

Применение сеточных моделей при исследовании линейного шагового двигателя для вертикального перемещения регулирующего органа

СМИРНОВ А.Ю., ЕРШОВА Е.А., УСНУНЦ-КРИГЕР Т.Н.

Исследуется линейный шаговый электропривод для вертикального перемещения регулирующего органа ядерного реактора. Описываются методы расчёта электромагнитных полей и электромагнитной силы, которые используются в алгоритме интегрирования уравнения движения ротора в приводе вертикального перемещения. Приведены результаты численных экспериментов процесса пуска привода на перемещение регулирующего органа вверх с разной скоростью, с выходом и без выхода линейного шагового двигателя из синхронизма. Глубокая детализация электромагнитных процессов в двигателе при моделировании привода позволяет уменьшить запас по расчётной электромагнитной силе или моменту, а значит снизить потери и увеличить ресурс изоляции и привода в целом.

Ключевые слова: *линейный двигатель, шаговый привод, моделирование, метод конечных элементов, магнитный потенциал*

Индукторные и индукторно-реактивные двигатели [1, 2] нередко используются в непосредственном приводе машин и механизмов с поступательным движением рабочего органа в качестве шаговых двигателей вместо шаговых двигателей с вращательным движением ротора и преобразователем вращательного движения в поступательное [3, 4]. Применение линейного двигателя в приводах вертикального перемещения регулирующего органа вместо двигателя вращательного движения позволяет исключить преобразователь вращательного движения в поступательное. За счёт этого предельно упрощается кинематическая схема исполнительного механизма системы управления и защиты ядерного реактора [5, 6].

Наиболее эффективная конструкция линейного шагового двигателя представляет собой индукторно-реактивную машину с изолированными в магнитном отношении фазами (рис. 1) [7]. Ротор набран из магнитомягких 1 и немагнитных 2 колец. Кольца 1 ротора взаимодействуют с такими же кольцами 3 на статоре, ограничивающими воздушный зазор с противоположной стороны. Магнитный поток фазных обмоток статора 4 замыкается в аксиально-радиальном направлении через несколько колец 1 и 3, расположенных между цилиндрическими полюсами 5 магнитопроводов 6, несколько раз пересекая зазор. Фазные обмотки 4 с магнитопроводами 6 установлены в общем корпусе 7 со смещением колец 3 соседних магнитопроводов на 1/4 зубцового деления. Ротор перемещается в опорах 8 и связан с регулирующим органом посредством штока 10.

Благодаря неоднократному пересечению зазора рабочим магнитным потоком достигаются высокое

использование активных материалов и уменьшенное по сравнению с другими аналогами значение индуктивного сопротивления реакции якоря.

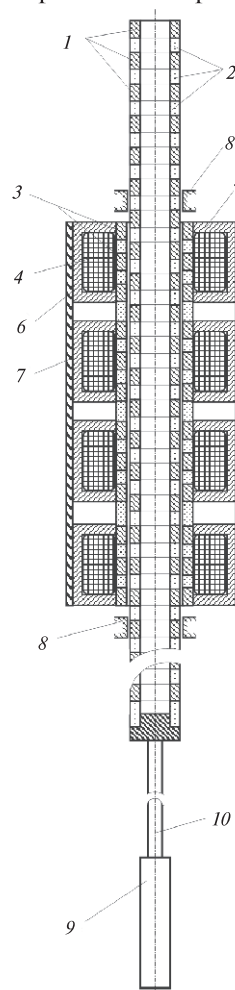


Рис. 1. Схема конструкции линейного шагового двигателя для механизма вертикального перемещения регулирующего органа

Серьёзным недостатком электропривода с линейными шаговыми двигателями является значительная инерционность подвижных масс, обусловленная безредукторной передачей движения непосредственно на исполнительный орган, и как следствие, низкое быстродействие и склонность к колебаниям при отработке шагов. Для исследования характера движения спроектированного линейного двигателя применяют математическое моделирование [8].

