

УДК 629.3.06+656.13+612.821

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДА И ОБОБЩЕННОГО АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ



**В.В. Савченко**

Начальник НИЦ Бортовых систем управления мобильных машин ОИМ НАН Беларуси, кандидат технических наук, доцент  
uus@tut.by



**В.А. Дубовский**

Ведущий научный сотрудник НИЦ Бортовых систем управления мобильных машин ОИМ НАН Беларуси, кандидат технических наук  
vdubovsky.email@gmail.com

### **В.В. Савченко**

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с исследованиями безопасности функционирования систем «человек-машина», разработкой методов и систем верхнего уровня для высокоавтоматизированных и беспилотных транспортных средств.

### **В.А. Дубовский**

Окончил Белорусский политехнический институт. Область научных интересов связана с исследованием проблем взаимодействия человека с техническими системами.

**Аннотация.** Статья посвящена междисциплинарному исследованию высокоавтоматизированных транспортных средств в контексте решения задачи передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения водителю, когда транспортное средство выходит из домена штатной эксплуатации с использованием методологии самоорганизации и синергетики. Рассмотрены структура системы верхнего уровня для передачи управления водителю и обобщенный алгоритм адаптивного взаимодействия систем верхнего уровня.

**Ключевые слова:** высокоавтоматизированное транспортное средство, домен штатной эксплуатации, коммуникационная платформа, облачные сервисы, передача управления водителю, самоорганизация, синергетика, системы активной безопасности, системы-ассистенты водителя, системы связи.

### **Введение.**

По проблеме самоорганизации за последние десятилетия опубликовано большое количество работ, выполненных учеными разных стран. Чаще всего это работы фундаментального характера, рассматривающие самоорганизацию как предмет или инструмент исследования на примере многоуровневых иерархических систем как естественного происхождения, так и антропогенных.

Сказать, что система «самоорганизующаяся», - считает У. Эшби, - значит придавать этому слову два совершенно разных значения. Первое из них относится к системе, все части которой в начале работы отделены друг от друга (так что поведение каждой из них не зависит от состояния других частей), а затем эти части работают таким образом, что между ними устанавливаются некоторые связи. Такая система изменяется от системы с «разделенными частями» до системы со «связанными частями». Во втором значении «самоорганизация», как и в первом случае, означает «переход от неорганизованной системы к организованной». Степень организации может быть различной. Тогда возможен переход от системы с низкой степенью организации к системе с высокой степенью организации.

Таким образом, различают три типа процессов самоорганизации [1]:

- процессы самозарождения организации, т.е. возникновение из некоторой совокупности целостных объектов определенного уровня новой целостной системы со своими специфическими закономерностями;
- процессы, благодаря которым система поддерживает определенный уровень организации при изменении внешних и внутренних условий ее функционирования;
- процессы, связанные с совершенствованием и саморазвитием таких систем, которые способны накапливать и использовать прошлый опыт.

Новые подходы к определению понятия «самоорганизация» предлагает синергетика [2,3]. Рассмотрим основные свойства биологических самоорганизующихся систем. Одним из таких свойств является ее целенаправленное (целесообразное) поведение. Под целесообразностью понимается общая характеристика поведения сложных динамических систем, направленного на достижение определенного конечного результата. Понятие целесообразности означает, что акт или поведение можно считать направленным к достижению «цели», т.е. конечному условию, при котором система устанавливает определенное временное или пространственное соотношение с другой системой. Тогда термин «целесообразность» употребляется как синоним цели, контролируемой обратной связью.

Цели самоорганизующейся системы могут быть самыми различными. К ним может относиться собственное сохранение системы, ее рост, а в некоторых случаях и ее разрушение. Обычно самоорганизующаяся система характеризуется наличием не одной, а нескольких целей. В некоторых случаях цели вступают в противоречие друг с другом. Тогда выбирается одна главная цель системы, выполнению которой подчиняются остальные ее цели. Подсистемы также могут иметь свои цели, однако, доминирующей является главная цель системы. Выполнение поставленных целей обеспечивается ресурсом системы, необходимым для их достижения. Цели функционирования системы предъявляют требования к критериям, по которым производится сличение и которые определяют целесообразность поведения системы. Существенным признаком самоорганизации является обособленность самоорганизующейся системы от окружающей среды [4]. Выделившись из однородной окружающей среды, система должна сохранять свою целостность, обуславливаемую наличием и разветвленностью связей между частями системы. Важная особенность самоорганизации - исключительное разнообразие обратных связей на всех уровнях системы. Действия самоорганизующейся системы выбираются с помощью обратной связи. Обратная связь приобретает особое значение именно для самоорганизующихся систем потому, что такого типа регулятор автоматически компенсирует любые возмущения, даже те, природа которых неизвестна.

