The emergency failure of the electric motor causes economic damage, consisting of the technological and technical components that arose from the shortage of livestock products and the replacement of the electric motor. The technical component of the economic damage from failures of electric motors of various capacities installed for the drive of technological equipment in animal husbandry has been evaluated. Based on the calculation results, the dependencies of the amount of technical damage on the cost and service life of a failed motor are obtained. Failures of electric motors of livestock farm equipment lead to technological downtime and material damage. The amount of damage is more significant in agricultural enterprises, with a large remoteness and dispersal of dairy and fattening farms,

which complicates the timely repair of electric motor failures by electricians and increases the duration of downtime. The main factors that influence the performance indicators of electric motors in agricultural production, which reduce the failure rate and reduce the time to resolve them, are identified. The results of the work performed allow us to determine the technical component of the economic damage associated with the failure of electric motors. It also makes it possible to determine the degree of economic responsibility of the electrical equipment involved, clarify and adjust the timing of preventive maintenance and repairs, and identify the reserves for improving the efficiency of the energy service of the agricultural enterprise.

© Некрасов А.И., Некрасов А.А.

УДК 631.21

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-55-3-119-126

Д.А. Соловьев, С.М. Бакиров, Г.Н. Камышова

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СЕКЦИЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: *электропривод; схема управления; дождевальная машина; энергозатраты; мощность электродвигателя.*

Введение. Движение электрифицированной дождевальной машины (ДМ) выполняется дискретно по секциям, согласно [1–4]. При включении электропривода опорной тележки крайней (последней) секции движение других опорных тележек секций подстраивается так, что при перемещении последующей опорной тележки секции от нормали более чем на угол φ° при длине трубопровода секции l автоматически включается питание электропривода опорной тележки предыдущей секции (рисунок 1).

Имеется также прибор синхронизации движения в линию (ПСЛ) [5], принцип работы которого состоит в контроле угла φ° и включении/отключении питания электропривода. Такое дискретное управление приводит к случаям одновременного запуска нескольких электроприводов опорных тележек (до 3–10 секций) [6]. Тогда график нагрузочной характеристики источника в некотором промежутке времени имеет вид, представленный на рисунке 2. Для автономных источников питания, таких как переносной генератор с двигателем внутреннего сгорания на дизельном или бензиновом топ-

ливе, данный режим приводит к тому, что требуется выполнение условия по выбору мощности источника:

$$P_{I\max}(t_i) > P_{H\max}(t_i), \quad (1)$$

где $P_{I\max}(t_i)$ и $P_{H\max}(t_i)$ – максимальные мощности соответственно источника электроэнергии и нагрузки в момент времени t_i , кВт.

Выполнение условия (1) приводит к тому, что при выборе источника энергии требуется складывать большую мощность, чтобы удовлетворять нагрузке в каждый момент ее действия, то есть с запасом. Вместе с этим сложение нагрузок секций приводит к совокупному показателю затрат энергии. Тогда, например, для переносного генератора обеспечение работы дождевальной машины (ДМ) сопровождается значительными потерями.

Перерасход горючего топлива очевиден, так как для требования нагрузки в конкретный момент времени, например, 1 кВт*ч электроэнергии, дизельный или любой другой (на горючем топливе) переносной генератор мощностью 10 кВт будет сжигать топливо, обеспечивая около 10 % мощности. В этом случае загрузка

генератора составляет 0,1 или 10 % [7], а потери энергии в данный момент достигают 70 %. Исследования показывают [8, 9], что с такой ситуацией перерасхода топлива сталкиваются все сельскохозяйственные производители, имеющие дождевальные машины с переносными генераторами.

Возникшую проблему возможно решить путем применения переносных генераторов меньшей мощности. Однако для дождевальных машин, состоящих из 8–12 секций, одновременный

запуск всех электроприводов может привести не только к аварийной остановке, но даже к отказу генератора. Поэтому в данной работе ставится цель оценить вероятность одновременного запуска всех электроприводов дождевальной машины, разработать способ и электрическую схему, исключающую одновременный запуск электроприводов опорных тележек дождевальных машин, а также оценить снижение энергетических затрат на перемещение дождевальной машины.

