УДК 622.233.05:621.3

ТЕОРИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНО-ПОДАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА БУРОВОГО СТАНКА ПРИ БУРЕНИИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ

Гилёв А.В., Шигин А.О.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: office@sfu-kras.ru

Бурение сложноструктурных массивов горных пород сопровождается ударами и толчками, которые передаются через буровой инструмент и буровой став к приводу подачи. Изменение буримости затрудняет или облегчает продвижение бурового инструмента сквозь породу. В случае применения электромагнитного привода подачи бурового станка эти изменения будут отражаться на изменениях электрических параметров электрической машины. Изменение нагрузки асинхронной машины приводит к соответствующему изменению скольжения. Асинхронные двигатели имеют достаточно жесткую ниспадающую механическую характеристику на рабочем участке, т.к. скорость ротора мало зависит от осевой нагрузки. Однако по сравнению с характеристикой гидравлического линейного двигателя она является более мягкой и адаптивной. Поскольку рабочая часть механической характеристики является наклонной, то в случае резких изменений показателя буримости и соответственном изменении линейной скорости подачи бурового става точка рабочего режима также будет иметь возможность перемещения При заклинивании бурового инструмента механическая характеристика, при которой двигатель работал до удара, позволит уменьшить усилие подачи и линейную скорость до нуля, но ток возрастет до токов короткого замыкания.

Ключевые слова: бурение сложноструктурных массивов, изменение буримости, электромагнитный привод подачи бурового станка, асинхронный линейный двигатель, адаптивная характеристика

WORKING OUT OF IDEALISED MODEL OF DRILLING OF ROCKS WITH VARIOUS PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES BY ROLLER BIT CHISELS

Gilev A.V., Shigin A.O.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: office@sfu-kras.ru

Drilling of rocks with difficult structure is accompanied by blows and pushes which are transferred via the chisel tool and chisel having become to a giving drive. Change of drilling capacity complicates or facilitates advance of the chisel tool through breed. In case of application of an electromagnetic drive of giving of the drilling rig, these changes will be reflected in changes of electric parameters of the electric car. Change of loading of the asynchronous car leads to corresponding change of sliding. Asynchronous engines have rather rigid falling mechanical characteristic on a working site since speed of a rotor depends on axial loading a little. However in comparison with the characteristic of the hydraulic linear engine it is softer and adaptive. As the working part of the mechanical characteristic is inclined, in case of sharp changes of an indicator of drilling capacity and respective change of linear speed of giving of chisel body, the point of an operating mode will have also moving possibility. When jamming the chisel tool the mechanical characteristic at which the engine worked to blow, will allow to reduce effort of giving and linear speed to zero, but the current will increase to currents of short circuit.

Keywords: drilling of breeds with difficult structure, drilling capacity change, an eolektromagnitny drive of giving of the drilling rig, the asynchronous linear engine, the adaptive characteristic

Бурение сложноструктурных массивов горных пород сопровождается ударами и толчками, которые передаются через буровой инструмент и буровой став к приводу подачи [1, 2]. Изменение буримости затрудняет или облегчает продвижение бурового инструмента сквозь породу. В случае применения электромагнитного привода подачи бурового станка эти изменения будут отражаться на изменениях электрических параметров электрической машины. Изменение нагрузки асинхронной машины приводит к соответствующему изменению скольжения.

Выражение для электромагнитного усилия для линейной асинхронной машины справедливо для любого режима работы и может быть использовано для построения зависимости усилия от скольжения [3, 4] при изменении последнего от $+\infty$ до $-\infty$ (рис. 1).

Рассмотрим часть этой характеристики, соответствующей режиму двигателя, т.е. при скольжении, изменяющемся от 1 до 0. Обозначим усилие, развиваемое двигателем при пуске в ход ($S = 1$), как $F_{\text{пуск}}$. Скольжение, при котором момент достигает наибольшего значения, называют критическим скольжением $S_{\text{кр}}$, а наибольшее значение усилия – критическим усилием $F_{\text{кр}}$. Тогда перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = F_{\text{кр}}/F_{\text{н}}.$$

Критическое усилие $F_{\text{кр}}$ и скольжение $S_{\text{кр}}$ с учетом электрического сопротивления

$$F_{\text{кр}} = C_{\text{м}} \frac{U_1^2}{2X_2}; \quad S_{\text{кр}} \approx \frac{R_2}{X_2}.$$

Критический момент не зависит от активного сопротивления ротора, но зависит от подведенного напряжения. При уменьшении U_1 снижается перегрузочная способность асинхронного двигателя.