Структурным основанием самоорганизации является множественность элементов и разветвленность связей между ними. Большое число связей на всех уровнях системы ведет к возникновению целостности и развитию направленного на оптимизацию системы глубокого взаимодействия элементов, являющегося функциональным основанием самоорганизации. Множество элементов, входящих в систему, большое количество прямых и обратных связей между элементами, функциональное разнообразие элементов определяют закон необходимого разнообразия, действующий в самоорганизующихся системах [5,6]. Согласно этому закону, любое разнообразие выбора  $k$  требует переработки количества информации, равного  $k$ . Иными словами, чтобы сделать выбор из множества вариантов мощностью  $k$ , необходим полный перебор этих вариантов. Для усечения перебора система должна обладать предварительной информацией. Таким образом, сущность обучения состоит в том, что система предварительно накапливает и обобщает информацию об аналогичных ситуациях в количестве, например,  $k^*$  единиц, пригодную для большого числа случаев, чтобы в дальнейшем при выборе значительно сократить перебор, переработав  $k - k^*$  единиц информации. Видно, что чем больше накопленный предыдущий опыт  $k^*$ , тем меньше количество информации следует переработать при выборе и тем меньше времени необходимо для принятия решения.

Чтобы обеспечить большее число вариантов для выбора, система должна обладать значительным числом состояний, которое обуславливается наличием достаточно большого числа элементов, входящих в систему, т.е. увеличить число  $k^*$ . В данном случае речь идет о независимых состояниях или о таких, которые не поддаются простому аналитическому описанию. Большое число элементов необходимо также для того, чтобы обеспечить возможность флюктуаций сигналов. [5].

Исследовав, известные из литературных источников, принципы (свойства) самоорганизующихся систем, представляется целесообразным разбить их на четыре класса:

- определяющие целенаправленное поведение систем;
- обеспечивающие существование отбора элементов и выбора необходимых из них для формирования более сложных блоков;
- обеспечивающие организацию структуры системы;
- позволяющие осуществлять приспособляемость системы к условиям ее функционирования.

«Синергетика – это междисциплинарное направление научных исследований, которое изучает закономерности и принципы, лежащие в основе процессов самоорганизации в системах разной природы: физических, химических, биологических, технических, социальных и других.» [7].

#### **Постановка задачи.**

Предмет исследования: передача управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку; объект исследования: высокоавтоматизированные транспортные средства (ВТС). Ключевым аспектом функционирования ВТС является безопасность. Рассматриваемая проблема системного синтеза, опирается на синергетические законы единства процессов самоорганизации и управления, что позволяет впервые поставить и решить междисциплинарную прикладную задачу взаимодействия систем верхнего уровня ВТС с единой целевой функцией – повышения безопасности функционирования транспортных средств (ТС).

#### **Основные тренды по направлению.**

В соответствии со стандартом SAE J 3016, разработанным Обществом автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE International) к ВТС относятся ТС 3-го и 4-го уровня автоматизации [8]. 3-й уровень автоматизации ТС предполагает, что в определенных условиях эксплуатации (в домене штатной эксплуатации, в описании должны быть четко перечислены конкретные условия, при которых ВТС предназначено для эксплуатации в автоматизированном режиме) управление ТС может полностью осуществляться системой автоматизированного вождения (СAB) без какого-либо участия водителя, но при этом водитель должен быть готов взять управление ТС на себя в любое время в случае сбоя системы. 4-й уровень автоматизации ТС аналогичен 3-му уровню, отличаясь лишь тем, что водитель не обязан брать управление ТС на себя, даже в случае сбоя системы, хотя он может это сделать при желании.

Вышесказанное означает, что при эксплуатации ВТС в домене штатной эксплуатации водитель может передать управление СAB и заняться делами, не связанными с вождением (просмотр видео, чтение, набор текста, отдых и т.д.), вследствие чего его осведомленность о дорожной ситуации и психофизиологическое состояние могут не быть оптимальными для управления ТС. Это повышает риски безопасности, связанные с человеческим фактором при возникновении необходимости незапланированной передачи ему управления ТС, особенно в сложных дорожных ситуациях [9 – 12].

