

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА И СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А. В. Дробов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научный руководитель В. Н. Галушко

Быстрое развитие силовой электроники позволило применять асинхронные электродвигатели (АД) не только в традиционных решениях с фиксированной скоростью вращения, но и с успехом использовать их в системах регулирования скорости. В таких системах двигатель должен управляться от статического преобразователя частоты, а не от линии электропередачи.

Работа АД при отклонении напряжении. При изменении напряжения изменяется механическая характеристика АД – зависимость его вращающего момента M от частоты вращения. С достаточной точностью можно считать, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения на его выводах. При снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение. Снижение частоты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления M_c и от загрузки двигателя. Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения можно выразить по формуле

$$n_1 = n_0 \left(1 - k_3 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U^2} s_{\text{НОМ}} \right), \quad (1)$$

где n_0 – синхронная частота вращения; k_3 – коэффициент загрузки двигателя; $s_{\text{НОМ}}$ – номинальное значение скольжения.

Из формулы (1) видно, что при малых нагрузках двигателя частота вращения ротора будет больше номинальной частоты вращения (при номинальной нагрузке двигателя). В таких случаях понижения напряжения не приводят к уменьшению производительности технологического оборудования, так как снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной не происходит.

Для двигателей, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на выводах таких двигателей рекомендуется

поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приводит к «опрокидыванию» двигателя, т. е. к его остановке. Во избежание повреждений двигатель необходимо отключить от сети [1].

Если двигатель длительно работает при пониженном напряжении, то из-за ускоренного износа изоляции срок службы двигателя уменьшается [2]. Приблизительно срок службы изоляции T можно определить по формуле

$$T = \frac{T_{\text{ном}}}{R}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ном}}$ – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке; R – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя и равный:

$$R = (\beta_1 \delta U^2 - \beta_2 \delta U + 1). \quad (3)$$

Поэтому с точки зрения нагрева двигателя более опасны в рассматриваемых пределах отрицательные отклонения напряжения.

Для анализа различных показателей работы электрооборудования с ним были проведены приборные исследования. Ниже представлены некоторые результаты.

В процессе исследований изучалось влияние частоты, напряжения и температуры на электропотребление и рабочие характеристики АД.

В качестве выходных значений регистрировались следующие: напряжение, ток, частота сети, активная и полная мощность, КПД трехфазного инвертора; напряжение, частота, момент на валу, линейные токи, $\cos\phi$, частота вращения, подводимая активная и полезная мощности на валу, КПД АД.

В качестве объекта исследования были использованы АД номинальной мощностью 60, 1100, 1700 Вт.

I. Сравнение характеристик АД при изменении напряжения и частоты с помощью трехфазного инвертора и синхронного генератора (СГ).

С помощью однофакторного дисперсионного анализа в программном продукте Microsoft Excel, StatGraphics и Statistica изучалось влияние трехфазного инвертора на электропотребление и рабочие характеристики АД. С интервалом 10 В изменяли напряжение на выходе трехфазного инвертора, а затем синхронного генератора, регистрируя выходные данные при фиксированных нагрузках на валу.

Для инвертора и синхронного генератора различие между средними линейными токами обмотки статора и частотой вращения ротора статистически значимо (на уровне, соответственно $p = 0,00667$ и $0,216$, т. е. меньше, чем критическое значение $0,05$), что обусловлено влиянием формы кривой напряжения. То есть от СГ при тех же нагрузках протекал меньший ток в статорной обмотке по сравнению с инвертором.

КПД АД значимо выше для пониженных напряжений, создаваемых СГ, по сравнению с трехфазным инвертором.

