

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

М. П. ТАБИНСКИЙ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Эксплуатация электроприводов переменного тока, предназначенных для работы с большой частотой пуско-тормозных и регулировочных включений, а также развитие импульсного регулирования скорости, выявили большое влияние электромагнитных переходных процессов на динамику, надежность, стабильность и точность работы асинхронного двигателя [1].

Благодаря работам выдающихся советских ученых: В. А. Веникова, А. В. Иванова-Смоленского, Е. Я. Казовского, В. А. Шубенко, А. А. Янко-Триницкого и других, а также работ зарубежных ученых: К. П. Ковача, И. Раца, В. Шуйского и других, была создана стройная теория, описывающая при помощи дифференциальных уравнений машины переменного тока в переходных режимах.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в асинхронном двигателе, в большинстве случаев невозможно. Задача решается трудоемкими численными методами или с помощью вычислительных машин.

Работы по изучению переходных процессов асинхронных двигателей, проводимые на кафедре ЭПП Томского политехнического института, выявили, что на основании теории физического моделирования можно создать простую методику расчета переходных режимов асинхронного двигателя, обладающей удовлетворительной точностью.

Для симметричной асинхронной машины (то есть при симметричном питающем напряжении и при симметричном статоре и роторе) существуют четыре основных критериев подобия [2]:

$$\frac{r_1}{x_\mu} = \text{idem} \quad (1)$$

$$\frac{r_2'}{x_\mu} = \text{idem} \quad (2)$$

$$\frac{x_1}{x_\mu} = \text{idem} \quad (3)$$

$$\frac{x_2'}{x_\mu} = \text{idem} \quad (4)$$

где r_1 ; r_2' ; x_1 ; x_2' ; x_μ — сопротивления схемы замещения асинхронного двигателя.

Кроме того, необходимо выполнение дополнительного условия подобия для сохранения масштаба времени механического движения:

$$\frac{J\omega_c s_k}{M_k} = \text{idem}, \quad (5)$$

где J — момент инерции вращающихся масс;

ω_c — синхронная скорость двигателя;

$M_k s_k$ — критический момент и скольжение двигателя.

Поскольку величины индуктивных и активных сопротивлений в справочной литературе отсутствуют, необходимо выразить критерии подобия асинхронных двигателей через каталожные данные.

Обычно для асинхронных двигателей принимают:

$$r_1 \approx r_2' \quad (3) \quad x_1 \approx x_2' \quad (4)$$

Величина сопротивления r_2' при известной номинальном скольжении s_n может быть подсчитана по формуле [5]:

$$r_2' = s_n \frac{U_{\text{фаз}}}{I_{\text{н фаз}}}, \text{ ом} \quad (6)$$

Сопротивление x_μ находится по формуле:

$$x_\mu = \frac{U_{\text{фаз}}}{I_{\text{м}}}, \text{ ом} \quad (7)$$

Ток холостого хода $I_{\text{м}}$ определяется формулой [6]:

$$I_{\text{м}} = I_{\text{н}} [\sin \varphi_{\text{н}} - \cos \varphi_{\text{н}} (k_{\text{м}} - \sqrt{k_{\text{м}}^2 - 1})], \quad (8)$$

где

$$k_{\text{м}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}.$$

Учитывая формулы (6), (7) и (8), критерии подобия (1) и (2) через каталожные данные можно выразить формулой:

$$\frac{r_1}{x_\mu} \approx \frac{r_2'}{x_\mu} = s_n [\sin \varphi_{\text{н}} - \cos \varphi_{\text{н}} (k_{\text{м}} - \sqrt{k_{\text{м}}^2 - 1})] = \text{idem} \quad (9)$$

Для выражения (3-го) и (4-го) критерия подобия через каталожные данные воспользуемся формулой критического скольжения:

$$s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

Учитывая, что $x_1 \approx x_2'$, формулу (9) можно преобразовать к виду

$$s_k = \pm \frac{\frac{r_2'}{x_\mu}}{\sqrt{\frac{r_1^2}{x_\mu^2} + \frac{(2x_1)^2}{x_\mu^2}}} \quad (10)$$

Из формулы (10) вытекает, что если $s_k = \text{idem}$, то при выполнении условий $\frac{r_2'}{x_\mu} = \text{idem}$ и $\frac{r_1^2}{x_\mu^2} = \text{idem}$, также $\frac{x_1}{x_\mu} = \frac{x_2'}{x_\mu} = \text{idem}$

Следовательно, необходимым условием подобия является также $s_k = \text{idem}$.

