические силовые агрегаты, равно как и электрические машины, обладают свойством обратимости, что позволяет использовать энергию рекуперативного торможения. Плюс к этому, пневмомобили сравнительно недорогие ввиду простоты конструкции пневматического двигателя.

В сравнении с электроприводом, пневматический привод не требует дорогостоящих аккумуляторных батарей большой массы.

Недостатками пневматического привода являются: малая энергоемкость сжатого воздуха (малый заправочный пробег), которая в сотни раз уступает бензину; низкий КПД (5...7%) на скоростных режимах; необходимость во внешнем теплообменнике, утечки давления в конструкции пневматической аппаратуры, требуется баллон значительных размеров для заправки воздухом [1]. Компромиссным решением для автомобильного транспорта является применение гибридных силовых установок (ГСУ). В этом отношении неоспоримый приоритет следует отдать электрическим гибридам.

Перечисленные аргументы позволяют сформулировать предпосылки применения пневмопривода на автомобиле – использование в составе ГСУ в качестве вспомогательного двигателя на режимах разгона, за счет рекуперированной энергии торможения.

**Анализ публикаций**

Рассмотрим основные направления создания пневматических гибридов, связанные с применением:

- воздушно-гибридных двигателей;
- конвертированных ДВС в качестве пневматических двигателей в составе ГСУ;
- пневматических двигателей общего назначения или оригинальных конструкций в составе ГСУ;
- гидравлических трансмиссий в составе пневматических ГСУ.

Воздушно-гибридные двигатели (ВГД) строятся на базе двухтактных ДВС с дополнительной системой газораспределения воздушного заряда. Различают ВГД с последовательной и параллельной реализацией тепловой мощности топлива и пневматической мощности давления воздуха. Так, например, в ВГД Guzzella используется последовательная технология Лино Гуццеллы (Швейцария). Подобный агрегат, снабженный пневматическим баллоном, позволяет реализовать дополнительные функции наддува воздуха и перезапуска двигателя для статуса ДВС, а также обеспечить рекуперативное торможение в статусах компрессора и пневмодвигателя [2]. В дальнейших разработках намерено предусмотреть еще и систему рекуперации тепла отработавших газов.

В [3] рассмотрен концепт ВГД с одновременной работой топливных и пневматических цилиндров, в котором наддув воздуха в топливные цилиндры осуществляется поршнем парного свободного (воздушного) цилиндра на фазе выпуска. Избыточное давление, в этом случае, можно аккумулировать в баллоне с последующим его использованием для привода от отдельного пневмодвигателя

или от воздушных цилиндров в статусе компрессора.

Композиции ГСУ могут сочетать различные силовые агрегаты и схемы передачи мощности на колеса. Так, в [4] рассмотрен вариант ГСУ, в которой ДВС в штатном режиме осуществляет привод колес автомобиля и дополнительно компрессора с пневматическим баллоном. Пневмопривод обеспечивается отдельным пневмодвигателем, построенным на базе двухтактного ДВС.

Чтобы быть убедительным в вопросе реальности применения пневмопривода на автомобиле, рассмотрим несколько примеров ГСУ автомобилей, представленных на

уровне экспериментальных образцов и промышленной продукции.

Электропневматические гибриды получили название PNEV (Pneumatic Hybrid Electric Vehicle). Силовой агрегат, построенный на базе четырехцилиндрового пневмодвигателя Гая Негре, устанавливается компанией MDI на автомобили серии Cat [5]. Композиция ГСУ включает обратимый пневматический агрегат 1, обратимую электрическую машину 2 и механическую трансмиссию 3 (рис. 1, а).

Фирма Energinе из Южной Кореи разработала автомобиль с электропневматическим приводом (рис. 1, б).