Рисунок 1

Дискретное движение секций ДМ (v_1 , v_2 – линейные скорости перемещения соответственно предыдущей и последующей опорных тележек секции): а) перемещение последующей секции; б) перемещение предыдущей секции

Рисунок 2

Нагрузочная характеристика источника электрической энергии

Результаты исследования. Мощность источника питания (для переносного генератора) оценивается суммой мощностей каждого потребителя и коэффициентом одновременности k_o , который определяется по вероятности одновременного запуска электроприводов

$$P_{H \max}(t) > k_o(B_1(t)) \sum_{i=1}^j P_i, \quad (2)$$

где $B_1(t)$ – вероятность одновременного включения всех секций; P_i – электрическая нагрузка i -ой секции (мощность электродвигателя и устройств автоматики в составе электропривода опорной тележки i -ой секции), начиная с крайней, кВт; j – количество секций дождевальной машины.

Вероятность одновременного включения в работу всех электроприводов будет зависеть от срабатываний автоматики, которая ориентируется на перемещение секций (рисунок 3). Тогда одновременный запуск можно определить в соответствии с геометрией перемещения дождевальной машины как единого целого. То есть определить вероятность таких событий, когда две, три и т. д. секции, перемещаясь, образуют идеальный прямолинейный луч. Согласно [10, 11], вероятность одновременного включения в работу всех электроприводов можно определить по длине трубопровода секции и длине окружности пройденного тележкой пути (рисунок 4).

Согласно геометрическим параметрам движения [12] и теории математической статистики

[13], вероятность можно определить по выражениям

$$\left. \begin{aligned} B_j(t)P_j &= 1, \\ B_{j-1}(t)(P_{j-1}; P_j) &= \frac{j-1}{j}, \\ B_1(t)(\sum_{n=1}^j P_j) &= \frac{1}{j}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

С учетом вероятности появления события – ДМ в виде прямой линии (нормали) и скоростных характеристик опорных тележек, вероятность одновременной работы всех электроприводов легко определить. Результаты расчета вероятности сведем в таблицу 1.

На основе данных таблицы с вероятностью 0,1 существует возможность запуска всех электроприводов одновременно. Поэтому при выборе источника питания, например, переносного генератора, требуется учитывать данные вероятности.

Рисунок 3

Общий вид дискретного перемещения секций дождевальной машины:

а) вид перемещения секций с отставанием; б) вид перемещения секций как идеальный прямолинейный луч

Рисунок 4

Сравнение длин пройденного пути опорных тележек дождевальной машины, состоящей из 5 секций

Таблица 1 Результаты расчета вероятности одновременного запуска электроприводов при количестве секций $j = 10$

	Двух	Трех	Четырех	Пяти	Шести	Семи	Восьми	Девяти	Десяти
$B_i(t)$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Исключение одновременного запуска электроприводов позволит снизить потери энергии с 70 % до 10 %. Этого можно добиться путем использования логической схемы поочередного включения электроприводов. Тогда общее количество энергии с логической схемой

$$W_{\text{лог}} = W - W_{\text{СП}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{СП}}$ – совокупные потери энергии при одновременном включении электроприводов, кВт*ч.

Также использование логической схемы позволит снизить негативное влияние наложенных друг на друга пусков ЭД на источник с переносным генератором и исключить перерасход топлива при стабилизации работы двигателя внутреннего сгорания с генератором [14].

Разработаем и проанализируем работу электрической схемы, исключающей одновременный запуск электроприводов. В логической схеме, представленной на рисунке 5, дополнительный контакт будет исключать одновременный пуск электродвигателей, что приведет к увеличению продолжительности выполнения полива, так как логическая остановка крайней тележки уже не будет контролироваться реле-датчиком повторного включения ПВ %.

Временную диаграмму логической схемы построим на графике $U(t)$ (рисунок 6).

