

И.Н. Радимов, канд. техн. наук,
В.В. Рымша, д-р техн. наук,
Чан Тхи Тху Хыонг, З.П. Процина

Выполнен поиск геометрических соотношений активной зоны вентильного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающих минимизацию величины реактивного момента.

Виконано пошук геометричних співвідношень активної зони вентильного двигуна з постійними магнітами, які забезпечують мінімізацію величини реактивного моменту.

The search of the geometrical ratio of the active zone of the brushless DC motor, which are provide the minimization of the cogging torque.

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ) на сегодняшний день находят самое широкое применение в системах автоматизации технологических процессов [1,2]. Это связано с доступностью высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ) и развитием полупроводниковой техники. При серийном производстве ВДПМ на первый план выходит упрощение технологии их изготовления и, следовательно, снижение себестоимости производства. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является применение в ВДПМ явнополюсного статора с сосредоточенными катушками его обмотки (рис. 1).

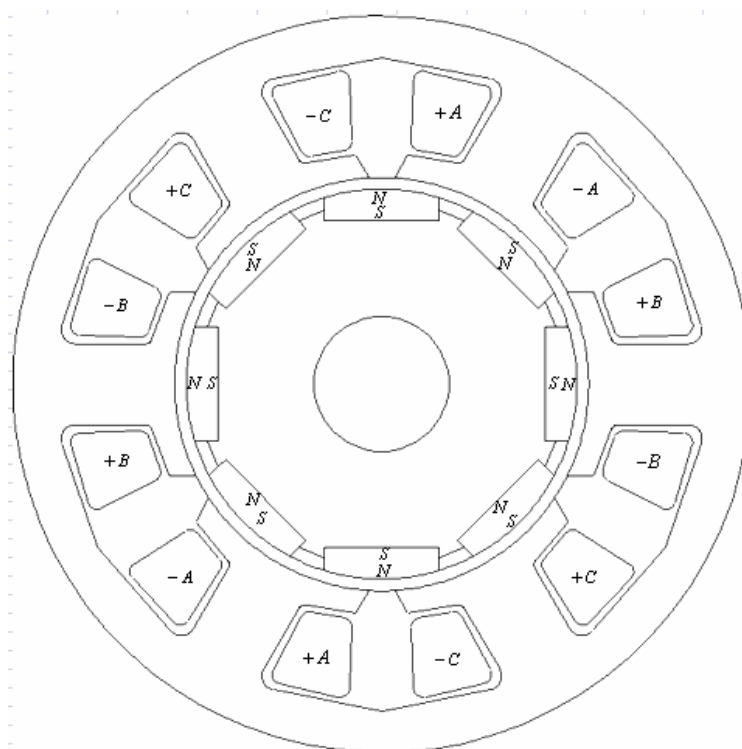


Рис. 1.

Для примера (см. рис.1) при числе зубцов (пазов) статора $Z_1 = 6$ выполняется обмотка с числом фаз $m = 3$. Число полюсов ротора $2p = 8$. При этом соблюдается симметрия обмотки статора, имеющей дробное число пазов на полюс и фазу: $q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{6}{8 \cdot 3} = \frac{1}{4}$. Шаг обмотки по пазам: $y = 1$, т.е. катушки имеют минимальные по длине лобовые части.

В то же время явнополюсная структура статора ВДПМ и связанная с этим неравномерность воздушного зазора приводит к возникновению реактивных моментов как от действия МДС постоянных магнитов, так и от действия МДС реакции якоря. Наиболее существенное влияние на свойства и характеристики электроприводов с ВДПМ оказывает реактивный момент M_p от действия МДС постоянных магнитов. Существует несколько способов уменьшения отрицательного влияния этого реактивного момента, а именно: скос зубцов (пазов) статора, либо скос ПМ, находящихся на роторе; сдвиг ПМ в несколько ступеней; вырезы на поверхности полюсного башмака [3,4]. Указанные способы являются достаточно эффективным инструментом в борьбе с реактивным моментом. Однако их применение ведет к усложнению технологии изготовления ВДПМ. В этой ситуации представляется целесообразным таким образом подобрать геометрические соотношения активной зоны двигателя, чтобы получить минимально возможный реактивный момент при токе статора $I_s = 0$ и, тем самым, избежать необходимости применения способов снижения M_p , ведущих к удорожанию ВДПМ.

