

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436.038



ГРЕХОВ

Леонид Вадимович

доктор технических наук,
профессор



Чжао Цзяньхуэй

аспирант
кафедры

«Поршневые двигатели»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана;

e-mail:

igrekhov@power.bmsty.ru)

Методика расчета процессов в приводе управляющих клапанов топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением

Л.В. Грехов, Чжао Цзяньхуэй

Предложенный способ описания петель статического гистерезиса обладает достаточной универсальностью для различных магнитомягких сталей, удобством применения в математической модели электромагнитного привода. Учет динамического гистерезиса позволяет более корректно описывать реальный процесс работы электромагнита для топливоподающей аппаратуры. Математическая модель расчета электромагнитного привода с предложенными соотношениями допускает расчет процесса намагничивания и размагничивания, учитывает влияние магнитного гистерезиса и насыщения на работу электромагнитного привода.

Ключевые слова: топливоподающая аппаратура, двигатель внутреннего сгорания, статический, динамический гистерезис, электромагнитный привод.

Method for calculation of processes in electronically controlled pilot valves actuator of fuel-injection system of internal combustion engine

L.V. Grehov, Zhao Jianhuey

The proposed method to describe the static hysteresis loops has a good universality for analyzing different magnetically soft materials, and it can be easily used in the mathematical model of the electromagnetic actuator. The actual work of the electromagnet for the fuel-injection system can be analyzed more accurately by considering the effect of the dynamic hysteresis. An improved mathematical

model in this paper, considering the effects of magnetic hysteresis and saturation on the work of the electromagnetic actuator, is a good use for calculating the process of magnetization and demagnetization for the fuel-injection system.

Keywords: fuel-injection system, internal combustion engine, static, dynamic hysteresis, electromagnetic actuator.

В настоящее время экономические и экологические показатели являются наиболее важными при совершенствовании двигателей внутреннего сгорания. Применение и развитие топливopодающей аппаратуры с быстродействующим электромагнитным приводом позволяет осуществлять гибкое управление характеристикой впрыскивания топлива, опережением и величиной подачи топлива, и таким образом удовлетворить строгим нормам выбросов вредных веществ [1].

В статье [2] для расчета электромагнита использованы уравнения Максвелла, которые позволяют рассчитывать распределение магнитного поля внутри детали. В других работах игнорируется влияние магнитного поля в сердечнике на рабочий процесс в электромагнитном приводе [3]. В перечисленных научных работах вообще не учитывается магнитный гистерезис и насыщение, которые в значительной степени влияют на характеристику работы электромагнита. Для получения кривой намагничивания как правило используется сплайн или полином [4]. Недостатки сплайна или полинома заключаются в том, что их использование неудобно, а для описания необходима эмпирическая информация, которую не найти в справочной литературе. Кроме того, формулы в виде сплайна и многочленного полинома нельзя применять ввиду отсутствия в справочной литературе необходимых экспериментальных данных по магнитомягким материалам.

В работе [5] для описания кривых намагничивания предлагается аппроксимирующая формула в виде гиперболического тангенса. Однако подбором единственного коэффициента не удастся добиться хорошего совпадения аппроксимирующей кривой с экспериментальными данными.

Аппроксимирующая формула статического магнитного гистерезиса должна отвечать следующим требованиям: достаточной универ-

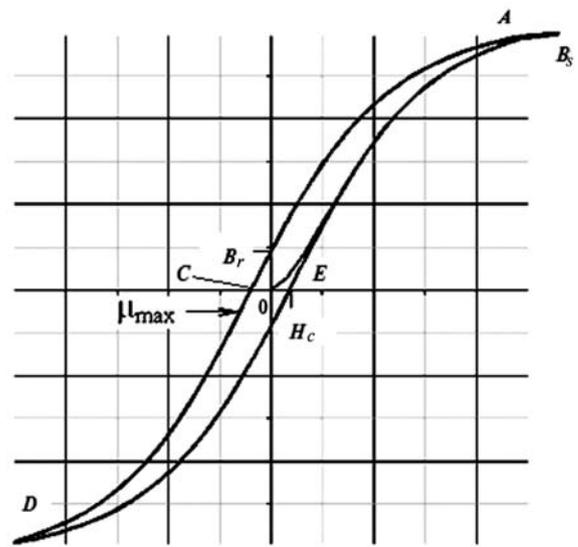


Рис. 1. Типовая петля статического гистерезиса материалов:

O—A: кривая намагничивания; A—C—D—E—A: петля статического гистерезиса

сальностью для различных магнитомягких материалов; возможностью явного вида при прямом и обратном счете; возможностью использования при определении коэффициентов по известным справочным изданиям. Из большого числа исследованных форм аппроксимирующих зависимостей для описания кривых намагничивания (рис. 1) в соответствии с перечисленными требованиями выбрана аппроксимирующая формула следующего вида:

$$B = \frac{1}{a} \lg^C \left[\frac{H}{H_c} + 1 \right]. \quad (1)$$

где B — магнитная индукция в магнитопроводе, Тл; H — магнитная напряженность в магнитопроводе, А/м; H_c — коэрцитивная сила, А/м; a и C — коэффициенты уравнения.

Тогда для характерных участков петли гистерезиса статический гистерезис описывается формулой

$$B = \begin{cases} \frac{1}{a} \lg^C \left[\frac{H}{H_c} + 2 \right] & \text{для } A - C; \\ -\frac{1}{a} \lg^C \left[-\frac{H}{H_c} \right] & \text{для } C - D; \\ -\frac{1}{a} \lg^C \left[-\frac{H}{H_c} + 2 \right] & \text{для } D - t; \\ \frac{1}{a} \lg^C \left[\frac{H}{H_c} \right] & \text{для } t - A. \end{cases} \quad (2)$$

Если имеются справочные данные $B_m(H_m)$, H_c , B_r , то коэффициенты C и a рассчитывают по формулам

$$C = \frac{\lg(B_m/B_r)}{\lg\left[\frac{\lg(H_m/H_c + 2)}{\lg 2}\right]}; \quad (3)$$

$$a = \frac{\lg^C(H_m/H_c)}{B_m}. \quad (4)$$

где B_m — магнитная индукция насыщения, Тл; H_m — магнитная напряженность, соответствующая B_m , Тл; B_r — остаточная магнитная индукция, Тл.

Если имеются данные о материале $B_m(H_m)$, H_c , μ_{\max} , то по кривой намагничивания определяют

$$B_m = \frac{1}{a} \lg^C\left(\frac{H_m}{H_c}\right). \quad (5)$$

Если оценивать вблизи уровня $B \leftarrow 0$, то для кривых намагничивания и размагничивания в малых ΔH ($\Delta H = 0,25 H_c$) имеем

$$\mu_{\max} = \frac{dB}{dH} \approx \frac{B}{\Delta H} = \frac{1}{a} \lg^C\left(\frac{\Delta H}{H_c}\right). \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) находим C и a :

$$C = \frac{\lg\left(\frac{B_m}{\mu_{\max} \Delta H}\right)}{\lg\left[\frac{\lg(H_m/H_c)}{\lg\left(\frac{\Delta H}{H_c}\right)}\right]}; \quad (7)$$

$$a = \frac{(\lg(H_m/H_c))^C}{B_m}, \quad (8)$$

где μ_{\max} — максимальная магнитная проницаемость, Гн/м; ΔH — искусственная малая величина ($\Delta H \approx 0,25 H_c$), А/м; B_r , H_m , H_c , B_m , μ_{\max} — характеризующие параметры магнитного материала, которые в обычном случае описаны в справочниках.

На рисунках 2 и 3 проиллюстрировано, что расчет по предложенной формуле дает удовлетворяющее совпадение с экспериментальными данными.