Минимальная продолжительность выполнения полива $T_{\text{ДМ min}}$ без логической схемы определяется по промежутку времени работы электропривода опорной тележки крайней j -ой секции t_p

$$T_{DM \min} = t_{pj}. \quad (5)$$

С логической схемой управления продолжительность работы ДМ будет ориентирована на продолжительность работы каждого электропривода в отдельности, как на рисунке 6:

$$T_{DM \min}^{лог} = t_j + t_{j-1} + \dots + t_1 = \frac{j(t_j + t_1)}{2}. \quad (6)$$

Если скорость перемещения опорных тележек одинакова, согласно [15], то продолжительность оборота крайней секции относительно первой составит

$$t_{pj} = j t_1. \quad (7)$$

Тогда доля увеличения продолжительности работы ДМ с логической схемой управления с количеством секций, равной j , составит

$$\tau' = \frac{T_{DM \min}^{лог}}{T_{DM \min}} = \frac{j(j t_1 + t_1)}{2} = \frac{j+1}{2}. \quad (8)$$

Из выражения (8) для ДМ, состоящей из 10 секций, продолжительность работы с логической схемой управления увеличится в 5,5 раз.

Применение логической схемы управления, исключающей одновременную работу электроприводов, позволит получить мощность источника, равную мощности электродвигателя одного электропривода:

$$P_{II}^{лог} = P_j. \quad (9)$$

На основе этих данных определим возможный диапазон снижения энергозатрат для пере-

носного генератора с логической схемой управления.

Примем, что переносной генератор без логической схемы управления имеет мощность $P_{IIГ}$, который при ПВ 100 % обеспечивает энергией дождевальную машину за один полив в течение промежутка времени t_{pj} :

$$W_{Г} = P_{IIГ} t_{pj}. \quad (10)$$

Для ДМ с логической схемой управления движением требуется генератор, мощность которого определяется соотношением:

$$P_{IIГ}^{лог} = \frac{P_{IIГ}}{j}. \quad (11)$$

Тогда количество энергии ДМ с логической схемой

$$\begin{aligned} W_{Г}^{лог} &= \frac{P_{IIГ}}{j} \frac{j t_{p1} (j+1)}{2} = \\ &= \frac{P_{IIГ} t_{p1} (j+1)}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом (12) доля снижения энергии при использовании логической схемы управления составит:

$$\begin{aligned} \Delta W_{лог} &= \frac{W_{Г} - W_{Г}^{лог}}{W_{Г}} = \\ &= 1 - \frac{P_{IIГ} t_{p1} (j+1)}{2 j P_{IIГ} t_{p1}} = 1 - \frac{j+1}{2j}. \end{aligned} \quad (13)$$

Рисунок 5

Логическая схема управления движением опорных тележек секций ДМ ($S1 \dots S_{j-1}$ – переключатели (концевые выключатели); $KM1 \dots KMj$ – катушки и контакты $KM1.1-1.3 \dots KMj.1-j.3$ магнитных пускателей электродвигателей $M1 \dots Mj$)

Таким образом, использование логической схемы управления для источника в виде переносного генератора приводит к экономии

25,21...48,85 % энергии на перемещение дождевальной машины.

Рисунок 6
Временная диаграмма логической части схемы управления движением секций ДМ

Рисунок 7
Зависимость снижения энергозатрат от числа опорных тележек (секций) ДМ с использованием логической схемы управления

Выводы. На основе выполненных исследований установлена вероятность 0,1 (10 %) одновременного запуска электроприводов дождевальной машины в укрупненном виде без учета задержки времени срабатывания контактов концевых выключателей и магнитных пускателей электродвигателя. Также предложена упрощенная электрическая схема, исключающая одновременный запуск электроприводов, применение которой позволит экономить до 48,85 % энергии источника в виде переносного генера-

тора на жидком топливе. Однако продолжительность работы дождевальной машины в целом увеличивается в 1,5–6,5 раз, что ограничивает диапазон поливной нормы дождевальной машины, например, вместо 60–650 м³/га диапазон с логической схемой управления составит 360–650 м³/га. Данное ограничение не является определяющим, так как решение о выборе поливной нормы машины принимается на основании природно-климатических зон и вида выращиваемой культуры.

Библиографический список

1. Журавлева, Л.А. Совершенствование технологических приемов полива дождевальными машинами кругового действия «Каскад» [Текст] / Л.А. Журавлева, В.А. Соловьев // Мелиорация. 2019. № 1 (87). С. 78–82.
2. Инструкция по эксплуатации [Текст]. Bauer – Centerstar 9000 133 EL, 168 EL, 168 E, 203 EL, 203 E. Фойтсберг, 2003. С. 103.
3. Каталог ирригационной продукции Zimmatic by Lindsay [Электронный ресурс]. Ре-

жим доступа: www.lindsay.com. Дата обращения: 23.11.2019.

