

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 519.1:631.3

DOI 10/26897/1728-7936-2018-1-59-63

ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор

E-mail: tatiana49@mail.ru

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук

E-mail: asa-finance@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗМЕЧЕННЫХ ГРАФОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Представлен метод определения показателей надежности электропривода сельскохозяйственных машин на основе использования размеченных графов состояний электропривода. Используя математический аппарат, электропривод представлен динамической системой и рассматривается как множество, состоящее из n элементов и имеющее N состояний, т.е. как система с дискретными состояниями. Рассматриваемая система может переходить из состояния в состояние в любое время, вследствие чего случайный процесс, протекающий в ней, является процессом с непрерывным временем. Тогда переходы системы из состояния в состояние можно рассматривать как происходящие под влиянием некоторых потоков событий: потоков отказов и восстановлений элементов электропривода. Случайный процесс с дискретными состояниями называется марковским – это когда все вероятностные характеристики процесса зависят лишь от состояния в настоящее время и не зависят от того, каким образом он протекал в прошлом (будущее зависит от прошлого через настоящее). В марковском процессе все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, являются простейшими, т.е. они отвечают требованиям: стационарность, ординарность и отсутствие последействия. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающих множество состояний электропривода. Осуществлен предельный переход к алгебраическим уравнениям, решение которых позволило определить коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя электропривода.

Ключевые слова: электропривод, надежность, граф, дифференциальные уравнения, потоки отказов и восстановлений, коэффициент готовности.

Введение. В современном сельскохозяйственном производстве применяют самые разнообразные машины и механизмы, которые необходимы для реализации технологических процессов. С помощью этих рабочих машин и механизмов производят и обрабатывают материалы и продукты, перемещают грузы, предметы труда, жидкости, газ и осуществляют другие процессы.

Рабочая машина и производственный механизм состоят из множества взаимосвязанных деталей и узлов. Для их работы необходима механическая энергия, которая вырабатывается приводом. В зависимости от вида используемой первичной энергии различают гидравлический, пневматический, тепловой и электрический приводы. В современном

мире широко применяют электрический привод, на долю которого приходится около 70% потребляемой электроэнергии [1].

Это объясняется рядом преимуществ электропривода по сравнению с другими видами приводов: использование электрической энергии, распределение и преобразование которой в другие виды энергии, в том числе и в механическую, наиболее экономично; большой диапазон мощности и скорости движения; разнообразие конструктивного исполнения, что позволяет рационально соединить привод с исполнительными органами рабочей машины и использовать для работы в сложных условиях (в воде, среде агрессивных жидкостей и газов, космическом пространстве); простота автоматизации

технологических процессов; высокий КПД и экологическая чистота.

Возможности использования современных электроприводов продолжают расширяться за счет достижений в смежных областях науки и техники: электромашиностроении и электроаппаратостроении, электронике и вычислительной технике, автоматике и механике.

Производительность технологического оборудования предприятий АПК в значительной степени определяется уровнем его надежности, основное звено которого – электропривод.

Надежность – это комплексное свойство, обусловленное сочетанием свойств работоспособности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [2].

Числовую оценку надежности электропривода осуществляют на основе показателей надежности, которые представляют собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность. Многие показатели надежности имеют вероятностную природу [3].

Цель работы – применение вероятностного подхода на основе использования размеченных графов при оценке показателей надежности электроприводов сельскохозяйственных машин; определение показателей надежности электроприводов сельскохозяйственных машин на основе вероятностного подхода с использованием размеченных графов (в частности, коэффициентов: готовности и вынужденного простоя).

Материал и методы. Предоставлена информация о работе электроприводов сельскохозяйственных машин и аппаратов. Применены методы теории вероятности, теории массового обслуживания, теории графов, теории надежности.

Результаты и обсуждение. Любой электропривод можно представить динамической системой – множеством, имеющим несколько элементов, находящихся в определенных состояниях: работоспособных и неработоспособных. Используя математический аппарат, электропривод можно рассматривать как множество, состоящее из n элементов и имеющее N состояний, т.е. как систему с дискретными состояниями, так как оно имеет счетное множество возможных состояний $1, 2, 3, \dots, n$ и переходы из одного состояния в другое осуществляются в случайные моменты времени скачками.

Рассматриваемая система может переходить из состояния в состояние в любое время, вследствие чего случайный процесс, протекающий в ней, является процессом с непрерывным временем [4].