Решение сформулированной задачи проведем для двигателя с наружным диаметром статора 81 мм и длиной пакета 45 мм. Материал постоянных магнитов – NdFeB. Номинальный момент двигателя – 1 Нм.

В качестве исходных варьируемых геометрических размеров примем (рис. 2):

- длину воздушного зазора δ ;
- полюсную дугу магнита α_{mag} ;
- дугу шлица $\alpha_{шл}$.

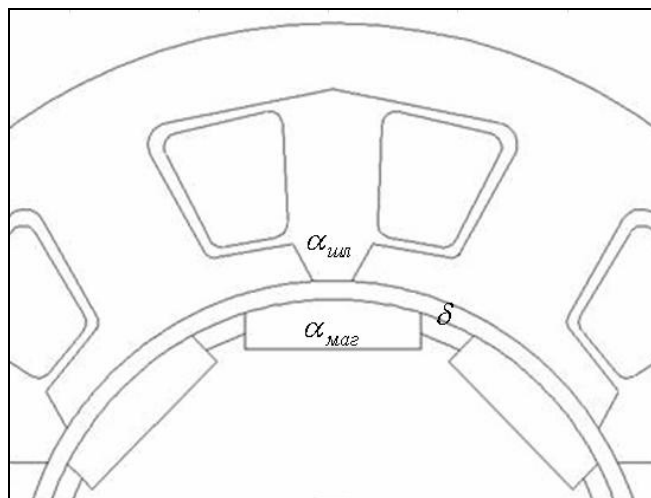


Рис. 2.

Целевой функцией служит минимальная величина амплитуды реактивного момента M_{pmax} , т.е. $M_{pmax} \Rightarrow \min$, определяемая по результатам расчета магнитного поля ВДПМ методом конечных элементов (рис. 3).

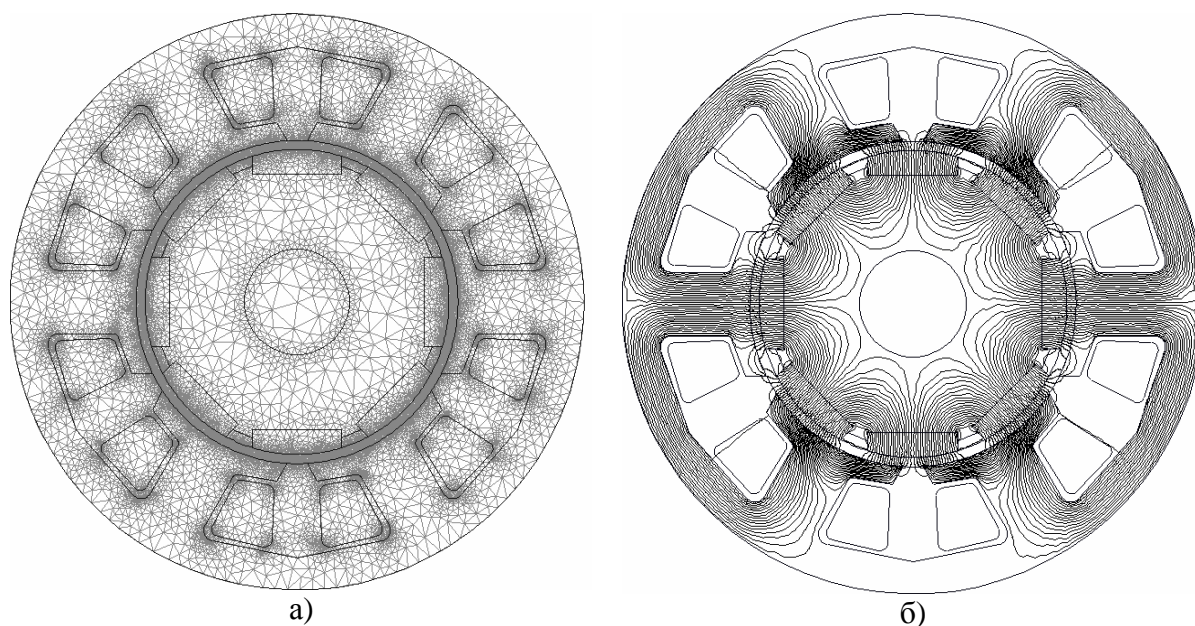


Рис. 3. Разбивка расчетной области на конечные элементы (а) и распределение магнитного поля для одного из расчетных вариантов (б)

