



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИНА «КОМПЛЕМЕНТАРНАЯ СБОРКА» ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО КАК МЕТОДА

*С.А. Гладких, gladkikh.sa@yandex.ru, А.М. Ланкин, lankinjohn@yandex.ru,
И.М. Ланкин, theskymangame2000@gmail.com*

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
г. Новочеркасск

В данной статье рассматривается разработка метода, позволяющего осуществлять комплементарную сборку электромагнита на основе подбора составных частей по их характеристикам. Также дается разъяснение термина «комплементарная сборка», как более подходящего, чем «селективная сборка» применительно к этому, а также схожим методам. Для наглядности модель магнитной системы предлагается рассматривать в виде эквивалентной электрической цепи, что позволяет сконцентрироваться на наиболее важном факторе, влияющем на конечную характеристику – магнитной проницаемости материала, или по аналогии представленную в виде магнитного сопротивления. Построенная эквивалентная схема, с исключением оказывающих меньше влияние на работу электромагнита эффектов, представляет собой цепь из последовательно соединенных резисторов. Суммарное сопротивление этих резисторов должно оставаться неизменным, чтобы обеспечить наиболее приближенную к номинальной выходную характеристику. Осуществляя подбор сопротивлений этих резисторов, отражающих магнитные свойства реальных частей электромагнита, так, чтобы отклонения одних компонентов компенсировались и дополнялись отклонениями других, становится возможным комплементарная сборка. Реальное влияние магнитных свойств деталей на силу тяги проверено построенным экспериментом со статистической обработкой данных.

Ключевые слова: электромагнит, эквивалентная схема, магнитное сопротивление, комплементарная сборка, тяговая характеристика

DEFINITION OF THE TERM «COMPLEMENTARY ASSEMBLY» FOR ELECTROMAGNETS AND SUBSTANTIATION OF IT AS A METHOD

S.A. Gladkikh, A.M. Lankin, I.M. Lankin

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk

This article discusses the development of the method that allows for complementary assembly of an electromagnet based on the selection of components according to their characteristics. An explanation of the term “complementary assembly” as being more suitable than “selective assembly” as applied to this, as well as to similar methods is also given. For clarity, the model of the magnetic system is proposed to be considered in the form of an equivalent electrical circuit, which allows us to concentrate on the most important factor affecting the final characteristic - the magnetic permeability of the material, or by analogy, presented in the form of magnetic resistance. The constructed equivalent circuit, with the exception of effects that have less effect on the operation of the electromagnet, is a chain of resistors connected in series. The total resistance of these resistors must remain unchanged in order to provide the output characteristic that is closest to the nominal value. By selecting the resistances of these resistors, which reflect the magnetic properties of the real parts of the electromagnet, so that the deviations of some components are compensated and supplemented by the deviations of others, a complementary assembly becomes possible. The real influence of the magnetic properties of the parts on the traction force was verified by a constructed experiment with statistical data processing.

Keywords: electromagnet, equivalent circuit, magnetic resistance, complementary assembly, performance curve

Электромагнит, как электромеханическое устройство, состоит из нескольких деталей: корпуса, фланца, якоря, стопора, магнитного шунта. Эти детали проходят контроль на годность и брак и поступают на сборку электромагнита. Обычная сборка не подразумевает выбор деталей по их свойствам и характеристикам, а осуществляется комплектами сборки, в которых каждая деталь выбрана случайным



образом (в порядке поступления). Собранный электромагнит проверяется на соответствие характеристик [1] и по результату проверки отбраковывается или считается годным и направляется к потребителю.

Для того чтобы увеличить выпуск годных устройств и уменьшить экономические издержки производства или получить на выходе большее количество устройств с заданными характеристиками, требуется вмешательство в процесс сборки с целью управления ею.

В машиностроении [2] и иных областях производства, связанных механическим сочленением деталей [3, 4] встречается понятие «селективная сборка». В основе селективной сборки лежит процесс, основанный на разделении работающих в паре деталей на размерные группы так, чтобы при их соединении обеспечивалась требуемая точность сборочного соединения [5].

Слово «селективный» заимствовано из английского (*selective*) и имеет значение «избирательный», «выборочный». Само по себе это слово употребляется часто в различных сферах: селективная коробка передач (в отличие от секвентальной, переключение передач в таких коробках может осуществляться в любом порядке), селективный мутизм (неспособность разговаривать при особых социальных ситуациях, например, при общении с незнакомцами), селективная ангиография (исследование кровеносных сосудов при помощи рентгеновского излучения в конкретной области тела).

