

СТАТЬИ

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ильичев В.Ю., Юрик Е.А.

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru

Проблемой при использовании схем с асинхронными двигателями часто является их недостаточная надёжность. В арсенале проектировщиков нет простых программных продуктов, позволяющих рассчитывать надёжность таких схем. Цели работы – разработка программы для расчёта надёжности схем подключения асинхронных трёхфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и выбор наилучшей схемы. Использован язык программирования Python, позволяющий производить вычисления, создавать интерфейс пользователя, выводить графики. Реализован алгоритм «коэффициентного метода» расчёта надёжности, выбранного по причине удобства сравнения схем с использованием среднестатистических интенсивностей отказа их элементов и возможности учёта условий эксплуатации. Рассчитана надёжность двух широко применяемых схем подключения асинхронных двигателей: со снижением и без снижения пускового напряжения при использовании их в разных условиях эксплуатации. Результаты расчёта зависимостей вероятностей безотказной работы от времени позволили наглядно продемонстрировать надёжность каждой рассмотренной схемы. Схема со сниженным напряжением запуска обладает меньшей надёжностью при эксплуатации, однако обеспечивает меньшую вероятность выхода из строя двигателя. Поэтому было решено дополнительно рассчитать показатели надёжности схемы с понижением напряжения, но с использованием резервирования. Оказалось, что такая схема в сложных условиях эксплуатации обеспечивает надёжность даже выше, чем схема без понижения пускового напряжения, поэтому она и рекомендуется для применения. В заключение сделаны выводы по результатам исследования, а также намечены цели будущих разработок при решении задач проектирования элементов электросиловых схем.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, системы управления и защиты, надёжность систем, коэффициентный метод расчёта надёжности, язык Python

STUDY OF ASYNCHRONOUS MOTOR CONNECTION RELIABILITY

Ilichev V.Yu., Yurik E.A.

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru

The problem when using circuits with asynchronous motors is often their lack of reliability. Designers does not have simple software products that allow to calculate the reliability of such schemes. The goals of the work are to develop a program for calculating the reliability of circuits of asynchronous three-phase electric motors with a short-circuited rotor and choosing the best circuit. Python programming language is used, which allows to make calculations, create a user interface, and output graphs. The algorithm of «coefficient method» of calculating reliability, chosen due to convenience of comparing schemes using average failure rates of their elements and possibility of taking into account operating conditions, is implemented. Reliability of two widely used connection schemes for asynchronous motors is calculated: with and without lowering the starting voltage when using them in different operating conditions. Results of calculating dependencies of probabilities of failure-free operation over time made it possible to clearly demonstrate reliability of each scheme considered. Reduced start voltage circuit has less reliability during operation, but provides lower probability of engine failure. Therefore, it was decided to additionally calculate the reliability indicators of the circuit with decrease in voltage, but using redundancy. It turned out that such a circuit in difficult operating conditions provides reliability even higher than the circuit without lowering of starting voltage, so it is recommended for use. Conclusions were drawn from results of the study, as well as goals of future developments in solving the problems of designing electric power circuits.

Keywords: asynchronous electric motor, control and protection systems, reliability of systems, efficiency method of reliability calculation, Python language

Электрические схемы с асинхронными трёхфазными электродвигателями с короткозамкнутым ротором нашли широкое применение во многих производственных процессах.

По сравнению с другими типами приводов они обладают следующими достоинствами [1]:

- простой конструкцией и компактностью, низкой ценой, высоким КПД;
- широким модельным рядом и, соответственно, возможностью подбора параметров;
- быстротой запуска и отключения, большим допусаемым диапазоном нагрузок.

Мало исследованным вопросом при использовании схем подключения асинхронных двигателей является прогнозирование изменения технического состояния с течением времени и обеспечение их надёжной работы в сложных условиях эксплуатации, таких как нестабильность питающего напряжения и нагрузок, неоптимальные условия окружающей среды, низкий уровень обслуживания, попадание загрязнений в электродвигатель и в устройства управления [2].

Как показывает практика эксплуатации, интенсивность отказа самих асинхронных

двигателей во много раз ниже, чем у прочих элементов, входящих в электрические схемы их подключения [3], и неисправное состояние наступает обычно из-за недостаточной надёжности элементов, из которых состоят системы управления и защиты [4].

