

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПЕРИОДИЧНОСТТА НА ПРОВЕЖДАНЕ НА
ИЗПИТВАНИЯ НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО

Явор Лозанов, Светлана Цветкова, Ангел Петлешков

DETERMINATION OF THE PERIODICITY OF TESTING OF ELECTRICAL
EQUIPMENT

Yavor Lozanov, Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov

Abstract: *The paper presents mathematical models for determining the optimal moments of time to perform diagnostic processes. Results connecting the statistical characteristics for the reliability of electrical equipment and strategies for technical diagnostics of production systems are shown.*

Въведение

Работата на електрообзавеждането е различните сектори на индустрията е съпътствана от високи разходи за поддържане на работното му състояние през целия експлоатационен срок. Поддържането на работоспособността на електрообзавеждането се осигурява чрез извършване на планови и превантивни дейности по техническо обслужване и ремонт, както и непланирани ремонти, извършвани с цел отстраняване на повреди и неизправности, възникващи по време на междуремонтните периоди.

За повишаване на ефективността на използване на електрообзавеждането са разработени методи и технически средства за диагностика, които се използват както по време на техническото обслужване и ремонт, така и като независим процес. Диагностиката осигурява възможност да се увеличи коефициента на готовност на машините, да се намалят сложността и приведените годишни разходи за експлоатация на електрообзавеждането и да се увеличи неговата ремонтпригодност. Основен инструмент за провеждането на техническата диагностика са разнотипните изпитвания (проверки). Проверката на електрообзавеждането е тип обслужване, което е много подходящо за профилактика на сложни, скъпи и уникални производствени агрегати. Изпитването се провежда в предварително определени интервали от време, с цел да се намали вероят-

ността за отказ на електрообзавеждането. Основната цел на извършването на изпитванията е да се ограничи времето на престой. Това налага провеждането на проверките да има определена периодичност (честота), отговаряща на конкретните експлоатационни условия [1, 2].

В доклада се предлагат математически модели за определяне на оптималните моменти от време за извършване на диагностични процеси. На основата на математическите модели са разработени компютърни програми, в софтуерната среда MATLAB R2019b, за определяне на оптималния момент от време за извършване на първа диагностика, както и за определяне на оптималните брой и моменти от време за извършване на последващите диагностични процеси. Изведени са резултати свързващи статистическите характеристики за безотказност на електрообзавеждането и стратегиите за извършване на техническа диагностика на производствените системи.

Математически модели за оптимизация на периодичността на диагностичните процеси

С увеличаване на времето на работа на системата t и параметъра на потока на отказите $\omega(t)$ се увеличава и честотата на диагностициране, следователно периодичността на провеждане на диагностика намалява.

В такъв случай отработката до първото провеждане на диагностика и периодичността на последващите диагностични изпитвания се определя по показателите на надеждността, като се вземат предвид и икономическите показатели. В случаите, когато става въпрос за отговорни системи поддържането на вероятността за безотказна работа се явява основна задача, при това периодичността на диагностициране се избира по запазване на неизменна стойност на параметър на потока на отказите.

Много често при определянето на периодичността на диагностициране, освен поддържането на надеждностните показатели, се налага да се отчетат и икономическите фактори [3, 4]. При наличие на статистическа информация за средната отработка между отказите на системата, отработката до първата диагностика се определя от равенството на разходите за диагностициране C_d и възстановяване на работоспособността C_p за периода от време до първата диагностика, т.е.

$$C_d = \xi C_p, \quad (1)$$

където ξ е коефициент на своевременното изпълнение на първата диагностика, характеризиращ вероятността за попадане на случайната величина (отработка до първата диагностика) в даден диапазон.

Използвайки налични статистически данни за отказ на дадения тип възел от системата се определят закона на разпределение на времето за безотказна работа и неговите параметри - средна отработка до отказ T_{cp} и средноквадратично отклонение на отработката до отказ σt . След това се пристъпва към определяне на оптималната стойност на функцията на нормално разпределение $\Phi(t_i / \sigma t)$, а оттам и оптималната отработка до провеждане на първа диагностика [5].

Отклонението на оптималното време за работа до първата диагностика средната отработка на възела до отказ, се определя от зависимостта: t_i , от

$$\Phi = 1 - \xi. \quad (2)$$

На основата на уравнение (2) може да се запише, че оптималното време за провеждане на първа диагностика се определя като:

$$t_{д1} = T_{cp} - t_i. \quad (3)$$

Обосновката на последващите моменти (периодичността) на диагностика се основава на статистическата обработка на данни за характера на зависимостта на диагностичния параметър (параметър на техническото състояние) от времето на работа.