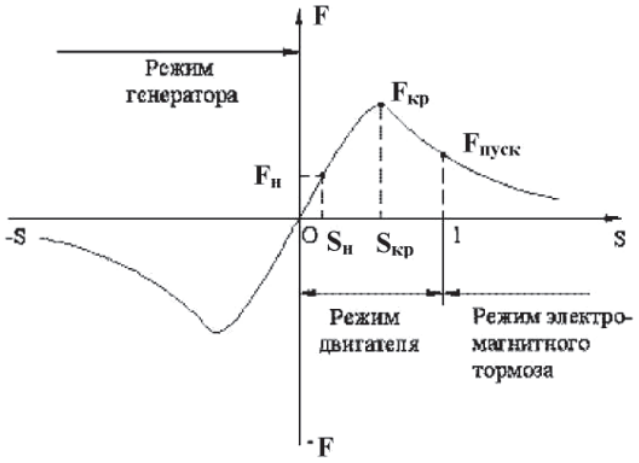

Рис. 1. Зависимость усилия, создаваемого линейным асинхронным приводом от скольжения

Из выражения, известного под названием «формула Клосса», получим выражение, удобное для построения $F = f(S)$.

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{2}{S / S_{кр} + S_{кр} / S}.$$

Если в эту формулу подставить вместо F и S номинальные значения момента и скольжения ($F_н$ и $S_н$), то можно получить соотношение для расчета критического скольжения.

$$S_{кр} = S_н \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}\right).$$

Участок характеристики (рис. 2), на котором скольжение изменяется от 0 до $S_{кр}$, соответствует устойчивой работе двигателя. На этом участке располагается точка номинального режима ($F_н$, $S_н$). В пределах изменения скольжения от 0 до $S_{кр}$ изменение нагрузки на валу двигателя будет приводить к изменению частоты вращения ротора, изменению скольжения и вращающего момента. С увеличением момента нагрузки на валу частота вращения ротора станет меньше, что приведет к увеличению скольжения и электромагнитного (вращающего) момента. Если момент нагрузки превысит критический момент, то двигатель остановится.

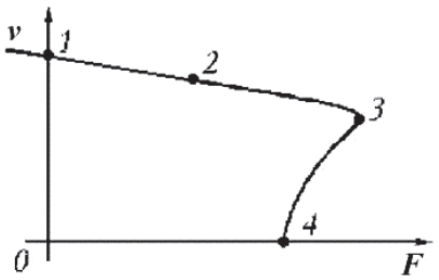

Рис. 2. Общий вид механической характеристики линейного асинхронного привода

Участок характеристики, на котором скольжение изменяется от $S_{кр}$ до 1, соответствует неустойчивой работе двигателя. Этот участок характеристики двигатель проходит при пуске в ход и при торможении.

Механической характеристикой линейного асинхронного двигателя является зависимость линейной скорости ротора в функции от электромагнитного усилия $v = f(F)$. Эту характеристику (см. рис. 2) можно получить, используя зависимость $F = f(S)$ и пересчитав линейную скорость ротора при разных значениях скольжения.

Так как $S = (v_0 - v)/v_0$, отсюда $v = v_0(1 - S)$.

При этом линейная скорость магнитного поля

$$v_0 = l \cdot \frac{60 f}{p}.$$

Здесь l – длина статора линейного двигателя, м; f – частота напряжения сети, Гц; p – число пар полюсов статора.

Участок 1–3 соответствует устойчивой работе, участок 3–4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n = n_0$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты $F_н$ и $v_н$. Точка 3 соответствует критическому моменту $F_{кр}$ и критической частоте вращения $v_{кр}$. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $F_{пуск}$. Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным. Точка 1:

$$v_0 = l \cdot \frac{60 f}{p}.$$

Точка 2 с координатами $v_н$ и $F_н$. Номинальная скорость $v_н$ равна среднему значению скорости бурения в заданном режиме.