Полная система электромеханического преобразования энергии в линейном шаговом двигателе, как и в любой другой электрической машине, содержит уравнение движения и уравнения баланса напряжений всех обмоток и электрических контуров [9]. Приступая к интегрированию этой системы, подавляющее большинство исследователей упрощают её, принимая определённые допущения. При этом, однако, не учитываются взаимоиндуктивные связи между обмотками, в расчётной модели выделяется лишь одна фаза [8], пренебрегается насыщением магнитной цепи [10], характеристики изменения потокосцепления фаз и обмоток заменяются известными функциями, в основном линейными и гармоническими [1, 10]. В теории автоматического регулирования [11], стремясь получить аналитическое решение, прибегают к линеаризации механических и статических характеристик двигателя.

Перечисленные упрощения позволяют оперативно исследовать различные переходные и установившиеся режимы работы привода, используя достаточно простые и малозатратные с точки зрения создания математического описания и программирования модели. Однако результаты, полученные с их помощью, имеют преимущественно качественное значение, поскольку идеализируется причинно-следственная связь между токами обмоток двигателя и его электромагнитным моментом. Между тем при воспроизведении работы исполнительного механизма системы управления и защиты ядерного реактора очень важно определять конкретное положение регулирующего органа с высокой точностью в каждый момент времени, что делает изложенные выше подходы к моделированию движения ротора недостаточно достоверными.

Достоверный количественный анализ процесса движения регулирующего органа ядерного реактора может быть выполнен только в результате расчёта электромагнитных полей при определении электромагнитного момента машины по известным значениям токов её электрических контуров на каждом шаге интегрирования уравнения движения.

Задача упрощается тем, что современные средства преобразовательной техники позволяют сфор-

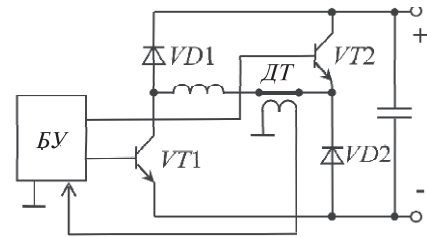


Рис. 2. Схема нереверсивного преобразователя частоты на основе асимметричного моста

мировать любую с учётом определённых ограничений по скорости нарастания и спада форму фазных токов. Для привода с рассматриваемым двигателем, в частности, может быть использован нереверсивный преобразователь частоты на основе асимметричного моста (рис. 2), отличающийся простотой и надёжностью. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ открываются синфазно. Инвертор, собранный по этой схеме, обладает широкими возможностями для регулирования выходного тока по сигналам обратной связи датчика тока $ДТ$ с использованием широтно-импульсной модуляции [12] в блоке управления $БУ$ и заданной формы импульсов тока.

Задав, например, треугольной на одном полупериоде изменения форму импульсов тока в фазах и исключив влияние неуправляемых токов короткозамкнутых контуров (если таковые имеются), можно отделить электромеханическую задачу определения положения ротора от электрической задачи расчёта токов, вынеся последнюю за рамки модели электромеханического преобразования.

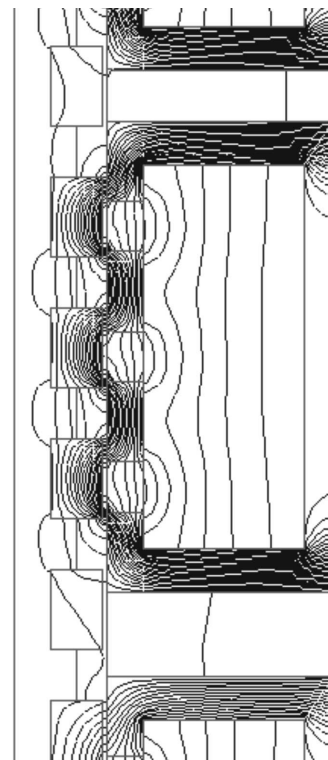


Рис. 3. Распределение магнитного потока в линейном ШД (фрагмент четырёхфазной модели)

Наиболее глубокую детализацию электромагнитных процессов в двигателе обеспечивает метод конечных элементов [13]. Расчёт поля во всех областях пространства этим методом может быть выполнен относительно векторных или скалярных магнитных потенциалов узлов сетки, ячейки которой заполняют всю расчётную область модели и характеризуются одинаковым материалом и магнитной проницаемостью внутри каждой из них.