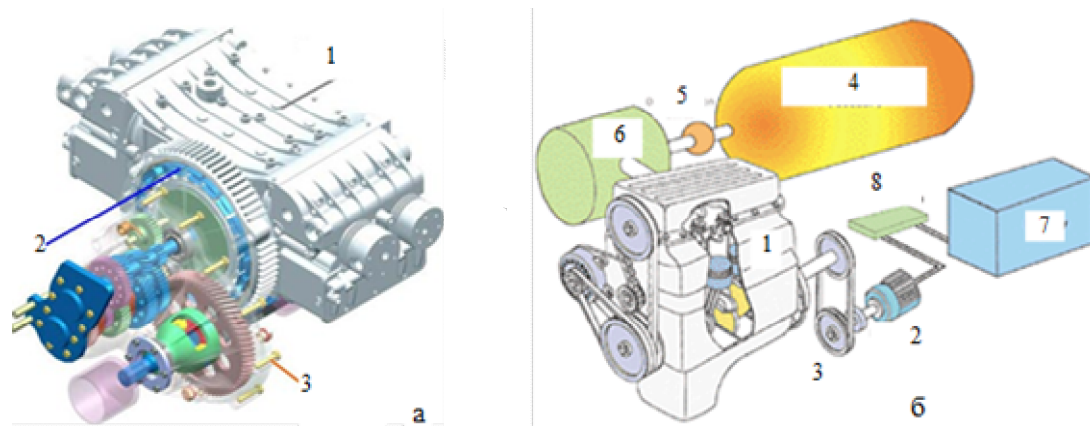


Рис. 1. Электропневматические приводы автомобилей: а – машин CAT's; б – фирмы Energinе

В этой машине два двигателя: пневматический (конвертированный ДВС) 1 и электрический 2. Пневматическая энергия в системах PNEV обеспечивается баллоном высокого давления 4 (300 бар), редуктором 5, ресивером 6 (10 бар). Для электрической тяги используется аккумуляторная батарея 7 с контроллером 8 [6]. При движении автомобиля с постоянной скоростью свыше 20 км/ч основным является электрический двигатель, а стартует, набирает скорость и преодолевает подъемы гибрид на пневматической тяге. Гибрид PNEV Energinе, только на пневматической тяге (100-литровый воздушный баллон), обеспечивает разгон и поддержку скорости до 120 км/ч в течение часа. В [1] упоминается концепт последовательной ГСУ с лопастным пневмодвигателем, где подкачка давления воздуха в пневмобаллон производится за счет картерной компрессии ДВС и тепловая энергия топлива дополнительно преобразуется в аккумулируемую энергию сжатого воздуха.

Наибольший интерес представляют ГСУ с гидравлической трансмиссией (технология

HNH – Hydraulic Hybrid Vehicle). В 2011 г. сотрудники Бухарестского института гидравлики и пневматики представили результаты моделирования динамики параллельного гибрида HNV с дизельным двигателем в режимах привода от ДВС, гидропривода, рекуперации торможения и совместного привода гибридной установки на уровне мехатронной структуры [7].

Отраслевые партнеры Американского агентства по охране окружающей среды EPA (Environmental Protection Agency) занимались вопросами выбора конфигурации трансмиссии для автомобиля с HNV-установкой, содержащей несколько обратимых гидравлических агрегатов, и привели результаты испытаний по топливно-экономическим и экологическим показателям альтернативных решений [8].

Компанией PSA Peugeot Citroen предложена технология Hybrid Air, по которой в паре с основным ДВС 1 через планетарную развязку 2 в трансмиссии привода задействован гидравлический обратимый агрегат 3 с бачком рабочей жидкости (рис. 2).

