

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. С. ВАРՔԵՅԱՆ

К ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ УСТАНОВОК, ПИТАЮЩИХСЯ  
ОТ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

В настоящее время электроподвижные установки (ЭПУ), питающиеся от химических аккумуляторных батарей (АБ), такие как электромобили, аккумуляторные электровозы и электрогрузчики, находят достаточно широкое применение.

Проектирование электрооборудования для таких установок должно выполняться комплексно с целью обеспечения требуемых статических и динамических характеристик ЭПУ при определенных ограничениях.

Наличие АБ ограниченной емкости, мощность которой сопоставима с мощностью нагрузки, придает системе ряд особенностей, обусловленных тем, что источник энергии и остальное электрооборудование данной установки (тяговый электродвигатель, системы управления и электронердачи и т. д.) находятся в сильной взаимопределяющей связи. Поэтому выбор электрооборудования ЭПУ должен производиться с учетом взаимного влияния ее отдельных элементов.

- В этой связи в данной работе рассматриваются следующие вопросы:
- 1 Влияние аккумуляторной батареи на механические и скоростные характеристики тяговых электродвигателей (ТД) постоянного тока с последовательным и параллельным возбуждением;
  - 2 Влияние способа возбуждения ТД и системы регулирования скорости

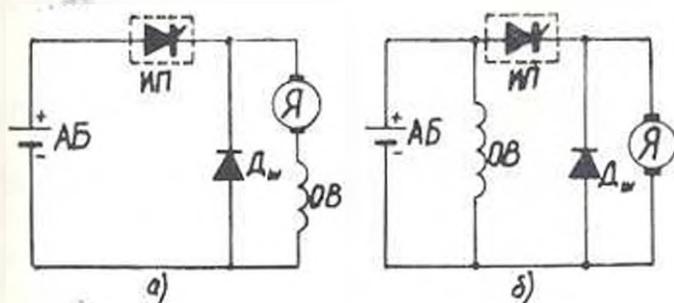


Рис. 1. Принципиальная схема питания ТД: а—при серийном возбуждении; б—при шунтовом возбуждении. ИП—импульсный преобразователь; Дш—шунтирующий диод.

на работу аккумуляторной батареи, в смысле лучшего использования последней.

Принципиальные схемы питания ТД приведены на рис. 1, где в качестве регулятора напряжения использованы импульсные преобразователи, условно обозначенные эквивалентными регулируемым ключами. Исследование выполнено на примере электрооборудования электромобиля, разработанного и изготовленного в проблемной лаборатории Ереванского политехнического института.

Основные данные электрооборудования электромобиля:

АБ — состоит из 18 последовательно соединенных аккумуляторов типа 6СТ—58;

ТД — две машины постоянного тока серии П-42 напряжением 220 В с суммарной номинальной мощностью 16 кВт и скоростью вращения 3000 об./мин. Тяговые двигатели питаются от АБ через индивидуальные тиристорные импульсные преобразователи, работающие синхронно. При этом интересующие нас величины определяются в относительных единицах, что дает возможность основные результаты исследований распространить и на электрооборудование других ЭИУ.

При исследовании характеристик ТД приняты следующие допущения:

а) не учитывается влияние коммутационных процессов импульсных преобразователей (ПП);

б) принимается, что период импульсного цикла работы ПП намного меньше электромагнитной постоянной времени цепи нагрузки [1], т. е. не учитывается пульсация тока нагрузки.

Скорость характеристики ТД [1]

$$\omega = \frac{U_{cp} - I_{cp}R}{k_1\Phi}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — скорость вращения ТД;  $U_{cp}$ ,  $I_{cp}$  — средние за период импульсного цикла значения соответственно напряжения и тока ТД;  $R$ ,  $k_1$ ,  $\Phi$  — соответственно омическое сопротивление силовой цепи, конструктивная постоянная и магнитный поток ТД.

Среднее значение напряжения  $U_{cp}$  определяется из [1] как

$$U_{cp} = \gamma U_a, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — скважность работы импульсных преобразователей;

$U_a$  — амплитуда напряжения аккумуляторной батареи при проводящем состоянии ПП.