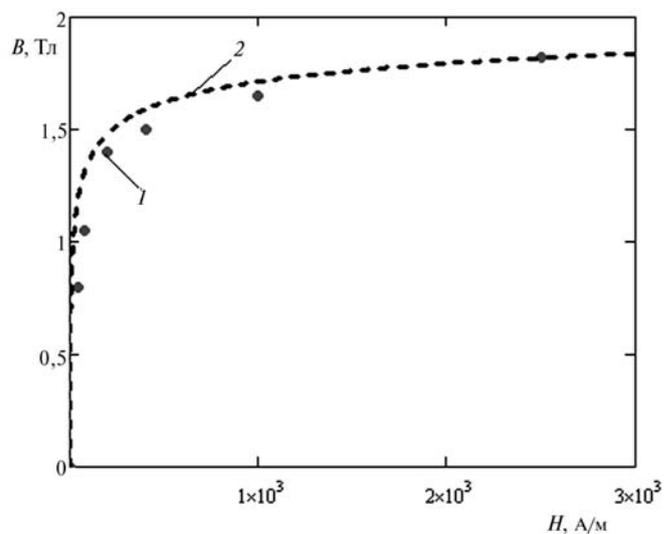


Рис. 2. Зависимость индукции B от напряженности H для стали 3423:

1 — экспериментальные данные [6]; 2 — расчет по формуле (1)

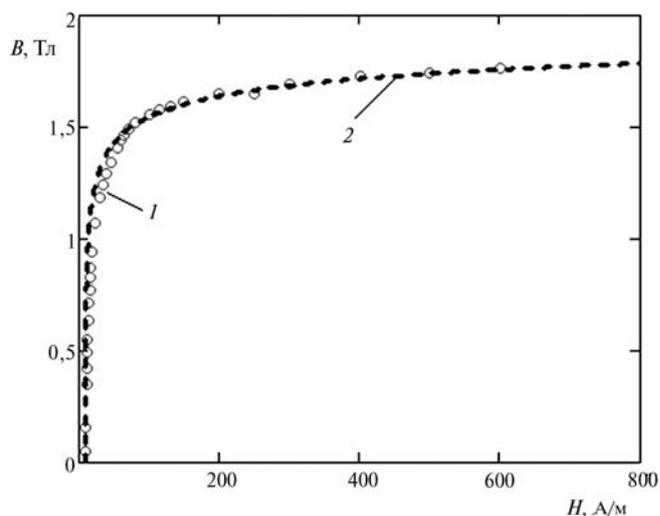


Рис. 3. Зависимость индукции B от напряженности H для стали 3414:

1 — экспериментальные данные [7];
2 — расчет по формуле (2)

Два варианта заданных справочных величин по каждому материалу могут быть приняты для нахождения коэффициентов C и a : при известных $B_m(H_m)$, H_c , B_r — формулы (3) и (4), при заданных $B_m(H_m)$, H_c , μ_{\max} используются формулы (7) и (8).

Динамический гистерезис отличается от статического гистерезиса наличием эффектов, возникающих при быстром перемагничивании. Если скорость изменения намагничивания настолько мала, что не оказывает влияния на ход

кривых намагничивания, процесс намагничивания считается статическим. Динамический гистерезис учитывает влияние на процесс намагничивания и потерь с магнитной вязкостью и с вихревыми токами. Простое и адекватное полуэмпирическое описание важнейших нестационарных эффектов при перемагничивании дает А.И. Кадочников [7, 8]:

$$H(t) = H_{ст}(B) + \frac{1}{r} \exp\left(\alpha \frac{B^2}{B_m^2}\right) \frac{dB}{dt} + \frac{1}{3} \gamma_{ег} \delta^2 \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

Здесь $H_{ст}(B)$ — статический гистерезис; δ — половина толщины ленты, мм; $\gamma_{ег}$ — эквивалентная удельная электропроводность магнитного материала, 1/(Ом·м); r — коэффициент магнитной вязкости, характеризующий процесс динамического взаимодействия стенок доменов с препятствиями при перемагничивании, Гц; α — параметр в уравнении магнитной вязкости, зависящий от состава материала и его технологии изготовления. Соответствующая математическая модель расчета электромагнита описана в статье [9]. С учетом динамического гистерезиса она встроена в программу «Впрыск» для расчета топливоподачи в двигателях внутреннего сгорания, описывающую комплекс актуальных гидравлических, тепловых, механических и электромагнитных процессов [10].

