

Гурса с данными на характеристиках. В работе также рассмотрено сужение оператора двойного интегрирования вида

$$(Af) \Big|_{L_0}(t) = \int_0^t f(\xi) d\xi \ln \frac{t}{\xi}$$

на подпространство

$$L_0 = \{f(x, y) \in L^2(D) \mid f(x, y) = f(xy)\}.$$

Осуществлено включение данных операторов в узел, описаны параметры узла, вычислены характеристические функции узлов.

Результаты статьи могут служить основой для получения новых модельных представлений операторов, а также для моделирования случайных процессов в рамках корреляционной теории.

Список литературы: 1. *Лившиц М.С., Янцевич А.А.* Теория операторных узлов в гильбертовых пространствах. – Х.: Изд-во Харьк. ун-та, 1971. – 160 с. 2. *Лившиц М.С.* О спектральном разложении линейных несамосопряженных операторов // Математический сборник. – 1954. – Т. 34 (76). – №1. – С. 145–198. 3. *Золотарев В.А.* Аналитические методы спектральных представлений несамосопряженных и неунитарных операторов. – Х.: ХНУ, 2003. – 342 с. 4. *Бродский М.С.* Треугольные и жордановы представления линейных операторов. – М.: Наука, 1969. – 287 с. 5. *Надь Б. С., Фояш Ч.* Гармонический анализ операторов в гильбертовом пространстве. – М.: Мир, 1970. – 431 с. 6. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке; перевод с нем. С. В. Фомина. – Изд. четв., испр. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Livshic, M. S. *Teorija operatornyh uzlov v gil'bertovyh prostranstvah.* Kharkiv: Izd-vo Khark. un-ta, 1971. Print. 2. Livshic, M. S. "O spektral'nom razlozhenii linejnyh nesamosoprjazhennyh operatorov." *Matematicheskij sbornik.* Vol. 34 (76). No. 1. 1954. 145–198. Print. 3. Zolotarev, V. A. *Analiticheskie metody spektral'nyh predstavlenij nesamosoprjazhennyh i ne-unitarnykh operatorov.* Kharkiv: KhNU, 2003. Print. 4. Brodskij, M. S. *Treugol'nye i zhordanovy predstavlenija linejnykh operatorov.* Moscow: Nauka, 1969. Print. 5. Nad', B. S., and Ch. Fojash. *Garmnicheskij analiz operatorov v gil'bertovom prostranstve.* Moscow: Mir, 1970. Print. 6. Kamke, Je. *Spravochnik po obyknovennym differencial'nym uravnenijam.* Transl. from german. S. V. Fomin. 4th ed., ispr. Moscow: Nauka, 1971. Print.

Поступила(received) 15.04.2015

УДК 621.43

А.М. ЛЕВТЕРОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАНУ,
Харьков;

Л.И. ЛЕВТЕРОВА, вед. инженер, ИПМаш НАНУ, Харьков;

В.Д. САВИЦКИЙ, инженер, ИПМаш НАНУ, Харьков

ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА БИОДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ И ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

Представлен анализ и попытки объяснения в научных публикациях особенностей образования оксидов азота при работе двигателя с воспламенением от сжатия на метиловых и этиловых эфирах жирных кислот (биодизельное топливо) и обозначены методы снижения содержания NO_x в отработавших газах. Исследование сгорания биодизельных топлив осложняется их многообрази-

ем, которое обусловлено изменяющимся составом сложных эфиров, а, главное, отсутствием данных о термодинамических и термохимических свойствах, во всяком случае, в открытой печати. В работе излагаются результаты численного и моторного экспериментов относительно влияния на величину эмиссии оксидов азота с отработавшими газами дизеля угла опережения подачи топлива и коэффициента избытка воздуха, при этом рассматривается как минеральное, так и одно из биодизельных топлив.

Ключевые слова: дизель, биотопливо, эмиссия монооксида азота, токсичность отработавших газов, моделирование, моторный эксперимент.

Введение и постановка задачи. В силу особенностей рабочего процесса, удельный выброс в атмосферу несгоревших углеводородов (HC), угарного (CO) и углекислого (CO_2) газов для дизеля ниже, чем для двигателя с искровым зажиганием, но эмиссия оксидов азота и твердых частиц, в том числе сажи, много выше, и эта проблема постоянно находится в поле зрения научных исследований. Фундаментальные основы термодинамического дизельного цикла остаются неизменными со времен *Рудольфа Дизеля*, поэтому в современном развитии проектирования и эксплуатации дизелей предметом исследований становятся методы совершенствования рабочих процессов. На исследовании образования вредных составляющих при сгорании в дизеле отразилось расширение масштабов использования альтернативных топлив, поскольку изменилось качественное и количественное соотношение компонент в продуктах сгорания этих топлив. В связи с предстоящими моторными испытаниями биодизельного топлива (этиловых эфиров жирных кислот рапсового, соевого, кукурузного и подсолнечного масел) определилась задача исследования: выбор способов уменьшения образования оксидов азота при его сгорании. С помощью математической модели можно осуществить стратегию оптимального выбора параметров и интерпретировать причинно-следственные связи по результатам предварительных расчетов и эксперимента, понять качественное взаимовлияние параметров двигателя в целом и параметров, сопровождающих впрыск и сгорание топлива, на рабочие характеристики дизеля.

