Предсказване на повреди в управляващи устройства, използвайки дърво на отказите и предходно знание

В. Боишина, М. Шаркова

Control Devices Faults Prediction Using Decision Tree and Case-Base Reasoning

V. Boishina, M. Sharkova

University of Chemical Technologies and Metallurgy, 8 Kliment Ohridski Blvd., 1756 Sofia, Bulgaria, venelin_b@yahoo.com, miglena.sharkova@yahoo.com

Key Words: *Case-Base Reasoning; Risk Management; Fault Tree; System Control; Power Plant.*

Abstract. *The management of Energy Power Plants (PP) is a multifaceted technological process influenced by various factors, including environmental changes, the state of system control elements, and potential faults in sensors and other critical components. During the control of Power Plants, some failures in system devices (such as sensors, valves, and other essential components) can occur. These failures can lead to damage and malfunctions within the system control loops, ultimately causing the system to work unstably and rise risk situations. Early diagnosis and prediction of these failures are crucial for maintaining the safe and efficient operation of Energy Power Plants. The research introduces a new approach for diagnosing the state of the system and presents a mechanism for predicting some failures of control loop elements at an early stage. The proposed approach combines Fault Tree (FT) analysis with Case-Based Reasoning (CBR) in a way to provide a comprehensive system for prediction of fault devices detection. Using the previous knowledge for the technological characteristics of control devices elements – such as material wear, working time under high load, and contamination of sensors and photocells is used for forming of knowledge base-oriented system (CBR). The CBR part of the system contains detailed technical information and descriptions of control device characteristics. The proposed system architecture is designed to detect faults in control devices and provide early detection of system behavior that indicates the possible failure of control elements. The CBR system includes knowledge about sensors, valves, and even the blades of power plant steam generators. The research illustrates the mechanism of Fault Event detection based on the occurrence of faults in some system control devices. It also demonstrates how the prediction of risk management can be performed by applying of common work of Fault Tree (FT) and knowledge based system (CBR). The system offers a proactive approach to fault management, ensuring stable and efficient plant operation. This innovative approach not only helps in early fault detection but also enables plant operators to take preventive measures, thereby reducing the likelihood of catastrophic failures and ensuring continuous and reliable power generation. The research contributes to the advancement of fault management techniques in Energy Power Plants and providing valuable insights and practical solutions for industry practitioners.*

1. Въведение

През последните десетилетия системите за управление на енергийни обекти търпят сравнително развитие поради нарастващото потребление на енергия в световен мащаб. За съжаление прекомерното производство на енергия от топлоелектрически централи (ТЕЦ) води до по-голяма степен на замърсяване и допринася за увеличаване на парниковия ефект, като нарушава редица екологични изисквания. Това води до договорка между страните в Европейския съюз за увеличение на използването на зелена енергия като възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) и в частност определената като зелена енергия и произведената такава от атомни електроцентрали. Целта на тази договорка е в следващите 12-15 години зелената енергия да достигне до 32% от производството на енергия с цел опазване на околната среда и спазване на екологичните норми и разпоредби.

Напредването на съвременните технологии дава възможност за въвеждане в експлоатация на различни автоматизирани системи за управление, мониторинг, супервайзорни системи, системи за ранно предупреждение, системи за риск мениджмънт и други [1,6]. Това дава възможност за съхранение на данни, получени от работата на системата, събиране на информация и данни за технологичния процес, режима на работа на електрическа централа (ЕЦ), състоянието на енергийната мрежа и други [6]. Натрупването на такъв вид предходна информация е предпоставка за развитието и прилагането

в системите за управление и мониторинг на риска посредством използването на различни методологии като дърво на отказите (Fault Tree Analysis, FTA), моделно предсказващо управление (МПУ), управление на базата на прецеденти (Case Base Reasoning, CBR), невронни мрежи, машинно обучение (Machine Learning) и други [1,2,4].

В статията е представена система за предсказване на възможни повреди в елементите за управление на енергийни централи, използваща знание за технологичните характеристики на измервателните устройства: време за експлоатация, натоварване в системата и други. Разработена е и е представена архитектура на система за ранна диагностика и мониторинг на енергийна централа. Системата комбинира работата на дърво на отказите и предходно знание за състоянието на системата и извършва ранна диагностика, като предсказва възможно възникване на повреди в управляващите и измервателните устройства.