На рисунках 4 и 5 представлены схема электромагнитного привода и диаграмма управления напряжением питания для исследования. В качестве материала сердечника выбрана

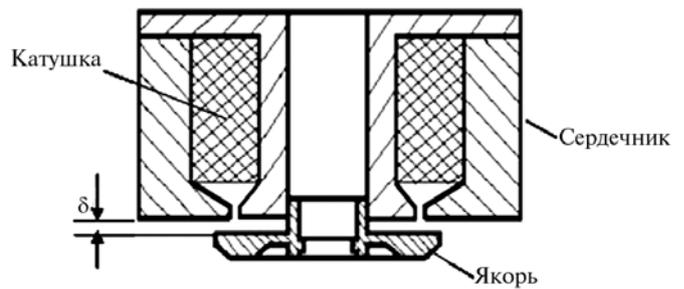


Рис. 4. Схематизация электромагнита:
δ — рабочий зазор

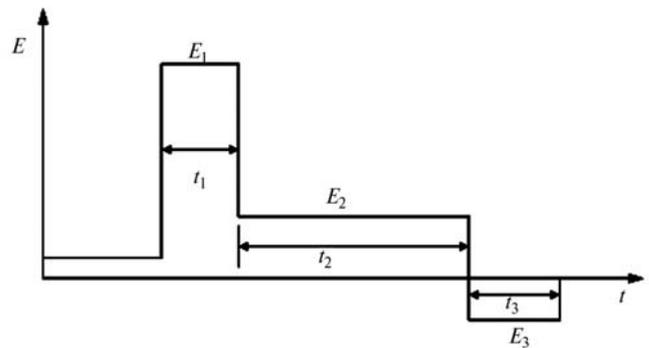


Рис. 5. Диаграмма управления напряжением питания

электротехническая Сталь 3414. Из расчетов нестационарного процесса топливоподачи с электромагнитным приводом обнаружено, что полученная зависимость индукции от напряженности по статическому и динамическому гистерезису заметно отличаются (рис. 6, 7). Это доказывает, что гистерезисные явления в быстропротекающем процессе срабатывания управляющих клапанов с эквивалентной частотой порядка 1 кГц, обусловлены не столько свойствами петли статического гистерезиса (свойствами материала), сколько специфичным нестационарным электромагнитным процес-