Если в системе с дискретными состояниями происходит случайный процесс с непрерывным временем, то переходы системы из состояния в состояние можно рассматривать как происходящие под влиянием некоторых потоков событий. В нашем случае потоки событий – это потоки отказов и восстановлений элементов электропривода. Случайный процесс с дискретными состояниями называется марковским, если все вероятностные

характеристики процесса зависят лишь от состояния в настоящее время и не зависят от того, каким образом он протекал в прошлом (будущее зависит от прошлого через настоящее). Если процесс марковский, то все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, являются простейшими. Потоки событий являются простейшими, если они отвечают требованиям: стационарность, ординарность и отсутствие последствия. В подавляющем большинстве технических систем потоки отказов и восстановлений имеют параметры простейших, т.е. время между отказами и время восстановления подчиняются показательному распределению.

При этом параметр потока отказов $\lambda = 1/t_{cp}$, а интенсивность восстановления $\mu = 1/t_b$, где t_{cp} , t_b – соответственно среднее время до отказа и восстановления.

Вероятностный подход к вопросам решения задач надежности можно применять для расчета надежности как восстанавливаемых, так и невозстанавливаемых систем [3].

Для использования этого метода необходимо иметь математическую модель в виде множества состояний системы, в которых она может находиться при отказах и восстановлениях. Чтобы при этом предельно уменьшить затраты труда на вычисления, обычно предполагают, что:

- отказавшие объекты начинают немедленно восстанавливать;
- отсутствуют ограничения на число восстановлений;
- надежность средств контроля идеальна.

Весьма удобным приемом в данном случае является использование размеченных графов [5]. Графом называют совокупность двух множеств: множества узлов (вершин) и множества соединяющих их ребер [6].

Теория графов [5] как абстрактная математическая наука оперирует с точечными моделями объектов, имеет дело со свойствами самих графов независимо от природы объектов, отображающих их.

В нашем случае целесообразно использовать размеченные (направленные) графы состояний, в которых узлы, символизирующие состояния системы, обозначаются окружностями или овалами, а возможные переходы системы из состояния в состояние обозначаются стрелками, соединяющими соответствующие узлы. В размеченном графе около каждой стрелки-дуги проставлена характеристика передачи – плотность (интенсивность) потока событий (отказов и восстановлений), переводящего систему из состояния в состояние.

На рисунке представлен граф состояний для рассматриваемого случая. Считаем, что наша система имеет восстанавливаемые элементы. Поэтому все соседние состояния связаны двумя дугами. Имеем в виду, что вся система отказывает, если отказал хотя бы один из ее элементов.

Вероятность появления одновременно двух неработоспособных элементов считаем пренебрежительно малой – показатель ординарности потока отказов.

Если рассматривается невосстанавливаемая система, то между состояниями имеется только одна дуга.

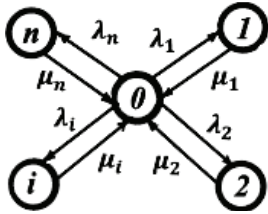


Схема графа состояний системы:

0 – все элементы работоспособны;

1 – первый элемент неработоспособен, остальные работоспособны;

2 – второй элемент неработоспособен, остальные работоспособны и т.д.;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – интенсивность отказов;

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – интенсивность восстановления

Марковский процесс, протекающий в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, характеризуется системой дифференциальных уравнений, описывающих вероятности состояний $w_0(t), w_1(t), w_2(t), \dots, w_i(t), \dots, w_n(t)$.

При наличии размеченного графа электропривода можно значительно сократить трудоемкость составления системы дифференциальных уравнений, характеризующих вероятности состояний.

Если традиционные способы составления указанных уравнений, изложенные, например, у Б.В. Гнеденко [4], В.Я. Розенберга [7] и др., требуют сложных рассуждений, то, руководствуясь мнемоническим правилом, рекомендованным А.Н. Колмогоровым [8], это осуществляется значительно проще.

Согласно этому правилу, в левой части каждого дифференциального уравнения имеется производная $\frac{dw}{dt}$ а в правой части столько членов, сколько переходов связано непосредственно с рассматриваемым состоянием. Если переход ведет в данное состояние, то член имеет знак «плюс», если ведет из данного состояния – знак «минус». Каждый член равен плотности потока событий, переводящего систему по данному переходу, умноженной на вероятность того состояния, из которого осуществляется переход.

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = \lambda_1 w_0 - \mu_1 w_1(t),$$

$$\frac{dw_2(t)}{dt} = \lambda_2 w_0 - \mu_2 w_2(t),$$

.....

$$\frac{dw_n(t)}{dt} = \lambda_n w_0 - \mu_n w_n(t).$$

Число дифференциальных уравнений, полученных таким образом, равно числу состояний системы и составляет 2^n .