Биодизельное топливо, представляющее собой смесь химически связанных сложных эфиров жирных кислот, при сгорании способствует уменьшению в отработавших газах летучих органических соединений, углеводородов и угарного газа, компенсирует выбросы углекислого газа в силу своего растительного происхождения, в общей сложности уменьшает выброс твердых частиц, но проблему эмиссии оксидов азота, увы, не решает.

С начала 90-х годов прошлого столетия, когда в Латинской Америке, США и ЕС стали широко использовать биодизельное топливо в качестве моторного, появилось много (в основном, экспериментальных) результатов исследований, дающих противоречивые сведения о количественных показателях эмиссии оксидов азота с выхлопными газами. С годами, по мере расширения фундаментальных исследований, в том числе математического моделирования рабочих процессов дизеля, работающего на различных биодизельных топливах, противоречия не уменьшились: кто-то [1 – 4] получал увеличение эмиссии, кто-то [5, 6] – уменьшение.

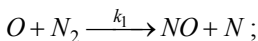
В официальном отчете агентства США по защите окружающей среды EPA за 2002 год, основанном на анализе многочисленного пакета всевозможных исследований биодизельного топлива, утверждается об увеличении эмиссии оксидов азота в среднем на 10 % для топлива B100 и на 2 % – для

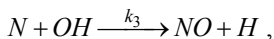
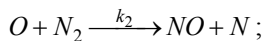
B20 и отмечается, что очень немногие исследователи констатируют ее уменьшение [7]. Положительное или отрицательное изменение эмиссии оксидов азота в каждом случае убедительно объясняется длинным списком «в зависимости от», например, от величины плотности и молекулярного веса топлива [8], повышенной кинематической вязкости, качества капель аэрозоля [9], поверхностного натяжения и плотности [10], прочих особенностей свойств биодизельного топлива в сравнении с дизельным традиционным. Показательно, что увеличение значений йодного числа от 8 до 129,5 единиц увеличивает NO_x на 29,3 %, а содержание йодного числа, плотность и цетановое число взаимозависимы. На эмиссию оксидов азота и твердых частиц (*PM*) большое влияние оказывает химическая структура биодизельного топлива. Так, *NO* увеличивается с увеличением числа двойных связей, с уменьшением длины цепи сложных эфиров полностью насыщенных жирных кислот, возможна значительная разница в формировании *NO* и *PM* сложных метиловых и этиловых эфиров с идентичным распределением жирных кислот [11].

На наш взгляд, суть противоречий объясняется разнообразием биодизельных топлив, которое связано с «родословной» каждого, набором в нем сложных эфиров, меняющимся качественно и количественно в зависимости от вида масла, способа его производства, генной модификации сырья. Как следствие, в процессе сгорания обозначаются разные значения адиабатической температуры, цетанового числа, периода индукции, температуры самовоспламенения, которые и дают отличия в качестве процесса сгорания. Несомненно также, что на формирование оксидов азота и их контроль влияют тип двигателя, испытательное и измерительное оборудование.

Методы уменьшения эмиссии оксидов азота. Численное моделирование, результаты эксперимента. Технология снижения эмиссии оксидов азота определяется механизмом их формирования в камере сгорания двигателя. В потоке отработавших газов стационарных и транспортных двигателей монооксиды *NO* и диоксиды NO_2 азота принято объединять под общим названием NO_x , включающим около 90 – 95 % монооксидов азота *NO* и до 5 % NO_2 . Последнее образование очень нестойкое, образуется уже в системе выпуска, при попадании отработавших газов в атмосферу быстро разлагается, участвуя в фотохимических реакциях. В камере сгорания *NO* формируется из молекулярного азота воздуха N_2 путем разрыва связей между атомами и происходит в трех направлениях: в соответствии с моделью Фенимора («быстрый» *NO*); по схеме Зельдовича (термический) и формирующийся через промежуточное звено N_2O . Есть еще топливный *NO*, образующийся благодаря молекулам азота в составе топлива.

