

Визначення надійності системи керування вентильно-індукторного двигуна

В статті описано методику розрахунку надійності електронної системи керування вентильно-індукторного двигуна. Обґрунтовано вибір показників інтенсивності безвідмовної роботи електронних компонентів, які входять до складу системи, та необхідність окремого розрахунку інтенсивності безвідмовної роботи електронних ключів, залежно від експлуатаційних факторів і режиму навантаження. Наведено основні закони розподілу відмов, які характерні для електронної апаратури. **вентильно-індукторний двигун, система керування, інтенсивність відмов, електронний ключ, ймовірність безвідмовної роботи, вірогідність відмов, середній час напрацювання на відмову**

Вентильно-індукторний двигун (ВІД) є відносно новим типом електромеханічних перетворювачів. Він зарекомендував себе як надійна, високотехнологічна система приводу, яка має широкий діапазон регулювання частоти обертання, високі енергетичні показники і здатність працювати у тяжких умовах і агресивних середовищах. Проте, очевидна простота, висока надійність і технологічність його є досить сумнівними. Це пояснюється тим, що для забезпечення якісного регулювання моменту і швидкості ВІД необхідна складна високопродуктивна електронна система керування (СК) [1].

СК ВІД являє собою блок електронної апаратури (ЕА), який складається з інших блоків, вузлів та елементів. Будемо розглядати СК ВІД як сукупність незалежних елементів, з'єднаних послідовно, кожен з яких є невідновлюваним, тобто працює до першої відмови.

Основними блоками які складають СК ВІД є блок керування (БК) та комутатор. БК формує функцію керування двигуна в залежності від задаючого сигналу і сигналів зворотного зв'язку, яку потім подає на комутатор. БК може бути представлений як підсилювач-регулятор лінійного, релейного або імпульсного типу, а може бути тільки регулятором, який впливає на комутатор сигналами малої потужності [2]. Комутатор здійснює комутацію обмоток ВІД.

Опишемо методику, що використовується для розрахунку надійності СК ВІД [3].

На першому етапі електронна схема розбивається на m однотипних блоків по n однотипних деталей і елементів.

© А.В. Калініченко, А.В. Некрасов, 2012

Далі визначаються величини інтенсивності відмов λ_i загальні для однотипних груп при різних граничних умовах експлуатації.

До складу БК може входити велика кількість вузлів і електричних з'єднань, радіоелементів, а також інтегральні мікросхеми. Визначення інтенсивності відмов кожного з них, враховуючи електричне навантаження, температуру, механічні навантаження та умови навколишнього середовища, є досить складним завданням. У такому випадку інтенсивність відмов слід визначати для груп однотипних елементів за номінальними даними, які наведено у довідниках.

Особливий інтерес представляє розрахунок імовірності безвідмовної роботи електронних ключів, що входять до складу комутатора. Ця ймовірність залежить від навантаження та особливостей режиму роботи ВІД. Виходячи з типу

напівпровідникових елементів, комутатор може бути побудований як на повністю керованих елементах (транзистори, ГТО-тиристори), так і на не повністю керованих елементах (звичайні тиристори).

Визначимо інтенсивність відмов напівпровідникових ключів, враховуючи їх особливості роботи у СК ВІД [4].

Експлуатаційна інтенсивність відмов λ_E для однотипних груп електронних компонентів визначається із математичної моделі

$$\lambda_E = \lambda_H \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

де λ_H – номінальна інтенсивність відмов елементів групи;

K_i – коефіцієнт, який враховує зміни експлуатаційної інтенсивності відмов, залежно від різних факторів;

m – число факторів, які враховуються.

Для біполярних і польових транзисторів і тиристорів показники λ_E розраховують наступним чином

$$\begin{aligned} \lambda_{E.mpr.б} &= \lambda_H K_P K_\Phi K_D K_U K_E K_{II}; \\ \lambda_{E.mpr.n} &= \lambda_H K_P K_\Phi K_E K_{II}; \\ \lambda_{E.mur} &= \lambda_H K_P K_D K_E K_{II}. \end{aligned} \quad (2)$$

Визначимо окремо кожен коефіцієнт для системи рівнянь (2).

