

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Э. М. ДИЛАНЯН, В. С. ВАРПЕТИАН, А. А. МОМДЖЯН, А. П. ТАРАСЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «АККУМУЛЯТОРНАЯ
БАТАРЕЯ—ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ—
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

В настоящее время эксплуатируются и вновь проектируются различные электротехнические установки с аккумуляторным питанием, как, например, средства автономного электротранспорта и т. д. Совершенствование таких систем развивается как в направлении внедрения новых видов электрооборудования с улучшенными характеристиками, так и оптимизации параметров системы и режимов работы электрооборудования. Преобладающее большинство таких систем реализовано с шунтовыми и сервесными электродвигателями постоянного тока, питающимися от свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АБ) через импульсный преобразователь [1, 2].

Наличие АБ с переменными электрическими параметрами и изменяющимся энергоресурсом, мощность которой соизмерима мощности нагрузки, придает ряд особенностей выбору параметров оборудования, в частности, мощности электродвигателя, номинальной емкости АБ и передаточного числа механической передачи. Аналитический расчет таких систем связан с известными трудностями, обусловленными наличием рекуррентных соотношений в выражениях, связывающих входные и выходные величины свинцово-кислотных АБ [1, 3, 5]. Наряду с этим, функционирование таких систем происходит под влиянием нагрузки внешней среды, имеющей сложный и случайный характер [4].

В данной статье предлагается алгоритм расчета на ЦВМ автономной системы «свинцово-кислотные АБ—импульсный преобразователь—двигатель постоянного тока». При составлении модели приняты следующие допущения:

1. Пренебрегается влияние коммутационных процессов импульсного преобразователя на характеристики двигателя и АБ.
2. К. и. д. импульсного преобразователя считается неизменным.

Для составления алгоритма расчета на ЦВМ модели редуктора и электродвигателя постоянного тока использованы следующие основные уравнения:

$$I_a = \frac{M_{ax}}{c\Phi} = \frac{1}{c\Phi j} \left(\frac{M_p}{\eta_p} + 0,975 \frac{P_{ст} + P_{мех}}{n_p} \right); \quad (1)$$

$$U_a = c\Phi n_p j + I_a R_a + \Delta U_{ш}; \quad (2)$$

$$P_{мех} = a_0 (n_p j)^2 + a_1 n_p j; \quad (3)$$

$$P_{ст} = a_2 (\Phi n_p j)^2 + a_3 \Phi^2 n_p j; \quad (4)$$

где I_a , U_a , Φ , R_a , M_{ax} , $\Delta U_{ш}$ — соответственно, ток, напряжение, магнитный поток, сопротивление якорной цепи, электромагнитный момент и падение напряжения на щетках электродвигателя; c — конструктивный коэффициент двигателя; M_p , n_p , j , η_p — входной крутящий момент, скорость вращения, передаточное число и к. п. д. редуктора; $P_{мех}$, $P_{ст}$ — механические потери и потери в стали двигателя; a_0 , a_1 , a_2 , a_3 — коэффициенты аппроксимации механических потерь и потерь в стали двигателя.

Задаваемое внешней средой значение крутящего момента M_p при формируемой скорости n_p поступает на вход редуктора. Производится расчет к. п. д. редуктора η_p и момента на валу двигателя. Когда момент на его валу оказывается больше допустимого максимального момента M_{ax} , следует команда на уменьшение ускорения, которая подается на вход блока внешней среды и расчет начинается заново, а если $M_a < M_{ax}$, по уравнениям (1)–(4) рассчитываются $P_{мех}$, $P_{ст}$, I_a , U_a , а также значение потребляемой электродвигателем мощности P'_0 , которая при шунтовом двигателе со стабилизированным потоком рассчитывается по формуле:

$$P'_0 = U_a I_a + R_a I_a^2,$$

где R_a , I_a — сопротивление и ток обмотки возбуждения двигателя.

При сериесном электродвигателе для нахождения требуемого значения потока возбуждения организуется следующий поиск.