Векторный магнитный потенциал в конкретном узле сеточной модели является характеристикой магнитного потока и связан с магнитной индукцией соотношением

$$B = \text{rot}A = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}, \quad (1)$$

где A – векторный магнитный потенциал; $\frac{\partial A_y}{\partial x}$ и $\frac{\partial A_x}{\partial y}$ – его частные производные по соответствующим координатам (в случае плоской модели поля и магнитной цепи).

Скалярный магнитный потенциал представляет собой объёмную производную напряжённости магнитного поля вдоль соответствующих координат (при трёхмерном поле):

$$H = \text{grad}\varphi_m = \frac{\partial \varphi_m}{\partial x} i + \frac{\partial \varphi_m}{\partial y} j + \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} k, \quad (2)$$

где φ_m – скалярный магнитный потенциал и частные производные его изменения по соответствующим координатным направлениям; i, j, k – координатные векторы единичной длины – орты. Применительно к магнитным цепям скалярный магнитный потенциал можно представить как магнитное напряжение этого узла сеточной модели относительно узла, магнитный потенциал которого условно принят равным нулю.

Изображение силовых линий магнитного поля в одной секции линейного двигателя (осесимметричная модель), полученное посредством векторного магнитного потенциала, показано на рис. 3.

Используя рассчитанные значения характеристик магнитного поля во всех узлах сетки, максимально достоверно определяется электромагнитная сила, приводящая в движение ротор линейного двигателя. Фундаментальным методом определения электромагнитной силы в магнитном поле является энергетический [14], учитывающий приращение энергии или коэнергии магнитного поля (рис. 3).

Найденное значение электромагнитной силы подставляется в уравнение движения электропривода:

$$ma = F_{\text{дв}} - \text{sign}\left|F_{\text{тр}}\right| \pm M_{\text{р.о}}, \quad (3)$$

в котором электромагнитный момент двигателя $F_{\text{дв}}$ определяется по его сеточной модели. В (3) m – масса ротора двигателя и движущихся частей исполнительного механизма; a – ускорение линейного движения; $F_{\text{дв}}$ – электромагнитная сила двигателя; $F_{\text{тр}}$ – сила трения в механизме; $M_{\text{р.о}}$ – масса регулирующего органа.

Интегрированием (3) по времени воспроизводится движение электропривода с линейным шаговым двигателем в различных режимах: пуска и останова при движении в направлении вверх и вниз, реверса, изменения тока и механической нагрузки и т.д.

Кроме сеточной модели электродвигателя, исходными данными для моделирования движения привода являются:

синхронная частота движения поля и ротора двигателя, она же определяет длительность цикла изменения тока в фазах двигателя $T_{\text{ц}}$;

параметры импульса питания двигателя – значения тока в характерных точках на периоде изменения в интервале от 0 до 2π ;

начальные значения координаты, определяющей положение ротора x и скорости его движения \dot{x} ;

параметры счёта – шаг счёта по времени (шаг интегрирования) Δt и время окончания счёта T_e .

Токовые нагрузки фаз определяются в начале каждого цикла путём интерполяции между характерными точками импульса тока по угловому аргументу

$$\varphi_1 = \frac{2\pi t_k}{T_{\text{ц}}}; \quad \varphi_n = 2\pi \left(\frac{t_k}{T_{\text{ц}}} + \frac{n-1}{m} \right) \quad (4)$$

для первой и последующих фаз двигателя соответственно. В (4) t_k – циклически изменяющееся время ($0 \leq t_k \leq T_{\text{ц}}$), по значениям которого определяется путём интерполяции текущее значение тока фаз двигателя.

Далее движение электропривода моделируется по алгоритму:

ввод начальных значений переменных – скорости и положения ротора (и регулирующего органа), времени ($t=0$);

определение токов фаз обмотки якоря по текущему значению времени коммутации t_k и приложение их к частям обмотки с катушками фазы;

расчёт сеточной модели двигателя относительно векторного или скалярного магнитного потенциала; вычисление электромагнитной силы двигателя;

решение уравнения движения относительно ускорения и интегрирование скорости и положения ротора: $\dot{x} = \dot{x} + a\Delta t$; $x = x + \dot{x}\Delta t$;

приращение времени на Δt и сравнение текущего времени с заданным временем окончания счёта T_e ;

переход к второму пункту алгоритма, если $t < T_e$.