Механизм Зельдовича [12], дополненный уравнением Lavoie [13] $N + OH \xrightarrow{k_{31}} NO + H$, носит название расширенного механизма Зельдовича. Этот механизм считается основным «поставщиком» *NO* при сгорании топлива, широко используется в термодинамических расчетах и включает три реакции:





где k_1, k_2, k_3 – константы скоростей прямых реакций. Скорость суммарной тепловой реакции формирования NO в упрощенном виде представима как [14]

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1(T) \cdot [O][N_2],$$

что указывает на возможность минимизации концентрации монооксидов азота NO путем уменьшения концентраций $[N_2]$ и $[O]$ или уменьшением константы скорости определяющей реакции (k_1), снижая температуру в области горения. Очевидно, что потенциальное увеличение формирования термического NO возможно и при увеличении времени пребывания горючей смеси в условиях высокой температуры.

Следовательно, любые средства, способные повлиять на эти факторы, будут влиять на процесс образования NO_x .

Анализ научных публикаций по теме и фундаментальные положения основ сгорания в поршневом двигателе [15] позволяют сделать вывод о сложившихся на настоящий момент возможных путях снижения монооксидов азота: в пред- и постпламенном вмешательстве в рабочий процесс. Предпламенный путь касается мероприятий, проводимых до начала процесса сгорания в камере сгорания, постпламенный – заключается в способах воздействия на сформировавшиеся в продуктах сгорания вредные составляющие.

Снижение может быть следствием модификации процесса сгорания, направленной, во-первых, на уменьшение пиковой температуры в камере сгорания путем реализации таких мероприятий:

- формирования богатых и бедных смесей, то есть исключением стехиометрического горения;
- охлаждения воздушного заряда;
- впрыскивания воды в зону сгорания;
- атомизации впрыска;
- увлажнения воздушного заряда водяным паром;
- рециркуляции ОГ, возможно дополнительно охлажденных;
- использования водно-топливных эмульсий;
- ступенчатого сгорания;
- использования топливных присадок, инертных газов, водорода.

Во-вторых, нацеленных на уменьшение времени пребывания горючей смеси в области пиковой температур, а именно:

- увеличение давления в системе впрыска топлива;
- смещение момента начала впрыска топлива по отношению к ВМТ и его продолжительностью;
- многостадийный впрыск топлива;
- изменение фаз газораспределения.

Постпламенное воздействие на продукты сгорания дизеля каталитическими методами представляет собой область, смежную с исследованиями процессов в ДВС, но непосредственно не является предметом наших изыска-

ний. Как правило, речь идет о катализаторах различного типа; проблемы и перспективы каталитического удаления NO_x хорошо обоснованы и изложены в работе [16].

Основная масса исследований как дизельного, так и биодизельного топлива, полученного из разного сырья, судя по анализу публикаций, для нивелирования формирования NO в основном направлена на изменение характеристик впрыскивания топлива. Изменения этих факторов связаны с решающим этапом в процессе сгорания в дизеле – периодом задержки воспламенения, то есть с изменением начала самовоспламенения, обусловленного физико-химическими свойствами топлива. Этот период можно изменять, выбирая время начала впрыска топлива или условия его осуществления [14, 15]. При сравнении дизельного и биодизельного топлив при одинаковом начале подачи топлива, то есть без изменения базовых настроек дизеля, уровень эмиссии оксидов азота регистрируется в пользу традиционного топлива, поэтому большинство исследований посвящено поиску того оптимального смещения угла начала впрыскивания топлива, который обеспечивает минимальную эмиссию. В работе [17] было установлено, что фактическая установка угла начала подачи топлива (стартовое впрыскивание) складывается из двух примерно равных составляющих, обусловленных автоматическим регулированием топливного насоса и физико-химическими свойствами биодизельного топлива.

Исследованиям стартовых изменений начала и продолжительности впрыска топлива, разделенного или ступенчатого впрыска, впрыска с увеличением давления подачи топлива или воздуха и их влияния на рабочие характеристики дизеля посвящена масса публикаций, касающихся как экспериментальных работ, так и математического моделирования рабочего процесса дизеля, работающего на традиционном топливе, беспримесном биодизельном или на различных композициях этих топлив. Приводим несколько, обозначив географию исследований [18 – 24].

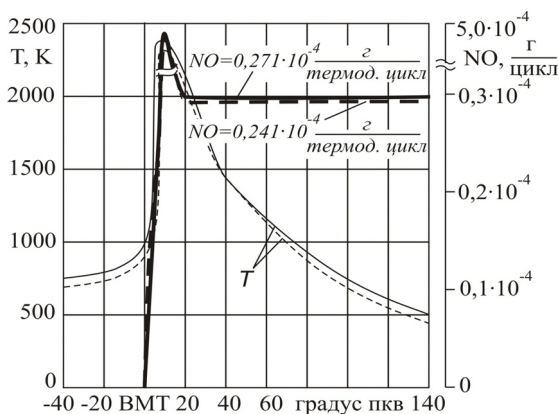
Во многих работах одновременно с выбором времени впрыскивания исследуется влияние других способов снижения эмиссии вредных компонент в ОГ. Так, охлаждение воздушного заряда на $40 - 90^\circ C$ снижает эмиссию оксидов азота на 25 % [25], водозмульсионное (на 30 %) биодизельное топливо уменьшает как эмиссию оксидов азота на 30 %, так и дымность ОГ – на 32 %, минимизируя удельный расход топлива при полной нагрузке по сравнению с работой на дизельном топливе без эмульгации [26]. 20-ти процентное биодизельное топливо (B20), полученное переэтерификацией подсолнечного масла, с 15 % рециркуляции ОГ дает 25 % уменьшение эмиссии оксидов по сравнению с беспримесным дизельным топливом при неизменном показателе дымности [27]. Уменьшать эмиссию оксидов азота может принципиально новая организация низкотемпературного сгорания (LTC) [28].

