

А. А. Галушак

## МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ СМЕСИ ТОПЛИВА

*В статье приведены схема системы питания дизеля Common Rail смесью дизельного и биодизельного топлив с динамическим регулированием ее процентного состава, теоретические основы организации и методика управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава.*

**Ключевые слова:** биодизельное топливо, дизельное топливо, смесь топлив, динамическое регулирование процентного состава, методика управления.

### Введение. Постановка проблемы

Массовое использование двигателей внутреннего сгорания привело к увеличению использования нефтяных топлив и стало причиной значительного ухудшения экологического состояния. Как известно, выбросы вредных веществ от двигателей внутреннего сгорания в среднем в год составляют 39% от всего объема вредных выбросов, а в городах порой достигают 70 – 90% [1]. Именно поэтому использование альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания уже длительное время является актуальным вопросом.

Физико-химические свойства альтернативных топлив при использовании в двигателях внутреннего сгорания обуславливают некоторые особенности протекания рабочих процессов в цилиндрах двигателя, что влияет на технико-экономические и экологические показатели двигателей. Как правило, использование альтернативных топлив без корректировки организации рабочих процессов приводит к уменьшению мощности двигателя и ухудшению его экономических показателей, поэтому ученые много внимания уделяют разработке рекомендаций по адаптации системы питания биодизельным топливом и усовершенствованию алгоритмов организации рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания при переводе их на работу на альтернативном топливе.

Для достижения максимального эффекта от применения биодизельного топлива нужно использовать современные технологии. Это требование удовлетворяет система питания дизеля с динамической регулировкой процентного состава смеси в зависимости от ее режима работы. Для большинства двигателей характерна работа при изменении в широком диапазоне теплового, нагрузочного и скоростного режимов работы. При эксплуатации зачастую двигатели работают на неустановившихся режимах, к которым можно отнести: пуск, прогрев, разгон, торможение, увеличение и уменьшение нагрузки, остановку двигателя. Эти режимы являются динамично несимметричными [2], то есть процессы, протекающие при увеличении и уменьшении нагрузки на коленчатый вал двигателя при запуске и остановке двигателя, отличаются друг от друга. Эффективное протекание рабочих процессов в цилиндрах дизеля при различных процентных составах смесей топлив и режимов его работы обеспечивает соответствующий алгоритм, поэтому это должно быть учтено в методике управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава.

Использование биодизельного топлива для дизелей является довольно актуальным, поэтому этим вопросом уже много лет активно занимаются ученые. Так, в работах [2 – 9] приведены результаты исследования влияния на технико-экономические и экологические

показатели дизеля использование чистого биодизельного топлива и его смеси с дизельным. Особое внимание следует уделить работе [10], в которой для улучшения экологических характеристик дизеля авторами была разработана методика определения характеристики регулирования оптимального соотношения компонентов смеси топлив в зависимости от режима работы дизеля. Использование разработанной методики обеспечивает снижение выбросов всех нормированных токсичных компонентов отработанных газов. Так, выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$  уменьшаются на 9%, оксида углерода  $\text{CO}$  – на 13,5%, углеводородов  $\text{C}_m\text{H}_n$  – на 36% по сравнению с работой двигателя на дизельном топливе.

Для реализации разработанной методики авторы предложили схему устройства для смешивания дизельного и биодизельного топлив в различных пропорциях в зависимости от режимов работы дизеля. В устройстве регулирование состава смеси топлива происходит пропорционально давлению дизельного топлива в топливопроводах высокого давления. Быстродействие такого устройства составляет около двух смежных циклов топливоподачи. Недостатком данной методики является то, что процентный состав смеси топлив зависит от частоты вращения коленчатого вала и не учитывает степень нагрузки двигателя.