Номинальное усилие рассчитывается по формуле

$$F_{\text{н}} = k_{\text{констр}} \frac{P_{\text{н}} \cdot l}{v_{\text{н}}},\ \text{Н};$$

здесь $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность.

Точка 3 с координатами $F_{\text{кр}} v_{\text{кр}}$. Критический момент рассчитывается по формуле $F_{\text{кр}} = F_{\text{н}}\lambda$. Перегрузочная способность λ задается в паспорте двигателя.

$$v_{\text{кр}} = v_0(1 - S_{\text{кр}});$$

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{н}}\left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}\right);$$

$S_{\text{н}} = (v_0 - v_{\text{н}})/v_0$ – номинальное скольжение.

Точка 4 имеет координаты $v = 0$ и $F = F_{\text{пуск}}$. Пусковое усилие вычисляют по формуле

$$F_{\text{пуск}} = F_{\text{н}}\lambda_{\text{пуск}},$$

где $\lambda_{\text{пуск}}$ – кратность пускового момента, задается в паспорте.

Асинхронные двигатели имеют достаточно жесткую ниспадающую механическую характеристику на участке 1–3, т.к. скорость ротора мало зависит от осевой нагрузки. Однако по сравнению с характеристикой гидравлического линейного двигателя она является более мягкой и адаптивной.

На рис. 3 показаны режимы работы линейного электромагнитного привода при плавно изменяющейся и резко возрастающей нагрузке.

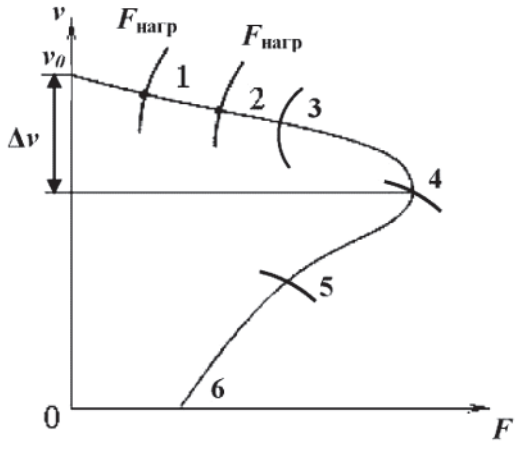

Рис. 3. Работа линейного электромагнитного привода при плавно изменяющейся и резко возрастающей нагрузке

Рассмотрим случай плавного увеличения и уменьшения показателя буримости при бурении однородной по свойствам породы. В начальный момент двигатель работает в номинальном режиме (точка 2). При увеличении показателя буримости естественным путем снижается скорость бурения и линейная скорость двигателя. При этом увеличивается скольжение, и точка рабочего режима перемещается в точку 3. При снижении показателя буримости, скорость бурения и линейная скорость двигателя естественным путем увеличиваются. При этом скольжение двигателя уменьшается, и точка рабочего режима перемещается из точки 3 в точку 2. Аналогично точка рабочего режима двигателя смещается в другую сторону. Если в начальный момент двигатель работает в номинальном режиме (точка 2) и показатель буримости снижается, то скорость бурения и линейная скорость двигателя также естественным путем снижаются. При этом уменьшается скольжение, и точка рабочего режима перемещается в точку 1. Затем при увеличении показателя буримости скорость бурения и линейная скорость двигателя естественным путем уменьшаются. Скольжение двигателя увеличивается, и точка рабочего режима перемещается из точки 1 в точку 2.