Данный термин получил развитие в трудах немецкого профессора Клауса Питера Цохера (*Klaus-Peter Zocher*) [6], в том числе посвященных подбору линз и их посадочных мест по геометрическим размерам при сборке микроскопов [7]. Там описывается адаптивная селективная сборка, сутью которой подразумевается наличие обратной связи между измерениями деталей и их производством с целью корректировки параметров их производства.

В трудах [8, 9], посвященных сборке электромагнитов, также встречается термин «адаптивная селективная сборка». Описанная там сборка осуществляется по следующему алгоритму: измеряются основные кривые намагничивания деталей электромагнита; детали разделяются на группы в рамках допуска; с помощью математической модели, основанной на взаимодействии деталей, влияющем на тяговую характеристику готового устройства, формируются комплекты для сборки электромагнитов; в результате снижается количество бракованных электромагнитов при неизменной точности изготовления деталей.

Поскольку термин «селективная сборка» используется в достаточно узкой сфере и применяется к геометрическим размерам парных деталей, то его использование применительно к описанному в трудах алгоритму [8, 9] представляется ошибочным. Более верным по смыслу представляется использование термина «комплементарный».

Термин «комплементарный» применяется повсеместно: в науке и вне ее рамок. В переводе с английского, *complementary* – дополнительный, дополняющий, работающий совместно. «Комплементарными» бывают:

В генетике: гены, отвечающие за формирование нового, не присущего этим генам по отдельности, признака, возникающего, только если два гена являются доминантными [10-12].

В химии: реакции, протекающие сопряженными стадиями выделения и поглощения энергии [13].



В экономике: блага, совместное потребление которых агентом более предпочтительно (например, зубная щетка и зубная паста) [14].

В обществе: взаимоотношение полов [15, 16].

В медицине: дополнительные методики лечения, которые благоприятно сказываются на выздоровлении совместно с основной терапией [17]. Также термин «*complementary assembly*» (рус. – комплементарная сборка) используется авторами в статье [18], описывающей гетерогенную сборку в фибрилле, осуществляющейся за счет взаимодополняющих электростатических взаимодействий между тремя или четырьмя видами пептидов, каждый из которых не способен к гомогенной самоорганизации.

В радиоэлектронике: транзисторы, различные по проводимости, но идентичные по характеристикам, использующиеся, например, для получения одинаковых по форме полуволн двухтактных преобразователей [19].

Из приведенного списка использований термина «комплементарный» видно, что в основе всегда лежит принцип дополнения, получения положительного суммарного эффекта использования особенностей отдельных частей процесса или явления.

Для определения какой термин наиболее употребим при сборке электромагнитов, рассмотрим электромеханический объект сборки – электромагнит – и метод подбора его комплекта сборки на основе представления его магнитной схемы в виде электрической эквивалентной [20-22].

Магнитная цепь электромагнита характеризуется следующими величинами: МДС – магнитодвижущая сила, R_m – магнитное сопротивление, Φ – магнитный поток.

МДС – интегральная величина, равная циркуляции вектора напряженности поля H по замкнутому контуру L , охватывающему электрические токи, которые создают это магнитное поле [23, 24]:

$$\text{МДС} = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i; \quad (1)$$

где H_l – проекция вектора $\vec{H}$ на направление $d\vec{l}$; n – число проводников с током, охватывающим контур.

В упрощенном виде МДС записывается в виде ампер-витков:

$$\text{МДС} = NI; \quad (2)$$

где N – количество витков катушки; I – сила тока, протекающего через катушку.

Магнитное сопротивление связано с магнитным потоком и магнитодвижущей силой следующим уравнением:

$$R_m = \frac{F}{\Phi}; \quad (3)$$

При этом по формуле Максвелла сила тяги электромагнита [25]:

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}; \quad (4)$$

где Φ – магнитный поток в сердечнике; S – сечение сердечника (полюса сердечника, взаимодействующего с якорем).

Магнитная цепь электромагнита состоит из магнитных потоков, проходящих через фланец ($\Phi_{\text{фл}}$), корпус ($\Phi_{\text{кор}}$), стопор ($\Phi_{\text{ст}}$), воздушный зазор ($\Phi_{\text{вз}}$) и якорь ($\Phi_{\text{як}}$) (рис. 1).