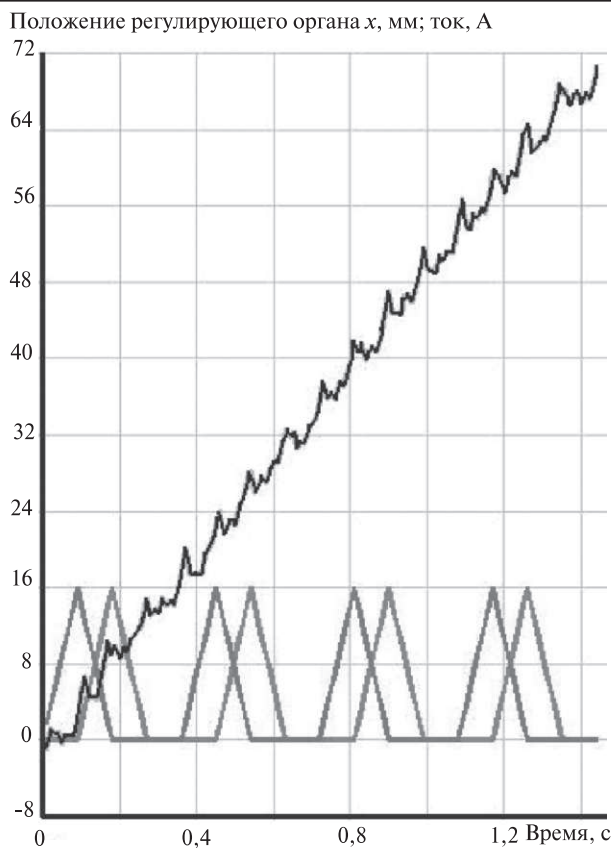


Рис. 4. Перемещение регулирующего органа вверх 40 мм/с

С использованием сеточной модели двигателя по приведенному алгоритму воспроизведён процесс пуска привода в режимах с номинальной и предельной для заданной нагрузки частотой переключения фаз.

В первом эксперименте (рис. 4) двигатель включается на подъём регулирующего органа вверх с синхронной частотой 40 мм/с. Уже после двух-трёх циклов изменения тока в фазах ротор двигателя успевает «догнать» поле (показаны осциллограммы изменения тока в двух смежных фазах из четырёх), линейная координата нарастает с незначительными отклонениями от положения, соответствующего равномерному движению с синхронной скоростью.

При увеличении синхронной частоты до 50 мм/с во втором эксперименте (рис. 5) ротор первоначально успевает разогнаться, но автоколебания, обусловленные инерционностью привода, вносят нарастающие возмущающие воздействия, которые к концу четвёртого цикла изменения тока в фазах двигателя приводят к необратимому пропуску обрабатываемых дискретных перемещений (шагов) и выходу двигателя из синхронизма. Между этими значениями находится область неустойчивого пуска, на ней факт успешного или неуспешного пуска двигателя зависит от начального