На практика данните от периодичните измервания на диагностичния параметър $h(t)$ се предствят като поредица от криви, които характеризират промяната му за всяка машина и за група машини. При това получените данни се апроксимират с функцията $L(a_1, a_2, \dots, a_n, t)$, където a_1 до a_n са апроксимационни коефициенти, а t е времето на работа. Чрез обработка на достатъчно голяма представителна извадка се определя комбинацията от апроксимационни коефициенти, които най-точно описват реалната крива на изменение на диагностичния параметър и следователно позволяват най-точно определяне на пределното време на работа t_{np} .

При определяне на оптималната периодичност на диагностика се използват следните величини и характеристики: α и β - минимална и максимална стойност на случайната величина време на работа trp , при което диагностичния параметър достига пределна стойност h_{np} ; $\mu(t)$ - плътност на вероятността на случайната величина; $g(t)$ закон на изменение на загубите при непълно използване на ресурса на системата ($t < 0$) и при надхвърляне на ресурса на системата ($t > 0$); $D(t_0, t)$ при $\alpha \leq t \leq \beta$ - средна грешка при изчислението на t_{np} в момента на диагностициране t_0 .

Ако се допусне, че при провеждане на диагностика на N на брой едно-типни машини в момента от време t_0 , се получава, че очакваното време на работа до граничната стойност на диагностичния параметър е едно

и също за всички машини и е равно на t . В процеса на експлоатация на разглежданите машини е установено, че моментите на достигане на гранична стойност на диагностичния параметър се описват с множеството t_1, \dots, t_k . При това средната грешка при изчислението на t_{np} се определя по следната зависимост:

$$D(t_0, t) = \frac{\sum_{i=1}^k (t_i - t)}{k} \quad (4)$$

Решението на задачата за оптимизиране на честотата на диагностика се свежда до разглеждане на два случая. В първият случай всички машини не се диагностицират, а възстановяването на техническото им състояние се извършва в момента t_{np} . Във вторият случай броя, а също така и моментите на диагностициране се избират, като се вземат предвид най-добрите икономически показатели.

При първият случай математическото очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на елементите на системата се определя като

$$J_0 = \int_{\beta}^{\alpha} g(t - t_{np}) \mu(t) dt. \quad (5)$$

Във вторият случай при проведени k диагностицирания по време на работа, в моментите $\alpha \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k \leq \beta$, е възможно да се запише следния израз

$$P(t_1, \dots, t_k) = \int_{\alpha}^{t_1} g(t - t_1) \mu(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} g[D(t_1, t)] \mu(t) dt + \dots + \int_{t_k}^{\beta} g[D(t_k, t)] \mu(t) dt. \quad (6)$$

Тъй като всеки интеграл от горния израз представлява математическо очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на елементите, то (6) е математичното очакване на загубите при k на брой диагностицирания в моментите t_1, t_2, \dots, t_k , без отчитане на разходите за диагностика. Оптималната стойност на зависимостта (6) се определя като:

$$P_k = \min\{P(t_1, \dots, t_k); \alpha \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k \leq \beta\}. \quad (7)$$

При това математичното очакване на загубите при k на брой диагностицирания, с отчитане на разходите за диагностика, се определя със зависимостта:

$$J_k = P_k + C_d k. \quad (8)$$

Тъй като $C_D > 0$, съществува такова естествено число n , при което $nC_D \geq J_0$. Завсички естествени числа в границите $1 \leq k \leq n$ се изчислява J_k и се определя минималната стойност $J_m = \min\{J_k; k = 0, 1, \dots, n\}$. Оттук става ясно, че е икономически най-оправдано да се провеждат m на брой диагностични процеса в моментите t_1, t_2, \dots, t_m , за които е изпълнено условието $P(t_1, \dots, t_m) = P_m$.

Изследване на моделите за оптимизация на диагностичния процес на електрообзавеждането

Разглежда се работата на моделите за определяне на периодичността на диагностициране при оптимизиране на диагностичния процес на нововъведени и намиращи се в експлоатация помпени агрегати. При съставянето на програмата за определяне на периодичността на извършване на диагностичните процеси се решават следните основни задачи [6]:

- Определяне на момента от време за извършване на първия диагностичен процес;
- Определяне на оптималните брой и моменти от време за извършване на диагностичните процеси.

Решаването на първата от поставените задачи може да бъде постигнато чрез използване на статистически данни за средното време на работа до отказ и средноквадратичното отклонение на времето на безотказна работа, за дадения тип помпени агрегати. Също така са необходими данни за цената за извършване на диагностиката и цената на ремонта на помпените агрегати.

За решаването на задачите са съставени програми за изчисление на оптималното време за извършване на първия диагностичен процес, като е използван програмен продукт MATLAB R2019b.

