

ТЕХНОЛОГИЧНА НАДЕЖДНОСТ ПРИ МЕТАЛОРЕЖЕЩИ МАШИНИ С ЦПУ

TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CNC-MACHINE TOOLS

Dr. Eng. Silviya Salapateva

Faculty of Mechanical Engineering - Technical University Sofia, Plovdiv Branch, Bulgaria

Abstract: Technological reliability is a complex indicator of the quality, which influences significantly the accuracy, efficiency and cost of the mechanical processing. Unlike the operational reliability of the machines and equipment which concerns the period of time after the production, the technological reliability characterizes the production process. In the present study, are discussed some specifics of the technological reliability of operations of mechanic processing performed on CNC-machine tools with multi-tool systems, and the opportunities for its improvement.

Keywords: MACHINE BUILDING, PROCESSING BY CUTTING, TECHNOLOGICAL RELIABILITY, CNC-MACHINE TOOLS, RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEMS

1. Въведение

Надеждността в общия случай е свойство на обекта на разглеждане да изпълнява зададени функции, като запазва във времето определени стойности на избрани показатели, съответстващи на зададен режим и условия на използване, техническо обслужване, ремонт, съхраняване и транспортиране [1]. Тя е обобщен показател на качеството, включващ единичните показатели за безотказност, дълготрайност, ремонтпригодност и съхраняемост. Всеки един от тези показатели може да се представи с определени количествени оценки [9].

Безотказността е свойство на обекта да запазва работоспособността си без прекъсване за определен период от време. За оценката ѝ се използват числените характеристики средна отработка до отказ \bar{T}_o и интензивност на отказите $\lambda(t)$. Тези статистически оценки се определят по формулите:

$$(1) \quad \bar{T}_o = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{N};$$

$$(2) \quad \lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N_u(t)},$$

където N е броят на изпитваните обекти;

τ_i - отработката до първи отказ на изделието с пореден номер i ;

$n(t)$ - броят на отказите в интервала Δt ;

$N_u(t)$ - средният брой на изправно работещите обекти в края на интервала Δt .

Дълготрайността е свойство на обекта да запазва работоспособността си до настъпване на гранично състояние, което е такова състояние, при което е недопустимо или нецелесъобразно по-нататъшното му използване по предназначение.

Това свойство е свързано и с възможността на обекта за възстановяване на характеристиките на неговото качество, които са нарушени в процеса на експлоатацията му.

В зависимост от състоянието на обектите и последствията от възникване на отказ, те може да се подразделят на възстановими и невъзстановими. Невъзстановими са, когато в резултат на конкретния по вид отказ е невъзможно или нецелесъобразно по технически или икономически причини да се осъществи възстановяване на работоспособността им. В обратния случай те са възстановими.

При възстановими обекти, когато времето за възстановяване е пренебрежимо малко спрямо времето между отказите, то се пренебрегва и те се разглеждат като невъзстановими в периода на работоспособност. В противен случай трябва да се отчита времето за възстановяване на работността. Основна характеристика на обекта в този случай е т.н. коефициент на готовност. Статистическата оценка на коефициента на готовност се определя от израза:

$$(3) \quad K_G = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{ip}}{N \cdot T_E},$$

където τ_{ip} е сумарното време, през което обектът с пореден номер i е бил в работоспособно състояние;

T_E - продължителността на експлоатация, включваща периодите от време на работа и възстановяване, без времената за планови ремонти.

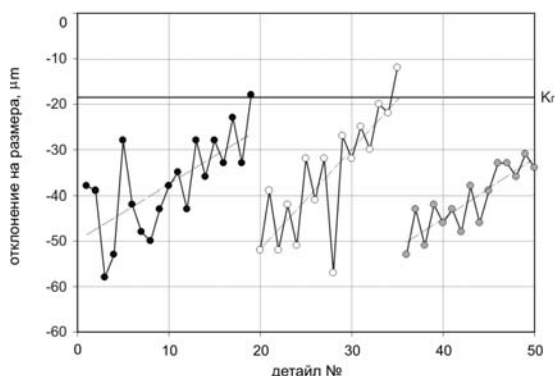
2. Изложение

При технологични операции за обработване на детайли чрез рязане понятието надеждност се свързва с възможността на технологичния процес да осигури качеството на обработваните детайли. В този смисъл става въпрос за технологична надеждност. В случая работоспособността не се свързва с физическото състояние на системата машина, приспособление, инструмент и детайл (МПИД), а с качеството на нейната работата.