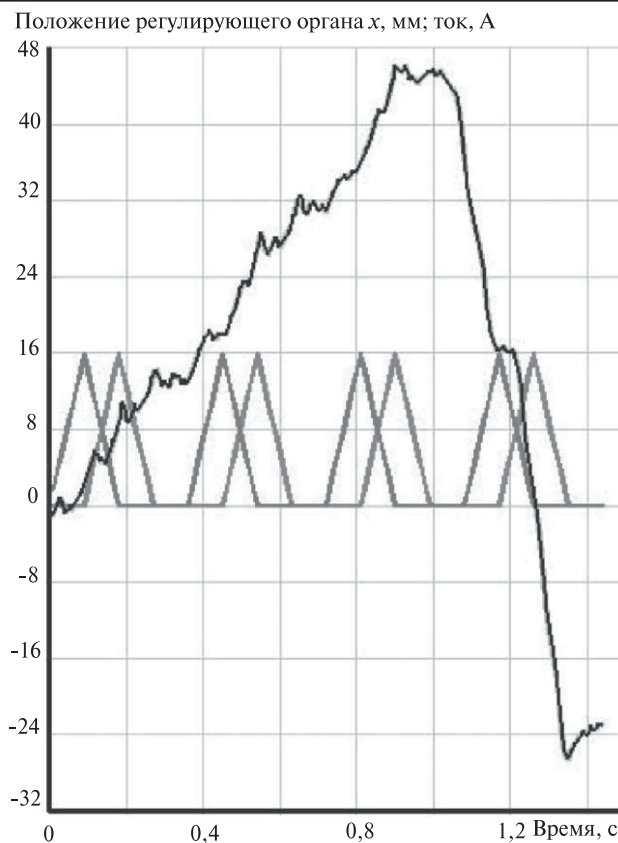


Рис. 5. Перемещение регулирующего органа вверх 50 мм/с, со срывом

положения ротора, т.е. от взаимного расположения магнитомягких полей на нём и на статоре.

Столь глубокая детализация электромагнитных процессов при моделировании привода позволяет снизить запас по превышению расчётной электромагнитной силы двигателя над нагрузкой, который вынужден закладывать в расчёт конструктор на предмет возможного разброса результатов из-за использования упрощённых моделей.

Выводы. 1. Численные расчеты линейного шагового двигателя с детальным воспроизведением электромагнитных процессов на сеточной модели подтвердили работоспособность конструкции с магнитомягкими кольцами на статоре и роторе с учётом возможного взаимного влияния разных фаз друг на друга через насыщение и потоки рассеяния.

2. Посредством виртуальных экспериментов на численной модели установлена область частот приемистости спроектированного линейного двигателя с заданной формой тока в фазах.

3. Уменьшение избыточной силы или момента шагового двигателя на 8–12% благодаря применению более достоверных методов моделирования позволяет снизить электромагнитные нагрузки и потери при тех же габаритах и повысить за счёт этого надёжность и ресурс работы двигателя и привода в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): Учебное пос. для вузов. — М.: Изд-во Форум, 2015, 192 с.
2. **Smirnov A.Yu.** Classification Issues for Noncontact Synchronous Machines. — Russian Electrical Engineering, 2012, vol. 83, No. 2, pp. 64–68.
3. **Патент №2412519 (РФ).** Реактивная машина/А.Ю. Смирнов, В.М. Крюков, Р.П. Темнов. — БИ, 2011, № 5.
4. **Патент №2533177 (РФ).** Электропривод для вертикального перемещения /А.Ю. Смирнов, В.И. Будцин, Р.П. Темнов. — БИ, 2014, № 32.
5. **Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок В.А.** Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1978, 272 с.
6. **Юркевич Г.П., Мерлин Л.М., Кураханов Г.И. и др.** Электроприводы регулирующих органов ядерных реакторов: Основы проектирования. — М.: Энергоатомиздат, 1985, 240 с.
7. **Клоков Б.К., Цуканов В.И., Ковган Д.И.** Расчёт электромагнитного тягового усилия в линейном двигателе возвратно-поступательного движения. — Электричество, 1989, № 9, с. 31–37.
8. **Цуканов В.И., Серихин Н.А.** Математическое моделирование электромеханического переходного процесса линейного шагового двигателя. — Электричество, 1992, № 12, с. 31–34.
9. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин — М.: Высшая школа, 1987, 248 с.
10. **Дискретный** электропривод с шаговыми двигателями/Под ред. М.Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971, 624 с.

11. **Наумов Б.Н.** Переходные процессы в системах автоматического регулирования/Под ред. Я.З. Цыпкина — М.; Л.: Гостехиздат, 1960, 223 с.
12. **Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М.** Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией. — М.: Энергия, 1968, 94 с.
13. **Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.В.** Электромагнитные поля в электрических машинах. — Л.: Энергия, 1979, 176 с.
14. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989, 312 с.

[23.05.2016]

Авторы: Смирнов Александр Юрьевич окончил Горьковский политехнический институт (ныне Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева) в 1980 г. В 2007 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры теоретической и общей электротехники НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Ершова Евгения Анатольевна окончила Петербургский институт инженеров транспорта (ныне Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I) в 1992 г. Старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Уснуиц-Кригер Татьяна Николаевна окончила НГТУ им. Р.Е. Алексеева в 2012 г., аспирант.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No.11, pp. 30–34.