При решаването на конкретната задача входните данни са предствени като отделни стойности за времето на безотказна работа на еднотипни помпени агрегати, работещи при сходни експлоатационни условия. Резултатите от работата на програмата са показани на фиг. 1, като от тях става ясно, че оптималния момент от време за извършване на първа диагностика за разглеждания тип помпени агрегати е $t_D = 2165 h$.

```

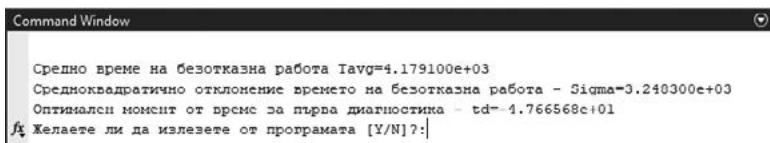
Command Window
-----
Средно време на безотказна работа Tavg=5.236400e+03
Средноквадратично отклонение времето на безотказна работа - Sigma=1.893173e+03
Оптимален момент от време за първа диагностика - td=2.165096e+03
f: Делаете ли да излезете от програмата [Y/N]?|
  
```

Фиг. 1. Резултати за оптималния момент на първата диагностика

С оглед получаване на по-пълна представа за работата на модела (програмата) за определяне на оптималния момент за първа диагностика се разглеждат резултатите, които се получават при изследване на електрообзавеждането на различни типове производствени агрегати. В резултат от изследването може да се заключи, че има две отличителни особености в работата на модела.

- Получаване на отрицателни стойности за оптималния момент за първа диагностика.

В случаите, когато поради особеностите на разглежданите производствени агрегати или особеностите на средата, в която те се експлоатират, във входните данни има голяма разнородност, т.е. стойността на средноквадратичното отклонение е съизмерима с математическото очакване на времето на безотказна работа, оптималното време за извършване на първа диагностика има отрицателна стойност (фиг. 2). Тази особеност следва да покаже, че при подобни системи изборът на стратегия за прекъсната диагностика, т.е. диагностициране в предварително определени моменти от време, е нецелесъобразен. Следователно при такива системи следва да се прилагат стратегии за диагностика включващи непрекъснат мониторинг на техническото състояние, което от своя страна е свързано с повишаване на разходите за диагностика.

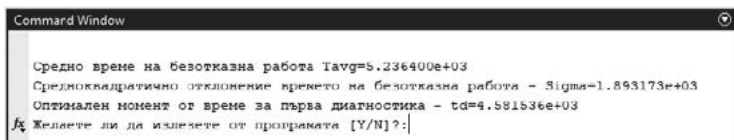


```
Command Window
Средно време на безотказна работа Tavg=4.179100e+03
Средноквадратично отклонение времето на безотказна работа - Sigma=3.240300e+03
Оптимален момент от време за първа диагностика - td= -4.766568e+01
Желаете ли да излезете от програмата [Y/N]?:
```

Фиг. 2. Резултати за оптималния момент за извършване на първа диагностика, при голяма дисперсия в стойностите на времето на безотказна работа

- Получаване на оптимален момент за извършване на първа диагностика съизмерим със средното време на безотказна работа.

Тази особеност възниква в случаите, когато себестойността на извършвания диагностичен процес е значителна част от цената за възстановяване на работоспособността на системата. На фиг. 3 са представени резултатите при коефициент на своевременното изпълнение на първата диагностика $\xi = 0,35$.



```
Command Window
Средно време на безотказна работа Tavg=5.236400e+03
Средноквадратично отклонение времето на безотказна работа - Sigma=1.893173e+03
Оптимален момент от време за първа диагностика - td=4.581536e+03
Желаете ли да излезете от програмата [Y/N]?:
```

Фиг. 3. Резултати за оптималния момент за извършване на първа диагностика, при $\xi = 0,35$

Подобен резултат, особено в случаите когато оптималното време за извършване на първа диагностика е по-голямо от средното време на безотказна работа, следва да покаже, че при такава висока себестойност на диагностичния процес неговото извършване е икономически необосновано.

При решаването на втората основна задача следва да се определи кой е водещия диагностичен параметър на системата, чиято стойност следва да се поддържа над определената стойност $h_{пр}$. В случая диагностичният параметър (кпд на агрегата) се намира