Нека основните понятия в теорията на надеждността бъдат отнесени към характеристиките на технологичния процес. При обработването на последователност (група) от детайли на металорежеща машина с ЦПУ, процесът на формиране на качествения показател, например точността на размерите, се представя с точкови диаграми. На фиг.1 е представена такава диаграма за случай на обработване на цилиндрични детайли чрез обстъргване [3]. Вижда се, че размерите на детайлите систематично нарастват, което е резултат от износването на инструмента. Успоредно с това се наблюдава разсейване на размерите, предизвикано от случайни фактори. В даден момент на процеса размерът на обработения детайл се получава по-голям от предварително определена контролна граница. В този момент трябва да се извърши размерно поднастройване на машината, за да не се получат негодни следващите детайли.

Следователно, процесът е достигнал до гранично състояние, при което е недопустимо работата да продължава. В същото време техническият ресурс на инструмента не е изчерпан и работата може да продължи след осъществяване на

размерно поднастройване. Тази специфична особеност е характерна за технологичните процеси. По време на осъществяването им, в резултат на влиянието на смущаващи фактори, те постепенно загубват точността на началното си настройване и се налага периодично поднастройване. Този момент от протичането на технологичния процес може да се дефинира като **технологичен отказ**.



Фиг.1. Точкова диаграма при обстъргване

Настъпването на технологичен отказ може да бъде предизвикано от всички елементи на технологичната система – металорежещата машина, технологичната екипировка и инструменталната система.

Съвременните ММ с ЦПУ притежават висока технологична надеждност, като цяло и техните системи: геоветрична, кинематична, система за управление, диагностика и контрол, и др. [10]. Същото се отнася и за технологичната екипировка. Освен това, тяхната точност се възстановява периодично в процеса на поддържане [9]. Така, че в хода на технологичния процес възникването на технологичен отказ по тяхна вина е практически невъзможно събитие, $Q_c(t) = 0$.

Основната причина за настъпване на технологичен отказ са режещите инструменти. Както се вижда от примера на фиг. 1, износването на инструмента протича с определена интензивност, което води до технологични откази с определена честота на възникване. Това явление е характерно за всички режещи инструменти, понеже постепенно, в резултат на износването, те загубват режещите си свойства.

Вероятността за настъпване на технологичен отказ в системата $Q_c(t)$ в даден момент на технологичния процес и вероятността за безотказна работа $P_c(t)$ в същия момент, са противоположни събития, които образуват пълна група вероятностни събития. От това следва, че $P_c(t) = 1 - Q_c(t)$. За всеки инструмент тези характеристики могат да се определят от интензивността на отказите $\lambda(t)$ и законът на разпределение на който се подчинява $P(t)$. Например, при експоненциален закон на вероятността за безотказна работа, се получава:

$$(4) \quad P(t) = e^{-\lambda T},$$

където T е отработката до отказ (например, броя на обработените детайли до възникване на технологичен отказ).

Технологичните операции върху ММ с ЦПУ са сложни, с голям брой разнообразни преходи и инструменти. Например, при обработващите центри за РСД може да се обработват сложни ротационни детайли с обстъргване, разстъргване, прорязване на канали, свредловане на отвори, фрезование на площадки и канали и др. Още по-сложни са операциите при обработване на корпусни детайли на обработващите центри за ПКД. Освен това съществуват и специфични операции, когато с един инструмент трябва да се отнеме голям обем метал. Такива са случаите на обработване на активните повърхнини на пресформи, шприцформи и други подобни инструменти.

При тях рещещият инструмент освен технологичния, изчерпва и техническия си ресурс и трябва да се смени поради загубване на режещите си свойства. Такъв момент настъпва и при другите режещи инструменти. Логично е при тези обстоятелства да се очаква много малка технологична надеждност на системата. Поради отказа на един или друг инструмент ще се налагат чести прекъсвания на процеса, което се отразява негативно на производителността и технологичната себестойност на операцията.

За изследване на надеждността на сложни обекти, състоящи се от множество елементи, които са свързани в обща система на функциониране, се прилагат структурни схеми. Чрез тях реалният физически обект се представя с логически модел на функциониране. С помощта на структурните схеми може да се изследват вероятността за безотказна работа на системата, вероятността за отказ, средната отработка и интензивността на отказите, при известни показатели за надеждността на елементите на системата.

При обекти, работоспособността на които зависи от работоспособността на всеки от елементите им, логическата схема за работоспособност е показаната на фиг.2. Вижда се, че елементите са последователно свързани логически. Физическата схема на свързване може и да е друга. Важно е свойството, че при отказ на който и да е елемент на системата, тя загубва своята работоспособност.