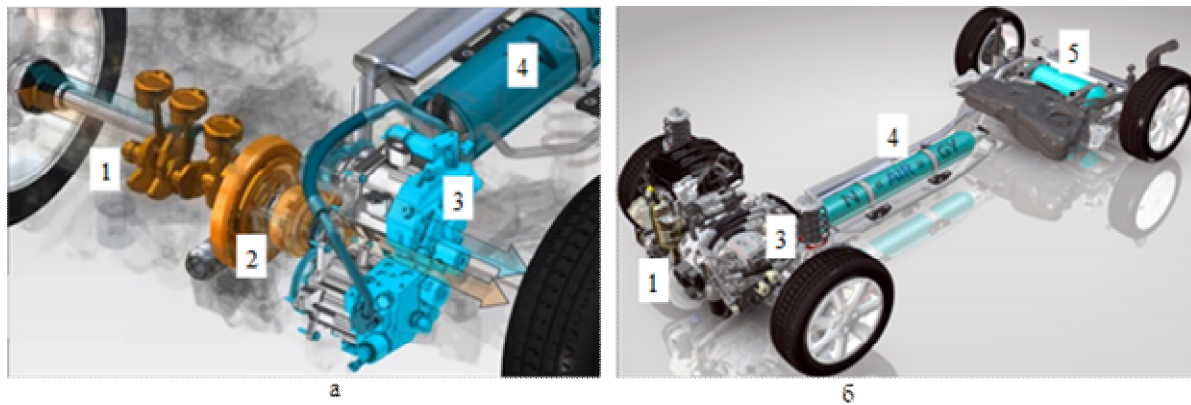


Рис. 2. Гибридная технология Hybrid Air: а – устройство силовой установки; а – компоновка силовых агрегатов на шасси

Гибридная установка получила промышленный выход на автомобилях Peugeot 208 Hybrid Air 2L и Citroen C3 Cactus Airflow 2L [9, 10]. Гибриды такого класса (полный заряжаемый) обеспечивает запас хода на пневматической тяге до десяти километров на скоростях городского ездового цикла. При этом вес агрегатов гидропневматической трансмиссии не превышает 100 кг, а экономия топлива достигает 45 %.

Приоритетным критерием оптимизации рассмотренных пневмогибридов является экономия топлива, а экологическая безопасность выходит на второй план. Если поменять акценты, то в условиях городского цикла конкуренцию полным пневмогибридам могут составить микрогибриды и умеренные гибриды с пневматической системой «разгон–торможение». С этих позиций, в [11] сформулированы задачи и намечены пути их решения для пневматической системы «разгон–торможение» по различным аспектам проблемы: энергетической автономности, конструктивной адаптивности, кибернетической полноте.

**Цель и постановка задачи**

Генеральная цель исследований состоит в синтезе ГСУ легкового автомобиля с основным ДВС и вспомогательным пневмодвигателем для эксплуатации в городском ездовом цикле на режимах движения разгон–торможение. На первом этапе исследований необходимо определить композицию ГСУ придерживаясь критериев минимизации расхода энергоносителей и затрат на конструктивную доработку базовой трансмиссии в ограниченном пространстве автомобиля. Для этого необходимо провести сравнительный анализ альтернативных технических реше-

ний и выработать рекомендации по синтезу проектируемой системы под заданные характеристики автомобиля и условия его эксплуатации.

При этом следует рассмотреть вопросы качественного характера, связанные с выбором композиции ГСУ с позиций: энергетической полноты и автономности; схемы передачи энергии на колеса; принципа построения пневмопривода.

**Альтернативные композиции пневматических ГСУ**

Под композицией ГСУ понимают качественный состав привода и схему передачи крутящего момента от источников мощности на колеса транспортного средства. В общем случае, силовая установка с пневмоприводом, кроме ДВС, может включать различные силовые агрегаты:

- пневматический агрегат (ПНА) в режимах мотора и компрессора;
- пневматический аккумулятор низкого давления (ПАК);
- пневматический баллон высокого давления (ПНБ);
- теплообменник (ТОБ);
- электрическую машину (ЭЛМ) в режимах двигателя и генератора;
- тяговую аккумуляторную батарею (ТАБ)

Энергетический обмен между перечисленными агрегатами ГСУ и колесами автомобиля «К» можно представить обобщенной структурой (рис. 3).

Мощность, распределяемая между силовыми агрегатами, имеет различную природу энергии, которая параметрируется температурой  $t^o$ , током  $I$ , давлением  $P$ .