### Изложение основного материала

Для эффективного использования биодизельного топлива была усовершенствована система питания дизеля (рис. 1), которая обеспечит изменение процентного состава смеси дизельного и биодизельного топлив в зависимости от режима работы двигателя. Для усовершенствованной системы вносят изменения, которые не ухудшают работу дизеля на дизельном топливе и обеспечивают его базовую мощность и крутящий момент. Изменение процентного состава смеси дизельного и биодизельного топлив происходит автоматически во время работы двигателя. Пуск и остановка дизеля происходит на дизельном топливе, поэтому возникает необходимость изменить подходы к управлению системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамическим регулированием ее процентного состава.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: 1 – топливный бак для дизельного топлива; 2 – фильтр грубой очистки дизельного топлива; 3 – насос низкого давления дизельного топлива; 4 – фильтр тонкой очистки дизельного топлива; 6 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 7 – форсунка; 8 – электронный блок управления (ЭБУ); 9 – рычаг подачи топлива; 11 – датчик частоты вращения коленчатого вала двигателя; 12 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 25 – топливный аккумулятор высокого давления. При совершенствовании системы питания дизеля был добавлен ряд элементов. Дополнительно установлен топливный бак для биодизельного топлива 13 с подогревателем 22, фильтры грубой 14 и тонкой очистки 16, топливный насос низкого давления 15, смеситель топлив 5, дополнительный бак 17 с подогревателем 22 и датчиком уровня топлива 23, насос низкого давления с дополнительного бака 18, электромагнитные клапаны 19, 20, обратные – 21, 24 и перепускной клапаны 10.

Для предотвращения смешивания смеси топлив с чистыми топливами были изменены трубопроводы, обеспечивающие подачу неиспользованного топлива из форсунок и ТНВД в систему после смесителя топлива перед ТНВД. Смеситель топлив управляется ЭБУ и обеспечивает регулирование процентного состава смеси топлив в процессе работы дизеля. При этом система питания дизеля с динамической регулировкой процентного состава смеси топлив обеспечивает возможность работы дизеля на дизельном, биодизельном топливах и их смесях всех процентных составов. Эффективность работы дизеля на дизельном топливе не меняется после усовершенствования системы питания.

Организация управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава



биодизельное топлива подают в смеситель с индивидуальных трубопроводов и насосов низкого давления. В смесители в зависимости от положения регулирующего устройства создается смесь топлив с соответствующим процентным составом и подается в ТНВД.

Основным параметром, которым нужно управлять и которого нет в классической системе питания, является процентный состав смеси топлив, определение и управление которым является основной особенностью разработанной системы питания. В зависимости от процентного состава смеси топлив для обеспечения технических показателей двигателя возникает необходимость менять цикловую подачу и угол опережения впрыска топлива.

При работе на дизельном топливе двигатель и его система питания работают по алгоритмам, заложенным заводом-производителем, изменения в управлении происходят, когда двигатель переходит на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив.

В разработанной системе питания добавлена линия низкого давления подачи биодизельного топлива, в которой происходит управление насосом низкого давления и подогревателем топлива. Подогрев биодизельного топлива является обязательным при его использовании, особенно при низких температурах окружающей среды. Так, при подогреве биодизельного топлива от 20°C до 50°C его вязкость уменьшается примерно на 51% [11]. Показатели плотности, поверхностного натяжения и др. тоже меняются, но не так существенно. На холодном двигателе ухудшается процесс испарения и сгорания топлива, также увеличивается вероятность попадания топлива в картер двигателя, где оно разбавляет масло. Влияние биодизельного топлива на масло более негативное, чем у дизельного топлива [12]. Свойства биодизельного топлива обуславливают большую его способность к коксованию, что особенно проявляется при плохом распылении топлива (на неподогретом биодизельном топливе).

Подогреватель включается после запуска двигателя и поддерживает нужную температуру биодизельного топлива. Насос низкого давления включается только тогда, когда температура биодизельного топлива достигает значения допустимого для его использования и выключается при уменьшении температуры биодизельного топлива ниже допустимой или перед остановкой работы дизеля, когда система питания наполняется дизельным топливом.