Проблема передачи управления водителю в ВТС является сложной междисциплинарной проблемой, которая к настоящему времени еще не решена полностью [13]. Для ее решения необходим непрерывный анализ функционального состояния и профессионально важных качеств человека-водителя, характеристик ТС в динамике, состояния СAB и внешней среды,

включая информационные потоки интеллектуальных транспортных систем (ИТС). В настоящее время поиск решений данной проблемы ведется в направлении разработки наиболее эффективных способов предупреждения водителя о необходимости передачи ему управления ТС и соответствующих интерфейсов, которые позволяли бы достаточно быстро и плавно приводить функциональное состояние водителя к нужному уровню [14 – 17].

Решение междисциплинарной проблемы перехода от автоматизированного режима управления ВТС к ручному, когда ВТС выходит из зоны среды штатной эксплуатации, предполагает реализацию ряда взаимосвязанных задач [18 – 20]: автоматический анализ информационных потоков в ИТС и взаимодействие бортовых информационно-аналитических комплексов с внешними системами [21, 22], классификация признаков выполнения водителем ВТС алгоритмов деятельности или их фрагментов и классификация релевантной информации для водителей в ВТС, включая кросс-модальные информационные потоки, мониторинг профессионально важных качеств, когнитивного и функционального состояния водителей, непосредственно во время выполнения алгоритмов деятельности при ручном управлении ВТС, и выявление их динамики, финишная обработка информации осуществляется облачными сервисами [23].

Системы верхнего уровня ВТС (рисунок 1) это: 1. системы активной безопасности – основные, антиблокировочная система тормозов (ABS); антипробуксовочная система (ASR); система курсовой устойчивости (ESP); система распределения тормозных усилий (EBD); система экстренного торможения (BAS); система обнаружения пешеходов (PDS); электронную блокировку дифференциала (EDS) и др.; 2. системы ассистенты водителя (Advanced Driver Assistance System (ADAS) – основные, адаптивный круиз-контроль (ACC); система автономного экстренного торможения автомобиля (AEB); система предупреждения о сходе с полосы (LDW); система мониторинга состояния водителя (DSM); критическое сближение с пешеходом (PCW); опасное сближение (FCW); съезд с полосы движения (LDW); стоящий впереди автомобиль начинает двигаться (FVSA); в зоне обнаружения находится транспортное средство (FPW); автоматическая запись видео до и после аварии (DVR); превышение допустимой скорости (SLR) и др.; 3. системы связи – коммуникационная платформа Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) позволяет выполнять интеграцию и консолидацию данных из различных источников, для использования различными типами бортовых систем высокоавтоматизированных транспортных средств, включая поддержку автономного вождения в домене штатной эксплуатации, передавать информацию водителю при ручном режиме управления, передавать информацию для актуализации специализированных баз данных для их анализа, в том числе в реальном масштабе времени, которая используется для определения момента времени перехода высокоавтоматизированных транспортных средств от автоматизированного режима управления к ручному; в состав коммуникационной платформы C-V2X входят следующие узконаправленные связи V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infrastructure), V2N (Vehicle-to-Network), V2P (Vehicle-to-Pedestrian); 4. спутники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), например, ГЛОНАСС, «Галилео», BeiDou, GPS; 5. облачные сервисы и хранилища – для решения, в контексте рассматриваемой проблемы, задач, связанных с обработкой Big Data, сбор данных для анализа; хранение и актуализация данных; выполнение облачных вычислений и анализ в соответствии с заданными алгоритмами; передача требуемых данных на бортовые системы ВТС; визуализация и использование результатов обработки для решения других, например, научно-исследовательских, задач.

