

УДК 621.318.3

ББК 31.264.36

И.П. ИВАНОВ, Д.В. САМУИЛОВ,
Е.Ю. ТРОФИМОВ, Г.А. ЧЕРНОВ, Е.Г. ВАСИЛЬЕВ**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ЯКОРЯ**

Ключевые слова: автоматический выключатель, электромеханический расцепитель, поляризованный электромагнит, проектирование, численное моделирование, динамические параметры.

В статье рассматриваются особенности проектирования поляризованных электромагнитов с принудительным включением якоря, вопросы разработки которых в технической литературе отсутствуют. Актуальность темы обусловлена необходимостью создания таких электромагнитов для использования в качестве малогабаритных расцепителей в современных автоматических выключателях отечественного производства.

Целью исследования является разработка научно обоснованной методики проектирования нового класса поляризованных электромагнитов с учетом их конструктивных особенностей, определяемых принудительным включением якоря. В статье проанализированы характеристики и отличительные особенности конструкции и принципа работы электромагнита производства фирмы Schneider Electric. Проведены поверочные расчеты с использованием численного моделирования методом конечных элементов. Отмечено, что для обеспечения малых габаритов электромагнита в рабочем состоянии магнитная индукция в элементах магнитопровода близка к индукции насыщения.

Сравнение расчетных значений и результатов моделирования с экспериментальными данными показало достаточную для инженерных расчетов точность при использовании предлагаемой методики, что говорит о ее достоверности и возможности применения при проектировании поляризованных электромагнитов с принудительным включением якоря разных конструктивных исполнений.

Введение. В современных автоматических выключателях (далее – АВ) широко применяются в качестве электромеханических расцепителей малогабаритные поляризованные электромагниты, в которых якорь включается от элемента ручного управления АВ и удерживается за счет сил постоянного магнита, а отключается, т.е. приходит в движение, от сигнала полупроводникового модуля защиты. В результате якорь расцепляет рычаг (шептало, защелку), и АВ отключается. Такие электромагниты с внешним (принудительным) включением (далее – ПЭМВ) отличаются от традиционных поляризованных электромагнитов как конструкцией и порядком работы, так и техническими характеристиками: имеют небольшие объемы (менее 10 см³) при больших полезных усилиях в процессе рабочего цикла (до нескольких десятков Н) [1–3]. Вопросы их проектирования с учетом отличий конструкций и порядка работы в технической литературе отсутствуют.

Целью исследования является разработка научно обоснованной методики проектирования нового класса поляризованных электромагнитов с учетом их конструктивных особенностей, определяемых принудительным включением якоря. Особенности проектирования подобных электромагнитов далее будут рассмотрены на примере поверочного расчета существующей конструкции

ПЭМВ АВ производства фирмы *Schneider Electric*, общий вид которого изображен на рис. 1 в масштабе 2:1.

Описание конструкции, принципа работы и характеристик ПЭМВ. Приведенная на рис. 1 конструкция содержит характерные для других типов ПЭМВ, отличающихся конструктивным исполнением, элементы: якорь 1, полюсный наконечник (стоп) 2, постоянный магнит 3, магнитопровод 4, ферромагнитную втулку 5, катушку 6 (обмотку управления), рабочую пружину сжатия 7, пружину демпфирования (перезима) 8 и пластмассовую колодку (упор) 9.

Характеристиками ПЭМВ, определяющими его работу, являются зависимости механической силы рабочей пружины $P_{пр}$ и силы постоянного магнита $P_{пм}$ от зазора δ : $P_{пр} = f(\delta)$ и $P_{пм} = f(\delta)$, представленные на рис. 2. Следует отметить, что полезную работу, т.е. приведение в действие рычага механизма свободного расцепления АВ, совершает рабочая пружина.