На основании изменения входных и регистрации выходных параметров выдвигаем различные гипотезы о виде регрессионной зависимости между переменными с целью подбора уравнения регрессии. Приведем некоторые результаты одиночной и множественной регрессии, установленных в ходе проведенных исследований:

– КПД АД и КПД трехфазного инвертора существенно не изменяется с ростом напряжения при фиксированных нагрузках на валу;

- изменение частоты в диапазоне от 45 до 52 Гц при фиксированных нагрузках на валу значительно влияет на КПД АД ($\eta = -0,002f^3 + 0,330f^2 - 16,11f + 262,4$; $RI = 1$), создавая локальный минимум на частоте 47 Гц, и максимум при 51 Гц;
- также наблюдается влияние частоты на выходе инвертора на его КПД:

$$\eta = -0,005f^3 + 0,778f^2 - 38,77f + 643,6; RI = 1; \quad (4)$$

– исключение слагаемых (пошаговый регрессионный анализ в программе Statgraphics) незначимо ухудшило предсказательные возможности уравнения регрессии (коэффициент детерминации уменьшился). При этом значение приведенного коэффициента детерминации увеличилось.

Дальнейшие попытки добавления в уравнение еще не включенных слагаемых незначимо улучшают модель; а попытки удаления уже включенных в модель слагаемых значительно ее ухудшают, поэтому процедура пошагового регрессионного анализа была прекращена.

II. Анализ результатов для изменения напряжения и частоты с помощью синхронного генератора:

- уменьшение напряжения практически линейно ($RI > 0,85$) уменьшало частоту вращения ротора, снижение тока статорной обмотки лучше всего описывалось экспоненциальной зависимостью (например, для АД 1,1 кВт: $I = 1,322e^{0,005U}$ с $RI = 0,895$);
- изменение частоты значительно влияло на ток статорной обмотки и потребляемую из сети мощность в сторону уменьшения при снижении частоты. Это можно связать с потерями в стали, которые не зависят от его нагрузки АД и пропорциональны частоте в степени, близкой к 1,5 и могут быть определены по формуле

$$DP_m = k_{уд} \left(\frac{B_{m \text{ дейст}}}{B_{m \text{ табл}}} \right)^2 \left(\frac{f_{\text{дейст}}}{f_{\text{табл}}} \right)^{1,5}, \quad (5)$$

где $k_{уд}$ – удельные потери для данной марки стали при заданных табличных значениях индукции и частоты, величина $k_{уд}$ указывается в справочниках; $B_{m \text{ табл}}$ – действительное амплитудное значение индукции в трансформаторе; m – масса стали сердечника.

III. Анализ результатов для изменения напряжения и частоты с помощью трехфазного инвертора:

- выполненный множественный корреляционный и регрессионный анализ в программном продукте Statistica для зависимости тока холостого хода от линейного напряжения и частоты.

Информационная часть окна указывает на следующие параметры анализа:

- коэффициент множественной корреляции $R = 0,99726$;
- коэффициент детерминации, показывающий долю общего разброса (относительно выборочного среднего зависимой переменной), которая объясняется построенной регрессией $R^2 = 0,9945$;

IV. При изменении нагрузки двигателя происходит изменение как тока I_1 и мощности P_1 , так и частоты вращения ротора n_2 , скольжения s , КПД η и $\cos \varphi_1$. Зависимости n_2 , s , M_2 , I_1 , $\cos \varphi_1$, η и P_1 от P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Их примерный вид (имелись отличия для различных мощностей) для значительно изменяющихся рабочих характери-

стик по сравнению с естественными [2] (сплошные линии) для АД представлен на рис. 2, *a* (пунктиром) – тенденция к их изменению при уменьшении напряжения с помощью инвертора; *b* (точками) – с помощью СГ относительно малой мощности; *в* – указаны при уменьшении частоты инвертором.

Анализ полученных результатов позволяет выдвинуть следующие выводы:

– асинхронный электродвигатель, питаемый ШИМ напряжением, имеет более низкую эффективность, чем при питании синусоидальным напряжением, в связи с увеличением потерь, вызванных гармониками;

– при работе АД от частотных преобразователей должна оцениваться эффективность системы в целом, а не только электродвигателя;

– каждый случай должен быть должным образом проанализирован с учетом характеристик, как двигателя, так и преобразователя, учитывая следующие параметры: рабочая частота, частота переключения, диапазон скоростей, нагрузка и мощность двигателя, суммарный коэффициент гармонических искажений и т. д.;

– увеличение частоты коммутации увеличивает КПД двигателя и снижает КПД инвертора (из-за увеличения потерь на переключениях силовых ключей).