Для обзора области исследования пределы изменения варьируемых переменных приняты следующими (см. табл. 1).

Таблица 1

Переменная	Размерность	Минимальное значение	Максимальное значение
δ	мм	0,7	1,6
$\alpha_{\text{маг}}$	град.	32	36
$\alpha_{\text{шл}}$	град.	6	12

Первоначально, методом случайного поиска, был определен ряд из 19 вариантов сочетания варьируемых переменных, для которых проводился расчет зависимости $M_p = f(\Theta)$ при изменении угла поворота ротора ВДПМ в пределах ($\Theta = 0 \div 45$) градусов с шагом 0,5 градуса. По результатам расчетов вычислялась амплитуда $M_{p_{\text{max}}}$.

Исходные данные и результаты расчетов величины $M_{p_{\text{max}}}$ сведены в таблицу 2.

Таблица 2

№ вар.	δ , мм	$\alpha_{\text{маг}}$, град.	$\alpha_{\text{шл}}$, град.	$M_{p_{\text{max}}}$, Нм
1	0,7	35	9	0,218
2	1,3	35	12	0,029
3	1,5	34	7	0,016
4	1,3	33	10	0,057
5	1,4	33	11	0,069
6	0,7	35	8	0,22
7	1,1	34	11	0,029
8	0,7	32	11	0,155
9	1,6	36	7	0,037
10	1,3	34	8	0,011
11	1,1	35	8	0,075
12	1,6	35	10	0,011

13	0,9	35	6	0,136
14	1,6	33	6	0,027
15	1,5	34	11	0,037
16	1,1	32	10	0,11
17	1,2	34	10	0,021
18	1,3	32	11	0,11
19	1,3	34	7	0,0092

Как следует из представленных в таблице 2 данных, лучшим вариантом является вариант № 19, для которого $M_{P_{\max}}=0,0092$ Нм.

Анализ полученных результатов показывает целесообразность сужения области поиска в окрестность значений $\delta=1,3$ мм, $\alpha_{\text{маг}}=34$ град., $\alpha_{\text{шл}}=7$ град., принадлежащих варианту № 19. Исходя из этого, второй этап расчетных исследований был проведен с применением методики рационального планирования эксперимента [5] при вариации переменных на 5 уровнях (табл. 3). Классическая схема полного исследования влияния трех факторов, каждый из которых может принимать пять различных значений, требует расчета $5^3=125$ различных вариантов. В соответствии с [5] выбрана схема планирования, при которой надо исследовать только 25 вариантов. В таблице 4 (столбцы 2÷4) приведены уровни факторов для каждого варианта выполненных расчетов магнитного поля.

Таблица 3

Переменная	Размерность	Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
δ	мм	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
$\alpha_{\text{маг}}$	град.	33	33,5	34	34,5	35
$\alpha_{\text{шл}}$	град.	6	6,5	7	7,5	8

Результаты полевых расчетов – значения амплитуды реактивного момента $M_{P_{\max}}$ - приведены в столбце 8 таблицы 4.

