

К РАСЧЕТУ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ШИП

А. И. САПОЖНИКОВ, В. А. БЕЙНАРОВИЧ, А. И. АЛИФИРОВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Импульсное регулирование скорости находит все большее распространение в электроприводах постоянного тока, особенно в установках с автономным питанием (аккумуляторные электровозы, электрокары, электромобили, электропогрузчики и т. п.) и в тяговых установках с троллейным питанием (электровозы, троллейбусы, трамваи и т. п.). В таких установках, как правило, применяются двигатели последовательного возбуждения (ДПВ), обеспечивающие большие пусковые моменты и плавность переходных процессов, питающиеся от силовых широтно-импульсных преобразователей (ШИП), выполненных на тиристорах.

Расчету электромеханических характеристик ДПВ, представляющих собой зависимость скорости вращения ω от тока I двигателя $\omega(I)$ при питании от ШИП с учетом нелинейной зависимости потока возбуждения Φ от тока двигателя $\Phi(I)$, посвящены работы [1, 2, 3, 4, 5], в которых используются графические или графоаналитические методики расчета.

Общим в этих методиках расчета является использование естественной электромеханической характеристики двигателя $\omega_e(I)$, кривой намагничивания $\Phi(I)$ [1, 2, 5] и допущений [2, 3, 4, 5] о том, что период коммутации силовой цепи значительно меньше электромеханической и электромагнитной постоянных времени электропривода, коммутирующие элементы безынерционны, скорости вращения в течение периода коммутации не изменяются, а э. д. с. двигателя зависит только от скорости вращения и тока двигателя (через кривую намагничивания), процессы в системе гашения основного тиристора не влияют на цепь двигателя.

С учетом этих допущений при питании ДПВ от ШИП общее для всех методик расчета выражение искусственной электромеханической характеристики ДПВ в функции относительной продолжительности включения γ и тока двигателя I может быть записано в следующем виде:

$$\omega_{и} = \frac{\gamma(U - \Delta U) - IR_{э}}{U - IR_{дв}} \omega_{е}, \quad (1)$$

где U — напряжение источника питания;

ΔU — падение напряжения на силовом тиристоре;

ω_e — угловая скорость вращения ДПВ, соответствующая току двигателя I на естественной электромеханической характеристике при напряжении питания U ;

R_0 — общее сопротивление силовой цепи ШИП—ДПВ;
 $R_{дв}$ — сопротивление цепи ДПВ.

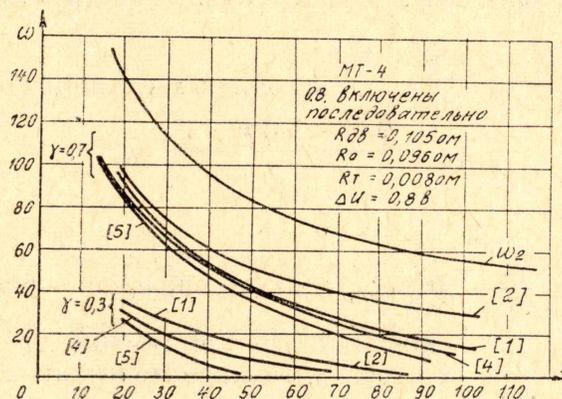


Рис. 1.

На рис. 1 приведены зависимости $\omega_n(\gamma, I)$, рассчитанные по методикам, изложенным в [1, 2, 4, 5]. Различные результаты расчета для одних и тех же значений относительной продолжительности включения γ и тока двигателя I возникают из-за разного значения R_0 , которое принимается

- в [1] $R_0 = R_{дв} + R_d(1 - \gamma) + (R_0 + R_t)\gamma$;
- в [2] $R_0 = R_{дв}$, частный случай;
- в [4] $R_0 = R_{дв} + \gamma(R_t + R_0)$;
- в [5] $R_0 = R_{дв} + R_0$;

здесь

R_0, R_t, R_d — сопротивления соответственно источника питания, тиристора и шунтирующего диода.