Для описания разрядных характеристик АБ используется уравнение из [2] в следующем виде:

$$U_a = U_0 - Ni - c_0 I - k \frac{I}{1 - q}, \quad (3)$$

где  $U_0$  — постоянный потенциал;  $N$  — коэффициент, учитывающий внутреннее сопротивление аккумулятора;  $c_0$  — коэффициент, учиты-

вращающ надение потенциала в процессе разряда из-за уменьшения плотности электролита:  $k$  — коэффициент, учитывающий поляризацию;  $q = It/Q_0$  — отдаваемая аккумулятором емкость в относительных величинах;  $I$  и  $t$  — соответственно ток и время разряда;  $Q_0$  — максимальная разрядная емкость, обусловленная активными массами аккумулятора.

Коэффициенты уравнения (3) определяются по экспериментально снятым разрядным кривым по методике, подробно описанной в [2].

Амплитуда тока батареи при проводящем состоянии двух ПП будет

$$I_a = 2I_{cp}.$$

С учетом последнего и уравнений (2), (3) выражение (1) будет иметь следующий вид.

$$\alpha = \frac{\gamma \left[ n \left( U_0 - NI_a - c_0 q - k \frac{1}{1-q} I_a \right) \right] - I_{cp} R}{k_1 \Phi}, \quad (4)$$

где  $n$  — количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарее.

Влияние аккумуляторной батареи на характеристики ТД в данный момент времени определяется величиной емкости, отданной батареей до этого времени, что в уравнении (4) учитывается величиной  $q$ , которая и определяет зарядовое состояние АБ.

При сериесном возбуждении ТД, в определенном зарядовом состоянии аккумулятора ( $q$ ), при заданной скважности  $\gamma$  импульсных преобразователей варьируется  $I_{cp}$ , по которому определяются магнитный поток  $\Phi$  по кривой намагничивания двигателя и напряжение батареи при токе  $I_a$ .

При шунтовом возбуждении ТД его ток возбуждения (см. рис. 1, б) не остается постоянным в связи с изменением напряжения АБ при токе  $I_a$  и отдаче емкости  $q$ . В этом случае величина  $\Phi$  определяется из кривой намагничивания по значению тока возбуждения

$$i_w = \frac{U_{a-ср}}{R_w}.$$

где  $R_w$  — сопротивление шунтовой обмотки возбуждения;

$U_{a-ср}$  — среднее значение напряжения АБ за период импульсного цикла работы ПП.

Обычно в рабочих режимах  $i_w \ll I_{cp}$ , поэтому влиянием  $i_w$  на напряжение АБ можно пренебречь. При этом из принятого допущения (б) следует, что пульсацией тока шунтовой обмотки возбуждения можно полностью пренебречь, поскольку электромагнитная постоянная времени шунтовой обмотки намного больше якорной.

Напряжение батареи при токе  $I_a$  равняется  $U_a$ , а при непроводящем состоянии ПП  $I_a = 0$  и напряжение АБ из (3) равняется

$(U_0 - c_0 q)$ . Следовательно, среднее значение напряжения батареи определяется как

$$U_{a-ср} = U_a \gamma + (U_0 - c_0 q)(1 - \gamma) = \gamma \left( U_0 - NI_a - c_0 q - k \frac{1}{1-q} I_a \right) + (U_0 - c_0 q)(1 - \gamma) = U_0 - c_0 q - \gamma I_a \left( N + \frac{k}{1-q} \right). \quad (5)$$

Момент тяговых двигателей определяется как  $M = k_1 \Phi I_{ср}$ .

На основе вышесказанного, с учетом (4) и (5), на рисунках 2, 3 и 4 приведены расчетные скоростные  $v(i_{ср})$  и механические  $\gamma(\omega)$  характеристики импульсно-регулируемого двигателя П-42 с разными типами возбуждения при различных зарядовых состояниях батареи. В качестве базисных величин были приняты номинальные данные двигателя. Характеристики рассчитаны в диапазоне допустимой перегрузки двигателя по току  $I_{ср} < I_{ном} = 2,5$ . При этом каждому значению  $\gamma$  соответствуют четыре характеристики для зарядового состояния батареи  $q = 0; 0,25; 0,5; 0,75$  (при увеличении  $q$  характеристики перемещаются вниз по оси  $v$ ).