До сих пор отсутствует простой программный продукт, позволяющий выбрать оптимальную с точки зрения надёжности схему подключения двигателя.

Цель работы – сравнение надёжности схем подключения асинхронных двигателей в разных условиях эксплуатации [5]. Характеристики надёжности должны оцениваться с помощью специально разработанной программы. На основе проведённых расчётов необходимо разработать средства повышения надёжности схем подключения двигателей.

Материалы и методы исследования

Рассматривалась надёжность двух основных схем подключения асинхронных трёхфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Обе схемы подключения нереверсивные, первая – с запуском при сниженном напряжении (рис. 1, а), вторая – без снижения пускового напряжения (рис. 1, б).

Для представленных схем необходимо было выбрать методику расчёта их надёжности, являющуюся основой алгоритма разрабатываемой программы.

Согласно теории надёжности, основной характеристикой безотказности элемен-

тов, составляющих любую исследуемую на надёжность систему, является интенсивность отказов λ . Значение λ принимается постоянным и соответствует номинальному электрическому режиму и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. Значения λ , приводимые в технической документации и современных справочниках по надёжности, характеризуют безотказность элементов с учётом разных типов отказов: внезапных и постепенных [6].

Для составления алгоритма расчёта надёжности рассматриваемых схем подключения двигателя применён «коэффициентный метод», описанный в [4] и хорошо зарекомендовавший себя при расчёте надёжности электрических схем. Данный метод основан на теории надёжности и статистических выкладках, сформированных по результатам многочисленных экспериментальных исследований элементов электрических схем, работающих в разных условиях.

При использовании «коэффициентного метода» базовым элементом электрической схемы считают резистор, коэффициент надёжности которого принимается равным 1, а числовое значение интенсивности отказов для базового элемента равно $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$. Это первое из исходных данных, необходимое для создания расчётной программы. Данное значение интенсивности отказов базового элемента вводится в поле пользовательского интерфейса программы, и при необходимости его можно изменить.

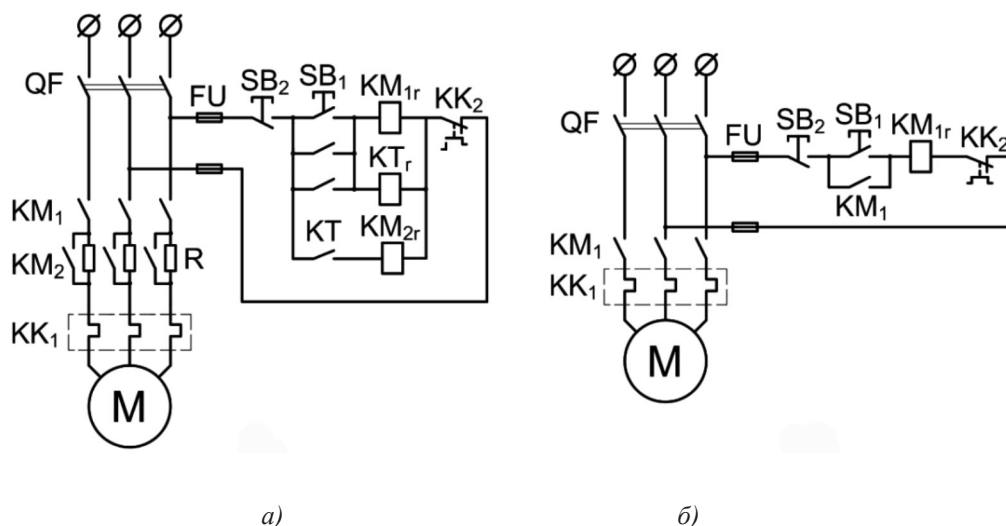


Рис. 1. Схемы включения асинхронного двигателя со снижением (а) и без снижения (б) пускового напряжения: QF – автоматический выключатель; FU – плавкие предохранители; KK_1 – термореле со своим выключателем KK_2 ; KT_r и KT – катушка и выключатель реле времени; KM_1 и KM_2 – контакты магнитных пускателей, срабатывающие от катушек реле KM_{1r} и KM_{2r} ; резисторы R ; SB_1 и SB_2 – кнопки «Пуск» и «Стоп»

Надёжность остальных элементов, входящих в состав электрической схемы, учитывается с помощью коэффициентов надёжности, показывающих, во сколько раз надёжность рассматриваемого элемента превышает базовую надёжность. В описании метода присутствуют таблицы, позволяющие определить коэффициент надёжности для любого элемента схемы.