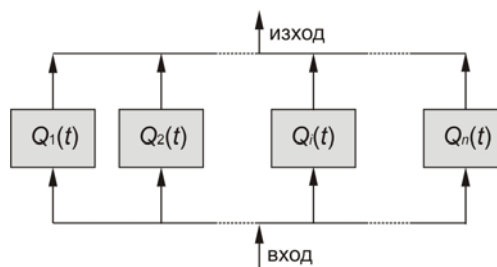
Фиг.2. Структурна схема с последователно свързани елементи

Вероятността за безотказна работа на системата $P_c(t)$ за изследвания период от време t ще се определи чрез умножение на вероятностите за безотказна работа на нейните елементи за същия период от време:

$$(5) \quad P_c(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

От анализа на структурната схема на системи с последователно свързани елементи могат да се направят следните изводи: вероятността за безотказна работа на системата намалява с увеличаване броя на нейните елементи; вероятността за безотказна работа на системата е по-малка от тази на елемента с най-ниско ниво на надеждност.

На фиг.3 е показана структурната схема на система с успоредно свързани елементи. При успоредна логическа връзка отказът на цялата система възниква при отказ на всички нейни елементи. Ако дори един от елементите е в работоспособно състояние, системата е в състояние да функционира.



Фиг.3. Структурна схема с успоредно свързани елементи

Вероятността за отказ на системата $Q_c(t)$ в изследвания период от време t се определя по теоремата за умножаване на вероятностите за отказ на всички елементи по формулата:

$$(6) \quad Q_c(t) = Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t) \dots Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t).$$

Вероятността за безотказна работа на системата $P_c(t)$ ще бъде съответно:

$$(7) P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)].$$

От зависимостите за надеждността на система с успоредно свързани елементи следва, че надеждността на системата като цяло е по-голяма от тази на елемента с най-голяма надеждност.

Понеже при ММ с ЦПУ технологичният отказ на който и да е инструмент води до отказ на цялата система, логическата схема за надеждността е показаната на фиг.2. Вероятността за безотказна работа на системата $P_c(t)$ се определя по формула (5). При експоненциални закони на вероятността за безотказна работа на отделните инструменти, за системата се получава:

$$(8) P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} e^{-\lambda_3 t} \dots e^{-\lambda_n t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}.$$

Интензивността на отказите на системата в момента t ще бъде:

$$(9) \lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Средната отработка до отказ на системата \bar{T}_{oc} ще бъде:

$$(10) \bar{T}_{oc} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{T}_{oi}} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^{-1},$$

където \bar{T}_{oi} е средната отработка до отказ на елемента с пореден номер i .

Повишаване на технологичната надеждност при ММ с ЦПУ

Основен метод в теорията на надеждността за повишаване на надеждността на сложни и отговорни системи е резервиране на системата или на нейните елементи. В първия случай на разположение е резервна (дублираща) система, която се включва при отказ на основната. Във втория случай се осигуряват дублиращи елементи, които се включват в работа при отказ на основните.

При използване на дублираща система, която има надеждност, еднаква с основната, вероятността за безотказна работа на резервираната система P_{pc} според формула (7) ще бъде:

$$P_{pc}(t) = 1 - [1 - P_c(t)]^2.$$

При наличието на две резервни системи съответно:

$$P_{pc}(t) = 1 - [1 - P_c(t)]^3 \text{ и т.н.}$$

Вижда се високата ефективност на метода, понеже $P_c(t) < 1$. Например, при $P_c(t) = 0,8$ и една дублираща система, вероятността за безотказна работа на резервираната система се получава $P_{pc}(t) = 0,96$, а при две резервни системи $P_{pc}(t) = 0,992$.

Описаният метод е прилаган за повишаване надеждността на автоматичните линии съставени от ММ с ЦПУ, при които автоматично се подменят целите инструментални магазини [2].

Подобно решение може да се възприеме и при реконфигуриращите се производствени системи, когато някой от елементите на системата е с ниска надеждност и намалява надеждността на системата като цяло.

По-прост за реализация е методът с резервиране на отделните инструменти. В този случай се повишава вероятността за безотказна работа на всеки от резервираните

инструменти, а от там и на инструменталната система като цяло. На практика методът се реализира, като в инструменталния магазин се зареждат по няколко еднакви инструменти. Това са инструментите с най-малка технологична надеждност. Предварително всички са настроени на размер и са в готовност за работа. В програмата за ЦПУ всеки от инструментите носи оригинален идентификационен номер.

Проблемът за въвеждане на резервиране при ММ с ЦПУ е установяването на момента за смяна на инструмента и автоматично генериране на съответна команда в програмата за ЦПУ.

