

УДК 621.771.05

Пушкин А.А. (ДГМА, г. Краматорск), Тимошенко А.В. (ООО «Крампромэкспорт», г. Краматорск), Колесникова Г.В. (ДГМА, г. Краматорск)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ И СТРОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

На основі дослідження електромеханічної взаємодії електричної і механічної підсистем у складі повної електромеханічної системи запропонована методика удосконалювання приводів прокатних станів з метою підвищення їхньої надійності і строго виконання ними технологічного процесу.

На основе исследования электромеханического взаимодействия электрической и механической подсистем в составе полной электромеханической системы предложена методика совершенствования приводов прокатных станов с целью повышения их надежности и строго выполнения ими технологического процесса.

On the basis of research of electromechanical interaction of electric and mechanical subsystems in structure of full electromechanical system the technique of perfection of drives of rolling mills is offered with the purpose of increase of their reliability and is strict performance of technological process by them.

Введение. В условиях переходной экономики, изменения и перераспределения ресурсов, в Украине приоритетными являются направления развития базовых отраслей промышленности, одной из которых является металлургия. После системного кризиса экономики и развала бывшего союза металлургическая промышленность продолжает сохранять необходимый уровень производства конкурентоспособной продукции и по данным ИЧМ НАНУ дает ежегодно около 25 % валового национального продукта, обеспечивая в условиях ограниченности инвестиционных средств до 40 % валютных поступлений. Главным направлением совершенствования прокатного производства предполагается внедрение новых энергосберегающих технологий [1], создание, реконструкция и модернизация оборудования, совершенствование режимов его работы. Одним из элементов прокатных станов который требует системного анализа и совершенствования является электропривод. Первостепенное значение приобретает исследование динамики замкнутых систем регулирования координат электропривода прокатного стана, возникает необходимость более полного учета упругих элементов, зазоров, люфтов ~~Встанових елементах передачі значительного количества упругих элементов приводит к тому, что динамические нагрузки в несколько раз превышают номинальные, в некоторых случаях они в 5 - 8 раз превышают статические нагрузки, необходимые для реализации технологической операции [3-5]. Под их действием происходит разрушение элементов каркаса сооружения, элементов электромеханической системы (ЭМС) [2], коммуникаций, прилегающих или проходящих в зоне работы прокатного оборудования, повышенный нагрев в двигателе и управляемом преобразователе [3, 6]. Наличие упругих механических звеньев отрицательно сказывается на качестве металлопроката [7], сроке службы электрического и механического оборудования прокатного производства [2, 8], его надежности и безотказности [9], показате-~~

лях качества регулирования приводов [7, 10]. Подавление упругих колебаний, возникающих в электроприводах прокатных станов при пуске и ударных нагрузках, существенно увеличит срок службы передаточных устройств (муфт, шпинделей, редукторов), вызовет снижение динамических нагрузок, что приведет к уменьшению потребления энергии, а также уменьшит тепловые нагрузки двигателя и преобразователя.

Цель работы. Определение параметров систем управления приводами прокатных станов, с целью максимального подавления упругих механических колебаний, снижение динамических нагрузок и повышения надежности электроприводов.

Обобщенное временное состояние вопроса. Данному направлению посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных авторов. В работах [11-12] проанализирован вариант применения, в приводах машин и агрегатов, механических демпфирующих устройств, которые, как правило: сложны в изготовлении; требуют очень тщательного ухода в процессе эксплуатации; довольно усложнен процесс их наладки; дают дополнительные потери энергии, учет которой очень важен, в связи с резким её удорожанием. Из-за ряда недостатков данных методов наиболее широкое распространение получил электротехнический способ демпфирования упругих колебаний, использование которого позволяет легко автоматизировать любую электромеханическую систему прокатного стана с целью уменьшения динамических нагрузок. Электропривод, при электромеханическом взаимодействии, способствует отводу энергии механических колебаний из механической части и синхронному её рассеиванию на диссипативных элементах (активных сопротивлениях) или возвращению в сеть электрической частью. Упругие механические колебания в механической подсистеме при убывании энергии с течением времени затухают – в этом и заключается эффект демпфирующей способности электропривода [2, 13-14].