Условные обозначения всех элементов, входящих в электрические схемы подключения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, изображённые на рис. 1 и 2, внесены в разрабатываемую программу, как и определённые для них коэффициенты надёжности для нормальных условий эксплуатации (температура 20 °С, давление 1 атм).

Пользовательский интерфейс ввода данных для работы разрабатываемой программы, сформированный с помощью библиотеки Tkinter языка Python, представлен на рис. 2.

Также в используемом методе расчёта используются поправочные коэффициенты электрической нагрузки, температуры, потребляемой мощности, которые в нормальных условиях эксплуатации равны 1, что и отображено в полях программы. Исключение в рассматриваемом случае составляет коэффициент мощности, так как схемой предусмотрено, что некоторые элементы (плавкие предохранители, резисторы и др.) постоянно недогружены по мощности.

Ещё одним поправочным коэффициентом является коэффициент использования, который для каждого типа элемента находится по таблицам [4].

Алгоритм расчёта характеристик надёжности состоит из следующих этапов.

После нахождения произведения коэффициента надёжности каждого i -го элемента на все поправочные коэффициенты (данное произведение обозначим k_i), определяется интенсивность отказов устройства в целом

$$\lambda_{\text{устр.}} = \lambda_0 \sum_{i=1}^n N_i k_i,$$

где N_i – число одинаковых элементов в устройстве;

n – общее число типов элементов в устройстве.

Данная сумма для первой схемы управления двигателем будет представлена следующим образом (номера элементов i даются по порядку их расположения в заполняемой таблице программы, изображённой на рис. 2):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n N_i k_i &= 3k_1 + 2k_2 + k_3 + k_4 + 3k_5 + k_6 + \\ &+ 3k_7 + 3k_8 + k_9 + 3k_{10} + 3k_{11} + k_{12} + k_{13}, \end{aligned}$$

для второй схемы

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n N_i k_i &= 3k_1 + 2k_2 + k_3 + k_4 + 4k_5 + \\ &+ k_8 + k_9 + 3k_{10}. \end{aligned}$$

Надёжность всей рассматриваемой системы характеризуется вероятностью безотказной работы $P(t)$ – вероятностью того, что в пределах заданного времени наработки системы t не возникнет ни одного отказа. Она определяется по формуле

$$P(t) = e^{-K_u \lambda_{\text{устр.}} t},$$

где t – время, ч;

K_u – коэффициент условий эксплуатации. Для нормальных условий эксплуатации равен 1.



Рис. 2. Интерфейс программы расчёта надёжности схем управления трёхфазным асинхронным двигателем

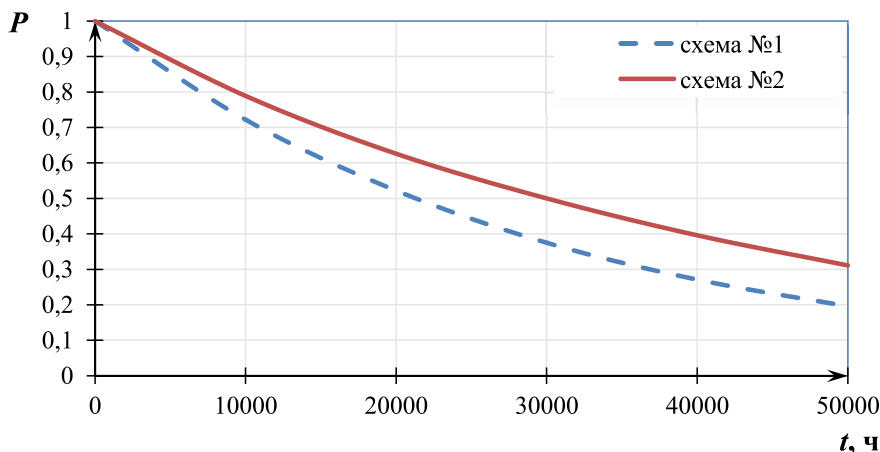


Рис. 3. Результаты расчёта зависимости вероятности безотказной работы от времени для схем управления и защиты асинхронного двигателя при нормальных условиях эксплуатации

Для достижения целей работы необходимо получить зависимости вероятности безотказной работы от времени $P(t)$ для двух рассматриваемых схем подключения электродвигателя и для разных условий их работы.