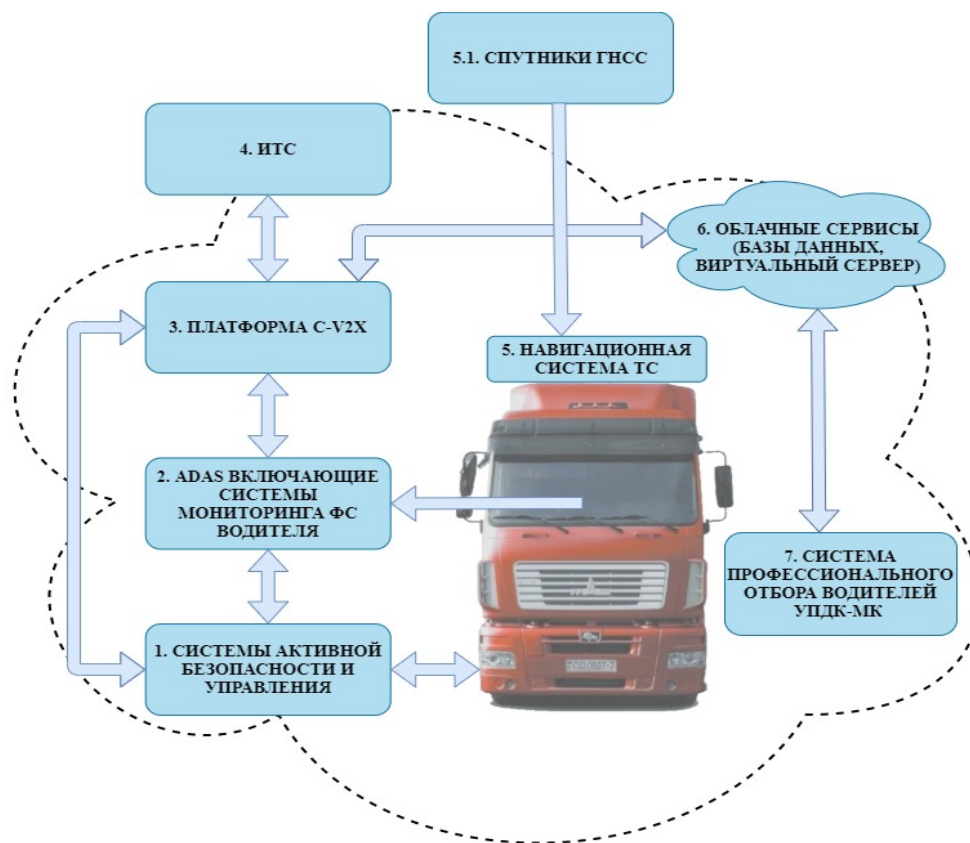


Рисунок 1. Структура системы верхнего уровня для передачи управления водителю в ВТС: 1 – системы активной безопасности и управления ТС; 2 – ADAS, включающие системы мониторинга ФС водителя; 3 – коммуникационная платформа C-V2X; 4 – ИТС; 5 – навигационная система ТС; 5.1 – спутники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС); 6 – облачные сервисы (базы данных, виртуальный сервер); 7 – стационарная система профессионального отбора водителей (универсальный психодиагностический комплекс УПДК-МК)

Коммуникационная платформа C-V2X является основной информационной системой, обеспечивающей передачу разнородных данных как уже консолидированных в бортовых системах ВТС, так и «сырых» данных для их последующей консолидации облачными сервисами, с целью последующей обработки и анализа для реализации различных функционалов, в том числе появляется возможность использовать сложные сценарии, в бортовых комплексах ВТС, например, поддержка движения как в автономном режиме в домене штатной эксплуатации, так и в режиме ручного управления. Проблема передачи управления водителю, при переходе ВТС к ручному режиму управления, в настоящий момент находится на стадии поисковых исследований. C-V2X позволяет ставить и решать задачи по прототипированию и апробации системы передачи управления водителю на определенном ВТС, с использованием ранее разработанных подходов, концепции, моделей, методов и способов. Рассмотренные архитектуры развертывания C-V2X позволяют обосновывать технические требования к коммуникационной платформе в зависимости от ее функционала, для реализаций современных автомобильных коммуникационных технологий. Обобщенный алгоритм адаптивного взаимодействия систем верхнего уровня ВТС (рисунок 2) ориентирован на получения наиболее достоверного результата в реальном масштабе времени на основе анализа доступной информации о процессах функционирования ВТС и водителя, непрерывного обновления исходных данных, базируется на

концептуальной модели системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» [24] и структуре системы верхнего уровня для передачи управления водителю в ВТС.