Материалы исследований. Для исследования электромеханического взаимодействия составим структурную схему двухмассовой ЭМС прокатного стана (рис. 1).

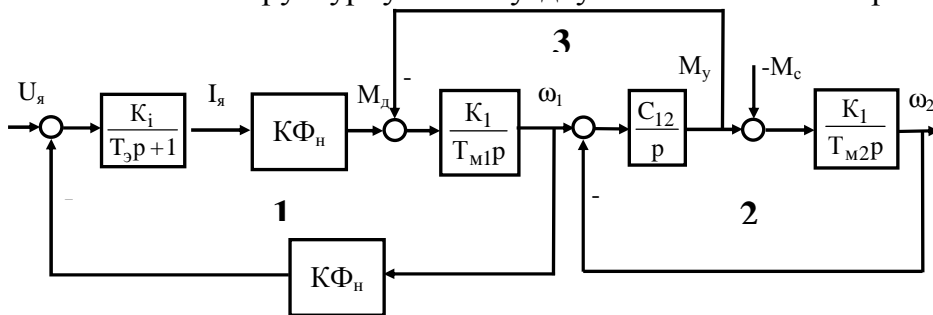


Рис.1 – Обобщенная структурная схема двухмассовой ЭМС прокатного стана

В схеме приняты следующие обозначения: ω_1, ω_2 – угловая скорость двигателя и механизма; $U_я$ – напряжения на зажимах обмотки якоря; $M_д$ – момент развиваемый двигателем; $M_у$ – момент упругих сил; M_c – момент статического сопротивления; $I_я$ – ток якорной цепи двигателя; $T_{м2}$ – электромеханическая постоянная времени прокатного стана; C_{12} – приведенный коэффициент жесткости; $K_i=1/R_{яц}$ – коэффициент передачи якорной цепи, $R_{яц}$ – суммарное сопротивление якорной цепи.

Динамические свойства электропривода определяются характеристическим уравнением полной ЭМС, которое имеет вид:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_{м1} T_э}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_{м1}}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma(1 + T_{м1} T_э \Omega_{12}^2)}{\Omega_{12}^2} p^2 + \gamma T_{м1} p + 1 = 0, \quad (1)$$

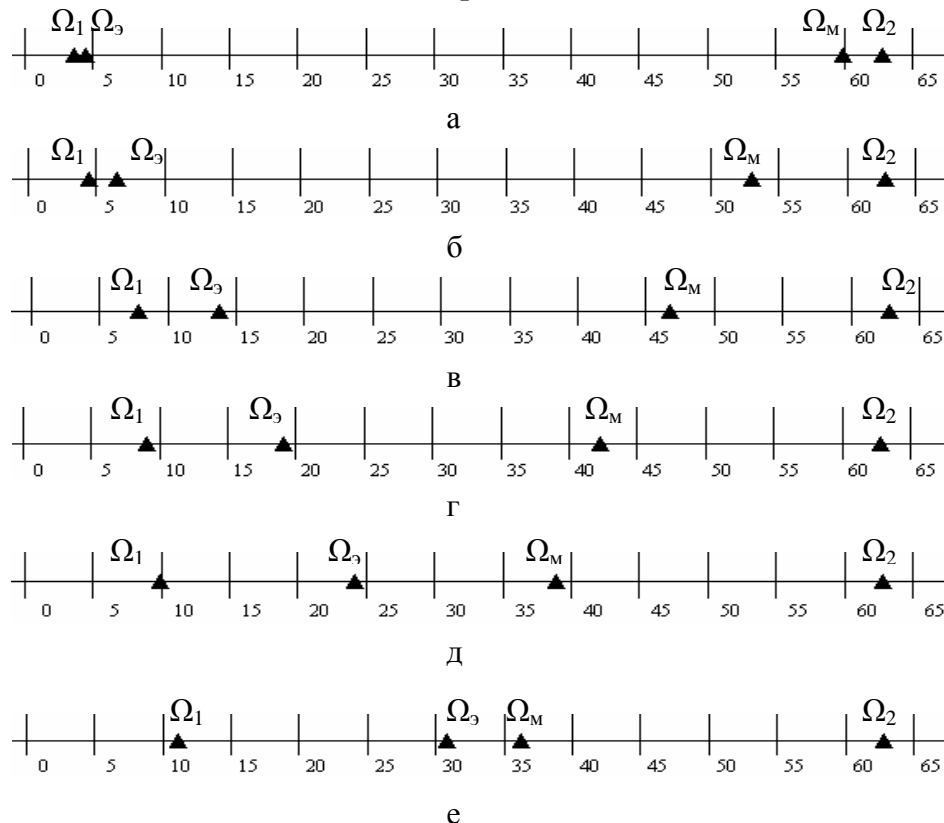
где T_3 – электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя; $T_{м1}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя; γ – коэффициент распределения инерционных масс; Ω_{12} – частота свободных колебаний двухмассовой ЭМС.