Таким образом, пути снижения эмиссии наиболее «проблемного» среди вредных составляющих ОГ – монооксида азота могут решаться различными воздействиями на рабочий процесс дизеля с необходимым поиском оптимального компромисса между уровнем эмиссии и «штрафами», а также привлечением новых методов по мере совершенствования достижений в этой области. Остановимся на, пожалуй, самом распространенном методе – изменении угла подачи топлива. Расчетные исследования влияния угла начала

подачи топлива на эмиссию NO выполнены в термодинамической структуре математической модели полного цикла дизеля [29] с двух зонной моделью сгорания. Состояние рабочей смеси в камере сгорания на каждом шаге изменения процесса представлено двумя зонами: свежего заряда (испаренное в воздухе топливо) и продуктов сгорания. В пределах каждой зоны по мере изменения текущего объема цилиндра определяются температура, состав смеси, текущие значения удельного объема и термодинамических функций смеси. Давление в цилиндре постулируется одинаковым по всему объему, состав продуктов сгорания – равновесный. Энергоперенос в системе осуществляется в форме изменения энтальпий или внутренней энергии смеси, теплового потока в стенке цилиндра каждой из зон и совершения полезной работы.

Данные о термохимических и термодинамических свойствах биодизельных топлив, необходимые для моделирования сгорания, в открытой печати представлены очень скудно, выборочно и поэтому часто выход находится во введении в расчеты свойств условного топлива или отрабатывают методологию исследований на традиционном топливе, чем воспользовались и мы. При калибровке модели [29] были использованы результаты экспериментов, полученные в лаборатории при разработке и испытаниях макетов фильтров твердых частиц.

Прогнозирование характера изменения эмиссии монооксида азота в функции угла поворота коленчатого вала осуществлялось для двух значений угла начала подачи топлива, на режиме максимального крутящего момента ($n = 1400 \text{ мин}^{-1}$), результаты представлены на рис. 1.



— начало впрыска топлива – 25 градусов до верхней мертвой точки;
 - - - - - начало впрыска топлива – 18 градусов до верхней мертвой точки

Рис. 1 – Характер изменения эмиссии монооксида азота.

Видно, что момент начала впрыска топлива, а, следовательно, и его воспламенение, влияют на пиковый уровень температуры в камере сгорания. Более позднее воспламенение, как отмечается в [15], смещает процесс горения ближе к верхней мертвой точке, вызывая существенное снижение давления, температуры и, как следствие, NO . Полученные результаты расчета

обеспечили базу для оценки эффективности способов снижения образования оксидов азота в камере сгорания дизеля в преддверии проведения экспериментальных исследований биодизельного топлива на дизеле Д21. Изменяя угол начала подачи топлива θ с определенным интервалом, для набора нескольких значений коэффициента избытка воздуха α , провели предварительный численный эксперимент и получили соответствующие зависимости среднего индикаторного давления p_i , индикаторного КПД η_i и количества оксидов азота g_{NO} за рабочий цикл дизеля (рис. 2 и рис. 3).

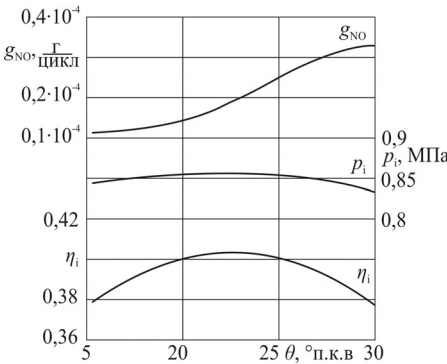


Рис. 2 – Расчетная зависимость показателей работы дизеля от угла опережения впрыскивания топлива.