Поскольку рабочая часть механической характеристики является наклонной, то в случае резких изменений показателя буримости и соответственном изменении линейной скорости подачи бурового става точка рабочего режима также будет иметь возможность перемещения. Минимальное время перемещения точки рабочего режима будет способствовать уменьшению ударных нагрузок. Время задержки при перемещении точки рабочего режима асинхронной машины характеризуется временем переходного процесса. Самый сложный для обмотки статора переходной процесс из возможных – это внезапно возникший режим короткого замыкания, т.е. внезапное заклинивание и остановка. В этом случае максимальный ток будет равен 1,2–1,35 от величины установившегося тока. Такой ток возникнет в одной из фаз примерно через половину периода колебания переменного тока сети переменного напряжения [1]. Т.е. время задержки при перемещении точки рабочего режима асинхронной машины характеризуется временем половины периода колебания тока сети переменного напряжения. Таким образом, время возможного возникновения ударных нагрузок при частоте напряжения 50 Гц, сокращается до 0,01 с. Для сравнения, система с гидравлическим линейным двигателем не реагирует адаптивно и ударные нагрузки воспринимаются полностью буровым инструментом и буровым ставом.

Для надежной работы шарошечных долот наиболее опасен случай резкого и значительного возрастания нагрузки, причи-

ной которого может быть соответствующее изменение показателя буримости. При работе электромагнитного привода подачи данная проблема решается следующим образом. В начальный момент двигатель работает в номинальном режиме (точка 2), точка которого находится недалеко от значения критического усилия $F_{кр}$. При резко возрастающей нагрузке скорость бурения и линейная скорость двигателя естественным путем увеличиваются на величину Δv (рис. 3). При этом режим перемещается из точки 2 в точку 4. В случае, если линейная скорость уменьшается на значение больше величины Δv, то режим перемещается из точки 4 в точку 5. Такой режим работы двигателя сопровождается увеличением токов, вплоть до значения тока короткого замыкания. И высокий ток удерживается в таком значении, пока не увеличится естественным путем линейная скорость. Либо, при длительной задержке точки рабочего режима, возможно автоматическое регулирование с использованием преобразователя частоты напряжения с целью изменения механической характеристики, в которой установившаяся линейная скорость будет равна номинальной. По указанным причинам при проектировании электромагнитного привода подачи для бурового станка, работа которого предполагается преимущественно со сложноструктурными массивами, обмотка должна быть рассчитана на длительные перегрузки и большие токи. А также необходима система автоматического регулирования режима работы двигателя.

При бурении сложноструктурных массивов довольно часто возникает заклинивание бурового инструмента. Для электромагнитного привода такой режим работы нужно рассматривать как резкое снижение скорости бурения до нуля. Оно возможно либо по причине заклинивания бурового инструмента при бурении трещиноватых пород, либо вследствие разрушения опор качения шарошек. В первом случае есть необходимость максимального смягчения удара для предотвращения разрушения опор шарошек долота, а также для смягчения ударных нагрузок, передаваемых на буровой став и вращательный механизм. Во втором случае также есть необходимость смягчения удара для предотвращения окончательного разрушения опор шарошек и потери шарошки в скважине. Потеря шарошки требует извлечения металлических частей специальными ловителями, что занимает значительное время. Во втором случае также есть опасность ударных нагрузок, передаваемых на буровой став и вращательный механизм.

Для данного режима характерно снижение линейной скорости ротора подающего механизма до нуля. Это вызывает внезапный режим короткого замыкания как во вращающем двигателе, так и в электромагнитном двигателе подачи. При этом механическая характеристика, при которой двигатель работал до удара, позволит уменьшить усилие подачи и линейную скорость до нуля, но ток возрастет до токов короткого замыкания.

В данном режиме существует три задачи:

1. Снизить силу ударных нагрузок.
2. Снизить токи в обмотках статора.
3. Восстановить вращение с минимальными перегрузками для долота.

1. При заклинивании асинхронный двигатель как в системе подачи, так и в системе вращения снижает скорость согласно соотношению сил инерции и сил сопротивления породы. Если допустить мгновенное заклинивание, то вся кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию деформации и разрушения породы и металла. Эта энергия определяется из мощности привода

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\Delta E}{t} = \frac{m\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2 \cdot t}, \qquad (1)$$

где N – мощность, передаваемая от привода подачи к буровому инструменту бурового станка с учетом к.п.д. привода подачи, Вт; ΔE – изменение кинетической энергии при продвижении бурового инструмента через породу, Дж; m – эквивалентная масса, характеризующая массу рабочего органа и энергию подающего привода, кг; v_1 и v_2 – скорость равномерного продвижения бурового инструмента при бурении породы 1 и 2 с соответствующими физико-механическими свойствами, м/с (здесь порода 2 имеет показатель буримости больше, чем порода 1); t – время переходного процесса, т.е. период, за который скорость подачи бурового инструмента изменяется от значения 1 до значения 2.