По виду корней характеристического уравнения определяется характер переходных процессов, качество системы регулирования с точки зрения быстродействия, демпфирующей способности. Для анализа демпфирующей способности электропривода при электромеханическом взаимодействии процессов на основании теории колебаний [15] представим полную ЭМС прокатного стана в виде двух отдельных парциальных подсистем: электрической (ЭП) и механической (МП) (2), частоты которых определяются из соотношений (3).

$$Q_{эп}(p) = T_{м1}T_3p^2 + T_{м1}p + 1 = 0, \quad Q_{мп}(p) = \gamma/\Omega_{12}^2p^2 + 1 = 0. \quad (2)$$

$$\Omega_3 = \sqrt{1/T_{м1}T_3}, \quad \Omega_м = \Omega_{12}/\sqrt{\gamma}. \quad (3)$$

На основе представленного способа разделения полной ЭМС прокатного стана на отдельные мы получили возможность установить связь между свойствами полной ЭМС и свойствами составляющих ее отдельных частей, а именно механической и электрической. Исходя из структурной схемы, представленной на рис. 1, можно сказать, что парциальные подсистемы образуются контурами 1 (электрическая) и 2 (механическая), а связь между ними осуществляется через контур 3. Решающее влияние, на степень взаимодействия, оказывает близость отдельных парциальных частот: Ω_3 и $\Omega_м$ (Рис. 2).



а – $\gamma=1,1$; б – $\gamma=1,4$; в – $\gamma=1,8$; г – $\gamma=2,2$; д – $\gamma=2,6$; е – $\gamma=3,0$

Рис.2 – Расположение частот полной ЭМС привода при различных значениях γ

Максимальное электромеханическое взаимодействие с минимальными динамическими нагрузками на привод прокатного стана достигается при соблюдении условия: $\Omega_3=\Omega_м$. Стандартные параметры двухмассовых ЭМС прокатных станом не удовле-

творяют условиям максимального электромеханического взаимодействия с предельной близостью парциальных частот. Данное утверждение подтвердим на примере ЭМС прокатного стана с такими параметрами: $T_3=0,0175c$; $T_{M1}=0,0373$; $\gamma=1,5$; $\Omega_{12}=62,8c^{-1}$.

Произведем расчет на электронно-вычислительной машины (ЭВМ) корней характеристических уравнений (1, 2) в среде пакета прикладных программ MathCAD с помощью функции polyroots (V), где V – вектор-столбец коэффициентов полинома:

$$\text{polyroots} \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma \cdot T_{M1} \\ \frac{\gamma \cdot (1 + T_{M1} \cdot T_e \cdot \Omega_{12}^2)}{\Omega_{12}^2} \\ \frac{\gamma \cdot T_{M1}}{\Omega_{12}^2} \\ \frac{\gamma \cdot T_{M1} \cdot T_e}{\Omega_{12}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -25,905 - 16,618i \\ -25,905 + 16,618i \\ -2,666 - 65,155i \\ -2,666 + 65,155i \end{pmatrix}$$

$$\text{polyroots} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -51,276i \\ 51,276i \end{pmatrix}$$

$$\text{polyroots} \begin{pmatrix} 1 \\ T_{M1} \\ T_{M1} \cdot T_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -28,571 - 26,752i \\ -28,571 + 26,752i \end{pmatrix}$$

Установим значения частот: $\Omega_3=26,75c^{-1}$; $\Omega_M=51,27c^{-1}$; $\Omega_1=16,618c^{-1}$; $\Omega_2=65,15c^{-1}$.