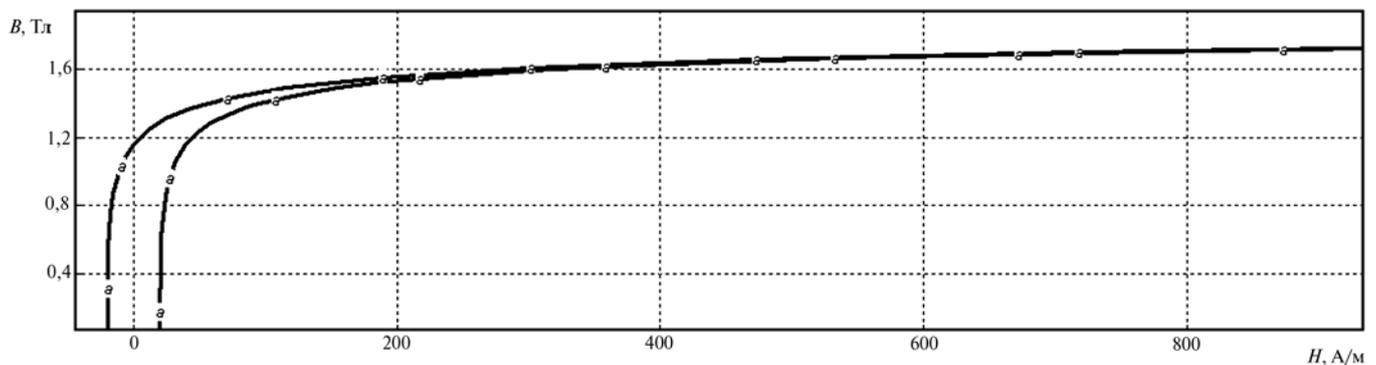


Рис. 6. Индукция в функции напряженности по статическому гистерезису

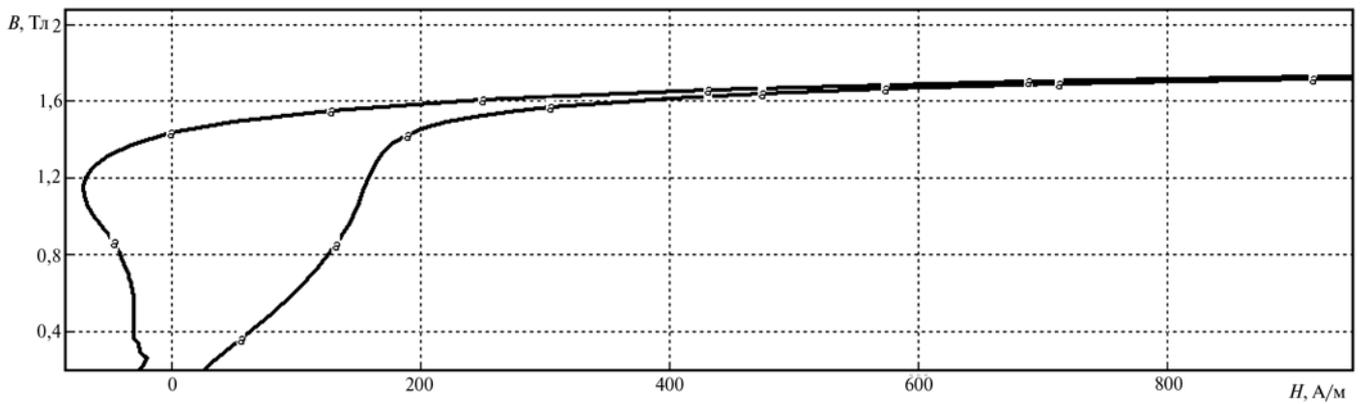


Рис. 7. Зависимость индукции от напряженности по динамическому гистерезису

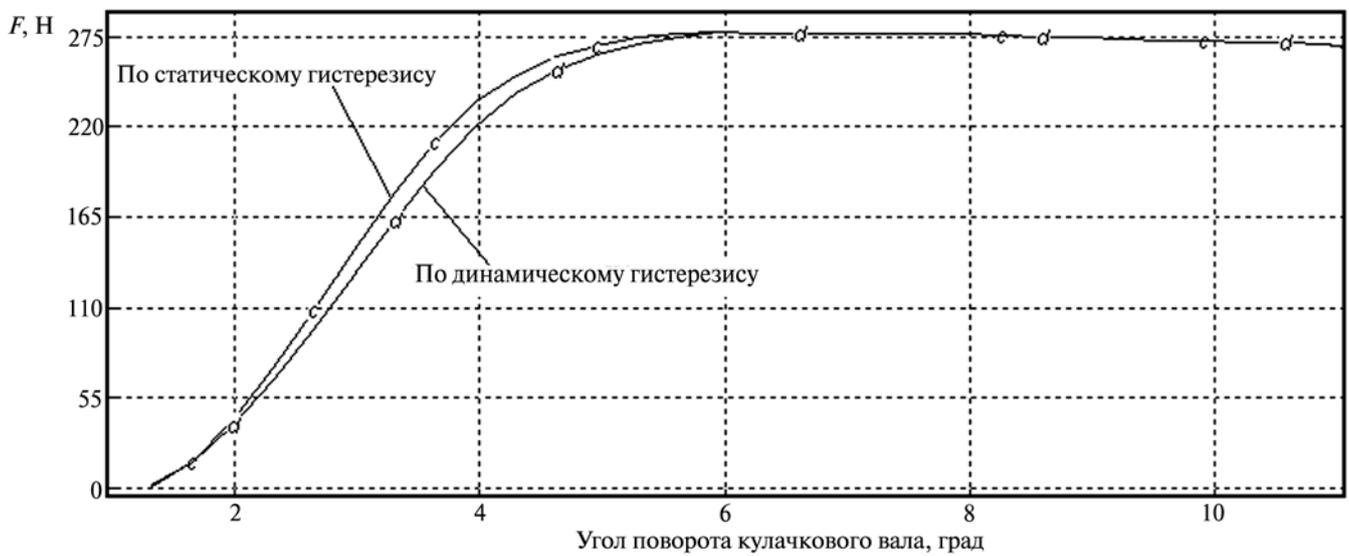


Рис. 8. Зависимость хода клапана от времени в процессе работы ЭМП в составе ТПА быстроходного дизеля

сом. К сожалению, при использовании нешлифованных сердечников значение этого еще более существенно из-за развития вихревых токов.