Для создания расчётной программы был выбран современный высокоуровневый универсальный свободно распространяемый язык программирования Python. При нажатии на кнопку «Расчитать...» внизу представленного интерфейса ввода данных (рис. 2) производится расчёт схем по рассмотренному алгоритму. Вывод результатов расчётов осуществляется с помощью модуля Matplotlib языка Python в виде графиков.

Результаты исследования и их обсуждение

Созданная программа расчёта надёжности схем управления и защиты трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором позволяет произвести анализ изменения вероятности безотказной работы с течением времени.

С помощью программы был произведён расчёт схем № 1 и № 2 с уменьшением и без уменьшения напряжения питания двигателя при пуске (соответственно рис. 1, а и рис. 1, б). Результаты расчёта при нормальных условиях окружающей среды представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что надёжность второй, более простой, схемы подключения двигателя выше, причём разница значений вероятности безотказной работы двух схем с течением времени увеличивается. Время безотказной работы при вероятности отказа 50% (при $P = 0,5$) при нормальных услови-

ях эксплуатации для первой схемы составляет 21180 ч, а для второй – 29920 ч, то есть в 1,41 раза выше.

Однако, несмотря на большую надёжность второй схемы управления и защиты, её применение приводит к уменьшению надёжности самого асинхронного электродвигателя, так как при его запуске могут наблюдаться значительные забросы напряжения в обмотках.

Далее была рассчитана надёжность двух схем при эксплуатации в сложных условиях, которые учитываются с помощью повышения коэффициента условий эксплуатации до 2,5.

Данный коэффициент заносится в соответствующее поле пользовательского интерфейса разработанной программы расчёта (рис. 3). После нажатия на кнопку «Расчитать...» получаем результаты, представленные на рис. 4.

Из графиков наглядно видно, что ухудшение условий эксплуатации схемы приводит к заметному снижению её надёжности. Если сравнивать время безотказной работы при вероятности отказа 50% (при $P = 0,5$), то в данном случае для первой схемы оно снижается до 8460 ч, а для второй до 12110 ч.

Для того чтобы не снижать надёжность системы пуска и защиты двигателя и при этом исключить забросы пускового тока, в программе предусмотрена возможность расчёта схемы № 1 с применением ненагруженного резервирования – то есть возможности подключения второй аналогичной электрической схемы при отказе первой. Такое решение может считаться оправданным, так как стоимость схемы запуска ниже, чем стоимость электродвигателя, который может выйти из строя при резком запуске.

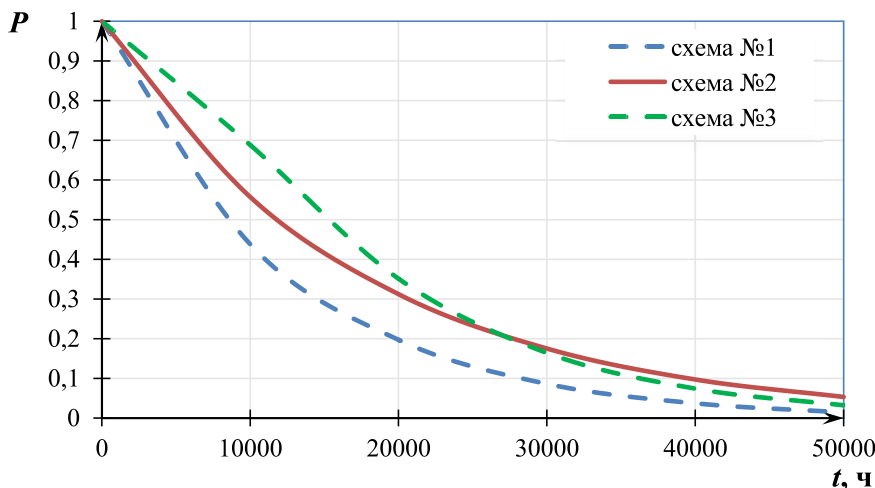


Рис. 4. Результаты расчёта зависимости вероятности безотказной работы от времени для схем управления и защиты асинхронного двигателя в сложных условиях

Результаты расчёта схемы № 1 с резервированием также приведены на рис. 4. Оказалось, что такая схема по надёжности превышает схему № 2 без резервирования до достижения непрерывной наработки около 27000 ч (3,1 года), что является для асинхронных электродвигателей очень хорошим показателем (по данным [7] наработка самого двигателя в сложных условиях может составлять 5000–10000 ч). То есть в данном случае система пуска и защиты получается более надёжной, чем сам двигатель, что является правильным.

