

УДК 681.5

Д. Н. РАКОВ, магистрант, В. С. МОГИЛА, кандидат технических наук, А. В. ДРОБОВ, аспирант, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Приведено описание влияния различных факторов на работу приводов с асинхронными тяговыми двигателями. Рассмотрена работа двигателя при отклоняющемся напряжении и обрыве одной из фаз. Проведен анализ механических и электрических характеристик асинхронного двигателя при включении в цепь трехфазного инвертора и синхронного генератора. По результатам исследований были сделаны соответствующие выводы о влиянии трехфазного инвертора и синхронного генератора на работу асинхронного двигателя.

**Б**ыстрое 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.

Использование электродвигателей с короткозамкнутым ротором в паре с преобразователем частоты имеет большие преимущества в отношении затрат и энергоэффективности, по сравнению с другими промышленными решениями регулирования скорости. Тем не менее, преобразователь влияет на характеристики электродвигателя и может наводить помехи в питающей электросети.

Постоянное увеличение числа приложений с асинхронными электродвигателями, питаемыми от ШИМ преобразователей частоты, с регулируемой скоростью, требует хорошего понимания всей системы электропитания, а также взаимодействия между ее отдельными частями (линия электропитания – преобразователь частоты – асинхронный двигатель – нагрузка).

Асинхронный двигатель (АД), работающий от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), подвергается влиянию гармоник напряжения с частотой, выше основной частоты питания. В зависимости от типа используемой ШИМ, частоты переключения и других особенностей управления эффективность электродвигателя может снижаться, а потери, температура, шум и уровень вибрации повышаются.

Кроме вышеперечисленных, могут проявляться и другие эффекты при питании асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты. Диэлектрический стресс системы изоляции и напряжения вала вместе с потенциально опасными подшипниковыми токами являются хорошо известными побочными эффектами. Существующие решения для уменьшения гармоник, генерируемых преобразователем частоты, приведены в таблице 1.

Ниже представлен анализ влияния различных факторов на работу АД.

*Работа АД при отклонении напряжения.* При изменении напряжения изменяется механическая характеристика АД – зависимость его вращающего момента  $M$  от частоты вращения. С достаточной точностью можно считать, что вращающий момент двигателя про-

порционален квадрату напряжения на его выводах. При снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение.

Таблица 1 – Существующие решения уменьшения гармоник

Метод уменьшения гармоник	Характеристики решения
Установка выходных пассивных фильтров ( $L$ , $LC$ , $dV/dt$ )	Увеличение стоимости установки
	Ограничения для векторного управления
	Падение напряжения (уменьшение момента АД)
Использование многоуровневого преобразователя	Увеличение стоимости
	Уменьшение надежности преобразователя
	Усложнение управления
Улучшение качества ШИМ (оптимизация временной диаграммы)	Пространственно-векторная модуляция (SVM)
	Значимо не увеличивает стоимость
	Улучшение контроля напряжения
	Выше эффективность всей системы (преобразователя и АД)
Увеличение несущей частоты	Уменьшение эффективности преобразователя (увеличение потерь при переключении)
	Увеличение токов утечки

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 следующим образом:

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

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 понижение напряжения не приводит 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].

Снижение напряжения ухудшает и условия пуска двигателя, так как при этом уменьшается его пусковой момент [1].

Практический интерес представляет зависимость потребляемой двигателем активной и реактивной мощности от напряжения на его выводах. В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2–3 % при снижении напряжения на 1 %), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции.

Снижение напряжения приводит также к заметному росту реактивной мощности, теряемой в реактивных сопротивлениях рассеяния линий, трансформаторов и АД.

Повышение напряжения на выводах двигателя приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности. При этом удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки двигателя. В среднем на каждый процент повышения напряжения потребляемая реактивная мощность увеличивается на 3 % и более (в основном за счет увеличения тока холостого хода двигателя), что в свою очередь приводит к увеличению потерь активной мощности в элементах электрической сети.

Если двигатель длительно работает при пониженном напряжении, то из-за ускоренного износа изоляции срок службы двигателя уменьшается [3]. 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,

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

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

При несимметрии напряжений фазные токи двигателя будут неодинаковы, и сдвиг между ними по фазе не будет равен  $120^\circ$ . В результате по одной из фаз будет протекать больший ток, вызывающий увели-

ченный нагрев обмоток данной фазы. Это заставляет ограничивать нагрузку двигателя по сравнению с работой его при симметричном напряжении. Кроме того, при несимметрии напряжений возникает не круговое, а эллиптическое вращающееся магнитное поле и несколько изменяется форма механической характеристики двигателя. При этом уменьшаются его наибольший и пусковой моменты.