Принцип работы ПЭМВ представляет собой некоторый аналог работы ударно-спускового (куркового) механизма. Под кратковременным действием внешней силы $P_{вн}$ от приводного элемента АВ сжимается пружина 7, якорь 1 притягивается к стопу 2 и удерживается в притяннутом положении силой постоянного магнита 3. Таким образом происходит «взвод» механизма ПЭМВ, т.е. приведение его в начальное (исходное) положение с максимальной накопленной потенциальной энергией рабочей пружины 7. Так как притяжение и удержание якоря силой постоянного магнита происходят при малых зазорах δ , соответствующие им участки зависимости 1' и 2' (рис. 2) изображены масштабированием оси δ (ось δ' , М10:1), где наглядно показаны характерные параметры: зазор срабатывания $\delta_{ср}$, зазор удержания $\delta_{уд}$ и сила удержания $P_{уд}$.

Методики, применяемые при проектировании ПЭМВ. В зависимости от поставленных задач порядок проектирования может быть различным. Однако методики расчетов и конструирования отдельных элементов (узлов), характерные для ПЭМВ будут одинаковыми.

Предлагается следующий порядок проведения поверочных расчетов:

- расчет параметров рабочей пружины;
- расчет силы постоянного магнита $P_{пм}$, построение зависимости $P_{пм} = f(\delta)$ и определение силы удержания $P_{уд}$;
- расчет магнитодвижущей силы (МДС) срабатывания $F_{ср}$ катушки (обмотки управления);
- определение динамических параметров.

Параметры рабочей пружины могут быть определены по традиционным методикам, например, по ГОСТ 13765–86, с учетом следующих особенностей:

- сила пружины при предварительной деформации P_1 должна быть не менее $(2 \div 2,5) \cdot P_{защ}$ ($P_{защ}$ – сила противодействия защелки механизма свободного расцепления АВ);
- жесткость пружины c должна быть минимальной, что обеспечит оптимальную мощность управления;
- разность сил $\Delta P = P_2 - P_1$ (P_2 – сила пружины при рабочей деформации, т.е. при $\delta = \delta_{уд}$, по которой определяется кинетическая энергия E_k пружины к концу движения и скорость движения v) должна быть достаточной для предотвращения разрушения торцевой части храповика, входящей в защелпление с защелкой (чем больше скорость v , тем меньше вероятность повреждения).

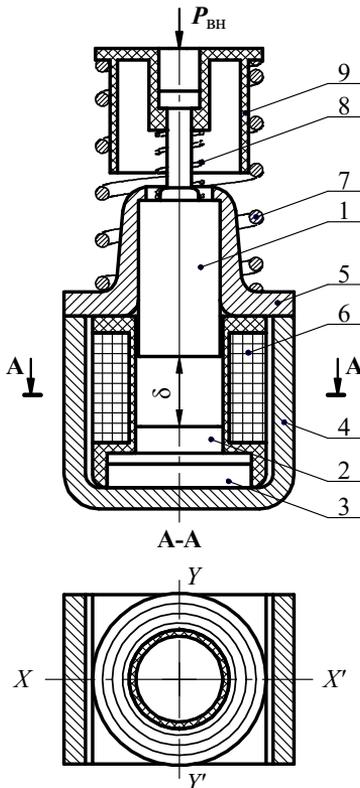


Рис. 1 – Общий вид ПЭМВ:

- 1 – якорь; 2 – стоп; 3 – постоянный магнит;
 - 4 – магнитопровод; 5 – ферромагнитная втулка; 6 – катушка;
 - 7 – рабочая пружина; 8 – пружина демпфирования; 9 – упор;
- $P_{вн}$ – сила принудительного включения