Таблица 4

№ вар.	δ	$\alpha_{\text{маг}}$	$\alpha_{\text{шл}}$	δ , мм	$\alpha_{\text{маг}}$, град.	$\alpha_{\text{шл}}$, град.	$M_{P_{\max}}$, Нм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	4	3	1,2	34,5	7	0,03718
2	2	1	4	1,25	33	7,5	0,03329
3	3	5	1	1,3	35	6	0,03999
4	4	2	5	1,35	33,5	8	0,02318
5	5	3	2	1,4	34	6,5	0,00934
6	1	1	2	1,2	33	6,5	0,02361
7	2	5	3	1,25	35	7	0,04700
8	3	2	4	1,3	33,5	7,5	0,01954
9	4	3	1	1,35	34	6	0,01118
10	5	4	5	1,4	34,5	8	0,01228
11	1	5	5	1,2	35	8	0,05241
12	2	2	2	1,25	33,5	6,5	0,01434
13	3	3	3	1,3	34	7	0,00922
14	4	4	4	1,35	34,5	7,5	0,01929

15	5	1	1	1,4	33	6	0,02435
16	1	2	1	1,2	33,5	6	0,01113
17	2	3	5	1,25	34	8	0,00879
18	3	4	2	1,3	34,5	6,5	0,02665
19	4	1	3	1,35	33	7	0,03144
20	5	5	4	1,4	35	7,5	0,03008
21	1	3	4	1,2	34	7,5	0,01569
22	2	4	1	1,25	34,5	6	0,03286
23	3	1	5	1,3	33	8	0,03958
24	4	5	2	1,35	35	6,5	0,03500
25	5	2	3	1,4	33,5	7	0,02058

Из представленных в таблице 4 данных следует, что лучшим вариантом является вариант № 17, для которого $M_{P_{\max}} = 0,0088$ Нм при следующих геометрических размерах: $\delta = 1,25$ мм, $\alpha_{\text{маг}} = 34$ град., $\alpha_{\text{шл}} = 8$ град. Очевидно, что второй этап поиска не дал существенного снижения величины $M_{P_{\max}}$. И на первом, и на втором этапах отношение момента $M_{P_{\max}}$ к номинальному моменту в лучших вариантах составляет менее 1%, что свидетельствует о нецелесообразности проведения дальнейших поисковых исследований с целью снижения величины $M_{P_{\max}}$.

Определенный интерес представляет оценка влияния геометрических соотношений на форму и амплитуду реактивного момента. Как показано в [3] для снижения величины $M_{P_{\max}}$ увеличивают частоту изменения функции $M_P = f(\Theta)$. Для этого на полюсных наконечниках статора выполняют различное количество вырезов прямоугольной или овальной формы. Такой путь приводит к усложнению конструкции штампа для вырубki пластин статора ВДПМ. Покажем, что эффект снижения величины $M_{P_{\max}}$ наблюдается без усложнения технологии производства. Для этого рассмотрим изменение формы функции $M_P = f(\Theta)$ для трех вариантов из табл. 4: № 15 ($\delta = 1,4$ мм, $\alpha_{\text{маг}} = 33$ град., $\alpha_{\text{шл}} = 6$ град.), № 21 ($\delta = 1,2$ мм, $\alpha_{\text{маг}} = 34$ град., $\alpha_{\text{шл}} = 7,5$ град.), № 17 ($\delta = 1,25$ мм, $\alpha_{\text{маг}} = 34$ град., $\alpha_{\text{шл}} = 8$ град.) (рис. 4).