Application of Mesh Models for Investigating the Linear Step Motor for Vertically Moving the Control Rod

SMIRNOV Aleksandr Yur'yevich (Nizhnii Novgorod State Technical University (NSTU), Nizhnii Novgorod, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

YERSHOVA Yevgeniya Anatol'yevna (NSTU, Nizhnii Novgorod, Russia) — Senior Lecturer

USNUNTS-KREGER Tat'yana Nikolayevna (NSTU, Nizhnii Novgorod, Russia) — Ph. D. Student

A linear step electric drive for vertically moving a nuclear reactor's control rod is investigated. The electromagnetic field and electromagnetic force calculation methods that are used in the algorithm to integrate the vertical displacement drive's rotor motion equation are described. The results from numerical experiments on simulating the drive starting process for moving the control rod upward at different speeds of the linear step motor with and without loss of synchronism are presented. A highly detailed analysis of electromagnetic processes in the motor performed in its simulation makes it possible to decrease the margin with respect to the design electromagnetic force or torque, and, hence, to decrease the losses and increase the service life of insulation and the drive as a whole.

Key words: step drive, linear motor, simulation, finite element method, magnetic potential

REFERENCES

1. **Smirnov A.Yu.** *Induktornye mashiny. Proektirovaniye i vychislitel'nyi analiz (spets. kurs)* (Inductor machines. Design and computational analysis. Special rate). Moscow, Publ. «Forum», 2015, 192 p.
2. **Smirnov A.Yu.** Classification Issues for Noncontact Synchronous Machines. — Russian Electrical Engineering, 2012, vol. 83, No. 2, pp. 64–68.
3. **Patent RF No. 2412519.** *Reaktivnaya mashina* (Reactive machine)/A.Yu. Smirnov, V.M. Kryukov, R.P. Temnov. Bulletin of inventions, 2011, No. 5.
4. **Patent RF No. 2533177.** *Elektroprivod dlya vertikal'nogo peremeshcheniya* (The drive for vertical movement). Bulletin of inventions, 2014, No. 32.
5. **Emel'yanov I.Ya., Voskoboinikov V.V., Maslenok V.A.** *Osnovy proektirovaniya mekhanizmov upravleniya yadernykh reaktorov* (Fundamentals of nuclear reactors control mechanisms). Moscow, Atomizdat, 1978, 272 p.
6. **Yurkevich I.Ya., Merlin L.M., Kurakhtanov G.I.** *Elektroprivod reguliruyushchikh organov yadernykh reaktorov. Osnovy proektirovaniya* (Electric drives regulators in nuclear reactors. Design basics). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 240 p.
7. **Klokov B.K., Tsukanov V.I., Kovgan D.I.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1989, No. 9, pp. 31–37.
8. **Tsukanov V.I., Serikhin N.A.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1992, No. 12, pp. 31–34.
9. **Kopylov I.P.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electrical machines). Moscow, Publ. «Vissaya shkola», 1987, 248 p.
10. **Diskretniy elektroprivod s shagovymi dvigatelyami/Под ред. М.Г. Чиликина** (Discrete drive with stepper/Edit. by M.G. Chilikin). Moscow, Publ. «Energiya», 1971, 624 p.
11. **Perekhodnyye protsessy v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya/Под ред. Я.З. Цыпкина** (Transients in automatic control systems/Edit. by Ya.Z. Tsyppkin). Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1960, 223 p.
12. **Sandler A.S., Gusyatskii Yu.M.** *Tiristornye invertory s shirotno-impul'snoi modulyatsiyey* (Thyristor inverters with pulse width modulation). Moscow, Publ. «Energiya», 1968, 94 p.
13. **Brynskiy E.A., Danilevich Ya.B., Yakovlev V.V.** *Elektromagnitnye polya v elektricheskikh mashinakh* (Electromagnetic fields in electrical machines). Leningrad, Publ. «Energiya», 1979, 176 p.
14. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektromagnitnye sily i preobrazovaniye energii v elektricheskikh mashinakh* (Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1989, 312 p.