Магнитные потоки проходят через материал по-разному в зависимости от величины магнитной проницаемости.

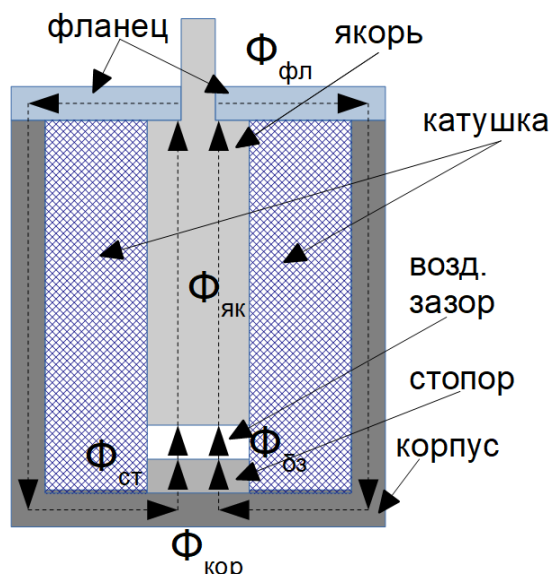


Рис. 1 – Устройство электромагнита

Чтобы связать это с электрической схемой вводится понятие магнитного сопротивления. Магнитное сопротивление связано с магнитной проницаемостью формулой:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_{\text{мат}} S}; \quad (5)$$

где l и S – длина и поперечное сечение участка цепи, μ_0 и $\mu_{\text{мат}}$ – магнитная постоянная и относительная магнитная проницаемость материала.

Эквивалентная электрическая схема, в которой источником электродвижущей силы являются ток в катушке I_k электромагнита и количество ее витков W , представлена на рисунке 1.6.

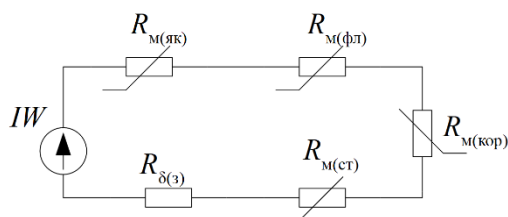


Рис. 2 – Эквивалентная электрическая схема электромагнита

На схеме замещения $R_m(\text{як})$, $R_m(\text{фл})$, $R_m(\text{кор})$, $R_m(\text{ст})$, $R_m(\delta_z)$ – магнитные сопротивления якоря, фланца, корпуса, стопора и воздушного зазора соответственно.

В рассмотренном примере не учитывается влияние потоков рассеивания, «тормозящих» перемещение якоря вихревых токов и геометрических размеров, поскольку они оказывают достаточно малое влияние на итоговую характеристику электромагнита в сравнении с изменчивостью магнитной проницаемости материалов.

Ток, протекающий в такой цепи, должен оставаться неизменным, а значит в уравнении

$$\Phi = \frac{IW}{\sum R_m}; \quad (6)$$

должно сохраняться постоянство правой части.

Сопротивления всех участков, кроме области воздушного зазора, являются переменными из-за изменяющихся параметров материалов, из которых они сделаны.



Поскольку магнитная проницаемость воздуха неизменна, сопротивление воздушного зазора принимается постоянной величиной. Для остальных частей электромагнита сопротивление может меняться, поэтому необходимо соблюсти условие:

$$\sum R_m = const; \quad (7)$$

То есть при отклонении значения проницаемости каких-то элементов необходимо так уменьшать или увеличивать магнитное сопротивление отдельных участков эквивалентной цепи, чтобы суммарное сопротивление осталось неизменным.

В случае, если становится невозможным подбор деталей для обеспечения этого условия, необходимо прибегнуть к выбору катушки, обладающей большим количеством витков.

Подставив эквивалентные значения в формулу (4) получим:

$$F = \frac{(IW)^2}{\sum R_m^2 \cdot 2\mu_0 \cdot S}; \quad (8)$$

Используя это эквивалентное представление магнитной системы, проведем статистическую проверку значимости изменения магнитной проницаемости деталей на примере расчета силы электромагнита ЭУ620301УХЛ4.

В основе расчетов лежат геометрические размеры деталей этого электромагнита, его номинальные ток и напряжение, количество витков, длина хода якоря и величина магнитной проницаемости, характерная для металлов [26], использующихся в производстве электромагнитов.