2. Предпоставки за изграждане на система за предсказване на повреди в измервателните устройства

Анализът на дървото на отказите (Fault Tree Analysis, FTA) е последователен метод за анализ отгоре-надолу, при който неизправното състояние на дадена система се анализира със средствата на булевата логика. Използването на тази методология дава възможност да се комбинират различни системи, използващи исторически данни. Дървото на отказите е подходящ механизъм за определяне на повреди посредством извършване на анализ на наличието на последователност от събития от ниско ниво, довели до отказа на системата. Този аналитичен метод се използва основно в областта на техническото осигуряване на безопасността и надеждността на системите (Safety Engineering, Reliability Engineering), представени в [2,3,4]. В разработката е използвана този вид методология с цел анализ на работата на системата и ранно предсказване на неизправност. Използването на FTA дава възможност за идентифициране на възможни повреди в контурите за управление и измервателните устройства. Анализът на работата на системата посредством дърво на отказите е добър подход за ограничаване на риска, както и за анализиране и предсказване на възможност за настъпване на повреди и поява на инциденти, които могат да доведат до отказ на работата на системата.

В статията е представена методология за определяне и предсказване на възможни повреди в измервателните устройства. Тя предлага комбинирана система за предсказване на възможни откази на елементите за управление посредством определяне на риска. Системата е базирана на съвместната работа на предварително детерминистично определено дърво на отказите. Системата предсказва възможни аварийни събития, получени въз основа на текущи и минали подобни случаи, възникнали при работата на енергийна централа (ЕЦ) [3,4,5]. Общата структура е дадена на *фиг. 1*.

3. Определяне на риска посредством дърво на отказите

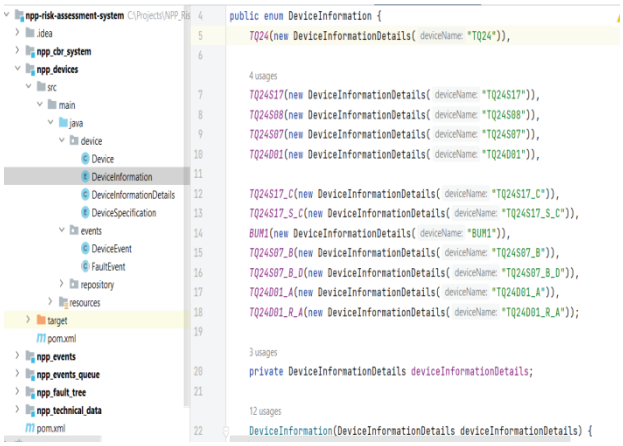
Използването на техника за анализ на дървото на отказите (FTA) е доказано ефективен инструмент за анализиране и идентифициране на области за възможно възникване на аварии. Това дава възможност за предотвратяване на опасности и намаляване на риска на системата за управление още във фазата на планиране. Този вид подход за анализ е приложим и на по-късен етап и дава възможност за оценка на риска. Представена е система за предсказване на повреди, като FTA методологията е използвана и за вероятностната оценка на риска. В разработената система са използвани дърветата на отказите [5], които съдържат информация за състоянието на елементите в системата. Тези дървета на отказите, както и информацията за текущото състояние на системата и технологичните характеристики дават възможност за изграждане на система за ранна диагностика и предсказване на повреди в електроцентралата. Използването на такъв вид експертно знание дава възможност за дефиниране и моделиране на основни възможни събития на отказ и повреди.

Архитектурно те са изобразени в долната част на дървото на отказите и са свързани посредством булевата логика с едно или повече от най-високоприоритетните събития. Тези вид събития дефинират на високо ниво възможни повреди, отказ на устройства, планирани ремонти и други технологични данни, които водят до опасни рискови ситуации при експлоатация на системата за управление. При дефинирането на тези събития се използват предходни и прогнозни данни за работата на електроцентралата. Типични такива събития могат да бъдат пълна загуба на производство, експлозия, токсични емисии и други [1,2]. В текущата разработка този вид технологични данни се съдържат в модула от разработената система (**npp-device**, *фиг. 8*). Те са такива като максимална температура при работа на измервателно устройство, оптимално натоварване на турбината, брой часове за експлоатация и други. Част от софтуерната реализация и кодът на модула, съдържащ технологичните данни за устройствата, сензорите и други елементи от контура за управление, са дадени на *фиг. 7*.