Это позволяет предложенные методики расчета разделить на три группы, в которых:

- 1) сопротивление цепи двигателя считается постоянным на интервалах импульса и паузы [2];
- 2) сопротивление цепи двигателя различно на интервалах импульса и паузы и отличается на величину внутреннего сопротивления источника питания [2, 5];
- 3) сопротивление цепи двигателя изменяется так же, как во второй группе, но кроме этого учитывается вольт-амперная характеристика силового ключа [4] или сопротивление силового ключа и шунтирующего диода [1]. К этой группе расчета можно отнести графическую методику [3], позволяющей, кроме того, учитывать внешнюю характеристику преобразователя.

Цель настоящей работы заключается в определении влияния параметров электродвигателя, источника питания и вольт-амперной характеристики силового тиристора на результаты расчета электромеханических характеристик ДПВ и условий допустимости неучета различных факторов.

Для определения влияния вышеперечисленных факторов на точность расчета электромеханической характеристики ДПВ при питании от ШИП запишем выражение (1) в относительных единицах. За базовые величины тока, напряжения, скорости и потока примем номинальные значения этих величин. При этом учтем, что

$$U_n - I_n R_{дв} = E_n = c \Phi_n \omega_n, \quad (2)$$

где

$c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ — коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины [6].

Тогда зависимость (1) в относительных единицах примет вид

$$\gamma_{и} = \frac{\gamma(\upsilon - \Delta\upsilon)\alpha - i\rho_{э}}{\alpha - i} \gamma_{е}, \quad (3)$$

где

$\gamma_{и} = \frac{\omega_{и}}{\omega_{н}}$; $\gamma_{е} = \frac{\omega_{е}}{\omega_{н}}$ — относительные значения скорости вращения двигателя соответственно на искусственной и естественной характеристиках;

$\upsilon = \frac{U}{U_{н}}$; $\Delta\upsilon = \frac{\Delta U}{U_{н}}$ — относительные значения напряжения питания и падения напряжения на тиристоре;

$\rho_{э} = \frac{R_{э}}{R_{дв}}$ — относительное значение сопротивления силовой цепи двигателя;

$i = \frac{I}{I_{н}}$ — относительное значение тока якорной цепи;

$\alpha = \frac{U_{н}}{I_{н} R_{дв}}$ — отношение номинального напряжения питания к номинальному падению напряжения в цепи двигателя.

Электромеханические характеристики, рассчитанные по любой методике, описанной в [1, 2, 3, 4, 5], могут быть пересчитаны в механические, для чего необходима переходная характеристика $\frac{M}{I} = f(I)$,

или могут быть рассчитаны, если имеется каталожная $\omega_{е} = f(M)$, и по аналогии с граничной электромеханической характеристикой $\omega_{гр} = f_1(I)$ построена граничная механическая характеристика ДПВ $\omega_{гр} = f(M)$.

Тогда для естественной механической характеристики справедливо выражение

$$\omega_{е} = \frac{U}{c\Phi} - M \frac{R_{дв}}{c^2\Phi^2} = \omega_{гр} - M \frac{R_{дв}}{c^2\Phi^2} \quad (4)$$

и для искусственной механической характеристики

$$\omega_{и} = \frac{(U - \Delta U)\gamma}{c\Phi} - M \frac{R_{э}}{c^2\Phi^2} = \omega_{гр} \left(1 - \frac{\Delta U}{U} \right) \gamma - M \frac{R_{э}}{c^2\Phi^2}, \quad (5)$$

где

M — момент на валу двигателя;

$\omega_{гр} = \frac{U}{c\Phi}$ — значение граничной скорости вращения по характеристике $\omega_{гр} = f(M)$, соответствующее моменту M ;

$\omega_{е}$ — значение скорости вращения по каталожной характеристике $\omega_{е} = f(M)$ соответствующее моменту M ;

Φ — магнитный поток двигателя, соответствующий моменту M .