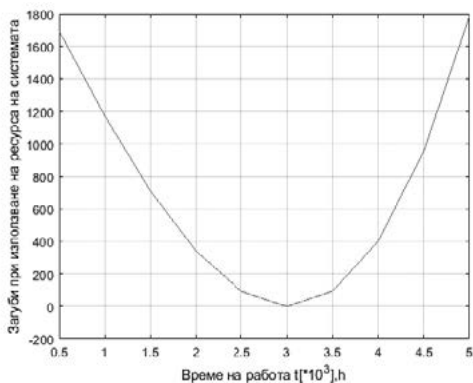
в пряка функционална взаимовръзка с рентабилността на системата и оптималната пределна стойност на този параметър може да се определи чрез минимизиране на разходите за единица време. На фиг. 4 е представен изглед от диалоговия интерфейс за въвеждане на входните данни към програмата.

```

Command Window
>> diagn_moments
Входни данни:
Времени интервал на разглеждане на диаг. параметър t = 0:0.5:5
Константа K = 3261
Цена на ремонт при едновременна замяна на всички елементи C = 2250
Апроксимирана функция за диагностичния параметър h(t) = -0.0370.*t.^2+0.92
Закон на изменение на загубите g(t) = 41.1.*t.^3-1120.*t+2250
Средна цена при изчисление на tпр Q(t-t0) = 0.67.*(t-t0)
Момент на начално диагностициране t0 = 2
Шътност на верооятността за случайната величина w(t) = 0.4-0.3.*(t-3)^2
Долна граница на случайната величина tпр alpha = 2
Горна граница на случайната величина tпр beta = 4
N Максимален брой диагностични процеси = 7
    
```

Фиг. 4. Диалогов прозорец за въвеждане на входни данни към програмата за определяне на оптималните брой и моменти от време за извършване на диагностика

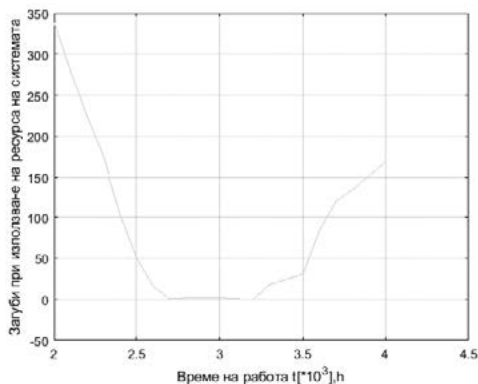
За разглежданият тук случай минималната и максималната стойност на случайната величина $t_{пр}$ са съответно $\alpha = 2000$ и $\beta = 4000$ h. При това максималният брой на диагностичните процеси за този времеви интервал е $N = 7$. На фиг. 5 е представено изменението на загубите от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата при липса на техническа диагностика.



Фиг. 5. Загуби от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата

Получените резултати показват, че в конкретния случай оптималния брой на диагностичните процеси в интервала от време от 2000 до 4000 часа е $N_{opt} = 5$, съответно в моментите от време $t_1 = 2300h$, $t_2 = 2700h$, $t_3 = 2900h$, $t_4 = 3200h$ и $t_5 = 3500h$.

Стойността на математическото очакване на загубите при извършване на оптимален брой диагностични процеси е над 7 пъти по-малка от математическото очакване на загубите при липса на диагностика. Изменението на загубите от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата, при прилагане на получения оптимален план за диагностика, е показано на фиг. 6.



Фиг. 6. Загуби от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата при оптимална програма за диагностика

Заклучение

Изведени са резултати свързващи статистическите характеристики за безотказност на електрообзавеждането и стратегиите за извършване на техническа диагностика на производствените системи.

Определени са оптималните периоди за диагностика на даден тип помпени агрегати. Показано е, че приложението на стратегията за прекъсната диагностика, с извършване на диагностични изпитвания в получените оптимални моменти от време, води до намаляване на математическото очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на агрегатите с над 7 пъти.

Литература

- [1]. Jin X., Z. Zeng, Y. Zhou, B. Liu, Research Method for Determining Preventive Maintenance Period Based on Time Stress Factors, 2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2016, DOI: 10.1109/ICRMS.2016.8050131.
- [2]. Белоусов Ю.И., Выбор периодичности термографического обследования энергетического оборудования, Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования Выпуск 17, Санкт-Петербург, 2002.
- [3]. Sánchez A., A. Goti, V. Rodríguez, Condition based maintenance optimization under cost and profit criteria for manufacturing equipment, Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications, Taylor & Francis Group, London, 2009, ISBN 978-0-415-48513-5.
- [4]. Wacker H.D., P. Holub, J. Börcsök, Optimization of Diagnostics with Respect to the Diagnostic Coverage and the Cost Function 2013 XXIV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2013.
- [5]. Харазов А. М., С. Ф. Цвиг, Методы оптимизации в технической диагностике машин, Машиностроение, Москва, 1983.
- [6]. Wang L., Gang W., Zhibin S., Determination of the Optimum Routine Maintenance Intervals for Protective Systems, 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, DOI: 10.1109/PES.2009.5275973.

Явор Лозанов, ас. инж., ТУ-София, e-mail: ylozanov@tu-sofia.bg

Светлана Цветкова, доц., д-р, инж., ТУ-София, e-mail: stzvet@tu-sofia.

bg Ангел Петлешков, доц., д-р, инж., ТУ-София, e-mail: apetl@tu-sofia.bg