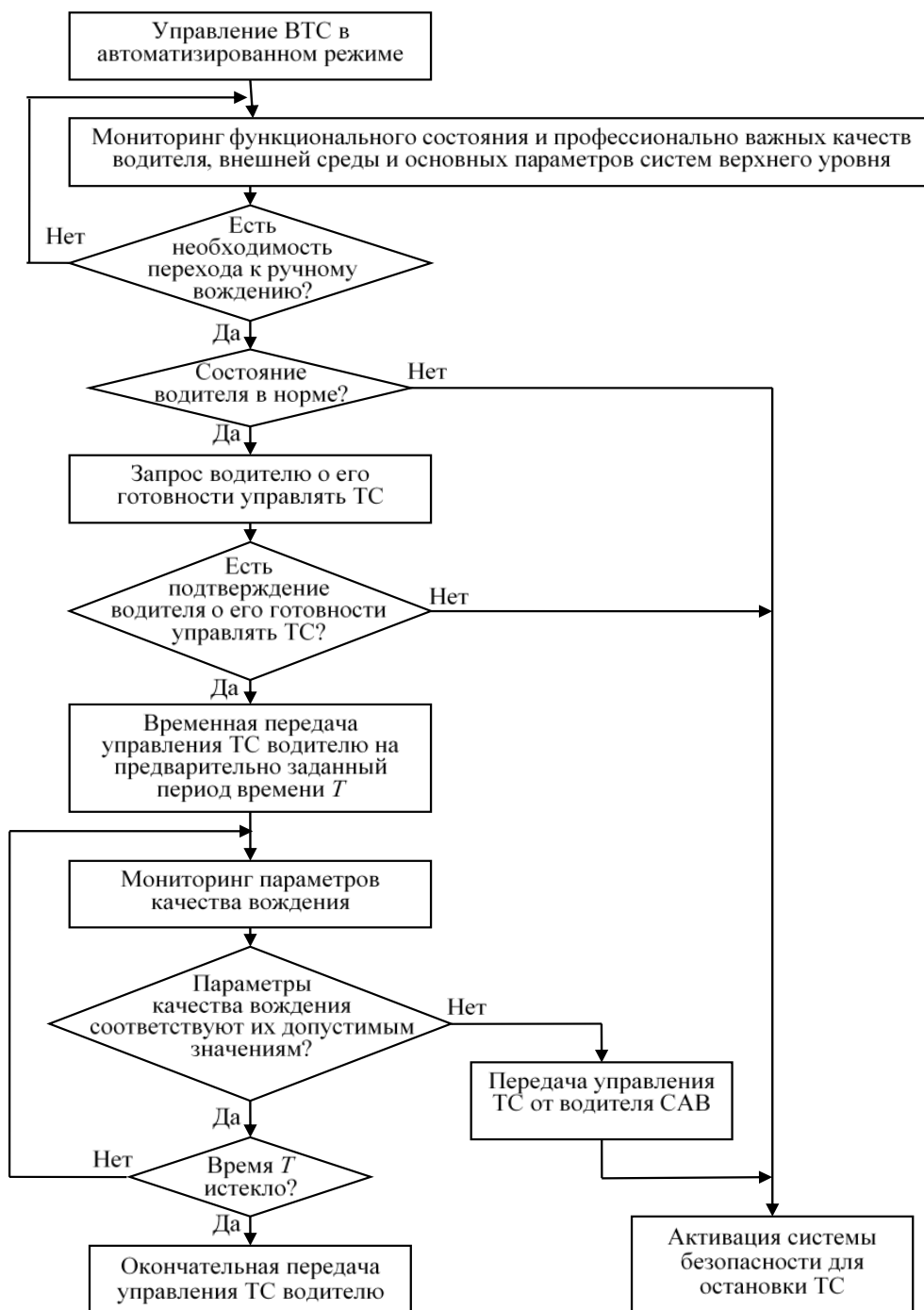


Рисунок 2. Обобщенный алгоритм адаптивного взаимодействия систем верхнего уровня ВТС

### Заключение.

С позиций междисциплинарного подхода рассмотрен вариант прикладной реализации подхода к анализу и синтезу систем передачи управления водителю в ВТС, когда транспортное средство выходит из домена штатной эксплуатации. Для реализации задачи используются системы верхнего уровня ВТС и оригинальные методы, способы, алгоритмы мониторинга

бортовых систем управления, водителя, включая основные индивидуальные особенности, в контексте специфики алгоритмов деятельности и внешней среды.