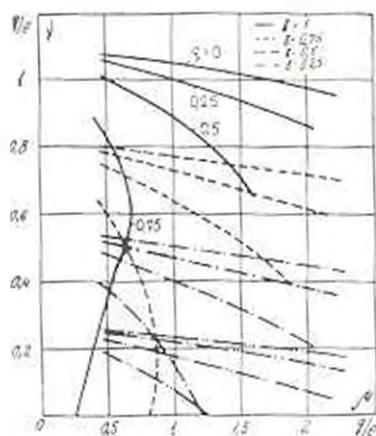


Рис. 2. Механические характеристики ТД при шунтовом возбуждении.

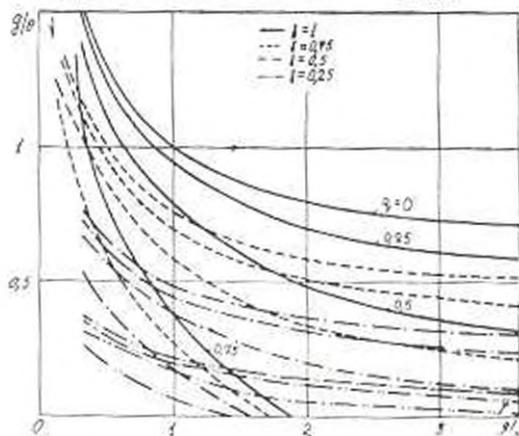


Рис. 3. Механические характеристики ТД при серийном возбуждении.

Характеристики ТД при шунтовом возбуждении получаются нелинейными за счет изменения потока ( $\Phi$ ) машины при изменении напряжения АБ. Кроме того, при определенных зарядовых состояниях АБ момент тягового двигателя при шунтовом возбуждении опрокидывается. Это объясняется тем, что при снижении скорости на величину момента сильнее влияет уменьшение потока возбуждения ТД, чем увеличение тока якоря. Опрокидывание момента ТД при шунтовом возбуждении крайне нежелательно, поскольку при этом сильно ухудшаются динамические характеристики ЭПУ.

Анализ зависимости среднего значения тока АБ  $i_{a, \text{cp}}$  от момента  $\tau$  ТД при шунтовом и серийном возбуждении, которую можно построить с учетом характеристик, приведенных на рисунках 2, 3 и 4, показывает, что при пуске и преодолении перегрузок, т. е. в области  $\mu > 1$ , при том же значении момента потребляемый от батареи ток  $i_{a, \text{cp}}$  при серийном возбуждении всегда меньше, чем при шунтовом. При этом среднее значение тока АБ следует определить как

$$i_{a, \text{cp}} = \tau(2i_{cp}). \quad (6)$$

Кроме того, из рис. 4 с учетом (6) следует, что при импульсно-регулируемом пуске ТД с шунтовым возбуждением и поддержанием постоянства тока двигателя ( $i_{cp}$ ) с увеличением скорости ТД его момент уменьшается в зависимости от зарядового состояния АБ. Например, при пуске ТД током  $i_{cp} = 2$  до скорости  $v = 0,6$  в случае  $q = 0,5$  момент уменьшается от 2,25 до 1,7. Это объясняется тем, что при условии  $i_{cp} = \text{const}$  пуск осуществляется плавным увеличением скважности  $\tau$ , что приводит к увеличению тока и снижению напряжения батареи, из-за чего по мере разгона ТД уменьшается ток в шунтовой обмотке возбуждения. Уменьшение момента из-за шунтового возбуждения ТД, в свою очередь, ухудшает динамику ЭПУ.

Анализ зависимости максимальной мощности, определяемой из рис. 2, 3 как  $P = \omega M$ , и максимального момента ТД от зарядового состояния батареи показывает, что максимальный момент и мощность ТД при серийном возбуждении больше, чем при шунтовом для всех практических значений  $q$ .

Из вышесказанного следует, что при серийном возбуждении ТД по сравнению с шунтовым не только улучшается приемистость ЭПУ, но и, согласно [3], улучшается использование АБ при уменьшении  $i_{a, \text{cp}}$ .

При серийном возбуждении влияние системы регулирования ТД на степень использования АБ при одинаковых условиях движения ЭПУ можно оценить сравнением импульсного и релейного способов регулирования, которые применяются в электроприводах постоянного тока ЭПУ.