Задается произвольное значение потока возбуждения Φ_1 из области его допустимых значений и рассчитываются параметры $P_{мех}$, $P_{ст}$, I_a , U_a . Согласно величине I_a по характеристике намагничивания машины определяется соответствующее значение потока Φ_2 . Далее производится сравнение значений Φ_1 и Φ_2 . Если $\Phi_2 < \Phi_1$, то задаваемое значение Φ_1 уменьшается на величину шага $\Delta\Phi$, а если $\Phi_2 > \Phi_1$, то Φ_1 увеличивается на $\Delta\Phi$; одновременно рассчитывается новое значение шага $\Delta\Phi_{i+1} = \frac{\Delta\Phi_i}{2}$. При достижении равенства $\Phi_2 = \Phi_1$ или выполнении условия $\Delta\Phi \leq \varepsilon_\Phi$, где ε_Φ — величина погрешности поиска значения потока возбуждения, поиск прекращается, и найденное значение потока возбуждения подается на блок расчета тока двигателя I_a . Аналогично рассчитываются U_a и величина потребляемой мощности $P'_0 = U_a I_a$.

Алгоритм расчета рассматриваемой системы на ЦВМ приведен на рис. 1. Обведенная на рис. 1 пунктирной линией часть представляет алгоритм нахождения величины Φ при серийном электродвигателе.

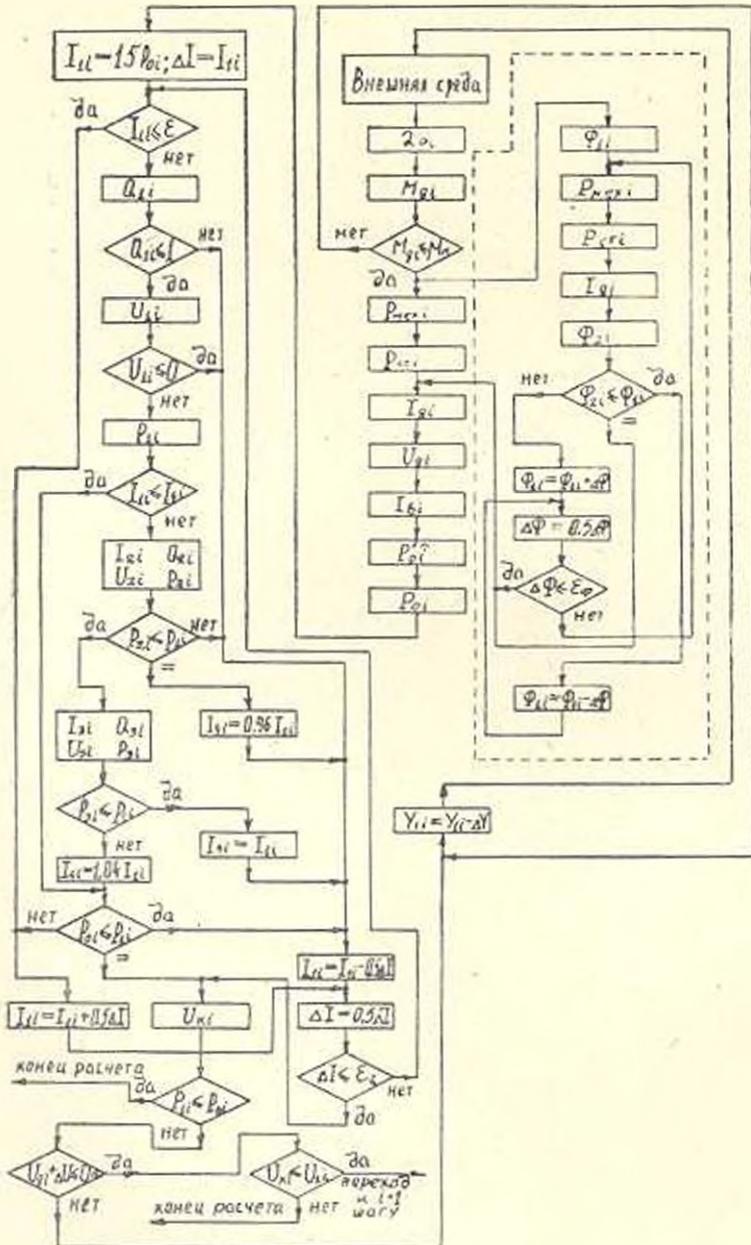


Рис. 1. Алгоритм расчета на ЦВМ модели системы «АБ—импульсный преобразователь—двигатель постоянного тока».