Полученная система дифференциальных уравнений дополняется нормированным условием:

$$\sum_1^n w_i(t) = 1.$$

Решение полученной системы однородных дифференциальных уравнений связано со значительными вычислительными трудностями. Ввиду этого целесообразно отыскать предельное решение, которое значительно проще интегрирования. Такое решение возможно благодаря таким свойствам потоков отказов и восстановлений, как стационарность, ординарность и экспоненциальное распределение интервалов времени между моментами отказов и восстановлений [9]. Предельным для нашей системы будет процесс, устанавливающийся при $t \rightarrow \infty$. При этом пределы левых частей уравнений системы будут равны нулю.

При этом предел $\lim_{t \rightarrow \infty} w_k(t) = w_k$ и наша система дифференциальных уравнений преобразуется до вида

$$\lambda_1 w_0 - \mu_1 w_1 = 0,$$

$$\lambda_2 w_0 - \mu_2 w_2 = 0,$$

.....

$$\lambda_n w_0 - \mu_n w_n = 0.$$

Решив полученную систему алгебраических уравнений с учетом нормировочного условия, получаем

$$K_{ГС} = w_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}.$$

Вероятность нахождения электропривода в i -м состоянии

$$w_i(t) = \frac{\lambda_i}{\mu_i} \cdot w_0.$$

$$K_{Г} = \frac{\mu}{(\mu + \lambda)}$$

$$\mu_i = \lambda_i \cdot \frac{K_{Гi}}{1 - K_{Гi}}.$$

Коэффициент готовности $K_{Г}$ – это отношение суммарного времени исправной работы t_{pi} к сумме суммарного времени исправной работы t_{pi} и вынужденных простоев t_{ni} [10].

$$K_{Г} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{ni}},$$

где t_{pi} – время между отказами; t_{ni} – время простоя после отказа; n – число отказавших элементов.

При анализе готовности восстанавливаемого объекта коэффициент готовности можно вычислить по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_{в}},$$

где t_{cp} – среднее время работы между отказами; $t_{в}$ – среднее время восстановления элемента.

$$K_{п} = \frac{t_{п}}{t_{п} + t_{п}},$$

где $t_{п}$ – время работы между отказами; $t_{п}$ – время простоя после отказа; n – число отказавших элементов.

Коэффициент вынужденного простоя – это отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев.

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью

$$K_{п} = 1 - K_{\Gamma}.$$

Выводы

Таким образом, вероятностный подход на основе использования размеченных графов к процессам, протекающим в электроприводах при их работе, позволяет на основе частных показателей надежности элементов вычислить показатели надежности всего

электропривода и наметить пути для повышения надежности как составных элементов, так и всего электропривода в целом.

Библиографический список

1. Воробьев В.А. Электропривод сельскохозяйственных машин. М.: ООО «ТРАНСЛОГ», 2016. 300 с.
2. Ветошкин А.Г., Марунин В.И. Надежность и безопасность технических систем. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 154 с.
3. Матвеевский В.Р. Надежность технических систем. М.: Изд-во Моск. гос. ин-та электроники и математики, 2002. 113 с.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1965. 400 с.
5. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.
6. Харари Ф., Палмер Э. Перечисление графов. М.: Мир, 1977. 324 с.
7. Розенберг В.Я., Прохоров А.И. Что такое теория массового обслуживания. М.: Советское радио, 1965. 154 с.
8. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Наука, 1980. 208 с.
9. Воробьев В.А. Электрические нагрузки сельскохозяйственных предприятий. М.: Изд.-во МСХА, 1991. 297 с.
10. Токарев А.Н. Основы теории надежности и диагностика. Барнаул: Изд.-во АлтГТУ, 2008. 168 с.