С этой целью определим разрядную емкость  $Q_0$  батареи для одного тягового двигателя при его импульсном пуске с постоянным значением тока  $i_{cp}$  до выхода на данную характеристику (при этом изменением зарядового состояния АБ пренебрегаем и рассматриваем пуск ЭПУ с постоянным ускорением). Допустим, что при зарядовом состоянии батареи  $q = 0,25$  тяговый двигатель запускается током  $i_{cp} = 2$  до  $\tau = 1$  (участок  $ab$  на характеристике  $abc$  рис. 4), после чего запуск продолжается по характеристике  $bc$  до точки  $c$ , соответствующей статической нагрузке двигателя  $i_{cp} = 0,8$  (по данным [4] ток каждого двигателя при равномерном движении электроавтомобиля составляет примерно 80% от номинального). На участке  $bc$  импульсный преобразователь полностью открыт ( $\tau = 1$ ) и согласно

(6)  $i_{a,cr} = 2i_{cr}$ . На участке  $ab$ , где  $\gamma < 1$ , согласно выражениям (4) и (6) при условии  $i_{cr} = \text{const}$  зависимость  $i_{a,cr}(\gamma)$  представлена прямой  $bd$ . Для построения прямой  $bd$  ее вторая точка  $f$  находится следующим образом: из точки  $e$  пересечения прямой  $ab$  с промежуточной характеристикой  $\gamma < 1$  (на рис. 4 выбрана характеристика при  $\gamma = 0,5$ ) при данном  $q = 0,25$  проводится горизонталь, на которой от начала оси откладывается отрезок  $gf$ , равный току  $i_{a,cr} = 2i_{cr} = 1$ . Соединив точки  $b$  и  $f$  прямой, получаем зависимость  $i_{a,cr}(\gamma)$ . В этом случае величина разрядной емкости  $Q_R$  батареи будет пропорциональна заштрихованной площади, ограниченной линией  $dbc$  и осью  $\gamma$ .

При формировании той же пусковой характеристики  $abc$  изменением сопротивления реостата в цепи двигателя ток батареи везде будет равняться  $i_{a,cr} = 2i_{cr}$ , т. е. при реостатном управлении величина разрядной емкости батареи  $Q_R$  будет пропорциональна площади, ограниченной самой пусковой характеристикой  $abc$  и осью  $\gamma$ . Отношение разрядных емкостей при импульсном и реостатном пуске, рассчитываемых графическим интегрированием соответствующих кривых  $dbc$  и  $abc$  по переменной  $\gamma$ , и рассматриваемом случае равняется  $\alpha = Q_0'(Q_R = 0,6)$ .

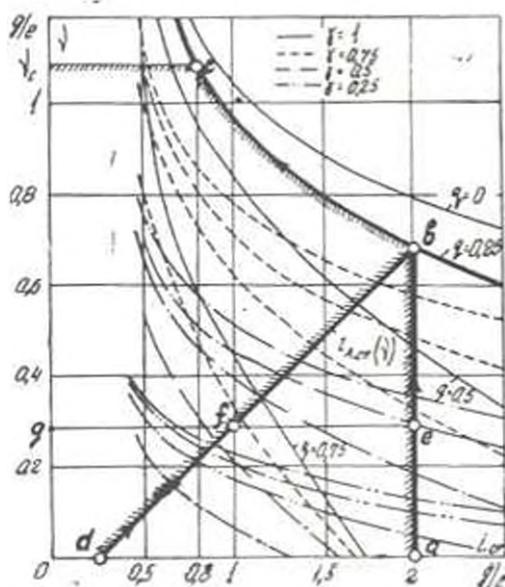


Рис. 4. Скоростные характеристики ДД при реостатном возбуждении

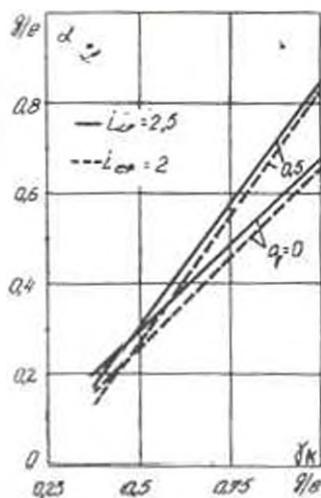


Рис. 5. Сравнение разрядной емкости аккумуляторной батареи при импульсном и реостатном пусках ДД.  $\gamma_0$  — конечное значение скважности, до которого регулируется среднее напряжение на ДД, поддерживаемое постоянным током  $i_{cr} = \text{const}$

