

Параметры установившегося режима асинхронного электродвигателя при асимметрии питающего напряжения в сельской электрической сети

В.Г. Петько, д.т.н., профессор, А.С. Петров, преподаватель, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Асимметрия напряжений отрицательно влияет на работу трёхфазных токоприёмников, и в особенности трёхфазных асинхронных электродвигателей [1]. Определению допустимого уровня асимметрии при номинальных условиях эксплуатации посвящены работы И.И. Мартыненко, Э.Г. Куреного и др. [2, 3]. С целью количественной оценки степени влияния на режимные параметры электродвигателей асимметрии питающего напряжения, представленной ранее [4], был произведён расчёт токов, мощностей и моментов в диапазоне изменения угловой скорости от $-\omega_c$ до $+\omega_c$. При этом степень асимметрии напряжений оценивалась однозначно определяющим её коэффициентом асимметрии $k = U_2/U_1$, где U_1 и U_2 – составляющие соответственно прямой и обратной последовательностей фаз.

Расчёт осуществлялся с использованием Г-образной схемы замещения (рис. 1) при подключении её раздельно на составляющие прямой и

обратной последовательностей фаз с последующим суммированием результатов расчёта по каждой из составляющих.

Так как магнитные поля, создаваемые токами прямой и обратной последовательностей фаз, вращаются во взаимно противоположных направлениях ($\omega_{C1} = -\omega_{C2}$), а ротор вращается с угловой скоростью ω , то скольжения ротора относительно этих полей находятся в соотношении:

$$s_2 = 2 - s_1. \quad (1)$$

С учётом этого сопротивления r_{1M}'' и r_{2M}'' определялись по формулам:

$$\begin{aligned} r_{M1}'' &= r_2''\omega/(\omega_{C1} - \omega) \text{ и} \\ r_{M2}'' &= -r_2''\omega/(\omega_{C1} + \omega). \end{aligned} \quad (2)$$

Однако для оценки влияния отклонения режимных параметров в условиях асимметрии напряжения от номинальных режимных параметров на нагрев и сопутствующее ему старение изоляции электродвигателя полученных в предшествующей работе зависимостей этих параметров от угловой

скорости при той или иной степени асимметрии недостаточно. Необходимо определить величину этого отклонения в установившемся режиме, существующего в конечный промежуток времени, в течение которого и происходит перегрев и ускоренное старение изоляции, что и является целью настоящего исследования.

Материал и методы исследования. Поставленная цель может быть достигнута, если определить режимные параметры, в том числе и параметры, влияющие на нагрев электродвигателя, при установившейся угловой скорости электродвигателя, работающего при той или иной степени асимметрии на определённый вид механической нагрузки. Установится угловая скорость, когда динамический момент $M_{дин}$ станет равным нулю:

$$M_{дин}(k, \omega) = M(k, \omega) - M_C(z, \omega), \quad (3)$$

где $M(k, \omega)$ – момент двигателя, зависящий от коэффициента асимметрии и угловой скорости, Нм; $M_C(z, \omega)$ – момент сопротивления рабочей машины (механическая характеристика), зависящий от угловой скорости и степени загрузки электродвигателя, Нм.

Приравняв правую часть уравнения к нулю и решая его относительно ω , находим установившуюся угловую скорость $\omega_y(z, k)$ для любого фиксированного значения коэффициента асимметрии k при той или иной степени загрузки z . Режимные параметры

для этой скорости и коэффициента асимметрии определяются по методике, изложенной в ранее опубликованной работе [4]. Алгоритм определения установившейся угловой скорости и параметров установившегося режима приведён на рисунке 2.

Исходные данные заносятся в модуль 1 алгоритма и далее определяются:

- технические данные и параметры схемы замещения, не зависящие от режима работы электродвигателя (модуль 2);

- выражения механической характеристики электродвигателя $M = f(k, \omega)$ при различных значениях коэффициента асимметрии питающего напряжения и механической характеристики рабочей машины $M_C = f(z, \omega)$, в качестве которой для примера принят вентилятор (модуль 3);

- установившаяся угловая скорость ω_y (модуль 4);

- параметры установившегося режима (модуль 5).