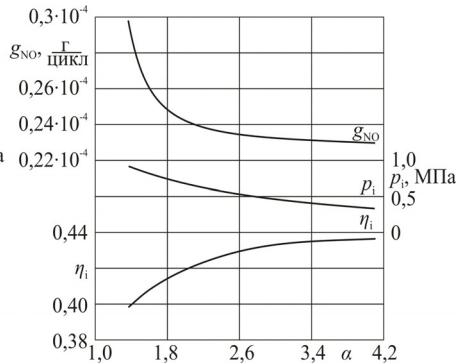
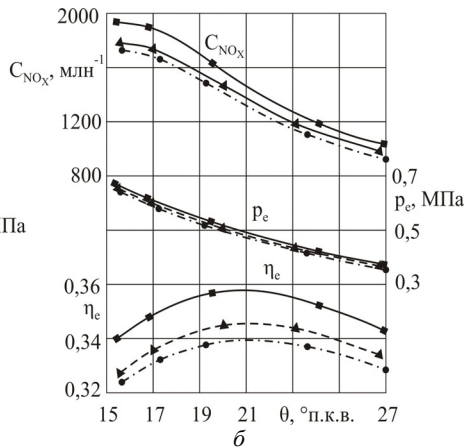
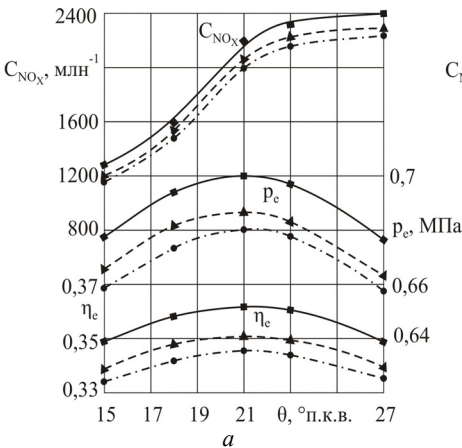


Рис. 3 – Расчетная зависимость показателей работы дизеля от коэффициента избытка воздуха.



—■— — 100 % дизельное топливо; —▲— — 40 % биотоплива;
 - - ● - - - 60 % биотоплива

Рис. 4 – Зависимость основных показателей работы дизеля Д21А на режиме $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ внешней скоростной характеристики: а – от угла опережения впрыска; б – от коэффициента избытка воздуха.

Оптимальная величина угла начала подачи топлива по критерию максимального индикаторного давления соответствует $22,5^\circ$ поворота коленчатого вала (п.к.в.). Видно, что смещение начала подачи топлива к верхней мертвой точке (ВМТ), например, на 5° п.к.в. способствует уменьшению g_{NO} на 35 % при снижении среднего индикаторного давления только на 1 %, а КПД – на $2,5\%$.

Обеднение топливовоздушной смеси с $\alpha = 1,4$ до $\alpha = 2,2$ позволяет получить уменьшение количества оксидов азота почти на 20 %. При этом среднее индикаторное давление теряет 15 % своей величины, а КПД даже возрастает на 6 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимизация эмиссии оксидов азота по двум регулировочным параметрам – коэффициенту избытка воздуха и началу подачи топлива – имеет значительный потенциал при приемлемых «штрафах» по показателям эффективности рабочего процесса. Окончательные выводы позволяют сделать результаты проведенных моторных испытаний собственно биодизельного топлива (рис. 4).

Выводы. В статье обозначены пред- и постпламенные методы уменьшения эмиссии оксидов азота с отработавшими газами дизеля. С помощью математической модели рабочих процессов дизеля проведены исследования влияния угла начала подачи топлива и коэффициента избытка воздуха на эмиссию NO и индикаторные показатели двигателя, работающего на традиционном минеральном топливе.

Характер расчетных зависимостей эмиссии NO и основных индикаторных показателей двигателя от коэффициента избытка воздуха и от угла опережения впрыска топлива идентичен характеру аналогичных зависимостей, полученных в моторном эксперименте с биодизельным топливом, что естественно, если учесть, что образование NO согласно [12] не зависит от состава топлива и пропорционально $\sqrt{[N_2] \cdot [O_2]}$.

В рамках исследования численными и экспериментальными методами других путей снижения эмиссии оксидов азота с отработавшими газами возможно рассмотрение эффективности охлаждения воздушного заряда, впрыскивания воды в зону сгорания, увлажнения воздушного заряда и рециркуляции ОГ.

Список литературы: 1. *Brakora J.* Investigation of NO_x Predictions from Biodiesel-fueled HCCI Engine Simulations Using a Reduced Kinetic Mechanism / *J. Brakora, R. Reitz* // SAE Techn. Pap. Ser. – 2010. – № 2010-01-0577. – P. 1 – 12. 2. *Hoekman S.K.* Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions / *S.K. Hoekman, C. Robbins* // Fuel Processing Technology. – 2012. – Vol. 96. – P. 237 – 249. 3. *Varatharajan K.* Mitigation of NO_x emissions from a jatropha biodiesel fuelled DI diesel engine using antioxidant additives / *K. Varatharajan, M. Cheralathan, R. Velraj* // Fuel. – 2011. – Vol. 90. – P. 2721 – 2725. 4. *Anderson L.G.* Effects of Biodiesel Fuels Use on Vehicle Emissions / *L.G. Anderson* // Journal of Sustainable Energy and Environment. – 2012. – Vol. 3. – P. 35 – 47. 5. Experimental research on the flame temperature of biodiesel fuel combustion in open-air conditions / *M. Gongping, W. Zhong, N. Peiyong, W. Xiaozhe* // Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2011. – P. 2171 – 2174. 6. Emission characteristics of a diesel engine using soyabean oil and diesel blends / *N.A. Ansari, Jitendra Kumar, Amitkumar, Dhananjay Trivedi* // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2, № 5. – P. 793 – 798. 7. A comprehend analysis