### Список литературы

- [1] Самоорганизация // БСЭ. - 3-е изд. - Т. 22. - С. 544.
- [2] Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1980. - 404 с.
- [3] Хакен Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. - М.: Мир, 1985. - 419 с.
- [4] Биологическая кибернетика // Под ред. А.Б. Когана. - М.: Высшая школа, 1977. - 408 с.
- [5] Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. - М.: Сов. радио, 1968. - 326 с.
- [6] Эффективность систем автоматического управления // Энциклопедия кибернетики: В 2 т. - 1975. - Т.2. - С. 511.
- [7] Синергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gtmarket.ru/concepts/6876/>. – Дата доступа: 03.03.2023.
- [8] SAE On-Road Automated Vehicles Standards Committee. J3016. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. Washington, DC: SAE International; 2014.
- [9] P. Bazilinsky, S.M. Petermeijer, V. Petrovych, D. Dodou, J.C.F. de Winter Take-over requests in highly automated driving: A crowdsourcing survey on auditory, vibrotactile, and visual displays / *Transportation Research Part F* 56 (2018) 82–98.
- [10] Collet C. and Musicant O. Associating Vehicles Automation with Drivers Functional State Assessment Systems: A Challenge for Road Safety in the Future. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019; 13:131. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00131.
- [11] Russell H.E.B., Harbott L.K., Nisky I., Pan S., Okamura A.M., Gerdes J.C. Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles. *Science Robotics*. 2016; 1(1): 1-9.
- [12] Lu Z., Happee R., Cabral C.D.D., Kyriakidis M. and Winter J.C.F. Human Factors of Transitions in Automated Driving: A General Framework and Literature Survey. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2016; 43(11): 183–198.
- [13] Merat N., Jamson A.H., Lai F.C.H., Daly M. and Carsten O.M.J. Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F*. 2014; 27: 274–282.
- [14] W. Morales-Alvarez, O. Sipele, R. Léberon, H.H. Tadjine and C. Olaverri-Monreal. Automated Driving: A Literature Review of the Take over Request in Conditional Automation *Electronics* 2020, 9, 2087.
- [15] Saito T., Wada T. and Sonoda K. Control Authority Transfer Method for Automated-to-Manual Driving Via a Shared Authority Mode. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2018; 3(2): 198–207. DOI: 10.1109/TIV.2018.2804167.
- [16] Gold C., Damböck D., Lorenz L. and Bengler K. Take over! How long does it take to get the driver back into the loop? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2013; 57(1): 1938–1942. DOI: 10.1177/1541931213571433.
- [17] Gold C., Körber M., Lechner D. and Bengler K. Taking Over Control from Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density. *Human Factors*. 2016; 58(4): 642–652. DOI: 10.1177/0018720816634226.
- [18] Савченко, В.В. Проблема передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах: метод мониторинга восприятия семантически бинарной релевантной информации водителем / В.В. Савченко // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2019. – №2(47). – С. 14 – 19.
- [19] Савченко, В.В. Концепция передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах / В.В. Савченко, С.Н. Поддубко // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2020. – Т.64, №5. – С. 624 – 631. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-624-631>
- [20] Дубовский В.А., Савченко В.В. Метод передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку. *Доклады БГУИР*. – 2020. – № 18(7). – С. 40 – 46.
- [21] Савченко В.В. Поддубко С.Н. Подход к разработке метода передачи управления транспортным средством водителю бортовыми системами в автоматическом режиме / В.В. Савченко, С.Н. Поддубко // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. – 2018. – №2(121). – С. 181–187.
- [22] Савченко В.В. Информационные потоки в высокоавтоматизированных транспортных средствах // «BIG DATE and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», материалы 6-ой Международной научно-практической конференции 20 – 21 мая 2020 г., Часть 2 // г. Минск, Республика Беларусь. – С. 122 – 128.
- [23] Дубовский В.А., Савченко В.В. Метод контроля профессионально важных качеств водителей транспортных средств / В.А. Дубовский, В.В. Савченко // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. – 2019. – Вып. 8. – С. 159 – 161.
- [24] Дубовский В.А., Савченко В.В. Концептуальная модель системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2019. – Том 63, №1. – С. 112-120.

## **DEVELOPMENT OF APPROACH AND GENERALIZED ALGORITHM FOR ADAPTIVE INTERACTION OF HIGH-LEVEL SYSTEMS OF HIGHLY AUTOMATED VEHICLES**

***V.V. Savchenko***

*Chief of the Research and Engineering Center  
«Onboard Control Systems of Mobile Machines»,  
PhD of Technical Sciences, Associate Professor*

***V.A. Dubovsky***

*Head Lead Researcher of the Research and  
Engineering Center «Onboard Control Systems of  
Mobile Machines», PhD of Technical Sciences*

*State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus.*

*E-mail: uus@tut.by*

**Abstract.** The article is devoted to the interdisciplinary study of highly automated vehicles in the context of solving the problem of transferring control of the vehicle from an automated driving system to the driver, when the vehicle leaves the normal operation domain using self-organization methodology and synergetics. Structure of upper level system for transfer of control to driver and generalized algorithm of adaptive interaction of upper level systems are considered.

**Keywords:** highly automated vehicle, standard operation domain, communication platform, cloud services, driver control transfer, self-organization, synergetic, active security systems, driver assistant systems, communication systems.