Критическое скольжение по паспортным данным двигателя находится по формулам [6]:

$$s_k = \frac{s_n + \sqrt{s_n \cdot A}}{1 + \sqrt{s_n \cdot A}}, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{\frac{M_{\text{макс}}}{M_n} - 1}{\frac{M_{\text{пуск}}}{M_n} - 1} \quad (12)$$

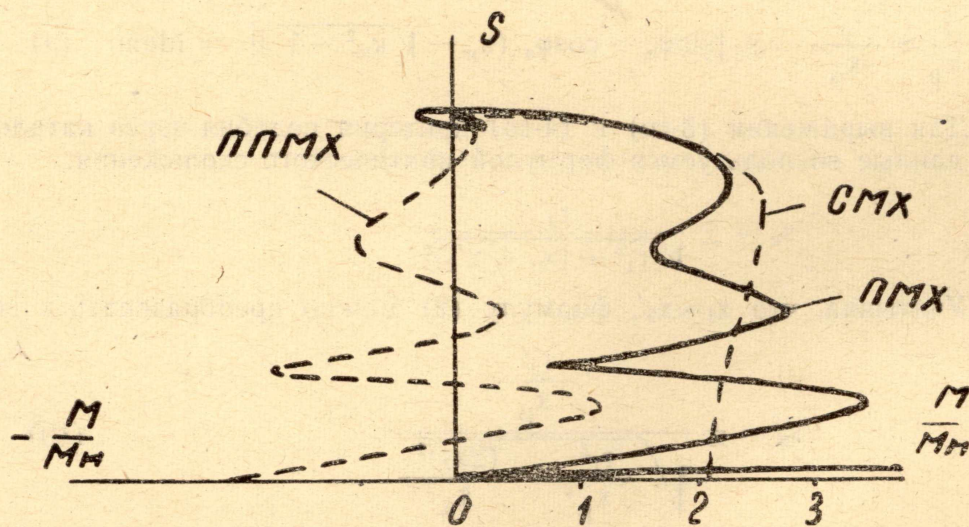
Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что критерии подобия (1) ÷ (4) выполняются, если

$$\cos \varphi_n = \text{idem} \quad (13) \quad \frac{M_{\text{макс}}}{M_n} = \text{idem} \quad (15)$$

$$s_n = \text{idem} \quad (14) \quad \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n} = \text{idem} \quad (16)$$

Иными словами, переходные режимы асинхронных двигателей, у которых механические характеристики в относительных единицах совпадают, у которых $\cos \varphi_n$ одинаковый и у которых соблюдено условие $\frac{J_{\omega_c} s_k}{M_k} = \text{idem}$, подобны во времени.

Многие исследователи отмечают, [8; 9], что время переходного процесса асинхронного двигателя, рассчитанное без учета электромагнитных переходных процессов, довольно точно совпадает с реальным временем переходного процесса (погрешность не более 10÷20%). Объясняется это тем, что электромагнитные переходные процессы создают знакопеременный момент, средняя величина которого за время



СМХ — статическая механическая характеристика.

ПМХ — переходная механическая характеристика.

ППМХ — пульсирующая переходная механическая характеристика

Рис. 1.

переходного процесса почти равна нулю. В [5] дано математическое доказательство равенства нулю среднего значения пульсирующего момента для частных случаев.

Если проанализировать переходную механическую характеристику, которая отображает зависимость $M_{дв} = f(n)$ в переходном режиме (пуск, торможение и т. д.), то можно сделать вывод, что ее можно разложить на две характеристики: статическую механическую характеристику, отображающую зависимость момента двигателя от скорости в установившемся режиме, и пульсирующую переходную механическую характеристику, которая отображает зависимость пульсирующего момента двигателя от скорости (рис. 1).

Такое разделение переходной механической характеристики впервые проведено В. А. Глебовым [9].

Вышеизложенные соображения легли в основу упрощенного метода расчета электромеханических переходных режимов асинхронного двигателя.