При съвременните системи за ЦПУ е предвидена възможност за зареждане в инструменталния магазин на еднакви инструменти, които се групират според вида им (за обстъргване, за нарязване на резба, отрезни и т.н.). За всяка група се задава и трайността в минути или брой обработени детайли, което се записва по определен начин в програмата за ЦПУ [8]. След изчерпване ресурса на първия инструмент от групата, той се заменя с втория и така до изчерпване на ресурса на цялата група.

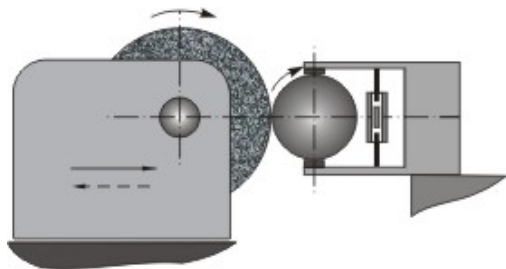
Смяната на инструментите по зададен в програмата ресурс има недостатък, че не се използва действителния ресурс на инструмента. Поради разсейването на трайността, програмираният ресурс съответства на вероятната най-малка трайност. На практика това е събитие с много малка вероятност, от което следва, че не се използват ефективно инструментите и се увеличава технологичната себестойност на операцията. Възможно решение на този проблем е въвеждането на активен контрол.

При струговане (обстъргване и разстъргване) е целесъобразно активният контрол да се осъществява чрез измерване на обработените детайли след напускане на работната зона на машината. С това се избягват смущенията на контрола от вибрациите при рязане и отделяните от процеса стружки, а в определени случаи и наличието на охлаждаща течност. Статистическата обработка на резултатите от контрола и генериране на съответни команди към системата за ЦПУ се осъществяват от компютърна система снабдена със специализиран софтуер. Такава реализация на активен контрол е описана в [3]. Алгоритъмът за автоматизирано генериране на изречения към програмата на системата за ЦПУ е представен в [7].

При други инструменти се прилагат различни подходи, адекватни на специфичния за тях процес на работа.

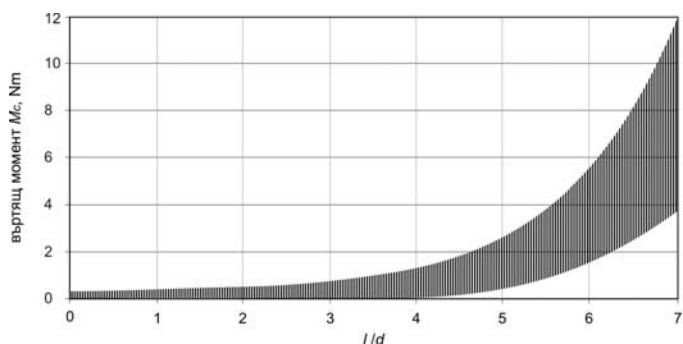
При шлифоване е подходящо активният контрол да се осъществява през време на обработването. На фиг.4 е показана схема на активен контрол с двукратно измервателно устройство. Размерът на обработваната повърхнина се следи в реално време и когато се включи в границите на допусковото поле процесът на обработване приключва и следват програмно управляеми действия за оттегляне на инструмента и контролното устройство. На практика технологичната система притежава висока технологична надеждност. Тук размерното износване на инструмента не оказва влияние на размерообразуването и не предизвиква технологични откази.

Характерно за процеса е нарушаване на режещата способност на инструмента, поради запълване на порьозната му структура с материал от обработваните детайли. Това може да е причина за нарушаване работоспособността на инструмента. С развитието на този процес нараства амплитудата на трептенията в технологичната система. Именно те може да се използват като индикатор за достигане на гранично състояние, при което трябва да се извърши претачоване на инструмента. За целта се въвежда сензор за контрол на трептенията, който се включва в системата за активен контрол.