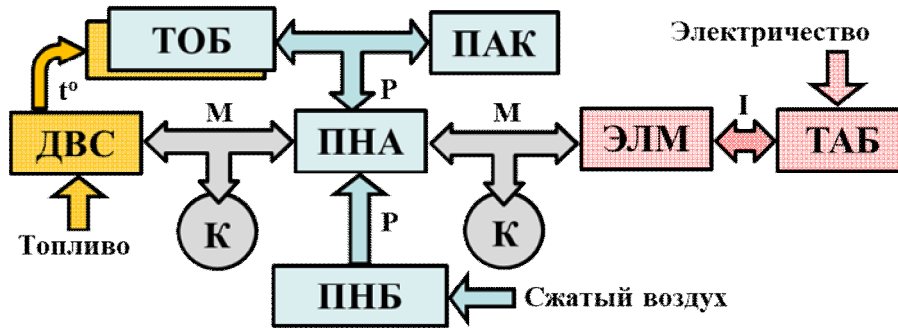


Рис. 3. Обобщенная структура энергетического обмена в ГСУ с пневмоагрегатом

Механическая мощность вращения, передаваемая при заданной частоте, определяется крутящим моментом  $M$ . Двухнаправленные стрелки на схеме указывают на возможность реализации систем рекуперации энергии. Механическая связь между силовыми агрегатами и колесами автомобиля осуществляется через трансмиссию. Таким образом, с позиций автономности движения, гибриды с пневмоприводом, по аналогии с электрическими гибридами, можно подразделить на заряжаемые, рекуперативные и комбинированные.

Согласно обобщенной структуре, можно построить различные композиции ГСУ с применением ПНА, где альтернативным двигателям отводится роль основного или вспомогательного силового агрегата. Степень использования двигателя обычно оценивают по количеству энергии, расходуемой в ездовом цикле. При этом рассматривают различные процентные показатели: мощность, развиваемую двигателем; ресурс пробега в заданном режиме; количество и стоимость энергоносителя, затраченного на базовом пробеге.

Таким образом, рациональность использования той или иной композиции ГСУ определяется условиями эксплуатации и режимами движения транспортного средства. Так, например, электропневматическая композиция, на первый взгляд, является нерациональной. Но если вспомнить, что в режиме трогания под нагрузкой электрический привод характеризуется значительными пусковыми токами (расходом электроэнергии), а пневматический, наоборот, – минимальным расходом давления, то для заданного режима такая композиция имеет право на обсуждение. При этом надо понимать, что заряжаемый электропривод выступает как основной, а рекуперативный пневматический – как вспомогательный.

Трехкомпонентная ГСУ также может рассматриваться как двухступенчатая пневматическая система пуска мощного ДВС, в которой производится предварительная компрессия давления в ПАК за счет энергии электропривода.

Что касается энергетической полноты, отметим следующее. Сжатый воздух, разряжаясь, снижает температуру своего состояния, а охлаждение газа в замкнутом пространстве приводит к снижению его давления. Чтобы сохранить удельную энергоемкость термодинамической системы (снизить потери на охлаждение) пневмопривода в ГСУ, используют побочную тепловую энергию ДВС. Проводником тепловой энергии ДВС может выступать либо жидкость системы охлаждения двигателя, либо отработавшие газы. Кроме того, как потенциальные источники тепла можно рассматривать охлаждающие системы агрегатов трансмиссии, электрических машин и тяговых аккумуляторных батарей. Таким образом, использование теплообменника ТОБ в системе пневмопривода позволяет повысить энергоресурс ГСУ в целом и снизить градиентные температурные нагрузки ее элементов. Следует отметить, что применение ТОБ оправданно для пневматических систем, работающих в расходном режиме под значительным давлением (от баллонов высокого давления), характерным для подзаряжаемых гибридов.

Выбор композиции пневматической ГСУ с позиций автономности опирается на баланс энергии пневмопривода под заданный ездовой цикл. При этом рассматривается вариация параметров силовых агрегатов пневмоустановки (уровень давления, объем аккумулятора, производительность пневмоагрегата), позволяющих, с одной стороны, поддерживать динамику движения автомобиля за счет энергии ДВС, с другой – преодолевать мо-

мент трогания и обеспечивать заданный цикл движения на энергии пневмопривода.

Согласно поставленной задаче, ограничимся рассмотрением вариантов ГСУ, в которых используется только энергия топлива ДВС в баке и сжатого воздуха без внешнего восполнения последней (пнеумогибрид с автономной зарядкой). В этом случае возможны три варианта использования пневматической системы: в чисто рекуперативном режиме; с пополнением давления от ДВС; комбинированный подход. С этих позиций, для пнеумогибридов с ДВС, именуемых ЕНРV (Engine Hybrid Pneumatic Vehicle), принято рассматривать три схемы передачи мощности от агрегатов силовой установки к колесам автомобиля.