При обрыве одной из фаз двигатель продолжает работать, но по неповрежденным фазам будут протекать повышенные токи, вызывающие увеличенный нагрев обмоток; такой режим не должен допускаться. Пуск двигателя с оборванной фазой невозможен, так как при этом не создается вращающееся магнитное поле.

Для анализа различных показателей работы электрооборудования с ним были проведены приборные исследования. Оборудование и приборы: ваттметры, мультиметры, трехфазный инвертор на базе микроконтроллера MB90F562 (Fujitsu) и силового интеллектуального модуля PS11033 (Mitsubishi) (рисунок 1), синхронный генератор, ЛАТР, источники постоянного регулируемого напряжения, испытательная установка – “черный ящик”, клещи токоизмерительные СЕМ DT-3353.



Рисунок 1 – Трехфазный инвертор MB90F562 (Fujitsu) и токоизмерительные клещи СЕМ DT-3353

Клещи токоизмерительные предназначены для измерения параметров фазных и сбалансированных трехфазных и однофазных электросетей. Прибор позволяет измерять напряжение, силу тока, активную, полную и реактивную мощность,  $\cos \varphi$ , фазовый угол.

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

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

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

**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 трех-фазного инвертора, а затем – синхронного генератора, регистрируя выходные данные при фиксированных на-грузках 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 изменяются 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;

– наблюдается влияние частоты инвертора на его КПД ( $\eta = -0,005 f^3 + 0,778 f^2 - 38,77 f + 643,6$ ;  $R^2 = 1$ );

– 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. В результате анализа итоговое множественное уравнение регрессии для КПД АД при изменении напряжения и частоты для неизменной нагрузки имеет вид

$$\eta = 0,2155 + 0,00935 f - 7 \cdot 10^{-9} U^3.$$

Приведем полученные коэффициенты:

R-squared = 81,9 percent – коэффициент детерминации, %;

R-squared (adjusted for d.f.) = 74,7 percent – приведенный к числу степеней свободы коэффициент детерминации, %;

Standard Error of Est. = 0,01337 – стандартная ошибка оценивания;

Mean absolute error = 0,0094 – средняя абсолютная ошибка;

Durbin-Watson statistic = 2,537 ( $P = 0,0735$ ) – коэффициент Дурбина – Ватсона и соответствующий ему максимальный уровень значимости.

Оценить влияние напряжения и частоты для КПД ЧПР с помощью процедуры пошагового регрессионного анализа не удалось ( $\eta = 0,64125$ ;  $R^2 = 0$ ). При этом КПД инвертора в зависимости от полезной мощности на валу имеет нелинейную зависимость, характеризующуюся почти линейной зависимостью до 50 % нагрузки инвертора, а затем возрастание имеет более слабо выраженный характер.

**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

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

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.

**Анализ результатов для изменения напряжения и частоты с помощью трехфазного инвертора.** Был выполнен 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  $R = 0,997$ ;

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

– скорректированный коэффициент детерминации составил  $0,9927$ ;

– наблюдается большое значение  $F$ -критерия = 544 и даваемый в окне уровень значимости  $p = 0$ , показывающие, что построенная регрессия значима.

Регрессионная модель приняла вид

$$I_0 = 8,74 + 0,0306U - 0,2278f;$$

– аналогичным образом получим зависимость *мощности холостого хода* от линейного напряжения и частоты.

Регрессионная модель описывалась уравнением

$$P_0 = 505 + 2,5U - 16,25f.$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9686$ ; значение  $F$ -критерия = 46,27 и уровень значимости  $p = 0,0056$ ;

– зависимость  $\cos\varphi_0$  от линейного напряжения и частоты имеет вид

$$\cos\varphi_0 = 0,2207 + 0,00024U - 0,00275f.$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9686$ ; значение  $F$ -критерия = 61,71 и уровень значимости  $p = 0,000985$ .