4. Определяне на риска на базата на предходни случай

За разлика от детерминистичното дърво на отказите, което изисква предварителен математически модел и анализ на системата, определянето на нивата на риска на базата на данни от предходни случаи изисква наличието

на вече известна информация за отказ на системата. Такива предходни случаи могат да включват информация за режима на работа и текущото състояние на системата (ниво на мощност, дебит и температура на водния контур, натоварване на помпите, технологично време за експлоатация и други).



Фиг. 1. Техническа спецификация на устройствата в контура за охлаждане в АЕЦ [5]

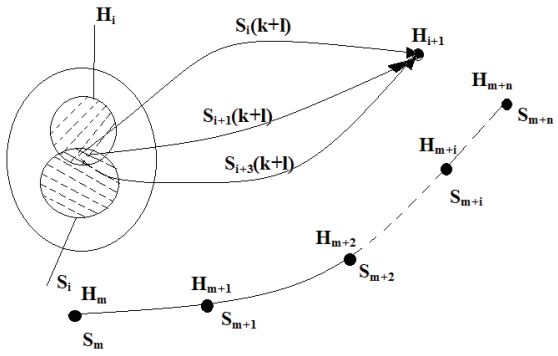
Разработената системата за предсказване на повреди определя нивата на риска, като използва предходна информация за състоянието на системата, които са предизвикали откази (Case-Base Reasoning System). Този вид система съдържа данни както за текущото състояние и работа на системата, така и информация за наличие на внезапно възникнали промени вследствие на отказ на управляващо устройство [8]. Например такива предходни случаи могат да са повреда в охлаждащия контур, отказ на помпа при подаването на вода във водния контур, липса на електрически сигнал от измервателно устройство, повреда на вентил и други.

Отпадането на устройства в контура на управление може да възникне поради различни причини: натоварване на устройство, повреди, отказ да се отвори вентил и други [7,8]. Това може да доведе до промяна на режима на работа на електроцентралата, като се премине от нормален към авариен режим. Схематично преминаването от един режим на работа към друг е представено на *фиг. 2.* Преминаването от нормален режим към рисков режим на работа може да се опише посредством **обобщена функция на риска** H_i (1), характеризираща дадена ситуация S_i. Функцията за определяне на риска се определя от различни фактори: отпадане на устройство (device fault – df), повреда в помпа (pomp fault – pf), отказ на клапан (fault valve – fv). Функцията на риска съдържа и други обобщени икономически показатели, определени от енергийната мрежа. Такива показатели, влияещи върху функционирането на системата, се описват от показателя e_f (2):

(1) $H_i=f(df,pf,fv,ef)$;

(2) $e_f=f(BC,SC,TS)$,

където BC са бизнес изискванията, SC – системните ограничения, TS – технологичното състояние на системата. Те могат да се обобщят с различни фактори като износване на оборудването, използване на различно качество на материалите и други.



Фиг. 2. Преход от нормално състояние към аварийно

Системата за управление на риска отчита и промяната на състоянието на работа на системата

(3) $S(H_i)= S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_i \rightarrow S_n$.

Всяка ситуация Si, възникнала в системата, се характеризира от различни случаи (3):

(4) $S(\Omega_i) = f(S(Hi))$.

Преходът от една ситуация в друга, описана от (4), е показана графично на *фиг. 2*. *Фиг. 2* демонстрира възможните преходи на енергийната система за управление от едно режимно състояние на работа в друго, което може да предизвика авария. Математичното описание $S(\Omega_i)$ е сложна функция, която определя различните възможни състояния на системата, породени от отказ на работа на елементите в контура за охлаждане. $S(\Omega_1)$ е нормално състояние, $S(\Omega_2)$ е предупредително състояние за работата на системата, $S(\Omega_3)$ е опасно аварийно състояние. Повече детайли за възможните режими на работа са представени в [1,2,4].