Вольт-амперные и емкостные характеристики свинцово-кислотных АБ с использованием результатов работ, проведенных в лаборатории

электромобиля ЕрПИ [3, 5], аппроксимированы следующими уравнениями:

$$U_{ii} = 13 \cdot (0,6 \exp(-20Q_{ii}) - 0,465 + (0,768/(1,038 - Q_{ii})) B_{ii} - 1,371Q_{ii} + U_{pi}; \quad (5)$$

$$U_{pi} = U_{pi(i-1)} - (0,21B_{ii} + 0,17(1 - \exp(-5,56B_{ii})) + U_{pi(i-1)})(1 - \exp(-(0,0015 + 0,015B_{ii})T_{ii})); \quad (6)$$

$$U_{pi} = U_{pi(i-1)} - (0,21B_{ii} + 0,17(1 - \exp(-5,56B_{ii})) + U_{pi(i-1)})(1 - \exp(-(0,003 + 0,03B_{ii})T_{ii})); \quad (7)$$

$$Q_{ii} = \frac{B_{ii} T_{ii}}{7200} + \frac{Q_{i-1}}{Q_n}, \quad (8)$$

где U_{ii} — напряжение АБ при i -том шаге разряда, В; Q_{ii} — номинальная емкость АБ, А·час; I_{ii} — значение тока разряда АБ, А; T_{ii} — время разряда АБ током I_{ii} , сек; $B_{ii} = \frac{I_{ii}}{Q_n}$ — относительное значение тока разряда АБ;

Q_{ii} — отданная до i -го шага разряда емкость АБ, А·час; Q_{i-1} — отданная до $(i-1)$ шага разряда емкость АБ в относительных единицах; U_{pi} — напряжение поляризации АБ при i -том шаге разряда АБ, В, которое рассчитывается по формуле (6); $U_{pi(i-1)}$ — среднее значение напряжения поляризации при $(i-1)$ шаге разряда АБ.

При переходе к $(i+1)$ -ому шагу разряда АБ, среднее значение напряжения поляризации U_{pi} за i -ый шаг рассчитывается по формуле (7).

Допустимое конечное напряжение АБ $U_{кон}$ в зависимости от силы разрядного тока I_1 для свинцово-кислотных АБ, описываемых уравнениями (6) — (8), аппроксимировано следующим выражением (для шестибаночных аккумуляторов):

$$U_{кон} = 9,85 - 0,3437B_1 + 1,05 \exp(-5,56B_1), \quad B. \quad (9)$$

На основании вышеприведенных уравнений составлен алгоритм расчета напряжения и тока АБ в зависимости от потребляемой импульсным преобразователем и двигателем мощности $P_0 = \frac{P_c}{\eta_0}$, где η_0 — к. п. д. импульсного преобразователя. При поиске значений мощности P_0 , тока АБ I_1 и напряжения U учитывается параболическая форма характеристики $P_0 = f(I)$ источника ограниченной мощности [6], и минимальное значение тока определяется следующим образом.

Задается максимально возможное значение тока АБ, равное $I_{ii} = 15P_{0i}$, где P_{0i} — текущее значение потребляемой импульсным преобразователем и двигателем мощности. По формуле (8) рассчитывается отданная до $(i+1)$ шага емкость АБ Q_{ii} . Если $Q_{ii} > 1$, то задаваемое

значение тока I_{1i} уменьшается с шагом, равным $I_{1i} 2^{-n}$, где n — номер шага поиска по мощности АБ, и расчет начинается заново; если $Q_{1i} \leq 1$, по формуле (5) рассчитывается U_{1i} и при $U_{1i} > 0$ находится отдаваемая АБ мощность P_{1i} . При $U_{1i} \leq 0$ аналогично следует команда на уменьшение тока АБ I_{1i} . Затем проверяется выполнение условия $I_{1i} \leq I_{4i} = 0,25Q_{1i}$, которое соответствует рабочему участку

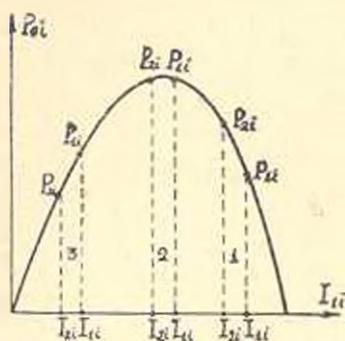


Рис. 2. Мощностная характеристика свинцовой АБ при данном зарядовом состоянии.

мощностной характеристики АБ. При выполнении этого условия производится переход к сравнению мощностей P_{2i} и P_{1i} . Если условие $I_{1i} \leq I_{4i} = 0,25Q_{1i}$ не выполняется, то необходимо найти значение тока АБ, соответствующее значению максимально отдаваемой при данном зарядовом состоянии мощности АБ. Здесь необходимо оценить значение приращения мощности АБ при изменении его тока. задается значение $I_{2i} = 0,96I_{1i}$ и по формулам (5)–(8) рассчитываются соответствующие значения Q_{2i} , U_{2i} , P_{2i} .