На рисунках 8 и 9 иллюстрируется, что с учетом динамического гистерезиса в своем начале процесс развивается по-иному.

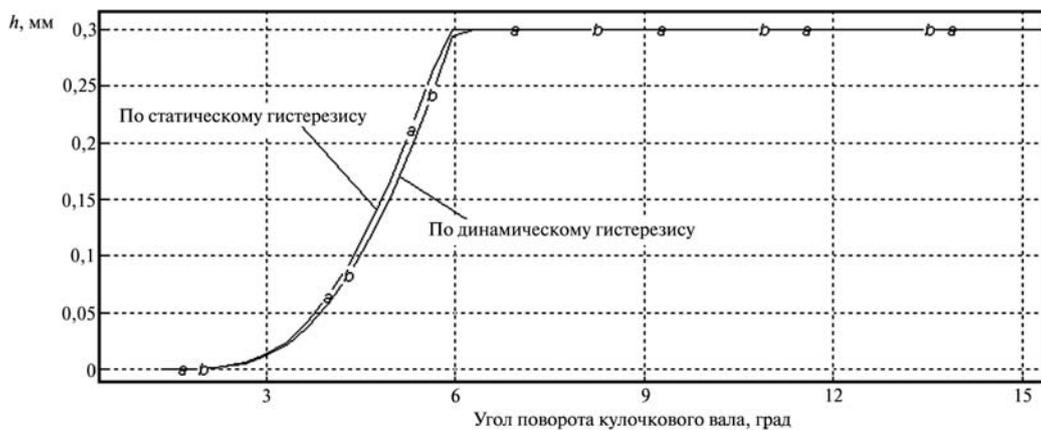


Рис. 9. Зависимость электромагнитной силы от времени процесса

В зависимости от сочетания действующих факторов предвидеть конечный результат трудно, в этом случае может быть полезной расчетная оптимизация процесса топливоподачи как сопряженной задачи о гидравлических механических электромагнитных процессах с использованием описанной методики.

Вывод

Предложенная формула описания петель статического гистерезиса обладает достаточной универсальностью для различных магнитомягких материалов, удобством использования при прямом и обратном счете, допускает определение только с помощью трех известных справочных характеристик статического гистерезиса.

В условиях топливоподающей аппаратуры с электромагнитным приводом, для быстрого двигателя игнорирование влияния динамического гистерезиса на процесс работы электромагнита оказывается не корректным.

Литература

1. Иващенко Н.А., Вагнер В.А., Грехов Л.В. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей. Барнаул-Москва: АлГТУ, 2002. 165 с.
2. Zhang X., Hao L., Gao L. Development of an e-type actuator for enhancing high-speed electro-pneumatic ejector valve performance // Journal of Zhengjiang University SCIENCE A-2008, 9. N 11. P. 1522—1559.

3. Wang G., Lu C., Lu J. Calculation for High speed electromagnet property of electronic-controlled fuel injection system of diesel engine // Vehicle Engine. 2003. N 5. P. 26—29.

4. Кадочников А.И., Хан Е. Б., Лобанова Н.Б. Нестандартный сплайн для аппроксимации кривых намагничивания и перемагничивания // Дефектоскопия. 1992. № 11. С. 75—81.

5. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Бовда А.М. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС // Автомобильный транспорт (Харьков, ХНАДУ). 2006. № 19. С. 138—143.

6. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1976, 334 с.

7. Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса. Екатеринбург. 2007. 283 с.

8. Кадочников А.И. Динамическое перемагничивание магнитопроводов из электротехнической стали под воздействием напряжения различной формы // Электричество. 2003. № 9. С. 62—66.

9. Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Математическая модель электромагнитного процесса в быстродействующем приводе клапанов топливных систем двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана (энергетическое и транспортное машиностроение). 2011. С. 89—96.

10. Грехов Л.В., Кулешов А.С., Фадеев Ю.М., Кулешов А.А. Программный комплекс ВПРЫСК четвертого поколения // Сб. науч. тр. межд. конф. Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана // Под ред. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. С. 319—322.

Статья поступила в редакцию 29.03.2012