Результаты расчётов выводятся на печать (модуль 6).

Расчёт по приведённому алгоритму параметров электродвигателя в установившемся режиме при асимметрии напряжения на его зажимах произвели для того же электродвигателя 4A355S6Y3, что и в [1, 5], с целью сопоставления результатов. Программу расчётов реализовали в математической среде MathCAD.

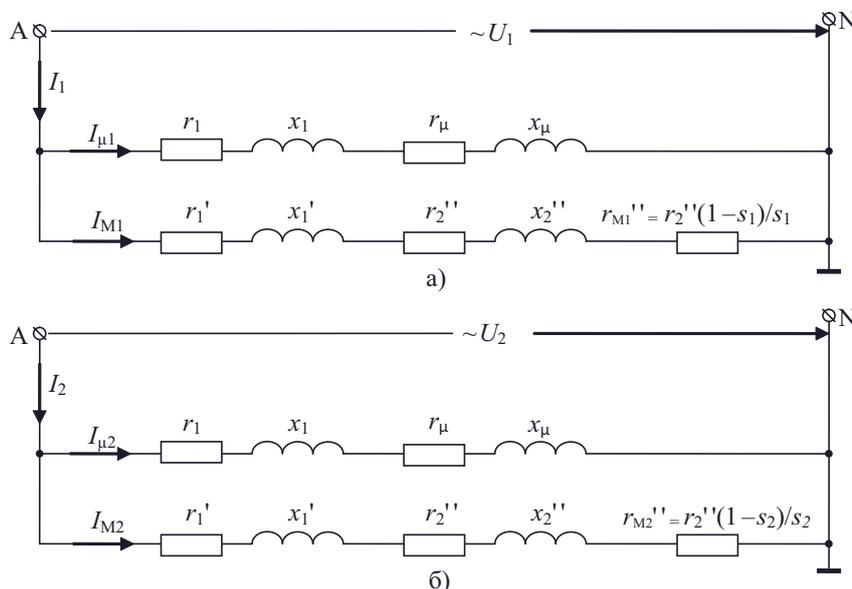


Рис. 1 – Схема замещения асинхронного электродвигателя фазы А, подключённая на симметричные напряжения прямой (а) и обратной (б) последовательностей фаз:

r_1, x_1 – активное и реактивное сопротивления обмотки статора при Т-образной схеме замещения, Ом; r_1', x_1' – скорректированные активное и реактивное сопротивления обмотки статора на Г-образную схему замещения, Ом; r_2'' , x_2'' – активное и реактивное сопротивления обмотки ротора, приведённые к обмотке статора, скорректированные на Г-образную схему замещения, Ом; r_μ, x_μ – активное и реактивное сопротивления цепи намагничивания, Ом; r_{M1}'' и r_{M2}'' – активное сопротивление в цепи ротора, развиваемая электрическая мощность на котором имитирует механическую мощность на валу, Ом; $s_1 = (\omega_{C1} - \omega) / \omega_C$ и $s_2 = (\omega_{C2} - \omega) / \omega_C$ – скольжения ротора относительно магнитного поля статора, соответственно относительно поля прямого и обратного вращения; ω_{C1}, ω_{C2} и ω – соответственно синхронная угловая скорость вращения магнитного поля статора в прямом и обратном направлении и угловая скорость вращения ротора, 1/с.

- Технические данные электродвигателя [6]:
- номинальная мощность – $P_H = 160000$ Вт;
 - номинальное фазное напряжение – $U_{H,\Phi} = 220$ В;
 - номинальная частота вращения – $n_H = 985$ об/мин;
 - номинальный коэффициент полезного действия – $\eta_H = 0,935$;
 - коэффициент мощности номинальный – $\cos\varphi_H = 0,90$;
 - кратность критического момента – $\mu_K = 2,2$;
 - сопротивления схемы замещения в относительных единицах:
 - индуктивное сопротивление цепи намагничивания – $Z_\mu = 2,8$;
 - уточнённое активное сопротивление статора – $R_1' = 0,023$;
 - уточнённое реактивное сопротивление статора – $X_1' = 0,11$;
 - уточнённые активное и реактивное сопротивления ротора, приведённые к обмотке статора, – $R_2'' = 0,016$ и $X_2'' = 0,14$.