Система питания обеспечивает подачу дизельного и биодизельного топлив в смеситель независимо друг от друга, давления обоих топлив на входе в смеситель одинаковые, после чего они смешиваются и рассматриваются как смесь топлив с соответствующим процентным составом.

После усовершенствования системы отвода неиспользованного топлива возникает необходимость в ее управлении, поскольку к ней был добавлен ряд новых компонентов.

Данная система отвечает за подачу не использованного топлива:

- в магистраль высокого давления между ТНВД и смесителем;
- при остановке двигателя в дополнительный бак.

Также возникает необходимость в подогреве смеси топлив в дополнительном баке и его подачи в систему питания. Смесь топлива из дополнительного бака используется, когда двигатель работает на рабочей температуре и топливо в баке подогрето до необходимой температуры.

Новым параметром, которым нужно управлять и которого нет в классической системе питания, является процентный состав смеси топлив, определение и управление которым является основной особенностью разработанной системы питания. Также возникает необходимость изменять показатели цикловой подачи и опережения впрыска топлива при работе на различных процентных составах смеси топлив при одинаковых режимах работы дизеля.

## **Методика управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава**

Для обеспечения управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава устанавливают дополнительные датчики и исполнительные механизмы (рис. 1).

Использование биодизельного топлива и его смеси с дизельным вызывает изменение технико-экономических и экологических показателей дизеля. Низшая теплота сгорания биодизельного топлива меньше, чем дизельного, это означает, что при полном сгорании биодизельного топлива получается меньше энергии, чем при сгорании того же количества дизельного топлива. Для сохранения технических характеристик дизеля нужно увеличивать цикловую подачу топлива. Это, в свою очередь, вызывает увеличение часового расхода топлива. При увеличении цикловой подачи топлива увеличивается продолжительность его впрыска, испарения и горения, при достижении критической продолжительности, топливо, которое впрыскивается в цилиндр двигателя, не успеет полностью сгореть за отведенное ему на это время. При больших цикловых подачах топлива и высоких частотах вращения коленчатого вала двигателя топливо не будет полностью сгорать, что негативно скажется на технико-экономических и экологических показателях дизеля.

Использование системы питания с динамической регулировкой процентного состава смеси топлив на дизелях требует особых подходов к организации работы системы питания, для чего необходимо разработать методику ее управления.

Регулирование процентного состава осуществляют по двум соображениям:

- обеспечение необходимого эффективного крутящего момента;
- обеспечение протекания рабочих процессов.

Методика управления системой питания дизеля при его работе на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамическим регулированием ее процентного состава реализуется следующим образом. Запуск и остановка дизеля происходит на дизельном топливе, для этого перед тем, как его остановить, смесь топлив из системы питания сливают в дополнительный бак. Это обуславливает необходимость работы дизеля еще некоторое время после того, как оператор или водитель выставит двигатель в режим остановки.

Процесс запуска дизеля происходит на дизельном топливе, поскольку на этот момент система питания заполнена дизельным топливом. Это обусловлено тем, что высокая вязкость и большое поверхностное натяжение биодизельного топлива увеличивают нагрузку на элементы системы питания, ухудшают процесс распыления и сгорания топлива, также возникает опасность закоксовываемости сопел форсунок. Система питания работает в соответствии с алгоритмом, заложенным заводом-производителем.

Далее проверяют температуру охлаждающей жидкости и биодизельного топлива: если они ниже допустимых, система питания дизеля обеспечивает его работу на дизельном топливе по алгоритму, заложенному заводом-производителем, и продолжает прогреваться биодизельное топливо и двигатель. Если же температура охлаждающей жидкости и биодизельного топлива достигают допустимых значений, то система питания дизеля может использовать биодизельное топливо или его смеси с дизельным. В случае, если в процессе эксплуатации двигателя температура биодизельного топлива опустится ниже допустимой, двигатель переходит на работу на дизельном топливе.