Выражения (4) и (5) могут быть записаны в виде

$$\omega_e - \omega_{гр} = -M \frac{R_{дв}}{c^2 \Phi^2};$$

$$\omega_{и} - \omega_{гр} \left(1 - \frac{\Delta U}{U} \right) \gamma = -M \frac{R_э}{c^2 \Phi^2}$$

и, если взято их отношение после несложных преобразований, получится

$$\omega_{и} = \frac{R_э}{R_{дв}} \omega_e - \left[\frac{R_э}{R_{дв}} - \left(1 - \frac{\Delta U}{U} \right) \gamma \right] \omega_{гр}, \quad (6)$$

или в относительных единицах, считая $U = U_{н}$,

$$\gamma_{и} = \rho_э \gamma_e - [\rho_э - (1 - \Delta v) \gamma] \gamma_{гр}. \quad (7)$$

Если же $R_о = 0$ и силовой коммутатор идеальный, то выражение примет вид

$$\gamma_{и} = \gamma_e - (1 - \gamma) \gamma_{гр}. \quad (8)$$

Естественно, что при переходе от граничной и естественной характеристик к искусственной, пересчет скорости вращения производится для одного и того же значения момента на валу двигателя. Для получения зависимости скорости вращения от электромагнитного момента необходимо иметь исходные зависимости ω_e и $\omega_{гр} = f(M_{эм})$.

Чтобы распространить результаты исследования влияния параметров α_1 , $\rho_э$ и Δv на точность расчета электромеханических характеристик на все типы ДПВ, вводится выражение эталонной скорости, которая получается при питании от идеализированного источника питания и ШИП, то есть $\rho_э = 1$, $\Delta v = 0$ и $v = 1$. Выражение (3) при этом примет вид

$$\gamma_э = \frac{\gamma \alpha - i}{\alpha - i} \gamma_e. \quad (9)$$

Относительное отклонение расчетного значения скорости, определяемое неидеальностями источника питания ($R_о > 0$) и ШИП ($R_т > 0$; $\Delta U > 0$), получается делением (3) на (9) и это позволяет не учитывать вид кривой намагничивания, которая различна для разных машин

$$\frac{\gamma_{и}}{\gamma_э} = \frac{\gamma \rho_э - i}{\gamma \alpha - i} - \frac{\Delta \rho_э i}{\gamma \alpha - i} - \frac{\Delta v \alpha \gamma}{\gamma \alpha - i} = \frac{\gamma \rho_э - i}{\gamma \alpha - i} - \frac{\Delta v_р}{\gamma_э} - \frac{\Delta v_к}{\gamma_э}; \quad (10)$$

где $\Delta v_р$ — относительная величина перепада скорости, вызванная дополнительно включаемыми сопротивлениями;

$\Delta v_к$ — относительная величина перепада скорости, вызванная падением напряжения в силовом ключе.

$$\Delta \rho_э = \rho_э - 1 = \gamma \frac{R_т + R_о}{R_{дв}} + (1 - \gamma) \frac{R_д}{R_{дв}}, \quad (11)$$

если принять $R_т = R_д$, то

$$\Delta \rho_э = \frac{\gamma R_о + R_т}{R_{дв}}. \quad (12)$$

Для некоторых типов тяговых двигателей в табл. 1 приведены для примера основные данные и значения коэффициента α .

Из анализа выражения (10), исходя из заданной точности расчета характеристик привода, можно определить допустимость идеализации ШИП в отношении неучета падения напряжения на тиристорном ключе ($\Delta U = 0$) и неучета величин сопротивлений источника (при $R_о = 0$),

Таблица 1

Тип двигателя	U_n (В)	I_n (А) 1 час	$R_{дв}$ (Ом)	α
МТ-4	31	75	0,105	3,936
РТ-2	50	145	0,02386	14
ДК-800А	110	110	0,1705	6,45
ЭТ-31	250	145	0,1482	11,633
РТ-113	750	344	0,1494	14,588
РТ-63	825	340	0,122	19,84
УРТ-110	1500	146	0,4155	24,726

тиристора (при $R_T=0$) и шунтирующего диода (при $R_D=0$), то есть принятия $\Delta v_p=0$ (при $\Delta \rho_a=0$).