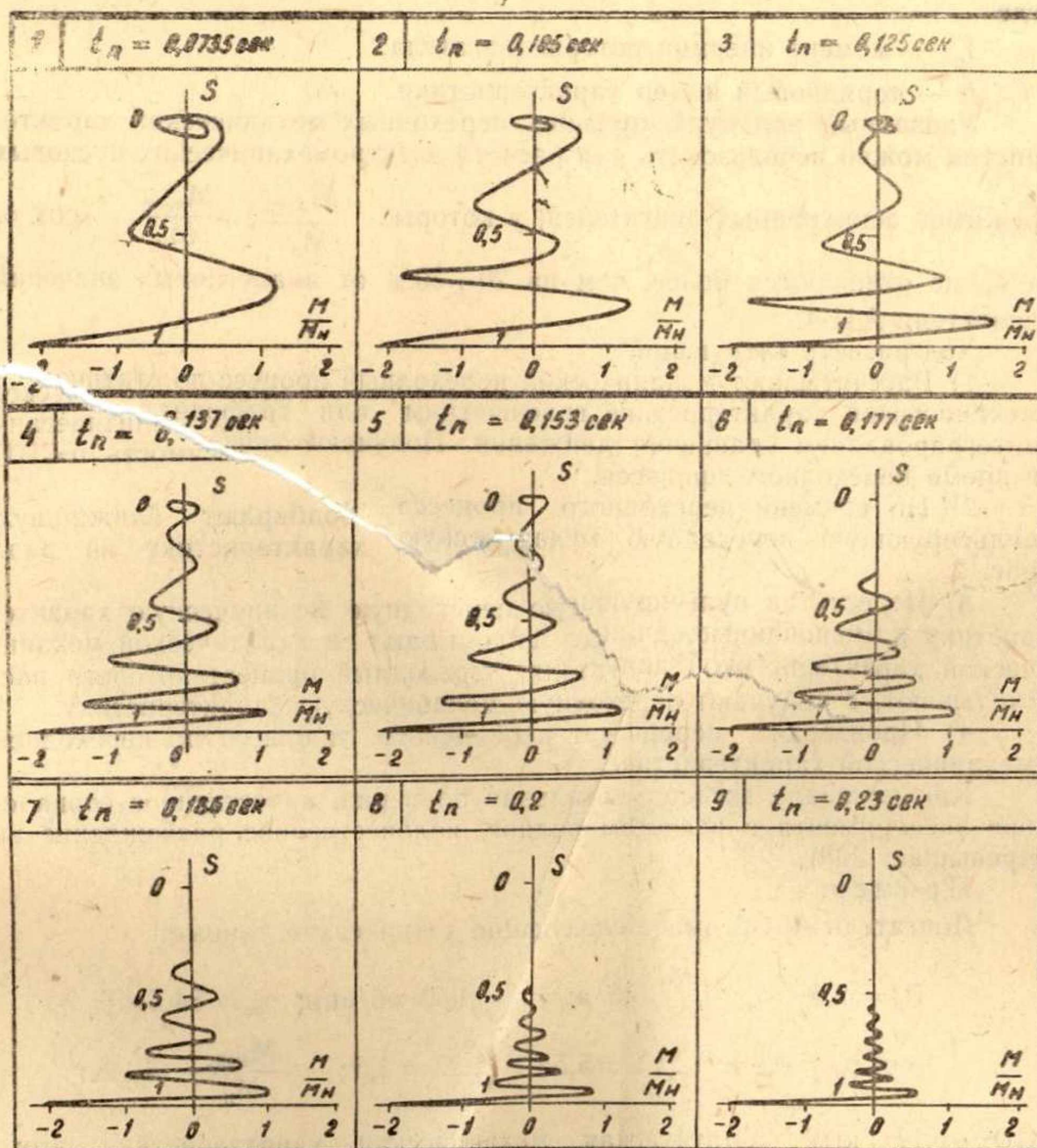


Рис. 2.

Для расчета необходимо иметь ряд пульсирующих переходных механических характеристик для переходного режима, снятых при различных значениях момента инерции, приведенного к валу двигателя, при статическом моменте, равном нулю ($M_{ст} = 0$). Такой ряд пульсирующих переходных механических характеристик, снятый для пускового режима асинхронного двигателя А41-4, приведен на рис. 2. На каждой характеристике указано время переходного процесса, при котором она получена.

Необходимо отметить, что при приведенном моменте инерции, равном трем моментам инерции ротора двигателя, переходная механическая характеристика почти не отличается от статической механической характеристики, поэтому вполне достаточно десяти пульсирующих переходных механических характеристик, снятых при нарастании момента инерции по арифметической прогрессии

$$J = J_p + (n - 1) \cdot 0,3 J_p,$$

где

J_p — момент инерции ротора двигателя;

n — порядковый номер характеристики.