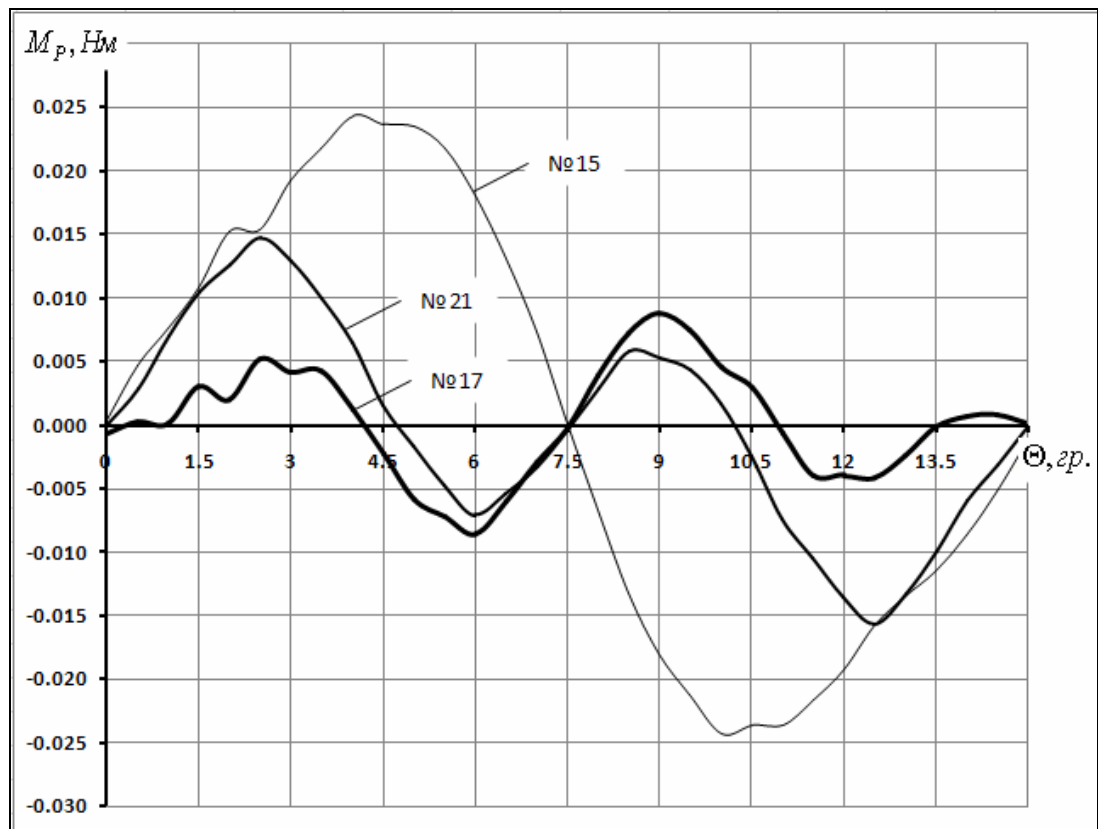


Рис. 4.

Наибольшая амплитуда реактивного момента наблюдается в варианте № 15, где величина первой (основной) гармоники составляет 93,8% от $M_{P_{\max}} = 0,0244$ Нм. При переходе к варианту № 21 функция $M_p = f(\Theta)$ имеет уже две весомые гармоники – первую и вторую (соответственно 45,5% и 51,8% от $M_{P_{\max}} = 0,0157$ Нм). В варианте № 17 амплитуда первой гармоники становится пренебрежимо малой, а основной вклад вносят вторая и третья гармоники с процентным отношением 54,6% и 41% к величине $M_{P_{\max}} = 0,0088$ Нм.

Сказанное выше проиллюстрировано на рис. 5, где показана гистограмма амплитуд гармоник $M_{P\nu}$, содержащихся в зависимости $M_p = f(\Theta)$, от номера гармоники ν для трех расчетных вариантов.