4. Каталог продукции Valley [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.valmont.com/irrigation. Дата обращения: 16.11.2019.

5. Каталог. Отличительные особенности ирригационных машин Reinke [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.reinke.com. Дата обращения: 8.11.2019.

6. Устройство автоматизированного управления многоопорной дождевальной машиной фронтального действия для точного полива [Текст]: пат. № 2522526 С1 Российская Федерация, МПК А01G 25/16, А01G 25/09, G01N 25/56, G01S 19/05 / В.Н. Карпов, В.А. Смелик, З.Ш. Юлдашев, Р.З. Юлдашев; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «СПбГАУ» и Карпов Валерий Николаевич. № 2012153613/13 заявл. 11.12.2012; опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20. 20 с.

7. Прищеп, Л.Г. Учебник сельского электрика [Текст] / Л.Г. Прищеп. 3-е изд. доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1986. 509 с.

8. Романенко, В.А. Сельскохозяйственные машины (устройства, работа и основные регулировки) [Текст]: учеб. пособие / В.А. Романенко, Е.И. Трубилин, И.Б. Фурсов, С.К. Папуша, А.А. Романенко, А.С. Брусенцов, В.В. Кравченко, В.А. Миронов, В.И. Коновалов, С.В. Белоусов. Краснодар: КубГАУ, 2014. 232 с.

9. Рыжко, Н.Ф. Регулирование расхода воды дождевальных машин для снижения потребления электроэнергии на полив [Текст] / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, Е.С. Смирнов, Е.А. Шишенин // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды. Материалы I Национальной научно-

практической конференции с международным участием. 2019. С. 105–109.

10. Eroshenko G.P., Solovyev D.A., Glukharev V.A., Bakirov S.M., Startsev S.V. Modes and Parameters of Circular Action Sprinkler electric drives. J. of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Т. 10. № 10. Special Issue. P. 2123–2128.

11. Абдразаков, Ф.К. Рациональное снижение металлоемкости при конструировании широкозахватных дождевальных машин [Текст] / Ф.К. Абдразаков, Л.А. Журавлева, В.А. Соловьев // Аграрный научный журнал. 2018. № 5. С. 37–42.

12. Рекомендации по научно обоснованным технологиям орошения сельскохозяйственных культур кукурузы на зерно, картофеля, лука и моркови современными стационарными широкозахватными круговыми и фронтальными дождевальными машинами Reinke и Valley в условиях центральной орошаемой зоны Ростовской области [Текст] / Под ред. Н.А. Иванова; Новочерк. гос. мелиор. акад. Новочеркасск, 2013. 30 с.

13. Рывкин, А.А. Справочник по математике [Текст]: справочное пособие для учащихся сред. спец. учеб. заведений и поступающих в вузы / А.А. Рывкин, А.З. Рывкин, Л.С. Хренов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. 480 с.

14. Справочник по электрическим машинам [Текст] / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. В 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.

15. Eroshenko G.P., Esin A.I., Solovyev D.A., Serebrennikov F.V., Bakirov S.M. Optimal power supply synthesis for circular action sprinkler. J. of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Т. 10. № 10. Special Issue. P. 2129–2134.

Сведения об авторах

1. **Соловьев Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, доцент, врио ректора, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова», РФ, Саратовская область, г. Саратов, Театральная пл., 1, e-mail: solovevda@bk.ru.

2. **Бакиров Сергей Мударисович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной физики, электрооборудования и электротехнологии, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова», РФ, Саратовская область, г. Саратов, Театральная пл., 1, e-mail: s.m.bakirov@mail.ru.

3. **Камышова Галина Николаевна**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой математики, механики и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова», РФ, Саратовская область, г. Саратов, Театральная пл., 1, e-mail: gkamichova@mail.ru.