Определение процентного состава смеси топлив проводят путем оценки значения угла поворота коленчатого вала, при котором происходит окончание горения смеси топлив. На рис. 2 приведен алгоритм определения процентного состава смеси дизельного и биодизельного топлив при переводе дизеля на работу на смеси топлив с динамической регулировкой ее процентного состава.

Определение процентного состава смеси топлив  $n_{БП}$  происходит следующим образом [13]. Определяют низшую теплоту сгорания смеси топлива  $Hu$  и ее цикловую подачу  $q_u$ . Цикловая подача смеси топлив – это такое количество топлива, которое обеспечит количество теплоты, получаемое при сгорании дизельного топлива на этом режиме работы дизеля.

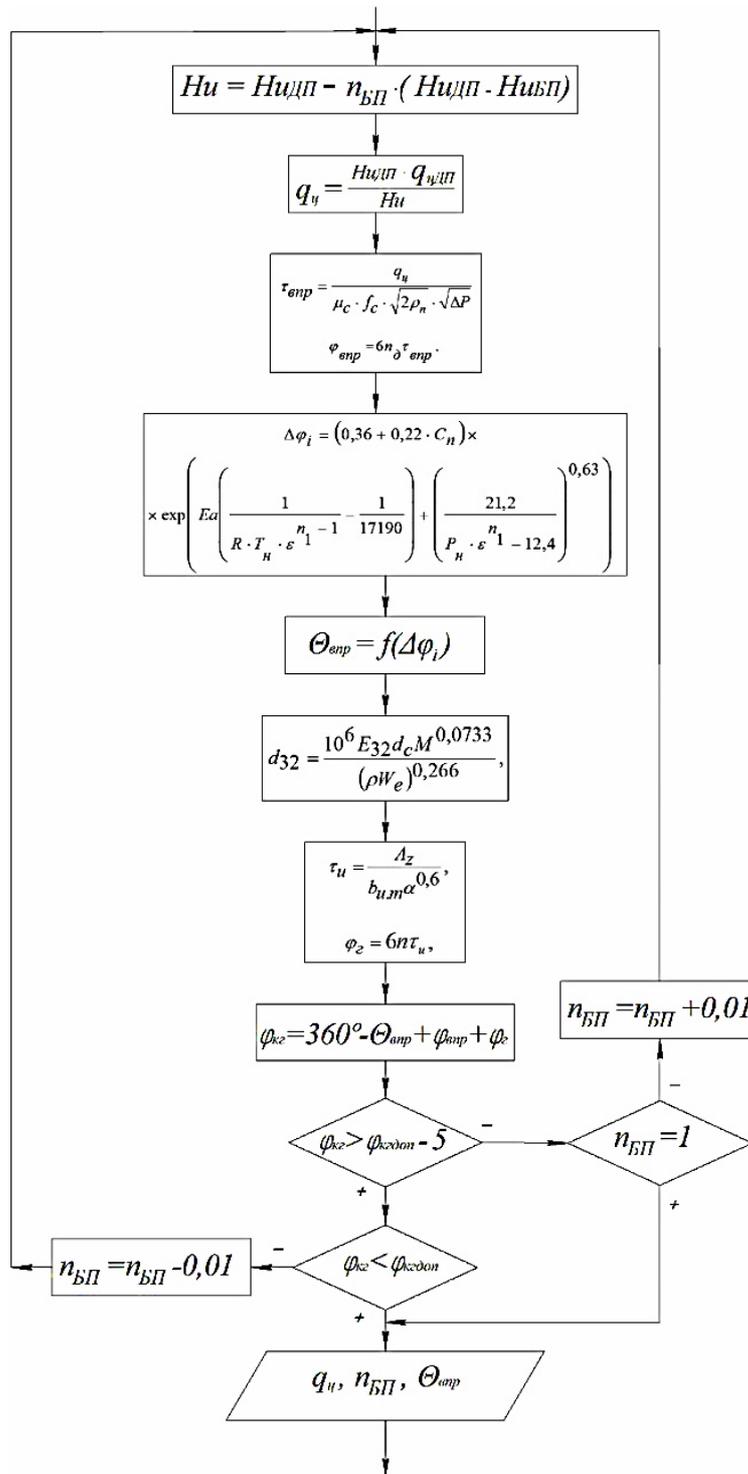


Рис. 2. Схема алгоритма определения процентного состава смеси топлив

Далее определяют продолжительность впрыска смеси топлива  $\varphi_{впр}$ , которая зависит от характеристик форсунки (коэффициента расхода проходных сечений сопловых отверстий  $\mu_c$

и площади поперечного сечения сопловых отверстий  $f_c$ ), давления впрыска смеси топлив в цилиндр двигателя  $\Delta P$  и плотности смеси топлив  $\rho_n$ .

Потом определяют период задержки воспламенения  $\Delta\varphi$ , который зависит от средней скорости поршня  $C_n$ , энергии активаций топлива  $Ea$ , универсальной газовой постоянной  $R$ , температуры  $T_n$  и давления газов в момент начала впрыска  $P_n$ , степени сжатия  $\varepsilon$  и показателя политропы сжатия  $n_1$ . Зная период задержки воспламенения  $\Delta\varphi$ , корректируют угол опережения впрыска смеси топлива  $\theta_{впр}$ .

Определяют средний диаметр капель смеси топлив впрыскиваемого в цилиндр двигателя  $d_{32}$ , который зависит от конструкции форсунки ( $E_{32}$  – эмпирический коэффициент), диаметра соплового отверстия форсунки  $d_c$ , критерия Вебера  $W_e$ , отношения плотности воздуха к плотности топлива  $\rho$  и критерия, характеризующего соотношение сил поверхностного натяжения  $M$ .