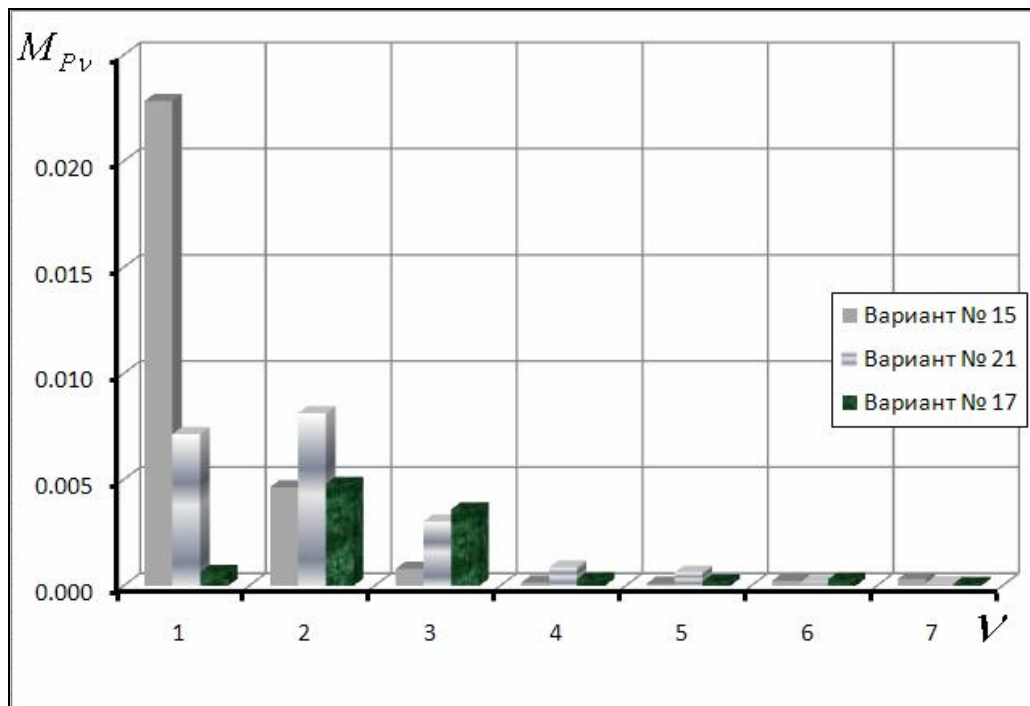


Рис. 5.

Таким образом, варьируя геометрическими размерами активной зоны ВДПМ, можно получить уменьшение периода изменения функции $M_p = f(\Theta)$ и, соответственно, существенное снижение амплитуды реактивного момента.

На рис. 6 представлено семейство зависимостей электромагнитного момента $M = f(\Theta)$ при различных значениях тока статора I_s , рассчитанных для сочетания геометрических размеров, соответствующих варианту № 17. Из данных зависимостей видно, что проведенная минимизация $M_{p\max}$ позволила практически исключить влияние реактивного момента на форму $M = f(\Theta)$ в рабочем диапазоне тока I_s .

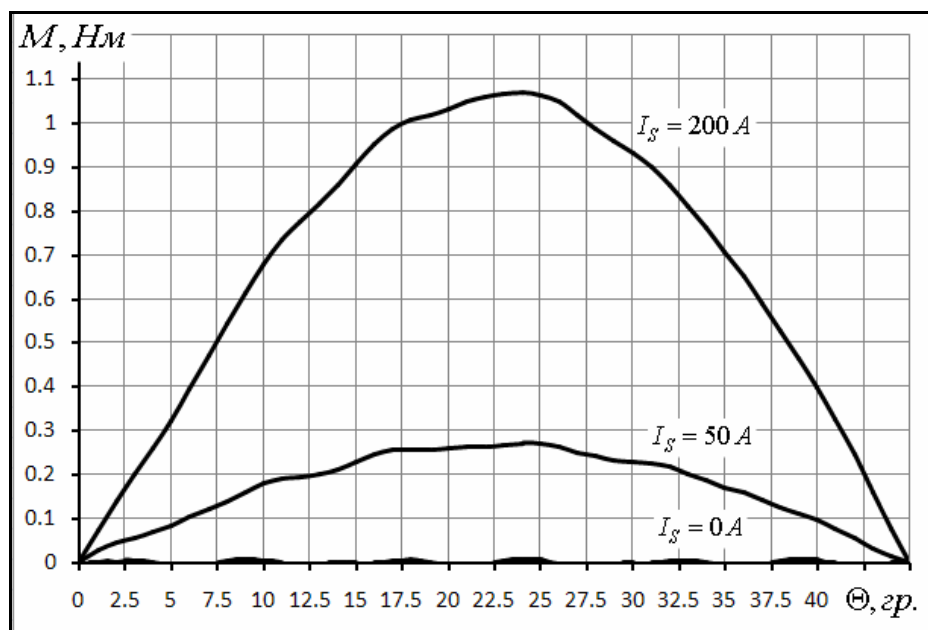


Рис. 6.

Список использованной литературы

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
2. Ткачук В. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
3. Bolognani S., Bianchi N., Malesani L., Zigliotto M., Cervaro S. Brushless motor drives for ventilation // Department of Electrical Engineering, University of Padova, Italy, 2003.
4. Радимов И.Н., Рымша В.В., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хьонг. Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины // Электротехника и электромеханика. – 2008. - № 1. – С. 41-43.
5. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.