Указанный ряд пульсирующих переходных механических характеристик можно использовать для расчета электромеханических пусковых режимов асинхронных двигателей, у которых $\frac{M_{пуск}}{M_n}$, $\frac{M_{макс}}{M_n}$, $\cos \varphi_n$

и s_n не отличаются более, чем на $20 \div 30\%$ от аналогичных значений двигателя А41-4.

Ход расчета следующий:

1) Рассчитывают механический переходный процесс по статической механической характеристике графическим или графоаналитическим интегрированием уравнения движения. Получают зависимость $n=f(t)$ и время переходного процесса.

2) По времени переходного процесса подбирают ближайшую пульсирующую переходную механическую характеристику из ряда рис. 2.

3) Пересчитав пульсирующую переходную механическую характеристику в именованные единицы, складывают ее с статической механической характеристикой двигателя, переходный процесс которого рассчитывают, и получают переходную механическую характеристику.

4) Производят перерасчет переходного процесса по переходной механической характеристике.

Как показала экспериментальная проверка, качественное совпадение эксперимента с расчетом полное, количественное расхождение не превышает 20% .

Пример:

Двигатель А51-6 имеет следующие технические данные:

$$P_n = 2,8 \text{ кВт}; \quad I_n = 6,6 \text{ а}; \quad n_n = 950 \text{ об/мин}; \quad \eta_n = 84,5\%;$$

$$\cos \varphi_n = 0,80; \quad \frac{I_{пуск}}{I_n} = 5,5; \quad \frac{M_{пуск}}{M_n} = 1,3; \quad \frac{M_{макс}}{M_n} = 1,8;$$

$GD^2 = 0,17 \text{ кгм}^2$. Статическая механическая характеристика этого двигателя, рассчитанная по каталожным данным, а также результат расчета механического переходного процесса графоаналитическим ме-

тодом приведены на рис. 3. Время переходного процесса равно 0,13 сек. Этому времени близко подходит пульсирующая переходная механическая характеристика № 3 на рис. 2.

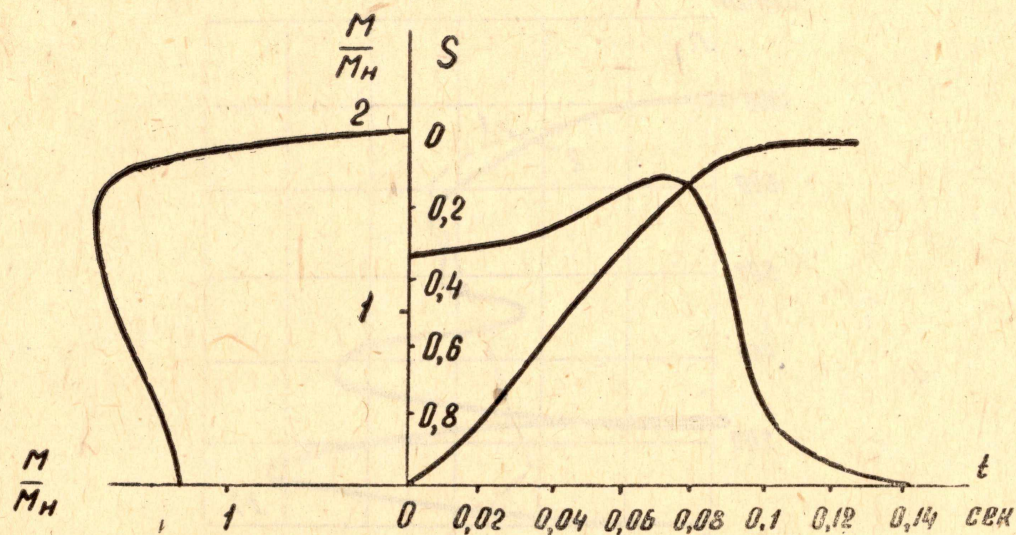
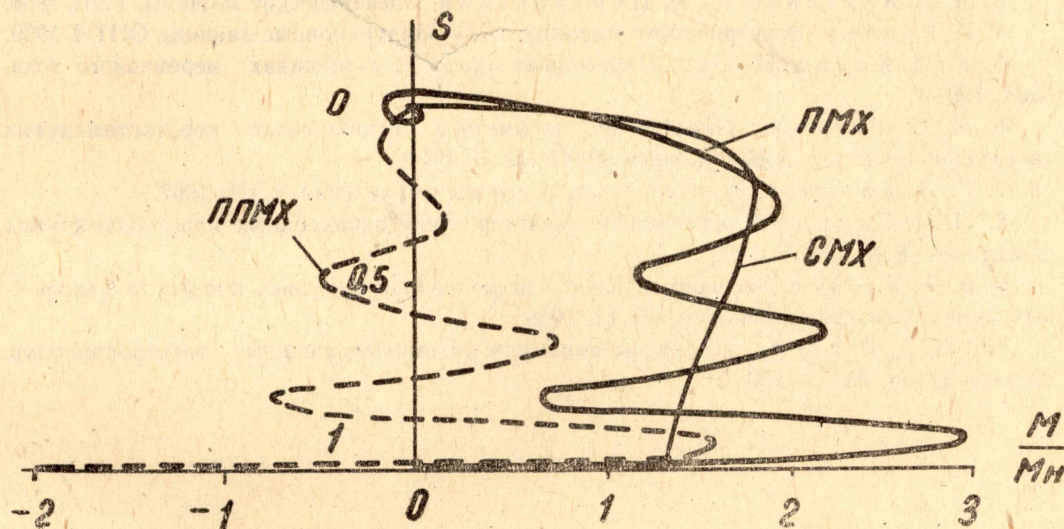