Значення номінальної інтенсивності відмов λ_H для даної групи елементів за нормальних умов експлуатації та при коефіцієнті електричного навантаження $K_H=1$ приведені в табл.1.

Таблиця 1 – Базові інтенсивності відмов електронних елементів

Група елементів	$\lambda_H, \times 10^{-6}$ 1/год
Транзистори біполярні кремнієві	0,044
Транзистори польові кремнієві	0,065
арсенідгалієві	0,578
Тиристори кремнієві	0,2

Коефіцієнт режиму роботи K_P залежить від K_H і температури корпусу елемента та розраховується згідно математичної моделі

$$K_P = A \exp \left[\frac{N_T}{273 + t_n + \Delta t K_H} + \left(\frac{273 + t_n + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right], \quad (3)$$

де $A, N_T, T_M, L, \Delta t$ – константи, які визначаються за табл.2;

t_n – температура навколишнього середовища, °С.

Коефіцієнт K_H представляє собою відношення фактичного навантаження на досліджуваному схемному елементі $F_{роб}$ до номінального або граничного навантаження на цьому ж елементі $F_{ном}$

$$K_H = \frac{F_{роб}}{F_{ном}}. \quad (4)$$

Для визначення K_H транзисторів у якості навантажувальної характеристики використовують розсіювану потужність, для тиристорів – середній прямий струм та розсіювану потужність.

Таблиця 2 – Константи моделі (3)

Група елементів	A	N_T	T_M	L	Δt
Транзистори біполярні і польові	5,2	-1162	448	13,8	150
Тиристори	37,2727	-2050	448	9,6	150

В табл.3 наведено значення коефіцієнта K_ϕ для транзисторів, які застосовуються у комутаторах ВІД.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта K_ϕ , в залежності від функціонального режиму роботи приладу

Група елементів	Функціональний режим роботи	K_ϕ
Транзистори біполярні	перемикаючий	0,7
Транзистори польові кремнієві арсенідгалієві	перемикаючий	0,7 7,5

Значення коефіцієнта K_D визначається, в залежності від максимально допустимого навантаження, за даними табл.4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнта K_D

Група елементів	Навантаження	Значення навантаження	K_D
Біполярні транзистори	Максимально допустима розсіювана потужність P_{max} , Вт	≤ 1	0,5
		$>1 \leq 5$	0,8
		$>5 \leq 20$	1,0
		$>20 \leq 50$	1,3
		$>50 \leq 200$	2,5
Тиристори	Максимально допустимий середній прямий струм $I_{пр.ср.мах}$	≤ 1	1,0
		$>1 \leq 5$	3,0
		$>5 \leq 25$	6,0
		$>25 \leq 50$	10,0

Коефіцієнт K_U залежить від відношення робочої напруги до максимально допустимої. Для біполярних транзисторів значення K_U , враховуючи коефіцієнт навантаження за зворотною напругою $K_H(U)$ (напругою на колекторі), наведено в табл.5.

Таблиця 5 – Значення коефіцієнта K_U для біполярних транзисторів

Значення коефіцієнту $K_H(U)$	Значення, або модель розрахунку K_U
$0 < K_H(U) \leq 0,5$	0,5
$0,5 < K_H(U) \leq 1,0$	$K_U = 1 / [2,42 - 2,09K_H(U)]$

Коефіцієнт експлуатації K_E залежить від класу ЕА за умовами її експлуатації, які визначаються відповідно до ГОСТ РВ 20.39.304-98. Такі класи мають наступні позначення:

а) Зр – стаціонарна наземна апаратура, яка експлуатується в лабораторних умовах, капітальних житлових приміщеннях та приміщеннях зі штучно регульованими кліматичними умовами;

б) $Z_{\text{чр}}$ – стаціонарна наземна апаратура, яка експлуатується у нерегулярно опалюваних, промислових та підземних приміщеннях з частковим регулюванням кліматичних умов;

в) $Z_{\text{вп}}$ – стаціонарна наземна апаратура, яка експлуатується під навісом або у неопалюваних приміщеннях, де кліматичні умови близькі до умов відкритого повітря;