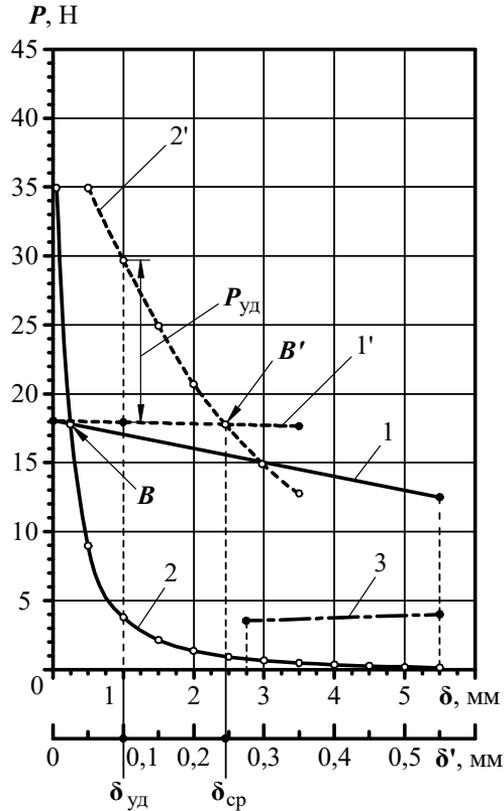


Рис. 2. Зависимости сил рабочей пружины $P_{пр} = f(\delta)$ (линии 1 и 1'), постоянного магнита $P_{пм} = f(\delta)$ (линии 2 и 2') и силы противодействия $P_{защ} = f(\delta)$ (линия 3) защелки механизма свободного расцепления АВ

На рис. 2 приведены зависимости $P_{пр} = f(\delta)$ (прямые 1 и 1'), соответствующие рабочей пружине сжатия со следующими основными параметрами: наружный диаметр пружины $D_1 = 12,6$ мм; диаметр проволоки $d_{пр} = 0,9$ мм; длина пружины в свободном состоянии $L_0 = 28$ мм; длина пружины при предварительной деформации $L_1 = 16,5$ мм; длина пружины при рабочей деформации $L_2 = 11,0$ мм; число рабочих витков пружины $n = 5$; $P_1 = 12,5$ Н; $P_2 = 18$ Н.

Сила постоянного магнита $P_{пм}$ определяется методами теории цепей или теории полей по геометрической модели ПЭМВ с предварительно выбранными размерами [4, 5].

На рис. 2 приведена зависимость $P_{пм} = f(\delta)$ (кривые 2 и 2'), построенная по значениям $P_{пм}$ для фиксированных значений δ и рассчитанная методом конечных элементов с помощью программного комплекса *COMSOL Multiphysics* для расчетной модели ПЭМВ со следующими основными параметрами:

- габаритные размеры: Ш×В×Г – (17,2×34,8×12,8) мм;

- диаметр и длина (без хвостовика) якоря: $d_я = 6,0$ мм; $l_я = 12,8$ мм;
- диаметр и высота магнита: $d_м = 10,8$ мм; $h_м = 1,8$ мм;
- материал магнита – неодим–железо–бор ($Nd-Fe-B$);
- максимальный воздушный зазор (полный ход якоря) $\delta = 5,5$ мм [6].

Зависимость $P_{пм} = f(\delta)$ (кривая 2') на участке от 0 до $\delta_{ср}$ можно описать уравнением прямой вида $P_{пм} = 39,5 - 90 \cdot \delta_{отн}$, где $\delta_{отн}$ – безразмерная величина, численно равная зазору δ в миллиметрах.

В этом случае сила удержания $P_{уд}$ определяется как

$$P_{уд} = 39,5 - 90 \cdot \delta_{отн} - P_{пр}. \quad (1)$$

При зазоре $\delta = \delta_{уд}$ сила $P_{пр} \approx P_2$.

Величина зазора $\delta_{уд}$ зависит, в основном, от толщины немагнитного покрытия полюсов, способа механической обработки торцов (полюсов) и плотности их прилегания. На основе эксплуатационных данных можно принять $\delta_{уд} = (0,05 \div 0,15)$ мм. В случае, если известно или задано значение $P_{уд}$, как, например, для рассматриваемого образца ($P_{уд} \approx 10$ Н), то по (1) можно установить расчетное значение зазора $\delta_{уд}$.

По известным значениям $\delta_{уд}$ (или $P_{уд}$) и $P_{пм}$ можно *определить графоаналитическим методом величину $F_{ср}$* . Для этого рассчитывается действующая на якорь результирующая сила $P_{\Sigma} = P_{пм} + P_к$, состоящая из силы, создаваемой постоянным магнитом $P_{пм}$, и силы, создаваемой катушкой $P_к$, при фиксированных значениях зазора δ в интервале, охватывающем величины $\delta_{уд}$ и $\delta_{ср}$. Далее строятся нагрузочные характеристики вида $P_{\Sigma} = f(F_к)$, где $F_к$ – МДС катушки.

Результаты моделирования и определение результирующей силы P_{Σ} .