Время безотказной работы при вероятности отказа 50% для схемы со сниженным напряжением пуска и с резервированием оказывается также самым большим из всех рассмотренных схем и составляет 14680 ч.

Заключение

В ходе работы последовательно были выполнены следующие этапы:

- сформулирована цель проводимой научно-исследовательской работы;
- обоснована необходимость повышения надёжности схем пуска, управления и защиты асинхронных двигателей;
- обоснован выбор метода расчёта надёжности рассматриваемых схем и описан его алгоритм;
- кратко описаны особенности процедуры разработки программы на языке Python для расчёта надёжности представленных схем;
- произведены расчёты зависимости вероятности безотказной работы от времени для разных схем подключения асинхронных электродвигателей и разных условий их эксплуатации;

– в результате анализа результатов расчётов выбрана рекомендуемая схема подключения асинхронного трёхфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Проведённое исследование показывает удобство применения «коэффициентного метода» расчёта надёжности, позволяющего на начальном этапе проектирования достаточно просто обосновать выбор конструктивных решений с точки зрения надёжности.

Результаты расчёта позволяют выработать следующие меры повышения надёжности электрических систем запуска и защиты рассматриваемых электродвигателей [8] при условии применения элементов схемы с одинаковой надёжностью:

- 1) уменьшить значение коэффициента условий эксплуатации с помощью помещения схемы двигателя в сухом и чистом помещении с нормальной температурой воздуха и с исключением воздействия агрессивных сред;
- 2) не допускать резких скачков тока в обмотках двигателя путём применения схемы № 1, при этом надёжность схемы можно значительно повысить с помощью резервирования.

Необходимо отметить, что усложнение схемы приводит к увеличению стоимости, габаритов и массы установки, поэтому эти факторы также нужно учитывать при составлении технико-экономического обоснования выбора той или иной схемы уже на этапе проектирования.

В ходе дальнейших исследований планируется разработка комплекса программ для расчёта, исследования и оптимизации прочих электрических схем. Таким образом, будут продолжены разработки авторов, на-

правленные на совершенствование элементов электроэнергетического оборудования (описанных в [9–11] и в других статьях).

Список литературы

1. Воробьев А.Э., Фатянов С.О. Анализ причин отказов в работе асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве и в промышленном производстве // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2017. № 2 (5). С. 169–174.
2. Прудников А.Ю., Боннет В.В., Логинов А.Ю., Потапов В.В. Экспериментальная проверка способа диагностирования эксцентриситета ротора асинхронного двигателя // Вестник КрасГАУ. 2015. № 11 (110). С. 73–77.
3. Chetoshnikova L.M., Buhanov S.S., Gryzlov A.A. Analyzing the problem of increasing industrial electric drive reliability. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076348.
4. Давыдова Т.И., Калашников А.В. Коэффициентный метод расчета надежности функциональной части платы питания // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 121–125.
5. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Матюшков В.Е., Цырельчук И.Н. Методика прогнозирования надежности электронных устройств для системы Арион // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2011. № 1. С. 383–385.
6. Бурков А.Ф., Катаев Е.В., Кувшинов Г.Е., Чупина К.В. Анализ надёжности электродвигателей, используемых в современных электроприводах // Электроника и электротехника. 2017. № 1. С. 1–6.
7. Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Скоробогатов А.А., Сулыненков И.Н. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 4. С. 44–53.
8. Давыдова Т.И., Калашников А.В. Коэффициентный метод расчета надежности функциональной части платы питания // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 121–125.
9. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14–18.
10. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41–45.
11. Ильичев В.Ю., Витчук П.В. Исследование динамических характеристик пластинчатых муфт // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 4. С. 217–225.