Как мы видим достигается слабое электромеханическое взаимодействие парциальных ЭП и МП, частоты электрической и механической подсистем значительно разнятся между собой, как следствие упругие механические колебания слабо демпфируются. На основании этого предложим методику определения оптимальных параметров двухмассовой ЭМС прокатных станом с целью ограничения пиковых нагрузок на привод. Связь процессов, протекающих в электрической и механической подсистемах в составе полной ЭМС, характеризуется коэффициентом электромеханического взаимодействия [13], который для данной двухмассовой ЭМС можно представить как:

$$K_B = \Omega_{12}^2 / \Omega_3^2 = T_{M1} T_3 \Omega_{12}^2. \quad (4)$$

Предельное подавление упругих механических колебаний, возникающих в электроприводе в процессе его работы, достигается при электромеханическом взаимодействии и полной идентичности колебаний в электрической и механической подсистемах клетки. На основании работ [10, 13] можно определить оптимальные коэффициенты электромеханического взаимодействия и демпфирования соответственно:

$$K_B^{opt} = 1/\gamma; \xi_d^{opt} = \sqrt{(\gamma-1)/\gamma} \quad (5)$$

Установим значения важных показателей: колебательности и частот ЭП и МП:

$$\mu = |\Omega_p / \alpha|, \mu^{opt} = \sqrt{(5-\gamma)/(\gamma-1)}, \Omega_{ЭП} = \Omega_{МП} = \Omega_p = (\sqrt{5-\gamma} \Omega_{12}) / 2 \quad (6)$$

На рис. 3-4 приводится графическая интерпретация результатов анализа процессов электромеханического взаимодействия, подтверждаются соотношения (6).

