

заранее прогнозировать отклонения профиля наружной шлицевой поверхности, и при помощи визуализации решений (рисунок 3), проводить анализ существующего состояния технологической системы резания и вносить коррективы по устранению выявленных спрогнозированных погрешностей.

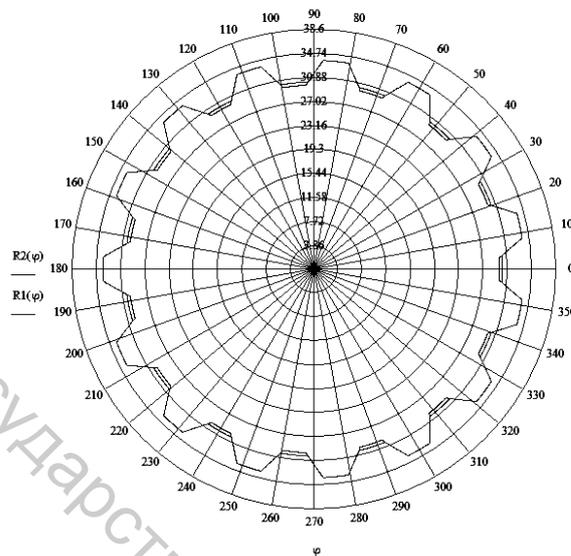


Рисунок 3 – Визуализация погрешности диаметра впадины

Применение методики поиска уравнения упругой линии ступенчатого вала и последующее решение вопроса прогнозирования погрешностей обработки шлицевой поверхности позволяет установить требуемые по условиям производительности и точности оптимальные режимы резания с учётом состояния элементов технологической системы.

С помощью исследуемых моделей для поиска уравнения упругой линии ступенчатого вала при шлицефрезеровании становится возможным:

- применение данной методики для любых расчётных схем ступенчатых шлицевых валов;
- разработка на основе данной методики интегрированной САПР способной не только производить расчёт технологических параметров, но и формировать управляющую программу для станка с ЧПУ на основе анализа жёсткости технологической системы резания в целом.

УДК 621.341.572

### ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА И СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

ДРОБОВ А.В., аспирант, ГАЛУШКО В.Н.

Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь

Ключевые слова: асинхронный двигатель, трехфазный инвертор, преобразование частоты, характеристики электродвигателя.

Реферат: в статье приведено описание влияния различных факторов на работу приводов с асинхронными тяговыми двигателями.

Быстрое развитие силовой электроники позволило применять асинхронные электродвигатели 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 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]. Приблизенно 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:

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

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  $0,216$ , то есть 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 значимо влияет на КПД АД ( $\eta = -0,002 f^3 + 0,330 f^2 - 16,11 f + 262,4$ ;  $R^2 = 1$ ) создавая локальный минимум на частоте 47 Гц, и максимум при 51 Гц;

– также наблюдается влияние частоты на выходе инвертора на его КПД:

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

– 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 значимо 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 ( $R^2 > 0,85$ ) 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  $R^2 = 0,895$ );

– изменение частоты значимо 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

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

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  $R^2 = 0,9945$ ;

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 проанализированы 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).

Литература:

1. Дробов, А.В. Электрические машины : учеб. пособие / А. В. Дробов, В. Н. Галушко. – Минск: РИПО, 2015. – 292 с. : ил.

2. В. Н. Галушко, С. Г. Додолев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.

УДК 621.3.019.3

### **ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

ДРОБОВ А.В., аспирант, ГАЛУШКО В.Н.

Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь

Ключевые слова: имитационное моделирование, система электроснабжения, электрическая сеть, надежность систем электроснабжения.

Реферат: разработан метод имитационного моделирования надежности СЭС сетей 0,4 кВ; разработан программно-технологический комплекс имитационного моделирования, обеспечивающий реализацию метода.

Автором предложена математическая модель, позволяющая определить параметры надежности различных сложных электрических систем (СЭС) 0,4 кВ, с применением метода Монте-Карло.

В имитационной модели могут быть реализованы произвольные вероятностные закономерности надежностных свойств элементов и воздействий на систему. Поэтому стандарты [1] определяют имитационное моделирование в качестве наиболее универсального метода исследования надежности систем.

Другими достоинствами имитационного моделирования является возможность [2, 3]:

- визуального наблюдения за процессом функционирования системы в течение некоторого времени;
- рассматривать различные варианты системы, отвечающие различным сторонам функционирования и возможным структурным преобразованиям;
- имитировать большое число отказов аппаратных и программных средств, что практически неосуществимо при натурных испытаниях;
- создать во время испытаний всё множество технологических ситуаций;
- проводить испытания модели системы в ускоренном или замедленном машинном времени.

Имитационное моделирование – метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение (на ЭВМ) процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера (детальное описание реализованных имитационных моделей представлено в справочнике [4]).

Многократно воспроизводя процесс функционирования имитационной модели системы до отказа, можно собрать статистический материал, достаточный для оценки интересующих показателей надежности системы с заданной точностью.