Работа посвящена снижению затрат энергии на полив дождевальными машинами кругового действия. Известно, что часто используемым источником энергии для электрифицированных

дождевальных машин является переносной генератор с двигателем внутреннего сгорания на жидком топливе. При выборе параметров генератора учитывают запас мощности для таких

режимов, когда запускаются одновременно все электроприводы опорных тележек секций дождевальной машины. Вероятность запуска двух, трех и т. д. электроприводов определяется по длине секции и длине окружности, пройденной опорной тележкой. Так как длины всех секций одинаковы, то вероятность одновременного запуска, например, 10 секций составит 0,1 (10 %). Как видно этот режим не продолжительный, и, обеспечивая запас мощности, потери энергии при недогрузке генератора могут достигать 70 %. Избежать значительных потерь энергии возможно путем изменения режима управления дождевальной машины, а именно, разработкой логической электрической схемы включения электроприводов. В предложенной схеме переключатели $S1...Sj-1$ (концевые выключатели) поочередно включают отдельные электроприводы в соответствии с действием приборов син-

хронизации движения в линию. Для наглядности приводится временная диаграмма работы логической электрической схемы. При действии предложенной схемы мощность переносного генератора можно выбрать по мощности одного электродвигателя, работающего в составе электропривода опорной тележки. Вместе с этим увеличивается продолжительность работы всей дождевальной машины на величину, зависящую от количества секций, из-за поочередного включения электроприводов. Например, для машины, состоящей из 10 секций, продолжительность работы машины при повторности включения крайнего электропривода ПВ100 % увеличится в 5,5 раз. Таким образом, применение логической схемы позволяет экономить до 48,85 % энергии, но ограничивает диапазон поливной нормы дождевальной машины.

D. Soloviev, S. Bakirov, G. Kamyshova

DEVELOPMENT OF AN ELECTRICAL SCHEME FOR LOGICAL CONTROL OF THE MOVEMENT OF SPRINKLER MACHINE SECTIONS, WHICH EXCLUDES SIMULTANEOUS START OF ELECTRIC MOTORS

Key words: *electric drive; control scheme; sprinkler machine; energy costs; electric motor power.*

Authors' personal details

1. **Dmitry Solovyev**, Doctor of Technical Sciences, Docent, acting rector Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Russian Federation, Saratov region, 1, Teatralnaya Square, Saratov, 410012, e-mail: solovevda@bk.ru.

2. **Sergey Bakirov**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of «Engineering physics, electrical equipment and electrical technologies», Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Russian Federation, Saratov region, 1, Teatralnaya Square, Saratov, 410012, e-mail: s.m.bakirov@mail.ru.

3. **Galina Kamyshova**, Candidate of Physic-mathematical Sciences, Docent, Head of the Department of «Mathematics, mechanics and engineering graphics», Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Russian Federation, Saratov region, 1, Teatralnaya Square, Saratov, 410012, e-mail: gkamichova@mail.ru.

The work is devoted to reducing energy costs for irrigation by circular action sprinkler machines. It is known that a frequently used source of energy for electrified sprinkler machines is a portable generator with an internal combustion engine on liquid fuel. When selecting the generator parameters, the power reserve for such modes is taken into account when all the electric drives of the support carts of the sections of the sprinkler machine are started simultaneously. The probability of launching two, three, etc. electric drives is determined by the length of the sprinkler machine section and the length of the circle passed by the support truck. Since the lengths of all sections are the same, the probability

of starting simultaneously, for example, ten sections will be 0,1 (10 %).

As you can see, this mode is not long-lasting and, providing a reserve of power, energy losses when the generator is underloaded can reach 70 %. It is possible to avoid significant energy losses by changing the control mode of the sprinkler machine, namely, by developing a logical, electrical scheme for switching on electric drives. In the proposed scheme, switches $S1...Sj-1$ (limit switches) alternately turn on individual electric drives by the action of the devices for synchronizing movement in a line. For clarity, a temporary diagram of the logical, electrical scheme is provided. With the pro-

posed scheme, the power of a portable generator can be selected by the power of one electric motor operating as part of the electric drive of the support truck. The operation duration of the sprinkler machine increases by an amount depending on the number of sections. For example, for a sprinkler ma-

chine consisting of 10 sections, the duration of operation time of the sprinkler machine when reclosing of the last electric drive PV100 % will increase 5,5 times. Thus, the logic scheme saves up to 48,85 % of energy but limits the range of irrigation rates of the sprinkler machine.

© Соловьев Д.А., Бакиров С.М., Камышова Г.Н.