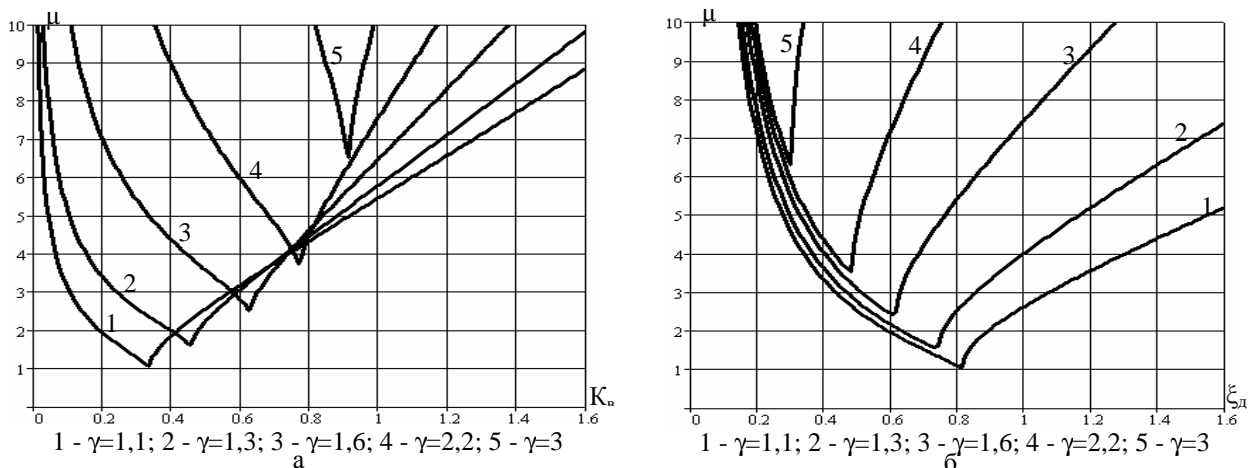


Рис.3 – Графики зависимостей колебательности от обобщенных параметров

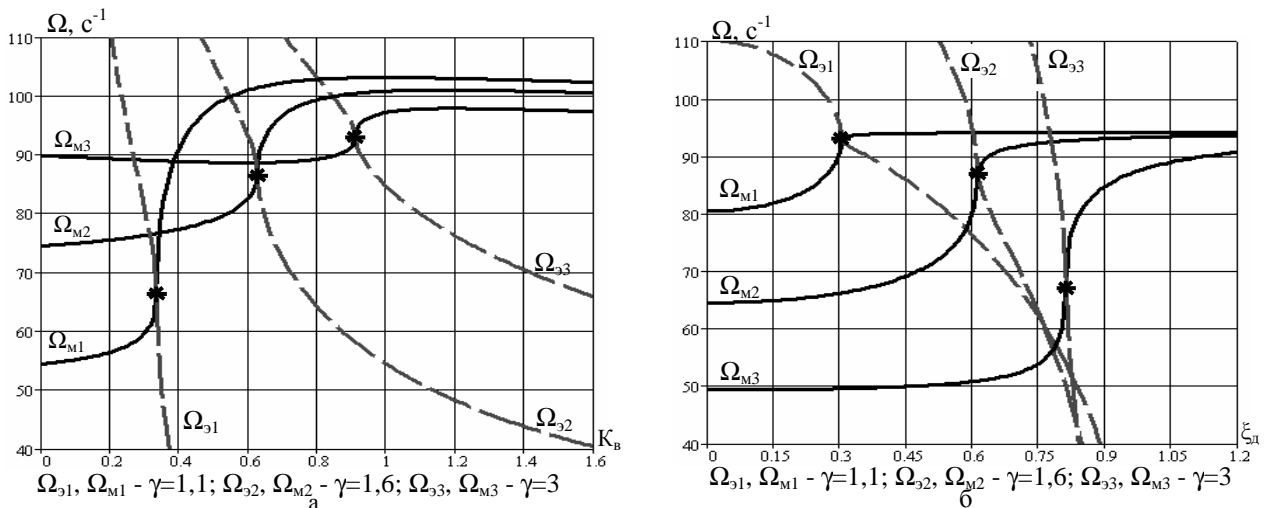


Рис.4 – Графики зависимостей частот ЭМС от обобщенных параметров

Перейдем от обобщенных показателей электромеханического взаимодействия (5) к оптимальным постоянным времени приводов прокатных станов:

$$T_3^{opt} = \sqrt{K_B^{opt}} / 2\xi_d^{opt} \Omega_{12} = 1/2\sqrt{\gamma-1}\Omega_{12}, \quad T_{M1}^{opt} = 2\sqrt{K_B^{opt}} \xi_d^{opt} T_y = 2\sqrt{\gamma-1}/\gamma\Omega_{12} \quad (7)$$

Зависимости (7) представляют собой обобщенные требования к конструкции упругой механической передачи стана с минимальной колебательностью и учетом взаимосвязи электрических, механических и технологических параметров. Подтвердим соотношения (7) расчетом корней характеристического уравнения (1) и построением графика переходного процесса в среде пакета прикладных программ MathCAD:

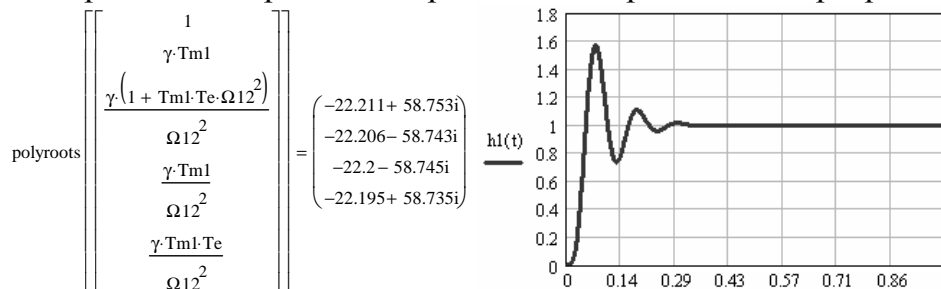


Рис.5 – Расчет двухмассовой ЭМС прокатного стана в среде MathCAD

Как мы видим, полученные корни являются комплексно-сопряженными кратными, т.е. в электромеханической системе прокатного стана достигается максимальное электромеханическое взаимодействие с предельным демпфированием упругих механических колебаний и минимальной длительностью переходного процесса.