Расчёт параметров для всех режимов работы электродвигателя и различной степени асимметрии питающего напряжения осуществляли при напряжении прямой последовательности фаз, равном 220 В.

Результаты исследования. На рисунке 3 изображены полученные в результате проведённых расчётов кривые зависимостей от угловой скорости моментов сопротивления $M_C(z,\omega)$ (для примера вентиляторного типа) на валу электродвигателя при различной степени его загрузки z и момента электродвигателя $M(k,\omega)$ при коэффициенте асимметрии k , равном нулю. Установившийся режим наступает при равенстве абсолютных величин моментов сопротивления и электродвигателя (пересечение кривых).

Эти же зависимости для наглядности изображены на рисунке 4 в более узком диапазоне изменения угловой скорости.

Вид кривых показывает, что величина установившейся угловой скорости ω_y зависит как от степени

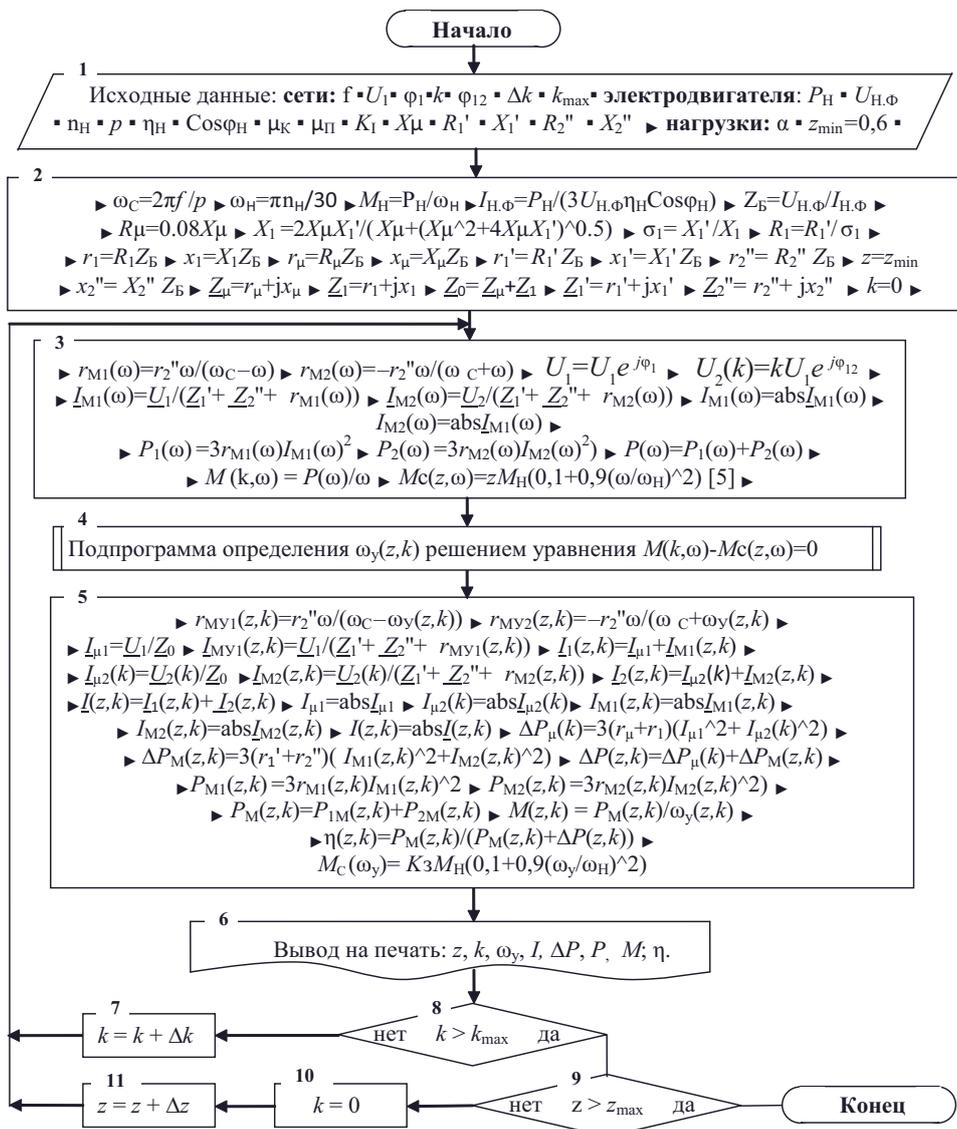


Рис. 2 – Алгоритм расчёта режимных параметров электродвигателя

загрузки электродвигателя z , так и от степени асимметрии напряжения k . Её величина при различной степени загрузки и асимметрии определяется путём решения уравнения $M(k, \omega) - M_C(z, \omega) = 0$ (модуль 4-го алгоритма). Зависимость этой угловой скорости от z и k наглядно иллюстрируется графиком, изображённым на рисунке 5.

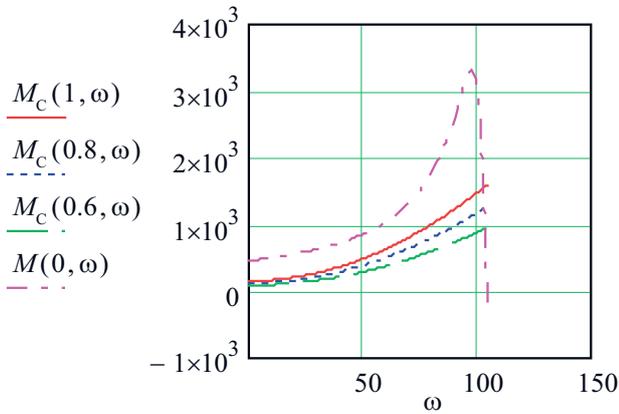


Рис. 3 – Зависимости моментов сопротивления $M_C(z, \omega)$ при $z = 1; 0,8$ и $0,6$ и момента электродвигателя $M(k, \omega)$ при $k = 0$

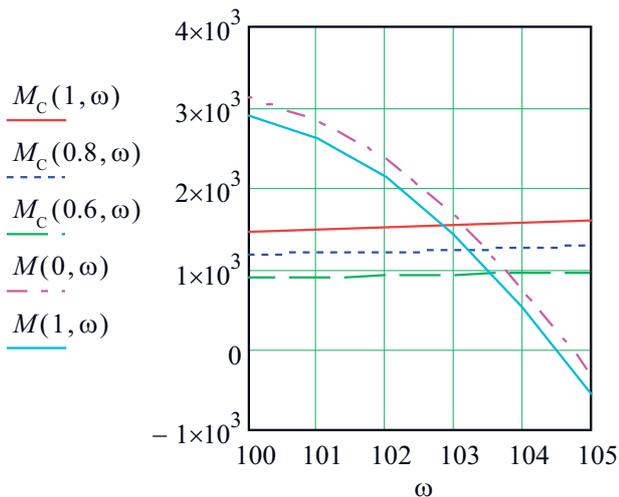


Рис. 4 – Зависимости моментов сопротивления $M_C(z, \omega)$ при $z=1; 0,8$ и $0,6$, и момента электродвигателя $M(k, \omega)$ при $k = 0$ и 1