Далее происходит переход к сравнению мощностей P_{2i} и P_{1i} . Возможны следующие три случая (рис. 2):

1. $P_{2i} > P_{1i}$. Следует команда на уменьшение тока АБ, и расчет мощности АБ начинается заново с новым значением тока АБ I_{1i} .

2. $P_{2i} = P_{1i}$. В качестве тока, соответствующего максимально отдаваемой АБ мощности, принимается значение, равное $I_{4i} = 0,96I_{1i}$; следует команда на уменьшение тока АБ, и расчет мощности АБ начинается заново с новыми значениями I_{1i} и I_{4i} .

3. $P_{2i} < P_{1i}$. задается $I_{3i} = 1,04I_{1i}$; по формулам (5)–(8) рассчитываются значения Q_{3i} , U_{3i} , P_{3i} и происходит переход к сравнению мощностей P_{3i} и P_{1i} . В этом случае возможны следующие два варианта;

3а. $P_{3i} \leq P_{1i}$. Принимаем $I_{4i} = I_{1i}$; следует команда на уменьшение тока АБ и расчет мощности АБ начинается заново с новыми значениями I_{1i} и I_{4i} .

3б. $P_{3i} > P_{1i}$. В качестве тока I_{4i} условно принимается значение, равное $I_{4i} = 1,04I_{1i}$, и происходит переход к сравнению мощностей P_{1i} и P_{0i} . При $P_{0i} < P_{1i}$ следует команда на уменьшение тока I_{1i} , а при $P_{0i} > P_{1i}$ — на увеличение I_{1i} . Расчет требуемой мощности АБ продолжается до равенства мощностей $P_{0i} = P_{1i}$ или до выполнения условия $\Delta I < \varepsilon_1$, где ΔI — шаг изменения тока АБ; ε_1 — величина погрешности поиска тока АБ.

При выполнении одного из этих условий по формуле (9) рассчитывается конечно допустимое напряжение АБ U_{0i} . Затем проверяется выполнение условия $P_{1i} < P_{0i}$. Если оно выполнено, следует команда

окончания расчета, а если нет — проверяется выполнение условия $U_{i1} + \Delta U \leq U_{i1}$, что связано с максимальным значением скважности импульсного преобразователя, где ΔU — падение напряжения в питающей цепи двигателя.

При невыполнении этого условия следует команда на уменьшение ускорения двигателя; новое значение ускорения Y_{i1} подается на блок внешней среды и расчет i -го шага начинается заново.

При выполнении этого условия происходит переход к проверке $U_{i1} < U_{i1}$. Если это условие выполняется, то следует команда окончания расчета, в противном случае происходит переход к $(i+1)$ шагу расчета.

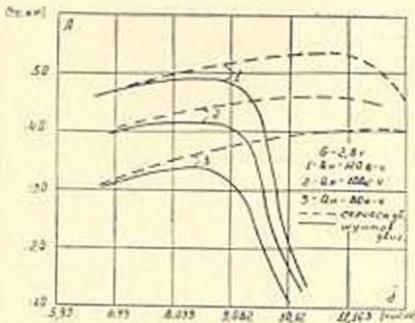


Рис. 3. Расчетная зависимость полезно-произведенной работы от передаточного числа трансмиссии ЭМ при различных номинальных емкостях АБ для двух видов двигателей постоянного тока.

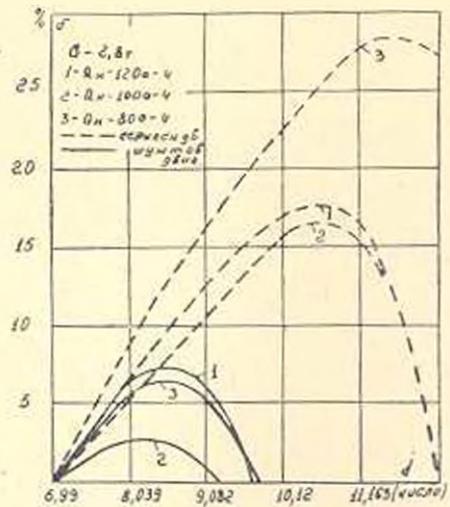


Рис. 4. Расчетная зависимость относительного увеличения дальности пробега от передаточного числа трансмиссии ЭМ при различных номинальных емкостях АБ для двух видов двигателей постоянного тока.