of biodiesel impacts on exhaust emissions // U.S. Environmental Protection Agency. – Boston: EPA 420-P-02-001, 2002. – 126 p. **8.** *Alptekin E.* Determination of the density and the viscosities of bio-diesel-diesel fuel blends / *E. Alptekin, M. Canakci* // Renewable Energy. – 2008. – Vol. 33. – P. 2623 – 2630. **9.** *Yuan W.* Computational investigation of the effect of biodiesel fuel properties on diesel engine NO_x emissions / *W. Yuan, A. Hansen* // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2009. – № 2. – P. 41 – 48. **10.** *Gopinath A.* Numerical modelling of oxides of nitrogen based on density of biodiesel fuels / *A. Gopinath, S. Puhani, G. Nagarajan* // International Journal of Energy and Environmental. – 2010. – Vol. 1. – P. 313 – 320. **11.** Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy-duty engine / *R.L. McCormick, M.S. Graboski, T.L. Alleman, A.M. Herring, K.S. Tyson* // Environmental Science and Technology. – 2001. – Vol. 35. – P. 1742 – 1747. **12.** *Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.И.* Окисление азота при горении. – М.: Изд. АН СССР, 1947. – 145 с. **13.** *Lavoie G.A.* Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines / *G.A. Lavoie, J.B. Heywood, I.C. Klek* // Combustion Science and Technology. 1970. – Vol. 1. – P. 313 – 326. **14.** *Варнац Ю., Маас У., Диббл П.* Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образованные загрязняющих веществ / Перевод с англ. под ред. В. Власова. – М.: Физматлит, 2003. – 351 с. **15.** *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamental / *J.B. Heywood*. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 930 p. **16.** *Садыков В.А.* Удаление оксидов азота из отходящих газов дизельных двигателей: проблемы и перспективы их решения / *В.А. Садыков и др.* // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – № 13. – С. 713 – 724. **17.** *Tat M.E.* Fuel Property Effects on Injection Timing, Ignition Timing, and Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel-Fueled Engines / *M.E. Tat, J.H. Van Gerpen, P.S. Wang* // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 1123 – 1128. **18.** Experimental study on the performance of and emissions from a low-speed light-duty diesel engine fueled with n-butanol-diesel and isobutanol-diesel blends / *Gu Xiaolei, Li Guo, Jiang Xue, Huang Zuohua, Lee Chia-fon* // Journal Automobile Engineering. – 2013. – № 227(2). – P. 261 – 271. **19.** Effect of Two-Stage Fuel Injection Parameters on NO_x Reduction Characteristics in a DI Diesel Engine / *Jeong Kyusoo, Lee Donggon, Park Sungwook, Lee Chang Sik* // Energies. – 2011. – Vol. 4. – P. 2049 – 2060. **20.** *Pandian M.* Influence of Injection Timing on Performance and Emission Characteristics of Naturally Aspirated Twin Cylinder CIDI Engine Using Bio-diesel Blend as Fuel / *M. Pandian, S.P. Sivapirakasam, M. Udayakumar* // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 1, № 5. – P. 113 – 117. **21.** *Valipour Alireza.* Experimental Combustion Analysis of Biodiesel Fuel Spray with Hot Surface Ignition / *Alireza Valipour* // International Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 1 – 14. **22.** *Meloni Roberto.* An Insight into the Effect of Advanced Injection Strategies on Pollutant Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine / *Roberto Meloni, Naso Vincenzo* // Energies. – 2013. – Vol. 6. – P. 4331 – 4351. **23.** *Gao Z.* The Effects of EGR and Splint Fuel Injection on Diesel Engine Emission / *Z. Gao, W. Schreiber* // International Journal of Automotive Technology. – 2001. – Vol. 2, № 4. – P. 123 – 133. **24.** *Wenqiao Yuan.* Computational investigation of the effect of biodiesel fuel properties on diesel engine NO_x emissions / *Yuan Wenqiao, A.C. Hansen* // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2009. – Vol. 2, № 2. – P. 41 – 48. **25.** Improving Air Quality by Using Biodiesel in Generators / *D.D. Zarling, K.L. Bickel, R.W. Waytulonis, J.R. Sweeney* // SAE Techn. Pap. – 2004. – № 2004-01-3032. – P. 1 – 8. **26.** Reduction of NO_x and Smoke Emission with the effect of Biodiesel-Water Emulsion Mixture Fuel in a Diesel Engine / *K. Sivasami, V. Selladurai, S.R. Devadasan, K. Rajan* // International Journal of Engineering and Technology. – 2013. – Vol 5, № 5. – P. 4378 – 4387. **27.** *Rajan K.* Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine with Sunflower Oil Methyl Ester / *K. Rajan, K.R. Senthilkumar* // Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2009. – Vol. 3, № 4. – P. 306 – 311. **28.** Computational Analysis of Biodiesel Combustion in a Low-Temperature Combustion Engine using Well-Defined Fuel Properties / *J.P. McCrady, V.L. Stringer, A.C. Hansen, Chia-fon F. Lee* // SAE Techn. Pap. – 2007. – № 2007-01-0617. – P. 1 – 12. **29.** *Левтеров А.М., Левтерова Л.И.* Численное моделирование рабочего цикла дизеля с непосредственным впрыском. Прогнозирование эмиссии сажи и оксидов азота // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 5. – С. 141 – 154.