Статья поступила 04.05.2017

THE USE OF MARKED GRAPHS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY ACTUATORS

VIKTOR A. VOROBYEV, PhD (Eng), Professor

E-mail: tatiana49@mail.ru

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: asa-finance@yandex.ru

Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Timiryazev Str., 49, Moscow, Russian Federation

The paper provides a method of determining the reliability of the electric drive of agricultural machinery basing on the use of marked graphs of the actuator states. Using the mathematical apparatus, the authors consider an electric drive as a dynamic system consisting of n elements and having N states, i.e. as a system with discrete states. The considered system can change its states at any time, so a random process going on inside it can be regarded as a continuous-time process. If continuous-time stochastic process occur in a system with discrete states, the system transitions from state to state may be regarded as being influenced by some event streams – the flows of failures and restorations of electric drive elements. A random process with discrete states is referred to as the Markov process in case all the probabilistic characteristics of the process depend on the its current state and does not depend on its characteristics in the past (the future depends on the past through the present). If a process is Markovian, all event streams changing the system states are the simplest. Event streams are the simplest, if they meet the requirements of stationary, ordinary nature and the absence of aftereffect. The authors have developed a system of differential equations that describe the numerous set of states and implemented limiting transition to algebraic equations, the solution of which has allowed relatively easy determination of the factors of availability and forced downtime of an electric drive.

Key words: electric drive, reliability, graph, differential equations, failure and restoration flows, availability factor.

References

1. Vorob'yev V.A. Elektroprivod sel'skokhozyaystvennykh mashin [Electric drive of agricultural machinery]. Moscow, OOO "TRANSLOG", 2016, 300 p. (in Rus.)
2. Vetoshkin A.G., Marunin V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability and safety of technical systems]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003, 154 p. (in Rus.)
3. Matveyevskiy V.R. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. Moscow, Izd-vo Mosk. gos. in-ta elektroniki i matematiki, 2002, 113 p. (in Rus.)
4. Gnedenko B.V. Kurs teorii veroyatnostey [A course of Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1965, 400 p.
5. Ore O. Teoriya grafov [Theory of graphs]. Moscow, Nauka, 1980, 336 p. (in Rus.)
6. Kharari F., Palmer E. Perechisleniye grafov [List of graphs]. Moscow, Mir, 1977. 324 p. (in Rus.)
7. Rozenberg V. Ya., Prokhorov A.I. Chto takoye teoriya massovogo obsluzhivaniya [What is queueing theory]. Moscow, Sovetskoye radio, 1965, 154 p. (in Rus.)
8. Venttsel' Ye.S. Issledovaniye operatsiy [Study of operations]. Moscow, Nauka, 1980, 208 p. (in Rus.)
9. Vorob'yev V.A. Elektricheskiye nagruzki sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy [Electrical requirements of agricultural enterprises]. Moscow, Izd. – vo MSKKhA, 1991, 297 p. (in Rus.)
10. Tokarev A.N. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika [Fundamentals of the theory of reliability and diagnostics]. Barnaul: Izd. – vo AltGTU, 2008, 168 p. (in Rus.)

The paper was received on May 4, 2017

УДК 621.31

DOI 10/26897/1728-7936-2018-1-63-68

НЕКРАСОВ АЛЕКСЕЙ ИОСИФОВИЧ, докт. техн. наук

E-mail: nalios@mail.ru

ПОДОБЕДОВ ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ

E-mail: podobiedov13@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»; 109428, Институтский 1-й, д. 5, Москва, Российская Федерация

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 10 КВ

На основе экспертных и статистических данных распределительных сетей напряжением 10 кВ исследованы составляющие отказов электрооборудования, их причины и варианты устранения. Произведен анализ надежности электрооборудования распределительной сети 10 кВ. Представлена многокритериальная методика оценки целесообразности перевооружения воздушных линий 10 кВ на новое электрооборудование с целью повышения надежности электроснабжения и качества электрической энергии. В качестве критериев многокритериальной оценки использования элементов воздушных линий электропередачи выбраны: недоотпуск электроэнергии, ущерб от недоотпуска, отклонение напряжения, неодинаковость напряжения, также в качестве фактора неопределенности среды был выбран рост загрузки. С целью проверки математического аппарата применяемой методики по пяти критериям выбраны две воздушные линии электропередачи 10 кВ Подольская МВС и Орловская РЭС. По итогам оценки надежности электроснабжения и качества электроэнергии выявлено, что анализируемые линии являются ненадежными, имеют большие потери напряжения, высокий недоотпуск электроэнергии и ущербы. На основании анализа рынка электрооборудования России были выбраны элементы воздушных линий электропередач и предложено восемь вариантов компоновок сетей 10 кВ с новыми элементами ВЛ с целью последующей оценки и разработки наиболее перспективной компоновки.

Ключевые слова: электрические сети, надежность электроснабжения, потери электроэнергии, частные критерии, качество электроэнергии, многокритериальная методика оценки.

Введение. В настоящее время проблемы с надежностью электроснабжения и качеством электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей достаточно велики. Из-за высокого процента износа электрических сетей, в частности сетевого оборудования (до 75%), а также ухудшения ка-