По данному алгоритму составлена программа на ФОРТРАН-IV на ЦВМ ЕС-1022 произведен расчет некоторых оптимальных параметров оборудования электромобиля. В качестве примера на рис. 3, 4 приведены зависимости полезно-произведенной работы и относительного увеличения дальности пробега от передаточного числа трансмиссии i для электромобиля модели ЭМ-ЕрПИ-1 полным весом 2,8 т, движущегося по следующему ездовому циклу: разгон электромобиля с максимальным допустимым ускорением до скорости 39 км/час; движение с установившейся скоростью и замедление до остановки при прохождении общего пути, равного 1 км; стоянка 30 сек. Далее цикл движения повторяется.

Полученные расчетные данные удовлетворительно согласуются с результатами дорожных испытаний электромобиля ЭМ-ЕрПШ-1 с серийными тяговыми двигателями [7]. При расчете относительного увеличения дальности пробега электромобиля в качестве базисной величины был принят пробег при $j=6,999$.

Из полученных результатов следует наличие оптимумов по дальности пробега и полезно-произведенной работы по j и их чувствительность в зависимости от номинальной емкости АБ. Кроме того, следует указать на необходимость управления магнитным потоком двигателей при их шунтовом возбуждении.

ЕрПШ им. К. Маркса

Поступило 12.III.1977

Է. Մ. ԳԻԼԱՆՅԱՆ, Վ. Ս. ՎԱՐՊԵՏՅԱՆ, Հ. Հ. ՄՈՄՉՅԱՆ, Ա. Պ. ՏԱՐԱՍՅԱՆ

«ԱՎՈՒՄՈՒՅԱՏՈՐԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑ-ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ
ԿԵՐՊԱՔՓՈՒՌԻՉ-ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՇԱՐՔԻՉ»
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ԸՆԴՈՒՅՑ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Հողվածում բերված են հարաբերակցություններ, որոնք նկարագրում են կապարային ախումուլչատորի, մեխանիկական փոխանցման, հաստատուն հոսանքի ղուղահեռ և հաջորդաբար գրգռման շարժիչների բնութագրերը: Իկտանոմ համակարգի հետադոտման համար հաշվի են առնված կապարային մարտկոցների սինամիկական բնութագրերը՝ լարման կախվածությունը հոսանքից ու մամանակից և հղորության բնութագրերը: Մշակված է ավտոնոմ համակարգի հաշվման ալգորիթմ, որի հիման վրա կաղմված է ծրագիր EC—1022 հաշվիչ մեքենայի համար: Սրապրում հաշվի են առնված էլեկտրական շարժիչի հաստատուն և փոփոխական կորուստները, մեխանիկական փոխանցման կորուստները և կապարային մարտկոցի շահագործման սահմանափակումները: Սրագիրն ոգտագործված է էլեկտրոմոթրիի որոշ օպտիմալ պարամետրերի հաշվման համար: Հաշվարկի արդյունքները բավարար ճշտությամբ համընկնում են փորձնական տվյալների հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дасоян М. А., Азуп Н. А. Современная теория свинцового аккумулятора. Изд. «Энергия», Л., 1975.
2. Купрюхин А. П. Исследование автономных замкнутых систем регулирования, получающих питание от энергетических батарей. Авт. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Новосибирск, 1974.
3. Агабян Э. М., Агабян Ю. В., Варпетян В. С. К вопросу аналитического описания аккумуляторной батареи для электромобиля. Межвуз. сб. научн. тр. «Электротехника», сер. XIII, вып. 2. Изд. ЕрПШ. Ереван, 1976.

4. Налчаджян Т. А., Перельман Н. А. Математическое моделирование внешней среды транспортных средств. «Известия АН АрмССР» (серия Т. Н.), т. XXVIII, № 5, 1975.
5. Варпетян В. С. Исследование состояния аккумулятора. Межвуз. сб. научн. тр. «Электротехника», сер. XIII, вып. 2. Изд. ЕрПИ, Ереван, 1976.
6. Агабабян Э. М., Агабабян Ю. В., Варпетян В. С. Влияние зарядового состояния аккумуляторной батареи на динамические характеристики автомобиля. Межвуз. сб. науч. тр. «Электротехника», сер. XIII, вып. 3. Изд. ЕрПИ, Ереван, 1976.
7. Материалы научно-технического совещания по проблеме электроавтомобилостроения. «Айастан», Ереван, 1974.