Bibliography (transliterated): 1. Brakora, J., and R. Reitz. "Investigation of NO_x Predictions from

Biodiesel-fueled HCCI Engine Simulations Using a Reduced Kinetic Mechanism." *Ser.: SAE Techn. Pap.* No. 2010-01-0577. 2010. 1–12. Print. **2.** Hoekman, S. K., and C. Robbins. "Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions." *Fuel Processing Technology*. Vol. 96. 2012. 237–249. Print. **3.** Varatharajan, K., M. Cheralathan and R. Velraj. "Mitigation of NO_x emissions from a jatropha biodiesel fuelled DI diesel engine using antioxidant additives." *Fuel*. Vol. 90. 2011. 2721–2725. Print. **4.** Anderson, L. G. "Effects of Biodiesel Fuels Use on Vehicle Emissions." *Journal of Sustainable Energy and Environment*. Vol. 3. 2012. 35–47. Print. **5.** Gongping, M., et al. "Experimental research on the flame temperature of biodiesel fuel combustion in open-air conditions." *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2011. 2171–2174. Print. **6.** Ansari, N. A., et al. "Emission characteristics of a diesel engine using soyabean oil and diesel blends." *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Vol. 2. No. 5. 2013. 793–798. Print. **7.** *A comprehend analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions*. Boston: U.S. Environmental Protection Agency. EPA 420-P-02-001, 2002. Print. **8.** Alptekin, E., and M. Canakci. "Determination of the density and the viscosities of biodiesel-diesel fuel blends." *Renewable Energy*. Vol. 33. 2008. 2623–2630. Print. **9.** Yuan, W., and A. Hansen. "Computational investigation of the effect of biodiesel fuel properties on diesel engine NO_x emissions." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. No. 2. 2009. 41–48. Print. **10.** Gopinath, A., S. Puhan and G. Nagarajan. "Numerical modeling of oxides of nitrogen based on density of biodiesel fuels." *International Journal of Energy and Environmental*. Vol. 1. 2010. 313–320. Print. **11.** McCormick, R. L., et al. "Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy-duty engine." *Environmental Science and Technology*. Vol. 35. 2001. 1742–1747. Print. **12.** Zel'dovich, Ya. B., P. Ya. Sadovnikov and D. I. Frank-Kameneckij. *Okislennie azota pri gorenii*. Moscow: AN SSSR, 1947. Print. **13.** Lavoie, G. A., J. B. Heywood and I. C. Klek. "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines." *Combustion Science and Technology*. Vol. 1. 1970. 313–326. Print. **14.** Varnac, Yu., U. Maas and R. Dibbl. *Gorenje: fizicheskie i himicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryzajushchih veshhestv*. Perevod s angl. Ed. V. Vlasov. Moscow: Fizmatlit, 2003. Print. **15.** Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamental*. New York: McGraw-Hill, 1988. Print. **16.** Sadykov, V. A., et al. "Udalenie oksidov azota iz othodjashchih gazov dizelnyh dvigatelej: problemy i perspektivy ih reshenija." *Himija v interesah ustojchivogo razvitiija*. No. 13. 2005. 713–724. Print. **17.** Tat, M. E., J. H. Van Gerpen and P. S. Wang. "Fuel Property Effects on Injection Timing, Ignition Timing, and Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel-Fueled Engines." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50. No. 4. 2007. 1123–1128. Print. **18.** Gu, Xiaolei, et al. "Experimental study on the performance of and emissions from a low-speed light-duty diesel engine fueled with n-butanol-diesel and isobutanol-diesel blends." *Journal Automobile Engineering*. No. 227(2). 2013. 261–271. Print. **19.** Jeong, Kyusoo, et al. "Effect of Two-Stage Fuel Injection Parameters on NO_x Reduction Characteristics in a DI Diesel Engine." *Energies*. Vol. 4. 2011. 2049–2060. Print. **20.** Pandian, M., S. P. Sivapirakasam and M. Udayakumar. "Influence of Injection Timing on Performance and Emission Characteristics of Naturally Aspirated Twin Cylinder CIDI Engine Using Bio-diesel Blend as Fuel." *International Journal of Recent Trends in Engineering*. Vol. 1. No. 5. 2009. 113–117. Print. **21.** Valipour, Alireza. "Experimental Combustion Analysis of Biodiesel Fuel Spray with Hot Surface Ignition." *International Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 2. No. 1. 2014. 1–14. Print. **22.** Meloni, Roberto, and Naso Vincenzo. "An Insight into the Effect of Advanced Injection Strategies on Pollutant Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine." *Energies*. Vol. 6. 2013. 4331–4351. Print. **23.** Gao, Z., and W. Schreiber. "The Effects of EGR and Splint Fuel Injection on Diesel Engine Emission." *International Journal of Automotive Technology*. Vol. 2. № 4. 2001. 123–133. Print. **24.** Wenqiao, Yuan., and A. C. Hansen. "Computational investigation of the effect of biodiesel fuel properties on diesel engine NO_x emissions." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. Vol. 2. No. 2. 2009. 41–48. Print. **25.** Zarling, D. D., et al. "Improving Air Quality by Using Biodiesel in Generators." *SAE Techn. Pap.* No. 2004-01-3032. 2004. 1–8. Print. **26.** Sivasami, K., et al. "Reduction of NO_x and Smoke Emission with the effect of Biodiesel-Water Emulsion Mixture Fuel in a Diesel Engine." *International Journal of Engineering and Technology*. Vol 5. No. 5. 2013. 4378–4387. Print. **27.** Rajan, K., and K. R. Senthilkumar. "Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine with Sunflower Oil Methyl Ester." *Journal of Mechanical and Industrial Engi-*