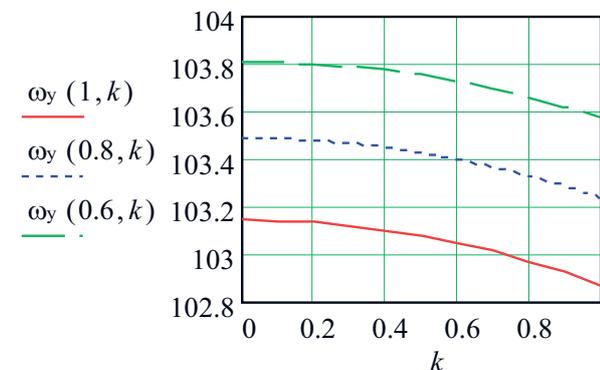


Рис. 5 – Зависимость установившейся угловой скорости ω_y в 1/с от коэффициента асимметрии k при степени загрузки электродвигателя $z = 0,6; 0,8$ и 1

Если диапазон изменения установившейся угловой скорости при достаточно широком изменении коэффициентов загрузки электродвигателя и асимметрии напряжения не превышает нескольких процентов, то изменение связанного с ней скольжения в установившемся режиме составляет от 60 до 120% по отношению к скольжению в номинальном режиме (рис. 6).

Определив установившуюся угловую скорость как функцию z и k , можно определить теперь и величины, непосредственно влияющие на нагрев и температуру электродвигателя в установившемся режиме. Эта часть расчётов осуществляется при выполнении модуля 5-го алгоритма. На рисунке 7 приведены полученные при этом графики зависимостей потерь мощности (мощности тепловыделения, Вт) от коэффициента асимметрии при различной степени загрузки электродвигателя.

Тепловыделение резко увеличивается с увеличением коэффициента асимметрии питающего напряжения. В диапазоне изменения коэффициента асимметрии от 0 до 1 мощность тепловыделения увеличивается более чем в 15 раз. В то же время уровень изменения тепловыделения несколько

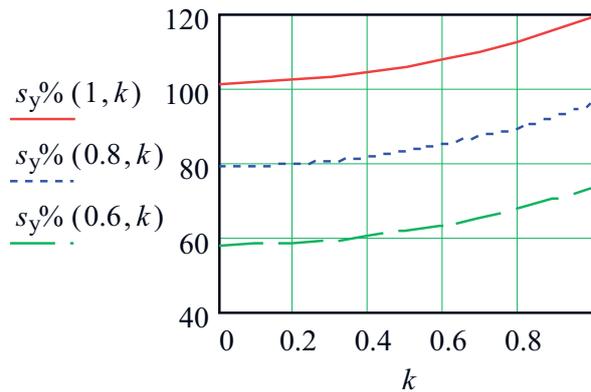


Рис. 6 – Зависимость установившегося скольжения в процентах к номинальному скольжению от коэффициента асимметрии k при степени загрузки электродвигателя $z = 0,6; 0,8$ и 1

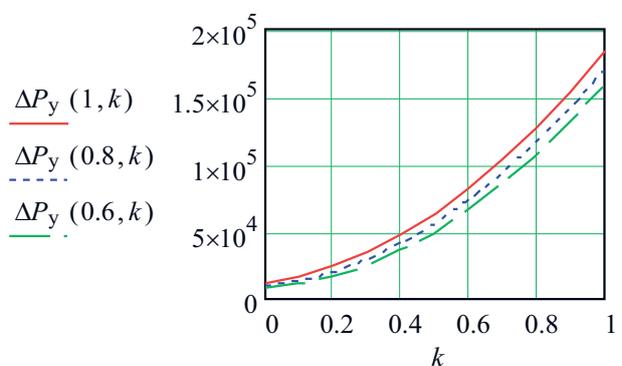


Рис. 7 – Зависимость тепловыделения в установившемся режиме от коэффициента асимметрии k при степени загрузки электродвигателя $z = 0,6; 0,8$ и 1

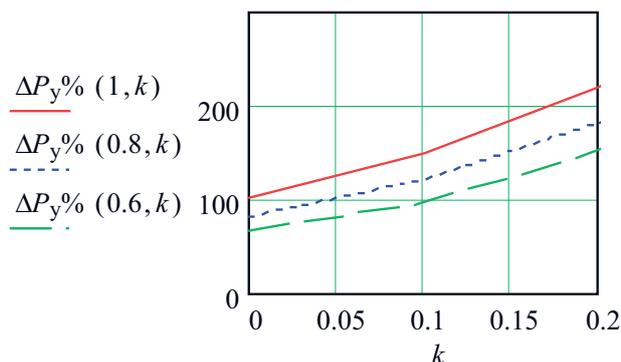


Рис. 8 – Зависимость мощности тепловых потерь в процентах к номинальным тепловым потерям от коэффициента асимметрии и степени загрузки электродвигателя