г) $Z_{\text{пн}}$ – переносна наземна апаратура, яка експлуатується у режимі стаціонарного застосування у будь-яких приміщеннях або під навісом, за кліматичних умов експлуатації груп $Z_{\text{р}}$, $Z_{\text{чр}}$ і $Z_{\text{вп}}$;

д) $Z_{\text{м}}$ – мобільна наземна апаратура, яка експлуатується у будь-яких приміщеннях, у кузовах або причепах автомобілів, палатках або на відкритому повітрі;

е) $Z_{\text{мд}}$ – мобільна наземна апаратура, яка експлуатується на залізничному транспорті, у кузовах і салонах автомобілів та інших транспортних засобів;

ж) $B_{\text{ск}}$ – апаратура вантажних і пасажирських літаків, яка експлуатується у відсіках, де знаходяться люди.

Відповідно до класифікації електронної апаратури за умовами експлуатації, із табл.6 обирається значення коефіцієнта K_E .

Таблиця 6 – Значення коефіцієнта K_E

Група елементів	Клас апаратури в залежності від умов експлуатації						
	$Z_{\text{р}}$	$Z_{\text{чр}}$	$Z_{\text{вп}}$	$Z_{\text{пн}}$	$Z_{\text{м}}$	$Z_{\text{мд}}$	$B_{\text{ск}}$
Транзистори біполярні	1	1,2	1,5	2	4	5	4
Транзистори польові, тиристри	1	1,2	1,5	1,5	1,7	2	3

Коефіцієнт прийомки $K_{\text{п}}$ залежить від ступеня жорсткості вимог щодо якості та правил прийомки елементів в умовах промисловості. Він враховує наступні види прийомки в умовах виробництва:

а) прийомка «1» – елементи масового застосування;

б) прийомка «3» – елементи за замовленням міністерств і відомств;

в) прийомка «5» – елементи загального військового застосування;

г) прийомка «7» – елементи особливої стабільності, які виготовляються малими партіями;

д) прийомка «9» – елементи особливої стабільності і підвищеної надійності;

е) комерційний або невідомий рівень якості.

Усереднені значення коефіцієнта $K_{\text{п}}$ визначаються, в залежності від виду прийомки, за даними табл.7.

Таблиця 7 – Значення коефіцієнта $K_{\text{п}}$

Група елементів	Значення $K_{\text{п}}$ для видів прийомки						
	Невідомий вид прийомки	«1»		«3»	«5»	«7»	«9»
		пластмасові корпуси	-				
Транзистори: біполярні, Si польові, одноперехідні	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
Транзистори арсенід галієві	10	-	5	2	1	0,5	0,35
Транзистори: низькочастотні малошумні, Si польові	10	-	5	2	1	0,5	0,35
Тиристри Si	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,2

На наступному кроці розраховується середня інтенсивність відмов пристрою λ для електронного вузла, який складається із кількох деталей і елементів [2]

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i n_i, \quad (5)$$

де λ_i, n_i – інтенсивність відмов кожного з елементів та число однотипних елементів i -ї групи відповідно.

Далі визначається ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і ймовірність відмов $Q(t)$ протягом часу T_p , що являє собою ресурс роботи пристрою, а також розраховується середній час напрацювання на відмову T_{cp} , в залежності від функції розподілу відмов.

Відмови в роботі ЕА мають випадковий характер і описуються різними законами розподілу за часом t . Основними законами розподілу відмов ЕА [5] є розподіли Вейбула, експоненціальний, Релея та Пуассона.

Розподілу Вейбула досить добре підпорядковуються відмови в ЕА, що містить велику кількість однотипних невідновлюваних об'єктів. Основні параметри надійності, такі як імовірність безвідмовної роботи $P(t)$, частота відмов $f(t)$, середній наробіток на відмову T_{cp} , розраховуються наступним чином [5, 6]

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda_0 t^k); \\ f(t) &= -P'(t) = \lambda_0 k t^{k-1} \exp(-\lambda_0 t^k); \\ T_{cp} &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_0 t^k) dt = \lambda_0^{-1/k} \Gamma(1/k + 1), \end{aligned} \quad (6)$$