neering. Vol. 3. № 4. 2009. 306–311. Print. **28.** McCrady, J. P., et al. "Computational Analysis of Biodiesel Combustion in a Low-Temperature Combustion Engine using Well-Defined Fuel Properties." Ser.: *SAE Techn. Pap.* No. 2007-01-0617. 2007. 1–12. Print. **29.** Levterov, A. M., and L. I. Levterova. "Chislennoe modelirovanie rabocheho cikla dizelja s neposredstvennym vpryskom. Prognozirovanie emissii sazhi i oksidov azota." *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Matematychni modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah*. No. 5 (979). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 141–154. Print.

Поступила (received) 11.05.2015

УДК 629.429.3:621.313

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

РАЦІОНАЛЬНІ ШВИДКІСНІ РЕЖИМИ РУХУ ПРИМІСЬКОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ З АСИНХРОННИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ

На поточний момент при розробці та експлуатації нових типів електропоїздів виникає питання щодо визначення їх раціональних швидкісних режимів руху. В роботі розглядається методика, що дозволяє визначити раціональну максимальну швидкість руху електропоїзду на підставі комплексного критерію ефективності. Зазначається, що для розглянутого в роботі приміського електропоїзду з тяговим електроприводом на основі асинхронного тягового двигуна збільшення максимальної швидкості руху приводить не тільки до збільшення середньої швидкості руху електропоїзда, але і до зменшення витрати енергії на 3,75%, що обумовлене роботою приводу в режимі з великим значенням ККД.

Ключові слова: електропоїзд, асинхронний тяговий електропривод, максимальна швидкість руху, оптимальні режими роботи тягового приводу, комплексний критерій ефективності.

Вступ. Серцем електрорухомого складу є *тяговий електропривод* – сукупність пристроїв, призначених для перетворення електричної енергії, яка одержується з контактної мережі, в корисну роботу з переміщення електрорухомого складу. Його ефективність визначає більшою мірою ефективність всього електропоїзда.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [1, 2] зазначається, що визначальним для режимів роботи та структури тягового електроприводу є тяговий двигун. Сучасний електрорухомий склад залізниць створюється в основному на основі асинхронного тягового приводу [1, 2]. Підвищена надійність і зниження витрат на експлуатацію, наявність стандартних технічних рішень в області напівпровідникової перетворювальної техніки привело до широкого використання приводу цього типу [1 – 4]. Застосування електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом потребує нових підходів до визначення раціональних швидкісних режимів руху порівняно з традиційними підходами, що застосовувались для електрорухомого складу з тяговими двигунами постійного струму. Як зазначено в [4, 5] керування роботою тягового приводу потрібно проводити на підставі мінімуму втрат [6 – 8], а швидкісний режим руху обирати по комплексному критерію ефективності [4].

Мета роботи. Розробити методику визначення раціональної максимальної швидкості руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими

© Б. Г. Любарський, 2015