Вычислительный эксперимент проводился следующим образом: строился ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП), в качестве факторов у которого выступали магнитные проницаемости деталей с отклонением на $\pm 20\%$ от номинальных, а в качестве отклика рассматривалась сила F . По этому плану проведен эксперимент и составлена таблица факторов и откликов. Данные из таблицы проанализированы в программе *Statistica* с целью выявить значимые факторы.

Результат обработки данных представлен на рисунках 3-5.

Effect Estimates; Var.:Force; R-sqr=.98028; Adj.:.97568 (Spreadsheet3) 4 factors, 1 Blocks, 75 Runs; MS Pure Error=.0536956 DV: Force										
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(50)	p	-95. % Cnf. Limit	+95. % Cnf. Limit	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95. % Cnf. Limit	+95. % Cnf. Limit
Mean/Interc.	23.67258	0.080254	294.9706	0.000000	23.51138	23.83377	23.67258	0.080254	23.51138	23.83377
(1)Armature(L)	-1.14290	0.059832	-19.1016	0.000000	-1.26307	-1.02272	-0.57145	0.029916	-0.63154	-0.51136
Armature(Q)	-0.36015	0.094618	-3.8064	0.000386	-0.55020	-0.17011	-0.18008	0.047309	-0.27510	-0.08505
(2)Flange(L)	-0.04047	0.059832	-0.6763	0.501963	-0.16064	0.07971	-0.02023	0.029916	-0.08032	0.03986
Flange(Q)	-0.38055	0.094618	-4.0220	0.000195	-0.57060	-0.19051	-0.19028	0.047309	-0.28530	-0.09525
(3)Base(L)	-2.90257	0.059832	-48.5116	0.000000	-3.02274	-2.78239	-1.45128	0.029916	-1.51137	-1.39120
Base(Q)	-0.24794	0.094618	-2.6205	0.011599	-0.43799	-0.05790	-0.12397	0.047309	-0.21899	-0.02895
(4)Stopper(L)	-0.64166	0.059832	-10.7243	0.000000	-0.76184	-0.52148	-0.32083	0.029916	-0.38092	-0.26074
Stopper(Q)	-0.37414	0.094618	-3.9543	0.000242	-0.56419	-0.18410	-0.18707	0.047309	-0.28209	-0.09205
1L by 2L	0.00152	0.066893	0.0227	0.981950	-0.13284	0.13588	0.00076	0.033446	-0.06642	0.06794
1L by 3L	0.10864	0.066893	1.6241	0.110642	-0.02572	0.24300	0.05432	0.033446	-0.01286	0.12150
1L by 4L	0.02411	0.066893	0.3605	0.720012	-0.11024	0.15847	0.01206	0.033446	-0.05512	0.07924
2L by 3L	0.00385	0.066893	0.0575	0.954345	-0.13051	0.13821	0.00192	0.033446	-0.06525	0.06910
2L by 4L	0.00085	0.066893	0.0128	0.989861	-0.13350	0.13521	0.00043	0.033446	-0.06675	0.06761
3L by 4L	0.06102	0.066893	0.9122	0.366024	-0.07334	0.19538	0.03051	0.033446	-0.03667	0.09769

Рис. 3 – Листинг с оценкой коэффициентов регрессии, базирующихся на кодированных исходных значениях факторов



Regr. Coefficients; Var.:Force; R-sqr=.98028; Adj.:97568 (Spreadsheet3) 4 factors, 1 Blocks, 75 Runs; MS Pure Error=.0536956 DV: Force						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err. Pure Err	t(50)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	20,95666	3,086156	6,79054	0,000000	14,75793	27,15538
(1)Armature(L)	0,00128	0,000794	1,60862	0,113996	-0,00032	0,00287
Armature(Q)	-0,00000	0,000000	-3,80640	0,000386	-0,00000	-0,00000
(2)Flange(L)	0,00267	0,000794	3,36072	0,001496	0,00107	0,00426
Flange(Q)	-0,00000	0,000000	-4,02199	0,000195	-0,00000	-0,00000
(3)Base(L)	-0,00092	0,000794	-1,16169	0,250877	-0,00252	0,00067
Base(Q)	-0,00000	0,000000	-2,62047	0,011599	-0,00000	-0,00000
(4)Stopper(L)	0,00191	0,000794	2,40299	0,020014	0,00031	0,00350
Stopper(Q)	-0,00000	0,000000	-3,95428	0,000242	-0,00000	-0,00000
1L by 2L	0,00000	0,000000	0,02274	0,981950	-0,00000	0,00000
1L by 3L	0,00000	0,000000	1,62410	0,110642	-0,00000	0,00000
1L by 4L	0,00000	0,000000	0,36047	0,720012	-0,00000	0,00000
2L by 3L	0,00000	0,000000	0,05754	0,954345	-0,00000	0,00000
2L by 4L	0,00000	0,000000	0,01277	0,989861	-0,00000	0,00000
3L by 4L	0,00000	0,000000	0,91223	0,366024	-0,00000	0,00000