Для рассматриваемого ПЭМВ расчет силы P_{Σ} , как и при определении силы постоянного магнита, проводился путем численного моделирования в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*. Некоторые особенности этих вычислений:

1) так как геометрическая модель ПЭМВ имеет явно выраженные плоскости симметрии $X-X'$ и $Y-Y'$ (разрез А-А, рис. 1), моделирование выполнено на четверти исходной модели с ограничением внешней расчетной области дополнительными слоями *Infinite Element Domain*;

2) размеры элементов расчетной конечно-элементной сетки: максимальные – 0,5 мм; минимальные – 0,05 мм;

3) для описания физических процессов использован физический интерфейс *Magnetic Fields*; магнитные свойства элементов ПЭМВ задаются при помощи узла *Ampere's Law*, в частности – параметром *Magnetization Model*:

– для ферромагнитных участков магнитопровода, выполненных из электротехнической стали марки 10895, используется модель *B-H curve*;

– для постоянного магнита используется модель *Magnetization*; направление магнитного поля – вдоль оси Z (оси симметрии);

4) магнитный поток, создаваемый МДС катушки, задается при помощи *Coil* и имеет встречное направление по отношению к магнитному потоку, создаваемому МДС постоянного магнита;

5) моделирование произведено по типу *Stationary* с использованием линейной дискретизации интерфейса в комбинации с прямым решателем и условием *Gauge Fixing for A-Field*.

Результаты расчетов результирующей силы P_{Σ} представлены на рис. 3 в виде нагрузочных характеристик $P_{\Sigma} = f(F_k)$ при различных значениях зазора δ . По этим зависимостям при заданных (известных) значениях сил пружины $P_{пр}$ и зазора удержания $\delta_{уд}$ можно определить значение МДС срабатывания катушки $F_{ср}$. Так, при $P_{пр} = 18$ Н и $\delta_{уд} = 0,1$ мм, МДС $F_{ср}$ составит 180 А, что незначительно отличается от опытных данных ($F_{ср.опыт} = 175$ А).

Здесь представляет интерес определение участков насыщения, т.е. распределения магнитной индукции, в магнитной системе при суммарном действии магнита и катушки. Пример получаемого при моделировании распределения магнитной индукции в ПЭМВ приведен на рис. 4. Как следует из рис. 4, индукции в якоре и на изгибе магнитопровода близки к индукции насыщения ($B \approx 1,61$ Тл), что неэффективно с точки зрения мощности намагничивающих элементов, но имеющие сечения магнитных участков обеспечивают минимальные размеры ПЭМВ.

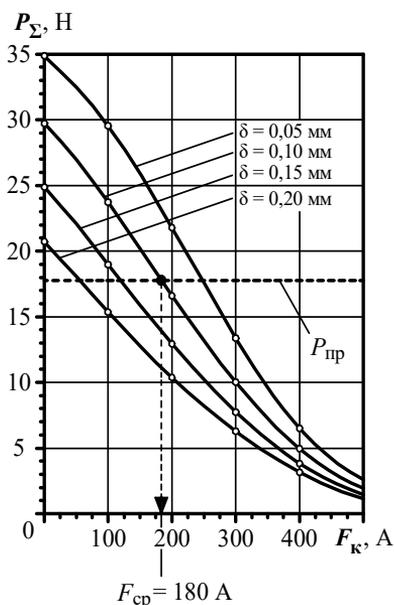


Рис. 3. Нагрузочные характеристики ПЭМВ $P_{\Sigma} = f(F_k)$ и пример определения МДС срабатывания $F_{ср}$ при величине $P_{пр} = 18$ Н и $\delta_{уд} = 0,1$ мм

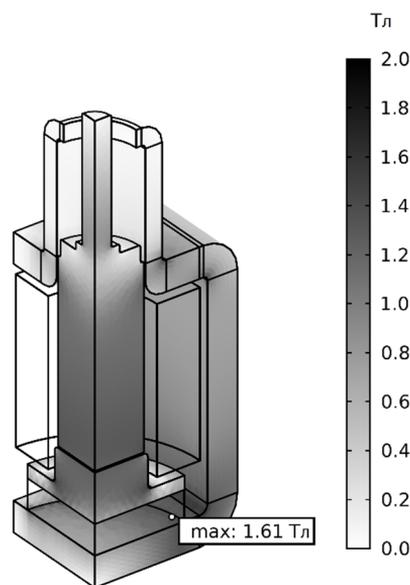


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в ПЭМВ для $\delta = 0,1$ мм и $F_k = 200$ А по результатам расчета ПК COMSOL Multiphysics (внутри постоянного магнита и катушки распределение не показано)