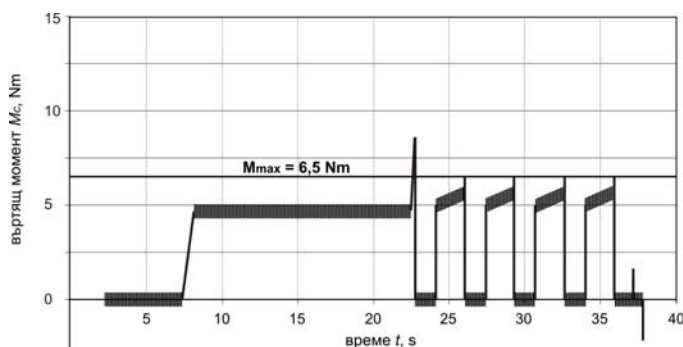


Фиг.4. Активен контрол при шлифване

При свредловане технологични откази се получават под влиянието главно на два фактора: износването на инструмента и уплътняването на стружката. С износването на инструмента той постепенно губи режещите си свойства. Това се отразява на силовите параметри на процеса – осова сила F_f и въртящ момент M_c . По-съществено износването се отразява на нарастването на осовата сила. При уплътняване на стружката, което се проявява при дълбоки отвори с отношение $l/d > 3 \div 5$, по-чувствително се променя въртящият момент. Следователно, контролът на осовата сила може да послужи за установяване на момента, при който следва да се извърши смяна на инструмента. С контрола на въртящия момент може да се организира дълбокопробивен цикъл на работа при свредловането.



а) типична закономерност



б) работа с адаптивна система

Фиг.5. Промяна на въртящия момент при свредловане

За повишаване на надеждността на процеса може да се приложи адаптивно управление [4, 5, 6].

На фиг.5а е показана типовата закономерност на промяна на въртящия момент при свредловане на дълбоки отвори. Ако процесът на рязане не се прекъсне преди достигане на въртящия момент до границата на разрушаване, ще възникне отказ поради разрушаването на инструмента. С помощта на адаптивна система се въвежда допустима граница на въртящия момент и при нейното достигане инструментът се извежда от отвора на бърз ход назад, при което автоматично се почистват стружките и дълбокопробивният цикъл продължава програмно. Промяната на въртящия момент при въвеждането на адаптивно управление е показана на фиг.5б.

Сигнал за смяна на инструмента може да се получи от контрола на осовата сила [6] или от акустичната емисия на процеса [4].

Заклучение

От представеното изследване могат да се направят следните изводи:

1. Технологичната надеждност при ММ с ЦПУ, които влизат в състава на съвременните реконфигуриращи се производствени системи, определя способността на технологичната система безотказно и продължително да гарантира качеството на произвежданите детайли;
2. При механичното обработване възникват технологични откази, когато системата достигне гранично състояние на точността на настройването и е необходимо поднастройване, за да не се получи брак;
3. При ММ с ЦПУ основен фактор на технологичната надеждност е надеждността на инструменталната система;
4. Повишаване на технологичната надеждност при ММ с ЦПУ може да се постигне чрез резервиране на инструментите в инструменталната система;
5. За автоматизиране на процесите по поднастройването и смяната на инструментите може да се използват активен контрол и адаптивно управление, според спецификата на процеса при различните инструменти.

Благодарност

Авторът изказва своята благодарност на НФНИ при МОМН за финансирането на част от представените изследвания по изследователски проект ВУ-ТН-208/06 „Създаване на методология за управление и диагностика на реконфигуриращи се производствени системи”.

Литература

1. Димитров Д., Данчев Д. Надеждност на строителни машини и системи. Техника, С., 1994.
2. Вълков С. Г. Производителност, точност на обработка и надеждност на металорежещите машини. Техника, С., 1980.
3. Салапатева С. Ч. Технологични изследвания за активен контрол при струговане с ЦПУ. Дисертация за присъждане на научната и образователна степен “доктор”. ТУ-София, филиал Пловдив, 2005.
4. Ленгеров А.Д. Адаптивно управление на процеса свредловане. Дисертация за присъждане на научната и образователна степен “доктор”. ТУ-София, филиал Пловдив, 1999
5. V. Georgiev, S. Lilov. Instruments and Software Tools for Obtaining Diagnostic Information for Intelligent CNC of Machine Tools. International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'07, Vol. II, p.p. V-25, V-28. Bulgaria, Sofia, October 3-6, 2007.
6. Sato, et al. High Speed and High Productive Drilling by Intelligent Machine Tools – Integration of the cutting conditions planning and adaptive control for drilling. Proc. of the Japan - USA Symposium on Flexible Automation. 13061, 2000.
7. Четров И. А. Адаптивно управление на точността при механично обработване на металорежещи машини с ЦПУ. Дисертация за присъждане на научната и образователна степен “доктор”. ТУ-София, филиал Пловдив, 2005.
8. Хаджийски П. Програмиране на CNC машини. ТУ-София, 2010.
9. Попов Г. Поддържане, ремонт и модернизация на металорежещите машини, ТУ-Сафея, 2002.
10. Попов Г. Металорежещи машини, ч. II – Конструирани и пресмятане, кн. 1, ТУ-София, 2010.