Или

$$\sigma_{уд} = \frac{F}{S} = \frac{m\left(v_2 - v_1\right)}{S \cdot t}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{уд}$ – напряжение, возникающее в металле при ударе, МПа; S – площадь контактной поверхности в подшипниковых узлах или других элементах, воспринимающих полностью нагрузку удара, мм^2.

Условно для пояснения процесса можно применить схему перехода долота из породы с одним показателем буримости в породу с более высоким показателем буримости (рис. 4). В данном случае скорость после переходного процесса v_2 равна нулю.

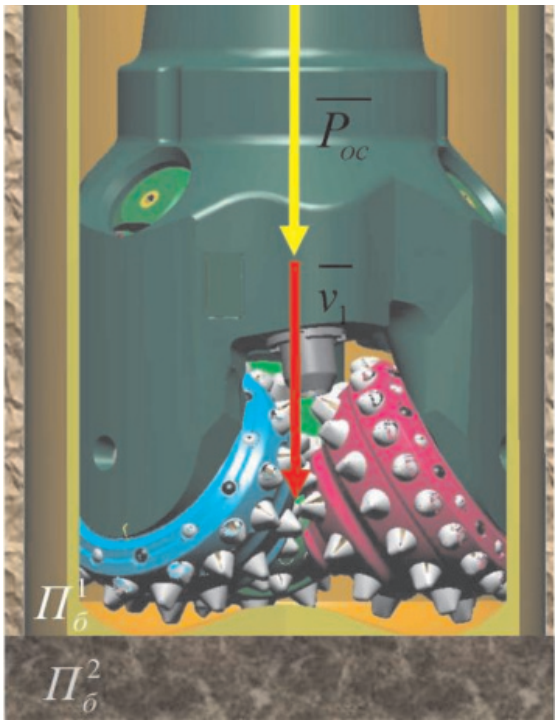

Рис. 4. Схема бурения трехшарошечным долотом при переходе бурового инструмента на слой горной породы с большим показателем буримости $П_б^2 > П_б^1$. P_{oc} – осевое усилие, v_1 – скорость бурения породы с показателем буримости $П_б^1$

В выражении (1) кинетическая энергия зависит:

1) от величины мощности;
2) от разности скоростей;
3) от времени переходного процесса.

Мощность привода подачи можно регулировать величиной подаваемого напряжения. Сложность заключается в малом промежутке времени, за который необходимо изменить его значение. С данной задачей может справиться либо автоматическая отсечка напряжения, либо автоматический регулятор напряжения.

Отсечка напряжения – наиболее простой и дешевый вариант, но его применение затрудняет последующий пуск. В этом случае для пуска будет необходимо поднимать буровой став и забуриваться с вращающимся буровым инструментом и ставом. Автоматический регулятор напряжения может значительно снизить мощность, а также смягчить механическую характеристику. Снижение мощности позволит уменьшить силу удара, но также затрудняет последующий пуск. Заклинивание может быть пройдено при помощи увеличения напряжения привода вращателя. При этом энергия удара увеличивается, но облегчается последующий пуск.

Смягчение механической характеристики также позволит снизить энергию удара, поскольку в данном случае при увеличении нагрузки линейная скорость бурового става естественным путем уменьшается и увеличивается ток в обмотке.

Все методы, применяемые при регулировании мощности, не решают в полной мере проблему ударных нагрузок. Например, метод регулирования напряжения более эффективен в случае предупреждения ударных нагрузок. Например, если известно, что породы трещиноватые, то необходимо снижать напряжение при сохранении скорости подачи.