Оценка динамических параметров ПЭМВ. Если пренебречь усилием постоянного магнита $P_{пм}$ при больших зазорах и силой противодействия $P_{защ}$, то, согласно условию сохранения энергии механической системы, сумма изменений потенциальной $\Delta E_{п}$ и кинетической $\Delta E_{к}$ энергий пружины при переходе из сжатого (рабочего) состояния с деформацией x_2 в конечное положение с отпущенным якорем при деформации x_1 будет равна нулю:

$$\Delta E_{п} + \Delta E_{к} = 0$$

или с учетом неподвижности подвижных частей в начальный момент времени ($v_2 = 0$ м/с)

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{c \cdot (x_2^2 - x_1^2)}{2}, \quad (2)$$

где $\frac{mv_1^2}{2}$ – кинетическая энергия при деформации x_1 ; m – масса подвижных частей (якоря, втулки, пружины), кг; v_1 – скорость движения якоря (подвижных частей) при деформации x_1 , м/с, $c = \frac{P_2 - P_1}{L_1 - L_2}$ – жесткость пружины, Н/м;

$$x_1 = L_0 - L_1; \quad x_2 = L_0 - L_2.$$

Из равенства (2) определяется скорость движения v_1 якоря.

Время движения $t_{\text{дв}}$ определяется как

$$t_{\text{дв}} = (x_2 - x_1)/v_1.$$

Для рассматриваемого ПЭМВ: $x_1 = 11,5$ мм; $x_2 = 17,0$ мм; $m = 4,3 \cdot 10^{-3}$ кг.

Результаты расчетов:

$$1) \text{ жесткость пружины } c = \frac{18,0 - 12,5}{(16,5 - 11,0) \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^3 \text{ Н/м;}$$

$$2) \text{ скорость движения якоря } v_1 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^3 \cdot (17,0^2 - 11,5^2) \cdot 10^{-6}}{4,3 \cdot 10^{-3}}} = 6,0 \text{ м/с;}$$

$$3) \text{ время движения } t_{\text{дв}} = (17,0 - 11,5) \cdot 10^{-3} / 6,0 = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Влияние на динамические параметры силы постоянного магнита $P_{\text{пм}}$ и противодействия защелки $P_{\text{защ}}$ можно учесть при проектных расчетах через коэффициент снижения K_E потенциальной энергии, т.е.

$$\Delta E_{\text{п.расч}} = K_E \cdot \Delta E_{\text{п}},$$

где $K_E = 0,8 \div 0,9$.

Полученные динамические параметры рекомендуется использовать при проектировании механизма свободного расцепления АВ.

Выводы. Таким образом, результаты поверочных расчетов по предложенной методике подтверждают работоспособность малогабаритного поляризованного электромагнита с принудительным (внешним) включением и эффективность его применения в современных АВ. Изложенная методика может быть использована также при проектировании других видов ПЭМВ с аналогичным принципом действия.

Литература

1. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Поляризованные электромагниты. М.; Л.: Энергия, 1964. 120 с.
2. Иванов И.П., Сагарадзе Е.В., Свинцов Г.П. Вопросы общей теории и практики проектирования поляризованных электромагнитов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. № 2. С. 44–50.
3. Иванов И.П., Митрофанов О.Н., Свинцов Г.П. Особенности проектирования магнитных систем перспективных сильноточных поляризованных реле // Проблемы и перспективы развития

энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 160–166.

4. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло и др.; под ред. Г.В. Буткевича. М.: Высш. шк., 1970. 600 с.

5. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. 5-е изд., перераб. И доп. СПб.: Лань, 2015. 592 с.

6. COMSOL Multiphysics – программное обеспечение для мультифизического моделирования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.comsol.ru> (дата обращения 12.12.2022).

ИВАНОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (ipivanov@vniir.ru).

САМУИЛОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (dsamuilov@vniir.ru).

ТРОФИМОВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ – начальник отдела автоматических выключателей, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (etrofimov@vniir.ru).

ЧЕРНОВ ГЕННАДИЙ АНДРЕЕВИЧ – инженер-конструктор, АО «ВНИИР-Прогресс»; магистрант кафедры электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (gachernov@vniir.ru).

ВАСИЛЬЕВ ЕВГЕНИЙ ГЕОРГИЕВИЧ – старший научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (veg@vniir.ru).

Ivan P. IVANOV, Dmitriy V. SAMUILOV,
Evgeniy Yu. TROFIMOV, Gennadiy A. CHERNOV, Evgeniy G. VASILYEV

FEATURES OF DESIGNING POLARIZED ELECTROMAGNETS WITH POSITIVE ENGAGEMENT OF THE ARMATURE

Key words: circuit breaker, electromechanical release, polarized electromagnet, design, numerical modeling, dynamic parameters.

The article considers the features of designing polarized electromagnets with positive engagement of the armature, these issues being insufficiently studied in the technical literature. The relevance of the topic is due to the need to create such electromagnets to use as small-sized electromechanical release devices in modern circuit breakers of internal production.

The aim of the study is to develop a scientifically based methodology for designing a new class of polarized electromagnets, taking into account their design features determined by the positive engagement of the armature. The article analyzes the characteristics and distinctive features of the design and the operating principle of the electromagnet manufactured by Schneider Electric. Verification calculations were carried out using numerical modeling by the finite element method. It is noted that in order to ensure the small dimensions of the electromagnet in the working state, the magnetic induction in the magnetic circuit elements is close to saturation induction.

Comparison of the calculated values and simulation results with experimental data showed sufficient accuracy for engineering calculations when using the proposed technique, which indicates its reliability and the possibility of using it in the design of polarized electromagnets with positive engagement of armature of different designs.

References

1. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Polyarizovannye elektromagnity* [Polarized electromagnets]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964. 120 p.

2. Ivanov I.P., Sagaradze E.V., Svintsov G.P. *Voprosy obshchei teorii i praktiki proektirovaniya polyarizovannykh elektromagnitov* [Questions of the general theory and practice of designing polarized electromagnets]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2017, no. 2, pp. 44–50.

3. Ivanov I.P., Mitrofanov O.N., Svintsov G.P. *Osobennosti proektirovaniya magnitnykh sistem perspektivnykh sil'notochnykh polarizovannykh rele* [Features of designing magnetic systems of promising high-current polarized relays]. *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy I mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of I Int. Sci. Conf. «Problems and prospects of development of power engineering, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2017, pp. 160–166.

4. Butkevich G.V. ed.; Bul' B.K., Butkevich G.V., Godzhello A.G. et. al. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of electrical devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 600 p.

5. Kurbatov P.A., ed. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov. 5-e izd., pererab. i dop.* [Fundamentals of the theory of electrical devices. 5th ed.]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015, 592 p.

6. *COMSOL Multiphysics – programnoye obespechenie dlya mul'tifizicheskogo modelirovaniya* [COMSOL Multiphysics – software for multiphysical modeling]. Available at: <http://www.comsol.ru> (Accessed Date 2022, Dec. 12).

IVAN P. IVANOV – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (ipivanov@vniir.ru).

DMITRIY V. SAMUILOV – Researcher, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (dsamuilov@vniir.ru).

EVGENIY Yu. TROFIMOV – Head of Department of Automatic Switches, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (etrofimov@vniir.ru).

GENNADIY A. CHERNOV – Design Engineer, JSC «VNIIR-Progress»; Master's Program Student of Electrical and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (gachernov@vniir.ru).

EVGENIY G. VASILYEV – Senior Researcher, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (veg@vniir.ru).

Формат цитирования: Иванов И.П., Самуилов Д.В., Трофимов Е.Ю., Чернов Г.А., Васильев Е.Г. Особенности проектирования поляризованных электромагнитов с принудительным включением якоря // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2. – С. 85–92. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-85-92.