**При изменении нагрузки двигателя** происходит изменение как тока  $I_1$  и мощности  $P_1$ , так и частоты вращения ротора  $n_2$ , скольжения  $s$ , КПД  $\eta$  и  $\cos\varphi_1$ . Зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $\eta$  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 значимо изменяющихся рабочих характеристик по сравнению с естественными [2] (сплошные линии) для АД представлен на рисунке 1: *a* (пунктиром) – тенденция к их изменению при уменьшении напряжения с помощью инвертора; *б* (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 соответствующим образом проанализирован с учетом характеристик как двигателя, так и преобразователя, учитывая следующие параметры: рабочую частоту, частоту переключений, диапазон скоростей, нагрузку и мощность двигателя, коэффициент гармонических искажений и т.д.;

– тип измерительных приборов чрезвычайно важен для правильной оценки электрических величин на системах с ШИМ напряжением. Правильные среднеквадратичные значения должны быть использованы для того, чтобы обеспечить верные измерения мощности;

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

### Список литературы

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

2 **Черномашенцев, В. Г.** Электрические машины : учеб.-метод. пособие для самостоятельной проработки курс.: Ч. I. Трансформаторы. Асинхронные машины / В. Г. Черномашенцев, В. А. Пацкевич, В. Н. Галушко. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 129 с.

3 **Галушко, В. Н.** Надежность электроустановок и энергетических систем : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, С. Г. Додолев. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.

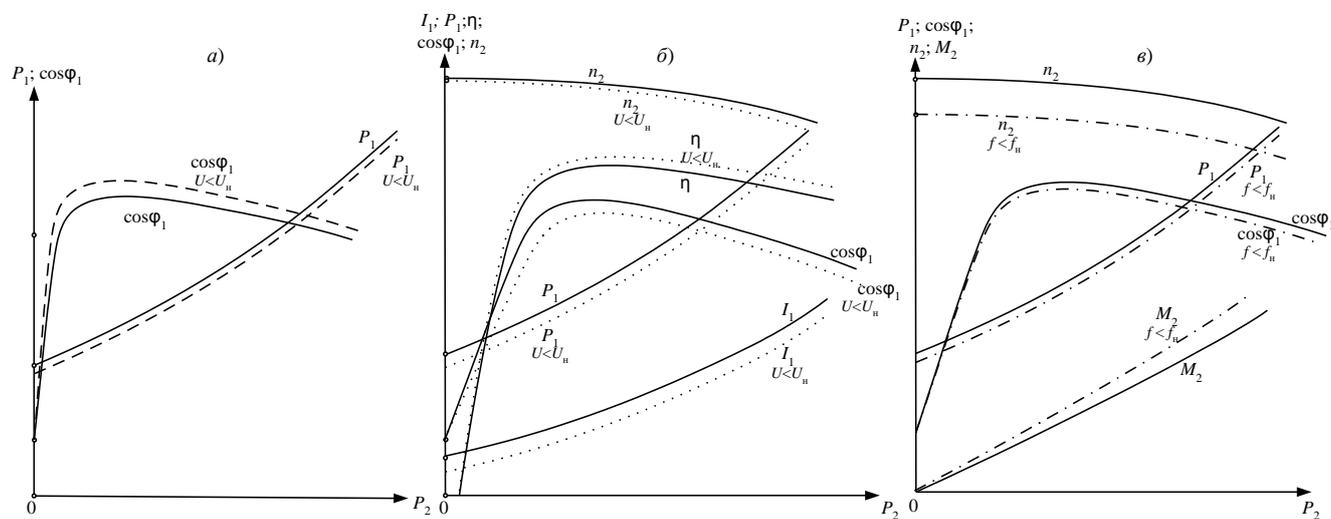


Рисунок 1 – Примерный вид значимо изменяющихся рабочих характеристик АД:

*a* – при изменении напряжения с помощью трехфазного инвертора;  
*б* – при изменении напряжения с помощью СГ; *в* – при изменении частоты с помощью инвертора

Получено 26.01.2016

**D. N. Rakov, V. S. Mogila, A. V. Drobov, V. N. Galushko.** Analysis of influence of various factors on the working characteristic of asynchronous motors.

The description of influence of different factors on operation of drives with asynchronous tractive engines is provided. Operation of the engine is considered at the deviating tension and a breakaway of one of phases. The analysis of mechanical and electrical characteristics of the asynchronous engine in case of switching on is carried out to a circuit of the three-phase inverter and the synchronous generator. By results of researches the appropriate conclusions were drawn on influence of the three-phase inverter and the synchronous generator on operation of the asynchronous engine.