Рис. 4 – Листинг с оценкой коэффициентов регрессии, базирующихся на не кодированных исходных значениях факторов

ANOVA; Var.:Force; R-sqr=.98028; Adj.:97568 (Spreadsheet3) 4 factors, 1 Blocks, 75 Runs; MS Pure Error=.0536956 DV: Force					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Armature(L)	19,5921	1	19,5921	364,872	0,000000
Armature(Q)	0,7780	1	0,7780	14,489	0,000386
(2)Flange(L)	0,0246	1	0,0246	0,457	0,501963
Flange(Q)	0,8686	1	0,8686	16,176	0,000195
(3)Base(L)	126,3658	1	126,3658	2353,372	0,000000
Base(Q)	0,3687	1	0,3687	6,867	0,011599
(4)Stopper(L)	6,1756	1	6,1756	115,011	0,000000
Stopper(Q)	0,8396	1	0,8396	15,636	0,000242
1L by 2L	0,0000	1	0,0000	0,001	0,981950
1L by 3L	0,1416	1	0,1416	2,638	0,110642
1L by 4L	0,0070	1	0,0070	0,130	0,720012
2L by 3L	0,0002	1	0,0002	0,003	0,954345
2L by 4L	0,0000	1	0,0000	0,000	0,989861
3L by 4L	0,0447	1	0,0447	0,832	0,366024
Lack of Fit	0,4371	10	0,0437	0,814	0,616556
Pure Error	2,6848	50	0,0537		
Total SS	158,3302	74			

Рис. 5 – Листинг с оценкой адекватности модели

Из рисунка 3 видно, что факторы, отражающие изменения магнитных свойств якоря (1), фланца (2), корпуса (3) и стопора (4) значимы. Причем наибольшее влияние на отклик, силу F , оказывают изменения проницаемости корпуса и якоря (рисунок 3, столбец «Coeff.»). Значение критерия Фишера, равное 0.81, подтверждает адекватность полученной модели.

Получившийся результат можно представить в виде уравнения регрессии для не кодированных значений:

$$K = 20,957 + 2,67 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_{\text{фл}} + 1,91 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_{\text{ст}} - 3,68 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_{\text{як}}^2 - 3,88 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_{\text{фл}}^2 - 2,53 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_{\text{кор}}^2 - 3,82 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_{\text{ст}}^2$$

Данное уравнение регрессии можно использовать при подборе деталей электромагнита по их магнитной проницаемости на комбинаторной, взаимодополняющей основе.

Основываясь на полученных результатах предложен алгоритм метода комбинаторной сборки:



- 1) получение математической модели зависимости тягового усилия от магнитной проницаемости деталей электромагнита (например, используя метод планирования эксперимента как сделано выше);
- 2) измерение магнитной проницаемости деталей электромагнита;
- 3) подбор из имеющихся множеств деталей, с различной магнитной проницаемостью, при помощи математической модели комплектов деталей из которых можно получить изделие с требуемым тяговым усилием;
- 4) составление комплементарных комплектов деталей для сборки электромагнитов;
- 5) сборка электромагнитов из комплектов.

Предложенный метод из пяти шагов позволит собирать из поставляемых деталей электромагниты с требуемой тяговой характеристикой используя математическую модель, не требующую больших вычислительных мощностей.

Проведенный эксперимент позволяет судить о комплементарной сборке, основанной на подборе деталей по их магнитным свойствам, как об эффективном методе получения готовых электромагнитов с требуемыми рабочими характеристиками.

Заключение. Таким образом, термин «комплементарная сборка» применительно к производству электромагнитов более предпочтителен, поскольку описывает процесс подбора взаимодополняющих друг друга по магнитным параметрам деталей электромагнита на основе функциональной зависимости свойств отдельных элементов на результирующую характеристику.

Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ).

Список использованных источников

1. ГОСТ 19264-82. Электромагниты управления. Общие технические условия. М.: 1987. – 32 с.
2. Бонч-Осмоловский, М.А. Селективная сборка / М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1974. – 144 с.
3. Буловский, П.И. Автоматизация селективной сборки приборов / П.И. Буловский, П.И. Крылов, В.А. Лапухин. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Федотова, А.И., Гибкие производственные системы сборки / А.И. Федотова. – Л.: Машиностроение, 1989. – 349 с.
5. Большой энциклопедический словарь. Политехнический. 4 - е (репринтное) издание. Гл.ред.: А. Ю. Ишлинский. – М.: Большая Российская энциклопедия. 1998. – 656 с.
6. Zocher, K.P. CAQ und CIM – Adaptive und selektive Montage in der flexiblen, automatisierten Fertigung / K.P. Zocher. – Ilmenau. – 1989. – P. 101-118.
7. K.-P. Zocher. Adaptive and Selective Assembling of Microscope Objectives. // Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada, 2011. – P. 376-381.
8. Н.М. Кыюнг. Автоматизация технологического процесса селективной сборки электромагнитов на основе контроля магнитных свойств деталей: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук. Новочеркасск, 2010. – 169 с.
9. Горбатенко, Н.И. Метод селективной сборки на основе моделирования магнитного состояния деталей электромагнитов / Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кыюнг // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. Спецвыпуск: Проблемы мехатроники – 2009. – С. 110-112.
10. P.S. Verma, V.K. Agarwal. Cell biology, genetics, molecular biology, evolution and ecology. // S. CHAND & COMPANY LTD. RAM NAGAR, NEW DELHI. 2004. – 295 p.
11. John M. Walker. Enzymes of Molecular Biology. // Humana Press Inc. 1993. – 370 p.
12. Ю.П. Фролов, М.М. Серых, О.Н. Макурина, Н.А. Кленова, В.Г. Подковкин. Биохимия и молекулярная биология. Учебное пособие для вузов. - Самара: Самарский университет. 2004. – 501 с.



13. М.И. Лебедева, И.А. Анкудинова, М.А. Свириева. Общая химия (часть 1). – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ». 2014. – 131 с.
14. Robert J. Carbaugh. Contemporary Economics: An Applications Approach. // Thomson/South-Western. 2006. – 464 p.
15. Pilkington, C., Tesser, A., & Stephens, D. Complementarity in romantic relationships: A self-evaluation maintenance perspective. // Journal of Social and Personal Relationships, 8(4). 1991. – P. 481-504.
16. Schmitt, D. Personality, attachment, and sexuality related to dating relationship outcomes: Contrasting three perspectives on personal attribute interaction. British Journal of Social Psychology, 41. 2002. – С. 589-610.
17. E. Ernst. The role of complementary and alternative medicine // BMJ. 2000 Nov 4; 321(7269). – P. 1133–1135.
18. Takahashi Y., Ueno A., Mihara H. Amyloid architecture: complementary assembly of heterogeneous combinations of three or four peptides into amyloid fibrils // Chembiochem. 2002. №3(7). С.37-42
19. B. Lojek. History of Semiconductor Engineering. // Springer-Cerlag, Berlin. 2007. – 387 p.
20. Adams Stratton J. Electromagnetic theory. // Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2007. – 608 с.
21. В.Г. Герасимов, Э.В. Кузнецов, О.В. Николаева и др. Электротехника и электроника. Кн. 1. Электрические и магнитные цепи: Учеб. для вузов. – В 3-х кн.: кн. 1 – М.: Энергоатомиздат. 1996. – 288 с.
22. L. Michalowsky, J. Schneider (Hrsg.). Magnettechnik. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen. 3. aktualisierte Auflage. // Vulkan-Verlag GbH. 2006. – 363 p.
23. Б.Б. Винокуров, Г.В. Вавилова, И.А. Клубович. Измерение неэлектрических величин. – Томск: Томский политехнический университет. 2008. – 290 с.
24. William H. Hayt, Jr., William H. Hayt, Jr. Engineering Electromagnetics. Eight edition. // McGraw-Hill. 2012. – 596 p.
25. В.Ю. Ломоносов, К.М. Поливанов, О.П. Михайлов. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 400 с.
26. А.А. Преображенский. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа. 1976. – 336 с.