Из рис. 4 следует, что при заданной статической нагрузке величина  $\alpha$  зависит от положения формируемой пусковой характеристики на плоскости ( $i_{cp}$ ;  $\gamma$ ). Последнее определяется требуемыми условиями пуска ЭПУ. Для двух зарядовых состояний батарей указанным графическим способом можно построить зависимость  $\alpha$  от условий пуска ЭПУ с той же статической нагрузкой  $i_{cp} = 0,8$  (рис. 5). Величиной  $\tau_k$  определяется положение конечной характеристики  $\psi(i_{cp})$  при пуске ТД.

Если учесть, что при движении ЭПУ в городских условиях значение  $\tau_k$  в среднем составляет  $0,5 \div 0,7$ , то из рис. 5 следует, что по сравнению с реостатным при импульсном пуске ТД разрядная емкость, отбираемая от АБ, уменьшается примерно на 60%. Это улучшает использование АБ и увеличивает запас ее емкости при дальнейшем движении ЭПУ после пуска.

На основе вышесказанного можно сделать следующие основные выводы:

1. Способ шунтового возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока, питающихся от аккумуляторных батарей, с точки зрения обеспечения требуемых динамических характеристик электроподвижной установки существенно уступает способу серийного возбуждения.

2. Серийное возбуждение электродвигателей, по сравнению с шунтовым, приводит к улучшению использования аккумуляторной батареи при пусках и допустимых перегрузках двигателей.

3. При питании тяговых электродвигателей от аккумуляторной батареи применение импульсного управления приводит к ощутимому улучшению использования и экономии расхода емкости аккумуляторной батареи при пуске и движении электроподвижной установки в режимах  $\tau < 1$ .

Результаты выполненного исследования могут быть использованы при проектировании электроподвижных установок, питающихся от аккумуляторной батареи.

ЕрПН им. К. Маркса

Получено 24.IV.1975

Վ. Ի. ՎԱՐՊԵՏՅԱՆ

ԱՎՈՒՄՈՒԼՅԱՏՈՒԱՅԻՆ ԻՄՔՏԿՈՑՆԵՐԻՑ ԸՆԿՐՈՂ ԷԼԵԿՏՐՈՇԱՐԺԱԿԱՆ ՏԵՂԱԿԱՅՈՒՄՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈԱՍՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Ցույց է տրված, որ ակումուլյատորային մարտկոցներից սնվող էլեկտրաշարժական տեղակայումների էլեկտրասարքավորումների հաշվման և բնորման ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել աճող սնման ազդեցությունը և մնացած էլեկտրասարքավորումների փոխորոշիչ ազդեցությունները, ինչ

որում, կախված մարտկոցի լիցքային վիճակից, էլեկտրաշարժիչի բարձրային բնութագրերը կարող են խիստ վատանալ: Առայուցված է, որ էլեկտրաշարժիչի հաջորդաբար զրգուման եզանակը պուպահեռի համեմատ ապահովում է տեղակայման ավելի բարձր գինեմիկական ցուցանիշները և բերում է մարտկոցի ավելի էֆեկտիվ օգտագործմանը: Ստացված է, որ քարշային շարժիչների իմպուլսային կոտավարումը համեմատած սեռատատայինի հետ բերում է ակումուլյատորային մարտկոցի գլխի լավ օգտագործմանը և նրա ունակության ծախսի խնայմանը՝ միևնույն օգտակար աշխատանք կատարելու դեպքում:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гипзено Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприборах постоянного тока. Изд. «Энергия», 1973
2. Shepherd C. M, Irl. Electrochem. Soc. vol. 112 (1965), p. 657.
3. Ласкин М. А. Химические источники тока. Изд. «Энергия», 1969
4. Расчет и выбор отдельных элементов силовой системы электромобил. Научно-технический отчет № 421 ОИИР ЕрПИ. Ереван, 1971.