В последовательной схеме ЕНРV нагрузкой ДВС выступает компрессор. При этом выбирается наиболее экономичный режим работы ДВС. Сжатый воздух от компрессора поступает в пневмоаккумулятор и далее через редуктор на пневмодвигатель и колеса автомобиля. При торможении компрессор приводится в действие от колес автомобиля, обеспечивая рекуперацию кинетической энергии. Преимуществом такой схемы является относительная простота управления силовой установкой, отсутствие специальных узлов трансмиссии, возможность использования ДВС малой мощности в экономических режимах. Недостаток такого варианта – малый КПД.

В параллельной схеме ЕНРV, ДВС и пневмодвигатель, работающий от баллонов высокого давления, связаны с ведущими колесами через трансмиссию. При рекуперативном торможении пневмодвигатель работает в режиме компрессора и обеспечивает подзарядку воздуха в пневмоаккумулятор. Такая конфигурация обеспечивает большой КПД. Для параллельной схемы ГСУ требуется усложнение трансмиссии и системы управления, более широкий диапазон необходимых рабочих режимов ДВС, необходимость заправки баллонов высокого давления от внешних компрессоров.

В комбинированной схеме ЕНРV повод ведущих колес может осуществляться от пневмоустановки, от ДВС или от вспомогательной установки и ДВС, включенных параллельно. Ключевым элементом гибридной силовой установки является распределитель мощности, обеспечивающий перераспределение потоков мощности между ходовой частью автомобиля, основным двигателем,

вспомогательным двигателем и контуром рекуперации энергии.

### Конструктивные особенности пневмотрансмиссии

Силовые установки для движения автомобиля на энергии сжатого воздуха по принципу построения могут представлять чисто пневматические или пневмогидравлические системы. Во втором случае как передаточное звено в системе используется гидравлический агрегат [10]. Такое решение, позволяет устранить потери энергии давления на утечки и паразитные объемы подводящих трубопроводов и тем самым повысить КПД привода. Если в силовой установке предполагается оперативное (кратковременное) использование энергии сжатого воздуха, как в системе «разгон–торможение», то указанным недостатком можно пожертвовать в счет упрощения конструкции и снижения веса привода.

В композиции гибрида ЕНРV с отдельными агрегатами пневмотрансмиссии, для привода компрессора от ДВС, можно использовать ременную передачу, а для передачи мощности от пневмодвигателя на привод колес – зубчатую. В этом случае для снижения потерь мощности ДВС на привод компрессора можно использовать механизм подключаемого шкива ременной передачи (как для вентилятора системы охлаждения) или шунтирующий электроклапан ЕСО (Electronically Controlled Orifice), применяемый для насосов гидроусилителя руля. Подключение пневмодвигателя в режиме разгона осуществляется через редуктор на ведомый вал трансмиссии.

Для реализации рекуперативного режима привод компрессора осуществляется от ведомого вала трансмиссии. Чтобы совместить режимы заряда пневмоаккумулятора в раздельной композиции, требуется усложнить механизм привода компрессора (предусмотреть вторую ступень подключения). Для увеличения производительности компрессора его вал предпочтительнее подключать к ведущему валу трансмиссии. Тогда коробка передач в обратном включении на первой передаче будет иметь максимальный коэффициент передачи оборотов от колес на вал компрессора. Однако при этом неизбежно возникают потери мощности в самой коробке передач. Для совмещенного механизма привода компрессора, наряду с отключаемыми шкивами ременных передач на базе блокирующих муфт, можно использовать фрикционные муфты и планетарный сумматор. Рас-

смотренная композиция системы характеризуется рассредоточенным размещением агрегатов, что не удовлетворяет основным критериям оптимизации пневматического привода.

Повысить компактность пневмопривода ЕНРV позволяет применение обратимого пневмоагрегата. В этом случае возникают вопросы, связанные с организацией совмещенного приводного механизма гибридной установки. Для автомобиля с передним приводом можно использовать механизм привода пневмоагрегата, аналогичный Citroen C3 (рис. 2).