Идеализацию можно считать допустимой, если относительное отклонение скорости

$$\frac{\Delta v_{\Sigma}}{v_3} = \frac{\Delta v_p + \Delta v_k}{v_3} = \frac{\Delta \rho_a i}{\gamma \alpha - i} + \frac{\gamma \alpha \Delta v_0}{\gamma \alpha - i} \quad (13)$$

из выражения (10) не превышает заданной точности расчета.

Анализ выражения (13) с учетом значения α (табл. 1) позволяет получать зависимость предельных значений $\Delta \rho_a$ от относительной продолжительности включения γ и тока двигателя i , при которых расхождение расчетных характеристик по сравнению с эталонной по выражению (9) не превышает заданной точности, приняв $\Delta v_k=0$,

$$\Delta \rho_a = \frac{\Delta v_p}{v_3} \cdot \frac{\gamma \alpha - i}{i} \quad (14)$$

Естественно, что наибольшее снижение скорости будет при максимальном значении тока $i=\lambda$, где λ коэффициент кратности максимального тока по отношению к номинальному. С учетом этого выражение (9) примет вид

$$\Delta \rho_a \leq \frac{\Delta v_p}{v_3} \cdot \frac{\gamma \alpha - \lambda}{\lambda} = \delta \frac{\gamma \alpha - \lambda}{\lambda} \quad (15)$$

В случае выполнения неравенства (15) для реальной схемы электропровода можно применять методики расчета первой группы, принимая $\Delta \rho_a=0$. Точность расчетов при этом будет не ниже δ во всем диапазоне изменения тока двигателя. В противном случае необходимо применять методики второй группы.

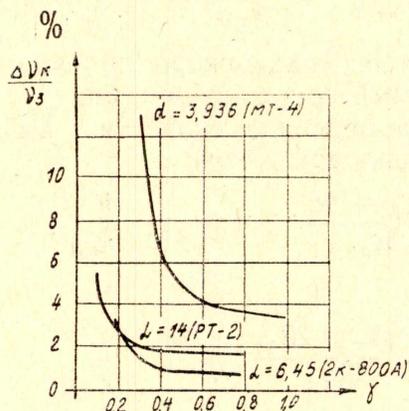


Рис. 2.

Вторая составляющая снижения скорости в выражении (13) определяется падением напряжения в тиристорном ключе

$$\frac{\Delta v_k}{v_3} = \frac{\gamma \alpha \Delta v_0}{\gamma \alpha - i} \quad (16)$$

На рис. 2 приведены зависимости относительного снижения скорости $\frac{\Delta v_k}{v_3}$ от величины γ при разных значениях α и падении напряжения в тиристорном ключе $\Delta U = 0,8$ в, рассчитанные по выражению (16).

Приведенные результаты в равной степени пригодны и для оценки влияния параметров на точность расчетов механических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Нагорский. Управление двигателя постоянного тока с помощью импульсов повышенной частоты. Известия АН СССР. «Энергетика и автоматика», № 2, 1960.
2. А. Д. Динкель, С. П. Василевский, А. С. Юрин. Расчет характеристик двигателей с последовательным возбуждением при импульсном регулировании скорости вращения. «Электротехника», 1968, № 6.
3. Н. И. Джус. Расчет характеристик двигателя последовательного возбуждения. Известия вузов. «Энергетика», 1971, № 6.
4. В. А. Бейнарович, А. И. Сапожников. Импульсное регулирование двигателей последовательного возбуждения в механизмах внутризаводского транспорта. «Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве». Труды V Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. Т. II. М., «Энергия», 1971.
5. А. С. Юрин. Статические характеристики двигателя с последовательным возбуждением при импульсном управлении. «Специальные системы электропривода». Вып. 2, Пермь, Ротапринт Пермского политехнического института, 1967.
6. В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. Основы электропривода. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.