снижается при уменьшении степени загрузки электродвигателя. Более точное представление о влиянии в количественном отношении коэффициентов асимметрии и загрузки на мощность тепловыделения можно получить, рассматривая графики, изображенные на рисунке 8, где приведены кривые изменения мощности тепловых потерь в процентном отношении к мощности тепловых потерь в номинальном режиме ($z = 1, k = 0$).

Снижение степени загрузки электродвигателя позволяет сохранить тепловые потери ниже номинальных тепловых потерь и, следовательно, предотвратить перегрев электродвигателя при повышенном до некоторой степени коэффициенте асимметрии. Так, при степени загрузки 0,8 допустимый по условиям нагрева коэффициент асимметрии равен 0,05, а при 0,8 – уже 0,1.

Увеличение степени асимметрии и уменьшение загрузки приводит к уменьшению коэффициента полезного действия в установившемся режиме (рис. 9).

Выводы. Предложенная методика и алгоритм расчета эксплуатационных параметров асинхронного электродвигателя в установившемся режиме позволяет определить в первую очередь установившуюся угловую скорость при работе его на рабочую машину с известным типом механической

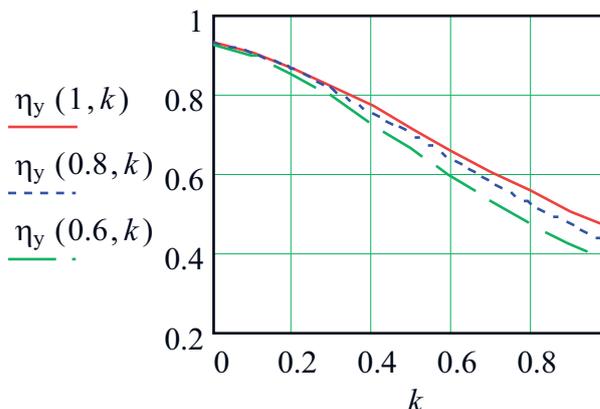


Рис. 9 – Зависимость коэффициента полезного действия от степени загрузки электродвигателя и асимметрии напряжения

характеристики. При этом установившаяся угловая скорость определяется в функции степени загрузки электродвигателя и асимметрии напряжения. Далее определяется мощность тепловых потерь в функции тех же параметров, непосредственно влияющая на нагрев электродвигателя, что в дальнейшем открывает возможность определить допустимый уровень асимметрии напряжения при работе любого конкретного электродвигателя в конкретных условиях эксплуатации.

Литература

1. Данилов И.Н. Защита электродвигателей от аварийных режимов работы. // Техника в сельском хозяйстве. 1988. № 2. С. 19–22.
2. Мартыненко И.И. Допустимая мощность электродвигателей при асимметрии напряжений // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1957. №4. С. 21–23.
3. Оценка и нормирование несимметрии напряжений в системах электроснабжения общего назначения / Э.Г. Куренный, Е.Д. Дмитриева, А.П. Лютый [и др.] // Электричество. 2008. №4. С. 18–27.
4. Петров А.С. Режимные параметры асинхронного электродвигателя при асимметрии напряжения / А.С. Петров, В.Г. Петько, В.А. Шахов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 8. С. 68–73.
5. Назаров Г.И. Электропривод и применение электрической энергии в сельском хозяйстве / Г.И. Назаров, Н.П. Олейник, А.П. Фоменков [и др.]. Изд. 2-е перераб. и дополн. М., «КОЛОС», 1972. С. 18–19.
6. Асинхронные двигатели 4Ф: справочник А90 / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин [и др.]. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с. ил.