При этом громоздкий оригинальный гидроаккумулятор с пневматическим подпором заменяется на обычный воздушный ресивер. Дополнительное пространство в гибриде с автономным зарядом воздуха освобождается за счет исключения из системы баллона высокого давления. Таким образом, предложенное решение позволяет снизить массогабаритные показатели и стоимость системы за счет ограничения резерва (расстояния, ускорения, продолжительности) разгона автомобиля на энергии воздуха.

### Выводы

Сформулированы предпосылки применения пневмопривода на автомобиле – использование в составе ГСУ в качестве вспомогательного двигателя в режимах разгона, за счет рекуперированной энергии торможения. Композиция пневматической ГСУ, с энергетических позиций, во многом определяется характеристикой заданного ездового цикла и схемой привода базового автомобиля. Для подзаряжаемых пневматических приводов целесообразно использовать побочное тепло от смежных силовых агрегатов ГСУ. Гибридная силовая установка с пневматической системой «разгон–торможение», согласно общим классификационным признакам, представляет умеренный (для последовательной схемы) или микрогибрид (для параллельной схемы) без внешней подзарядки, функционирующий поочередно в режимах пневматического привода и привода от ДВС. При построении пневматического гибрида, согласно поставленным задачам, не целесообразно использовать теплообменник и гидрорпневматическую систему привода.

Для обеспечения наилучших топливно-экономических и энергетических показателей ГСУ следует использовать структуру микрогибрида, функционирующего в чисто рекуперативном режиме. Чтобы повысить

компактность ГСУ с пневмоприводом следует использовать обратимые пневмоагрегаты. Рекуперативный режим системы «разгон–торможение» целесообразно использовать на участках городского ездового цикла, где наблюдаются частые остановки.

Наибольшая эффективность использования рекуперативного режима соответствует участкам маршрута, где потенциал точки (высота над уровнем моря) начала движения выше потенциала точки окончания движения (спуски преобладают над подъемами).

### Литература

1. Пневмопривод. Автомобили, работающие на сжатом воздухе. 2020. URL: <https://oborudow.ru/transmissiya/pnevmoпривод-автомобили-rabotayushchie-na-szhatom-vozdue-airpod/> (дата обращения 16.01.2020).
2. Hybrids Powered by Air. 2020. URL: <https://www.technologyreview.com/s/412001/> (дата обращения 16.02.2020).
3. Hybrid Opposite Piston Engine. 2020. URL: [http://www.hybrid-engine-hope.com/other\\_competitive\\_solutions](http://www.hybrid-engine-hope.com/other_competitive_solutions) (дата обращения 16.02.2020).
4. Design and Development of Pneumatic Hybrid Vehicle (PHV). 2020. URL: <http://www.riroij.com/open-access/> (дата обращения 16.0122020).
5. Воздушные автомобили. 2020. URL: <https://www.metodolog.ru/node/230> (дата обращения 16.01.2020).
6. Pneumatic Hybrid power leading the future. 2020. URL: <https://pneumaticservovalve.wordpress.com/2015/03/26/> (дата обращения 16.01.2020).
7. Mechatronic Systems for Kinetic Energy Recovery at the Braking of Motor Vehicles. 2020. URL: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-mechatronics/> (дата обращения 16.02.2020).
8. Hydraulic Hybrid Vehicle Layouts. 2020. URL: <https://archive.epa.gov/otaq/technology/web/html/prototype-vehicles.html> (дата обращения 16.02.2020).
9. Hybrid Air confirmed in new Peugeot engine range. 2020. URL: <https://www.autocar.co.uk/car-news/geneva-motor-show/> (дата обращения 16.01.2020).
10. Peugeot Citroen to introduce compressed air hybrid by 2016. 2020. URL: <https://newatlas.com/peugeot-citroen-hybrid-air-compressed-air/25961/> (дата обращения 16.01.2020).
11. Бороденко Ю.Н., Панасовский В.В. Аспекты построения пневматической системы разгон-торможение автомобиля. Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні» 15-18 жовтня 2019 р. – Х.: ХНАДУ, 2019. С. 321–322.