Рис. 3.

После пересчета пульсирующей переходной механической характеристики в именованные единицы и сложения с статической механической характеристикой двигателя А51-6, получена переходная механическая характеристика, которая начерчена на рис. 4а жирной линией. Для сравнения на рис. 4б приводится переходная механическая характеристика этого же двигателя, полученная по экспериментальным данным [10].



ПМХ — переходная механическая характеристика.
СМХ — статическая механическая характеристика
ППМХ — пульсирующая переходная механическая характеристика.

Рис. 4а

Ошибка вычислений находится в пределах $15 \pm 20\%$, несмотря на довольно значительное расхождение статических механических характеристик двигателей А41-4 и А51-6.

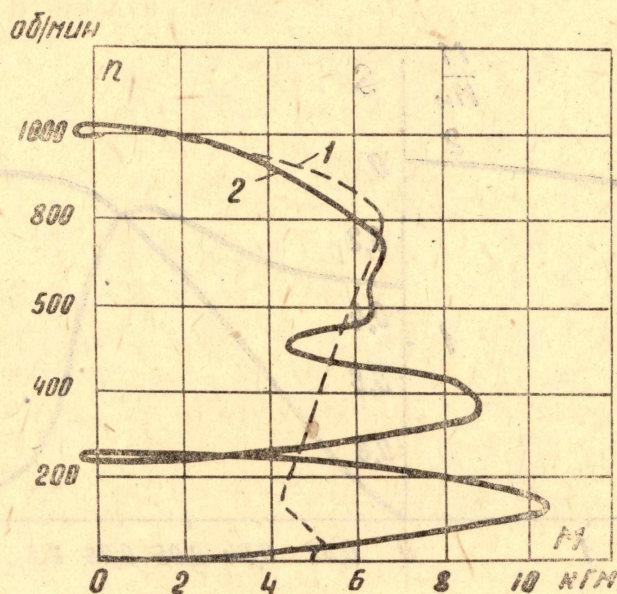


Рис. 46.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Шубенко. Вопросы динамики, энергетики и надежности автоматизированных асинхронных электроприводов. Обобщающий доклад по опубликованным работам, представленный на соискание ученой степени доктора технических наук. Свердловск, 1963.
2. В. А. Веников, Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. ГЭИ, 1958.
3. М. И. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, ГЭИ, 1958.
4. Р. Рихтер. Электрические машины, т. IV, Индукционные машины, ОНТИ, 1939.
5. К. П. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока, ГЭИ, 1963.
6. М. С. Туганов. Определение параметров асинхронных короткозамкнутых двигателей по каталожным данным. ВЭП, № 7, 1962.
7. Г. П. Хализев. Электропривод и основы управления. ГЭИ, 1962.
8. Л. П. Петров. Динамические характеристики асинхронных короткозамкнутых двигателей. ВЭП, № 5, 1959.
9. В. А. Глебов. Экспериментальное исследование пусковых процессов асинхронных двигателей. Электричество, № 12, 1956.
10. В. А. Шубенко. Вопросы динамики автоматизированных электроприводов. Электричество, № 1, 1960.