Продолжительность испарения и сгорания крупных капель зависит от константы времени испарения больших капель  $A_z$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и относительной теоретической константы испарения топлива  $b_{и.т}$ , которая, в свою очередь, зависит от среднего диаметра капель смеси топлив  $d_{32}$ .

Учитывая вышеизложенное, определяют момент окончания горения смеси топлива  $\varphi_{кз}$ . Если он меньше, чем допустимое значение  $\varphi_{кздоп}$ , проверяют процентный состав смеси  $n_{БП}$ , если содержание биодизельного топлива в смеси равно 100 %, то получают конечные для этого этапа цикловую подачу и состав смеси, если же содержание биодизельного топлива в смеси меньше 100 %, то содержание биодизельного топлива в смеси увеличивается на 1 %. Далее еще раз пересчитывают значение на этом этапе и снова проверяют условие соответствия момента окончания горения смеси топлив допустимым значениям, и так до тех пор, пока условие не будет выполнено. Шаг изменения содержания биодизельного топлива в 1 % достаточен для обеспечения регулирования процентного состава смеси топлив с нужной точностью.

Если же значение момента окончания горения  $\varphi_{кз}$  смеси топлив больше допустимого значения  $\varphi_{кздоп}$ , содержание биодизельного топлива в смеси уменьшается на 1 %, далее снова проверяют условие соответствия момента окончания горения смеси топлив допустимым значениям, и так до тех пор, пока условие не будет выполнено или содержание дизельного топлива в смеси станет равным 100 %.

При остановке двигателя для его дальнейшего легкого запуска систему питания заполняют дизельным топливом. Часть смеси топлив из системы питания подают в дополнительный бак, а другая часть сгорает в цилиндрах дизеля во время рабочего хода. Систему питания заполняет дизельное топливо – и двигатель останавливается. Смесь топлив с дополнительного бака используют, в первую очередь, при работе дизеля на смеси топлив.