## References

1. Pnevmoпривод. Avtomobili, rabotayushchiye na szhatom vozdukke. [Pneumatic drive. Cars running on com-pressed air]. Retrived from: <https://oborudow.ru/transmissiya/pnevmoпривод-avtomobili-rabotayushchie-na-szhatom-vozduhe-airpod/> (accessed: 16.01.2020).
2. Hybrids Powered by Air. Retrived from: <https://www.technologyreview.com/s/412001/> (accessed: 16.02.2020).
3. Hybrid Opposite Piston Engine. Retrived from: [http://www.hybrid-engine-hope.com/other\\_competitive\\_solutions](http://www.hybrid-engine-hope.com/other_competitive_solutions) (accessed: 16.02.2020).
4. Design and Development of Pneumatic Hybrid Vehicle (PHV). Retrived from: <http://www.riroj.com/open-access/> (accessed: 16.02.2020).
5. Vozdushnyye avtomobili. [Aerial cars]. Retrived from: <https://www.metodolog.ru/node/230> (accessed: 16.01.2020).
6. Pneumatic Hybrid power leading the future. Retrived from: <https://pneumaticservoalve.wordpress.com/2015/03/26/> (accessed: 16.01.2020).
7. Mechatronic Systems for Kinetic Energy Recovery at the Braking of Motor Vehicles. Retrived from: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-mechatronics/> (accessed: 16.02.2020).
8. Hydraulic Hybrid Vehicle Layouts. Retrived from: <https://archive.epa.gov/otaq/technology/web/html/prototype-vehicles.html> (accessed: 16.02.2020).
9. Hybrid Air confirmed in new Peugeot engine range. Retrived from: <https://www.autocar.co.uk/car-news/geneva-motor-show/> (accessed: 16.01.2020).
10. Peugeot Citroen to introduce compressed air hybrid by 2016. Retrived from: <https://newatlas.com/peugeot-citroen-hybrid-air-compressed-air/25961/> (accessed: 16.01.2020).
11. Borodenko Yu.N., Panasovskiy V.V. (2019). Aspekty postroyeniya pnevmaticheskoy sistemy razgon-tormozheniya avtomobilya. [Aspects of building a pneumatic system for accelerating and braking a car]. Suchasni tekhnolohiyi na avtomobil'nomu transporti ta mashynobuduvanni. Naukovi pratsi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Kharkov, October 16, 2019) [In Ukraine].

**Бороденко Юрий Николаевич**<sup>1</sup>, к. ф-м. н., доцент каф. автомобильной электроники, 098-362-9112, docentmaster@gmail.com

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, м. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Концепції побудови пневматичних гібридів

**Анотація.** У статті розглянуто **проблему** підвищення екологічних і енергетичних показників автомобіля за рахунок використання енергії стисненого повітря. У зв'язку з цим, відзначено пере-

ваги пневматичного приводу, в порівнянні з електроприводом і приводом від ДВЗ, на режимах розгону автомобіля в умовах міського транспортного циклу. **Актуальність** досліджень, в цьому напрямку, підтверджена прикладами розробок зарубіжних автовиробників на рівні технічних пропозицій, дослідних зразків і серійної продукції. Намічено шляхи вдосконалення конструкції пневматичних гібридів з метою зниження вартості пневматичної трансмісії та експлуатаційних витрат. **Мета** досліджень полягає в синтезі гібридної силової установки (ГСУ) легкового автомобіля з основним ДВЗ і допоміжним пневмодвигуном для експлуатації в міському їздовому циклі. При цьому пневмопривід передбачається задіяти тільки на режимах розгону і рекуперативного гальмування. Для цього необхідно визначити композицію ГСУ, дотримуючись критеріїв мінімізації витрати палива і витрат на конструктивне доопрацювання базової трансмісії в обмеженому просторі автомобіля. **Методика** досліджень включає порівняльний аналіз альтернативних композицій ГСУ під задані параметри автомобіля й умови його експлуатації. Дано якісну оцінку характеристик пневматичних ГСУ різної структури з позицій: енергетичної повноти, автономності заправки, схеми передачі енергії на колеса, принципу побудови пневмотрансмісії. Відзначено конструктивні особливості пневматичної трансмісії, обумовлені схемою включення її компонентів і транспортними режимами автомобіля. За **результатами** досліджень сформульовано передумови застосування пневмопривода на автомобілі. Розроблено рекомендації з синтезу пневматичної рекуперативної системи «розгін-гальмування» у складі ГСУ за заданими критеріями оптимізації. Запропоновано варіантні композиції пневматичних ГСУ, орієнтовані на заданий їздовий цикл і схему приводу базового автомобіля. Відзначено особливості композиції ГСУ і конструкції рекуперативної пневматичної трансмісії без зовнішньої підзарядки тиску. Дано рекомендації з вибору маршрутів руху транспортного засобу, оснащеного системою «розгін-гальмування» в рекуперативному режимі. **Наукова новизна** досліджень полягає в концептуальних схемних рішеннях альтернативних композицій пневматичних ГСУ автомобіля з рекуперацією енергії, для реалізації функцій системи «розгін-гальмування». **Практична значущість** досліджень представлена рекомендаціями, які можуть бути корисними при проектуванні систем «розгін-гальмування» нових і адаптації існуючих силових установок автомобілів, які експлуатуються в умовах міського їздового циклу.