Более эффективным при возникших ударных нагрузках и заклинивании является метод регулирования скорости подачи при сохранении мощности привода. Для этого необходимо применять регулятор частоты напряжения для уменьшения номинальной скорости в автоматическом режиме. Этот метод позволяет как снизить ударные нагрузки, так и выйти из режима заклинивания, не прибегая к подъему бурового става.

Время процесса зависит от механических характеристик породы. Чем меньше показатель буримости, тем больше время процесса торможения бурового става, а значит, пропорционально меньше сила удара. Однако, мы не имеем возможности влиять на показатель буримости породы, но можем заранее устанавливать номинальную линейную скорость бурового става с применением регулятора частоты напряжения.

2. Токи в обмотках статора зависят от величины напряжения и скорости подачи.

Ток в обмотке статора как в номинальном режиме, так и в режиме короткого замыкания находится в прямой зависимости от напряжения и в обратной зависимости от среднего квадратичного сопротивлений.

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

Поэтому, в случае заклинивания для снижения токов короткого замыкания, снижение напряжения в автоматическом режиме является целесообразным. Однако, как было сказано выше, оно затрудняет дальнейший пуск.

При изменении нагрузки соответственно изменяется скорость подачи, скольжение и ток в обмотке. Уменьшение линейной скорости до нуля при работе двигателя с определенной механической характеристикой приводит к увеличению тока до значения тока короткого замыкания. В этом случае уменьшение тока осуществляется аналогичными способами, но также целесообразно применять регулирование частоты напряжения с изменением номинальной скорости подачи.

3. Восстановление вращения с минимальными перегрузками возможно в случае сохранения мощности и снижения скорости вращения с использованием регулятора частоты.

Остановка бурения заключается в плавном снижении усилия и скорости подачи, а также частоты вращения с дальнейшим реверсом подающего привода. В этом режиме есть опасность потери бурового инструмента в случае повреждения соединительной резьбы в процессе бурения. Поэтому подъем целесообразно осуществлять без резких толчков при остановке для разъема секций бурового става.

НИР выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Адаптивная система подачи рабочих органов буровых станков / А.В. Гилев, А.О. Шигин и др. // Фундаментальные исследования. – 2010. – № 11. – 4 с.

2. Шигин А.О. Основные принципы адаптивной системы подачи рабочих органов буровых станков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 5. – 3 с.

3. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высш шк., 1996. – 638 с.

4. Электрические машины: Машины переменного тока / А.И. Вольдек, Д.А. Попов. – СПб.: Высш. шк.; Питер, 2007. – 350 с., ил.

5. Китаев В.Е., Шляпинтох Л.С. Электротехника с основами промышленной электроники: учебник для проф.-техн. учебных заведений. – 3-е изд., перераб., и доп. – М.: Высшая школа, 1973 – 360 с.

6. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

7. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980.

8. Сергеев П.С. Электрические машины. – М. -Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 280 с.

References

1. Gilev A.V., Shigin A.O., etc. Adaptive system of giving of working bodies of drilling rigs // Basic researches, no. 11, 2010. 4 p.

2. Shigin A.O. Basic principles of adaptive system of giving of working bodies of drilling rigs // Messenger of mechanical engineering, no. 5, 2011. 3 p.

3. Theoretical bases of electrical equipment / L.A. Bessonov. M: Vyssh шк. 1996. 638 p.

4. Electric cars: Cars of alternating current / A.I. Voldek, D.A. Popov. SPb.: Vyssh. sh.; St. Petersburg, 2007. 350 p, silt.

5. Kitayev V.E., Shlyapintokh L.S. Electrical equipment with bases of industrial electronics. The textbook for the prof. – educational institutions. Prod. the 3rd, reworks, and additional M, «The highest school», 1973. 360 p.

6. Yamamura S. Theory of linear asynchronous engines: Energoatomizdat; 1983.

7. Design of electric cars. Under the editorship of I. P. Kopylov; Energy. 1980.

8. Sergeyev P. S. Electric cars. M.-L.: Gosenergoizdat, 1962, 280 p.

Рецензенты:

Крушенко Г.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск;

Михайлов А.Г., д.т.н., профессор, Институт химии и химической технологии СО РАН, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 20.06.2012.