### Выводы

Применение методики управления системой питания дизеля при переводе его на работу на смеси дизельного и биодизельного топлив с динамической регулировкой ее процентного состава позволяет обеспечить работу двигателя с базовыми техническими показателями дизеля, при этом значительно улучшив его экологические показатели. В методике управления системой питания дизеля учтены особенности управления системой питания дизеля при различных режимах работы двигателя.

Основной особенностью методики является определение процентного состава смеси дизельного и биодизельного топлив в зависимости от режима работы дизеля и управления новыми компонентами, которые были добавлены в систему питания дизеля при переводе его на работу на смеси топлив с динамической регулировкой ее процентного состава. При этом

двухтопливность двигателя сохраняется, то есть в дизеле эффективно используют дизельное и биодизельное топлива и их смесь. При работе на дизельном топливе на всех режимах работы двигателя сохраняются его базовые характеристики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище [Електронний ресурс] / П. І. Чуваєв // Вісник Національного транспортного університету. – 2013. – № 27. – С. 380 – 383. – Режим доступу до журн.: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vntu\\_2013\\_27\\_58.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vntu_2013_27_58.pdf).
2. Пинский Ф. И. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания (дизельными и бензиновыми). Учебное пособие / Ф. И. Пинский, Р. И. Давтяк, Б. Я. Черняк // М: «Легион-Автодата», 2002. – 136 с.
3. Jindal S. Effect of injection timing on combustion and performance of a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester / S. Jindal // International journal of energy and environment. – 2011. – Volume 2, Issue 1. – P. 113 – 122.
4. Атамась А. І. Підвищення екологічних показників дизельного автомобіля під час використання біодизельного палива / А. І. Атамась, В. Ф. Шапко, С. В. Шапко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2012. – Випуск 3/2012 (74). – С. 126 – 130.
5. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. [Електронний ресурс] / Vozbas Kahraman // Published by Elsevier Ltd. – 2005. – P. 4, – Режим доступу до статті: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.9475&rep=rep1&type=pdf>.
6. Jinlin Xuea Effect of biodiesel on engine performances and emissions / Jinlin Xuea, Tony E. Grift, Alan C. Hansena // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. – №15 (2011). – P. 1098 – 1116.
7. Войтов В. А. Техніко-експлуатаційні та екологічні показники дизельних двигунів при застосуванні біодизеля / В. А. Войтов, М. С. Даценко, М. В. Карнаух // Техніка і технологія АПК. – 2009. – № 1. – С. 13 – 18.
8. Тарлаков Я. В. Эксплуатационные показатели дизельных электростанций лесного комплекса при работе на биотопливе : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» / Я. В. Тарлаков. – М, 2013. – 16 с.
9. Осетров О. О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля 4ЧН 12/14, що працює на біопаливах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Теплові двигуни» / О. О. Осетров. – Харків, 2015. – 20 с.
10. Ефанов А. А. Улучшение экологических характеристик дизеля регулированием состава смесового биотоплива : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.04.02 «Тепловые двигатели» / А. А. Ефанов. – М, 2008. – 18 с.
11. Poliakov A. P. Provision of required viscosity index for bipropellant fuel / A. P. Poliakov, O. O. Galushchak, D. O. Galushchak // New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, Tehnomus. Suceava, Romania. – 2013. – № 20. – P. 254 – 257.
12. Ron Kotrba Understanding the post-injection problem. / Ron Kotrba // – 2008, – Режим доступу до статті: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/2290/understanding-the-post-injection-problem>.
13. Поляков А. П. Математична модель системи «Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив» / А. П. Поляков, О. О. Галушчак // Міжвузівський збірник "НАУКОВІНОТАТКИ" Луцьк. – 2014. – Випуск № 45. – С. 438 – 443.

**Галушчак Александр Александрович** – аспирант кафедри автомобілей і транспортного менеджмента, e-mail: [galushchak\\_o@meta.ua](mailto:galushchak_o@meta.ua).

Винницький національний технічний університет.