де $\Gamma(1/k+1)$ – гама-функція, значення якої наведені у спеціальних таблицях [6];

λ_0 – коефіцієнт масштабу;

k – коефіцієнт форми.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ пов'язана з параметрами розподілу (λ_0, k) та розраховується за формулою [6]

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) = \lambda_0 k t^{k-1}. \quad (7)$$

Експоненціальний розподіл є окремим випадком розподілу Вейбула (при $k=1$). Він виділяється серед інших розподілів властивістю «відсутності пам'яті». Це означає, що пристрій, який працював протягом часу t , має такий же розподіл, як і новий, який тільки що розпочав роботу [7]. Із цього випливає, що інтенсивність відмов є величиною постійною ($\lambda = \text{const}$). Основні параметри надійності при такому розподілі розраховуються за формулами [5, 6]

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda t); \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t); \\ T_{cp} &= \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1 / \lambda. \end{aligned} \quad (8)$$

Розподіл Пуассона дозволяє обчислити ймовірність виникнення числа відмов протягом певного проміжку часу. Такий розподіл слід застосовувати при тривалій роботі ЕА для планування її ремонту.

Імовірність безвідмовної роботи за час t знаходять з виразу [5]

$$P_0 = \exp(-\lambda t). \quad (9)$$

Імовірність виникнення числа відмов i за той же час

$$P_i = \lambda^i t^i \exp(-\lambda t) / i! \quad (10)$$

Для описання надійності ЕА і її складових компонентів, з явно вираженими ознаками старіння і зношення, використовують розподіл Релея. Основні параметри надійності розраховуються за формулами [5, 6]

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp(-t^2 / 2\sigma_1^2); \\ f(t) &= t / \sigma_1^2 \exp(-t^2 / 2\sigma_1^2); \\ T_{cp} &= \sigma_1 \sqrt{\pi / 2}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\sigma_1 = \sqrt{t / \lambda}$ – параметр розподілу Релея.

Розроблена методика дозволяє оцінювати надійність електронної СК ВІД враховуючи особливості конструкції, електричне навантаження та кліматичні фактори. В залежності від поставленого завдання, враховуючи закони розподілу відмов, які характерні для ЕА, можна оцінити:

- 1) основні показники надійності СК ВІД, яка містить велику кількість однотипних невідновлюваних компонентів;
- 2) ймовірність виникнення числа відмов протягом певного часу;
- 3) надійність системи з явновраженими ознаками старіння і зношення.

Список літератури

1. Козаченко А., Анучин А., Дроздов А., Жарков А. Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением // Компоненты и технологии. № 8. 2004.
2. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
3. Шишмарёв В. Ю. Надёжность технических систем: учеб. [для студ. высш. учеб. завед.] / Шишмарёв В. Ю. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
4. Боровиков С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / Боровиков С. М. и др. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
5. Билибин К. И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учеб. для вузов / Билибин К. И., Власов А. И., Журавлёва Л. В.; отв. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2002. – 528 с.
6. Ермолин Н. П. Надёжность электрических машин / Ермолин Н. П., Жерихин И. П. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
7. Половко А. М. Основы теории надёжности / Половко А. М., Гуров С. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

А. Калиниченко, А. Некрасов

Определение надежности системы управления вентильно-индукторного двигателя

В статье описано методику расчета надежности электронной системы управления вентильно-индукторного двигателя. Обосновано выбор показателей интенсивности безотказной работы электронных компонентов, которые входят в состав системы, и необходимость отдельного расчета интенсивности работы электронных ключей, в зависимости от эксплуатационных факторов и режима нагрузки. Приведены основные законы распределения отказов, которые характерны для электронной аппаратуры.

A. Kalinichenko, A. Nekrasov

Definition of control system reliability switched reluctance motor

In article are described the methodology for calculating the reliability of electronic control of switched reluctance motor. Justify the choice of intensity reliable operation of electronic components, which are part of

the system, and the need for a separate calculation of the intensity of the electronic keys, depending on operational factors and load conditions. The basic laws of distribution of failures, that are characteristic of the electronic equipment, were submitted.

Одержано 18.09.12