Выводы. На основе применения данной методики сделаем выводы:

- осуществляется предельное демпфирование упругих механических колебаний, снижаются колебания в МП и ЭП привода; уменьшается амплитуда динамических нагрузок на привод в 1,9-2,4 раза; уменьшение динамических нагрузок приводит к сокращению простоев в металлургических цехах из-за отказа механической части;
- снижаются усталостные разрушения элементов механических передач (муфт, шкивов) возникающие из-за колебательного характера динамических нагрузок;
- значительно снижаются тепловые нагрузки на двигатель и управляемый преобразователь прокатного стана, повышается производительность оборудования;

– увеличивается срок службы механического и электрического оборудования прокатных станков, снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций, резонансных режимов, перегрузок; обеспечивается непрерывность процесса прокатки, повышаются технико-экономические показатели производства;

– происходит снижение частоты колебаний в электромеханической системе, что, несомненно, положительно влияет на ресурс и надежность элементов приводов;

– ликвидируется возможность возникновения рассогласований в характере движения прокатного стана и вала электродвигателя, т.е. нарушения режима работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сацкий В.А., Тилик В.Т., Штехно О.Н. и др. Энергосберегающая технология горячей прокатки полос на стане 1680 // *Сталь*. – 1998. – №8 – С.38-42.
2. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. – К.: Изд-во АН УССР, 1961. – 160с.
3. Большаков В.И. Исследование динамических нагрузок металлургических машин // *Захист металургійних машин від поломок – Маріуполь, 1999-Вип.4*. – С.6-14.
4. Hiersig H. M. Überlastungsschutz bei Antrieben im unteren Leistungsbereich // *Antriebetechnik*. – 28, - №2. – S.59-64.
5. Веренев В.В., Большаков В.И., Белобров Ю.Н., Бобух И.А. Уменьшение динамических нагрузок в приводе широкополосных станков // *Сталь*.-1999. №1.-С.35-38.
6. Мюллер В.О. Обзор повреждений в приводах прокатных станков // *Черные металлы*. – 1981. – №25-26. – С.9-14.
7. Тимошенко А.В., Пушкин А.А., Колесникова Г.В. Исследование динамических режимов приводов рабочих клетей прокатных станков // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*. – Краматорськ: ДДМА. – 2008. – С.340-344.
8. Гребеник В.М., Цапко В.К., Толстиков Г.И. и др. Контролирование нагрузок и оценка сроков службы деталей металлургического оборудования // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 1981. – №2. С.44-46.
9. Артюх В.С. Снижение динамичности и аварийности прокатного оборудования // *Сталь*. – 1974. – №1. – С.85-87.
10. Пушкин А.А., Тимошенко А.В. Оптимизация параметров электроприводов прокатных станков с целью улучшения качества динамических процессов // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Випуск 3 (56). – Том 1. – Дніпропетровськ. – 2008. – С.33-38.
11. Смирнов В.В. Механика привода прокатных станков/ В.В. Смирнов, Р.А. Яковлев. – М.: Металлургия, 1977. – 216с.
12. Иванченко Ф.К. Исследование динамических нагрузок в линии рабочих клетей непрерывного прокатного стана с учетом жесткости деталей привода и упругой связи между клетями // *Изв. Вузов. Черн. Металлургия*. – 1969. – №2. – С.164-173.
13. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний. – *Изв.вузов. Электромеханика*. – 1984. – №5. – С.92-98.
14. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М: Энергия, 1971. – 320с.
15. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1964. – 440с.