**Ключові слова:** пневмопривід, пневмоагрегат, гібридна силова установка, рекуперація енергії гальмування, критерії оптимізації, трансмісія, їздовий цикл.

**Бороденко Юрій Миколайович**<sup>1</sup>, к. ф-м. н., доцент каф. автомобильной электроники, 098-362-

9112, docentmaster@gmail.com

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Concepts for building pneumatic hybrids

**Abstract.** The article considers the **problem** of improving the environmental and energy performance of a car through the use of compressed air energy. In this regard, the advantages of a pneumatic drive, in comparison with the electric drive and the drive from the internal combustion engine, in acceleration modes of a car in an urban transport cycle are noted. The relevance of research in this direction is confirmed by examples of developments of foreign automakers at the level of technical proposals, prototypes and serial production. The ways of improving the design of pneumatic hybrids with the aim of reducing the cost of pneumatic transmission and operating costs are outlined. The **goal** of the research is to synthesize a hybrid power plant (HPP) of a passenger car with a main ICE and an auxiliary air motor for operation in a city driving cycle. At the same time, the pneumatic drive is supposed to be used only in acceleration and recreational braking modes. To do this, it is necessary to determine the composition of the HPP, adhering to the criteria for minimizing fuel consumption and the cost of constructive refinement of the base transmission in a limited vehicle space. The research **methodology** includes a comparative analysis of alternative HPP compositions for given vehicle characteristics and conditions of its operation. A qualitative assessment is given of the characteristics of pneumatic gas control systems of various structures from the standpoint of: energy completeness, autonomy of a gas station, a scheme for transferring energy to wheels, and the principle

of constructing a pneumatic transmission. The design features of the pneumatic transmission are noted, due to the circuit of its components and the transport modes of the car. Based on the **results** of studies, the prerequisites for the use of a pneumatic drive on a car are formulated. Recommendations have been developed on the synthesis of a pneumatic regenerative acceleration-braking system in the HPP according to the given optimization criteria. Variant compositions of pneumatic HPP are proposed, oriented on a given driving cycle and drive scheme of the base vehicle. The features of the HPP composition and the design of a regenerative pneumatic transmission without external pressure recharging are noted. Recommendations are given on the selection of vehicle driving routes equipped with the acceleration-braking system in a regenerative mode. The scientific **originality** of the research is contained in the conceptual circuit solutions of alternative compositions of pneumatic gas control systems of the vehicle with energy recovery for the implementation of the functions of the acceleration-braking system. The **practical value** of the research is represented by recommendations that can be useful in the design of acceleration-braking systems for new and adaptation of existing power plants of cars operating in urban conditions.

**Key words:** pneumatic drive, pneumatic unit, hybrid power plant, recovery of braking energy, optimization criteria, transmission, driving cycle.

**Yuriy Borodenko<sup>1</sup>**, Assoc. Prof., Ph. D. (Phys.-Maht.), 098-362-9112, docentmaster@gmail.com  
<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

---