5. Алгоритъм за определяне на риска на базата на предходни ситуации

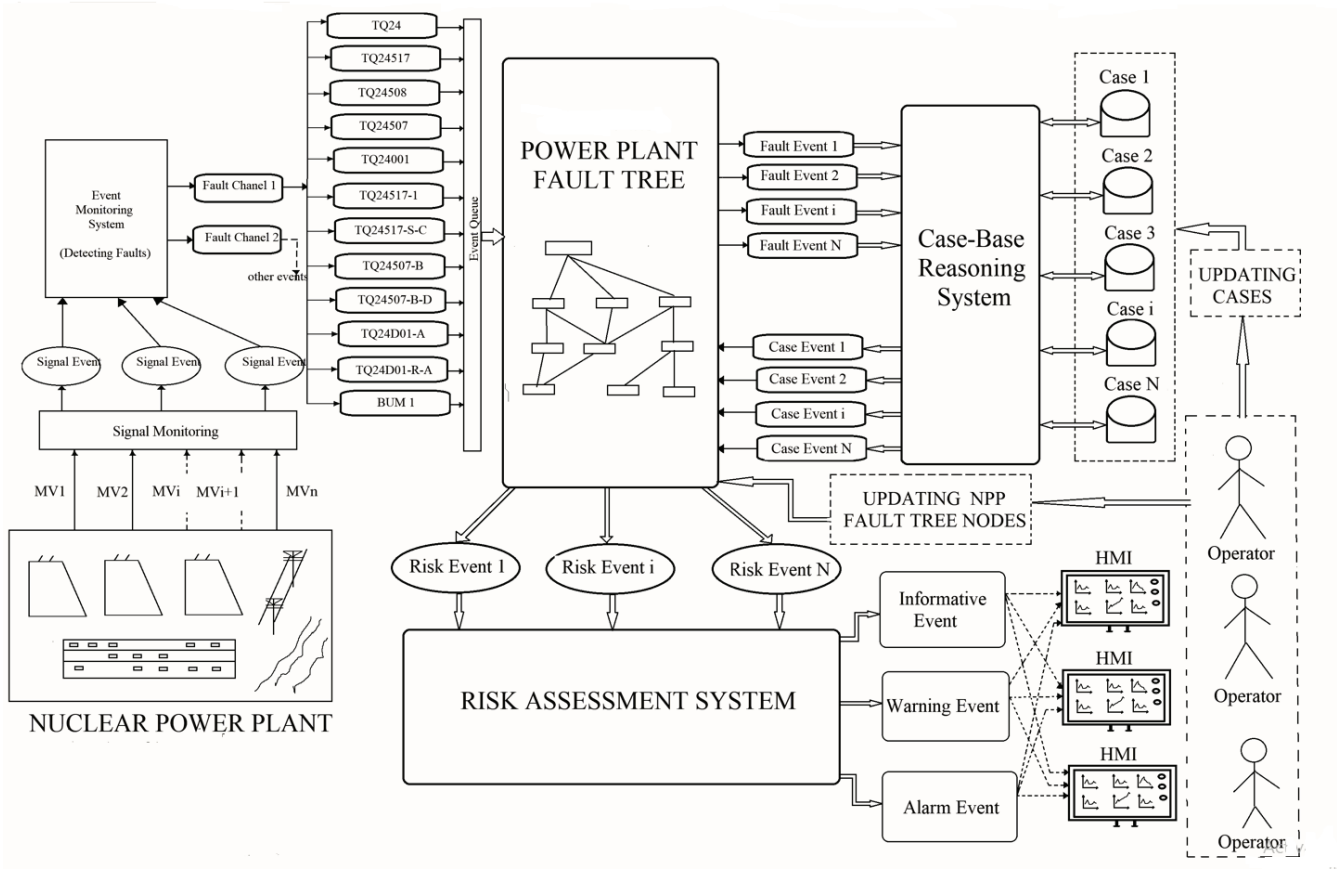
Възникване на промяна в начина на работа на елементите от контурите, породено от спиране или пускане на помпи, отказ на устройства и други в контура за охлаждане на реактора [5], може да доведе до промени в режима на работа. Това налага подновяването на знанието в системните данни, довело до промени на текущото знание. Наличието на такива промени се отразява от системата за мониторинг на риска и последваща адаптация на информацията, дефинирана в дървото на отказите [7]. Такъв вид неочаквани промени (липса на сигнал от сензори, отказ на вентил да се отвори или затвори заради механична повреда и други) води до внасяне на

неопределеност и липса на точност при управлението на ЕЦ и до повишаване на нивата на риска. Разработената система използва механизъм за адаптация на текущо знание посредством промяна на текущия прецедент (случай) [4,6]. Използваният механизъм за адаптация на знанието на предходни случаи при наличие на повреди, промени в началните условия, промяна в натоварването на енергийната мрежа и други не се разглежда в текущата разработка, а е разгледан подробно в [3,4].

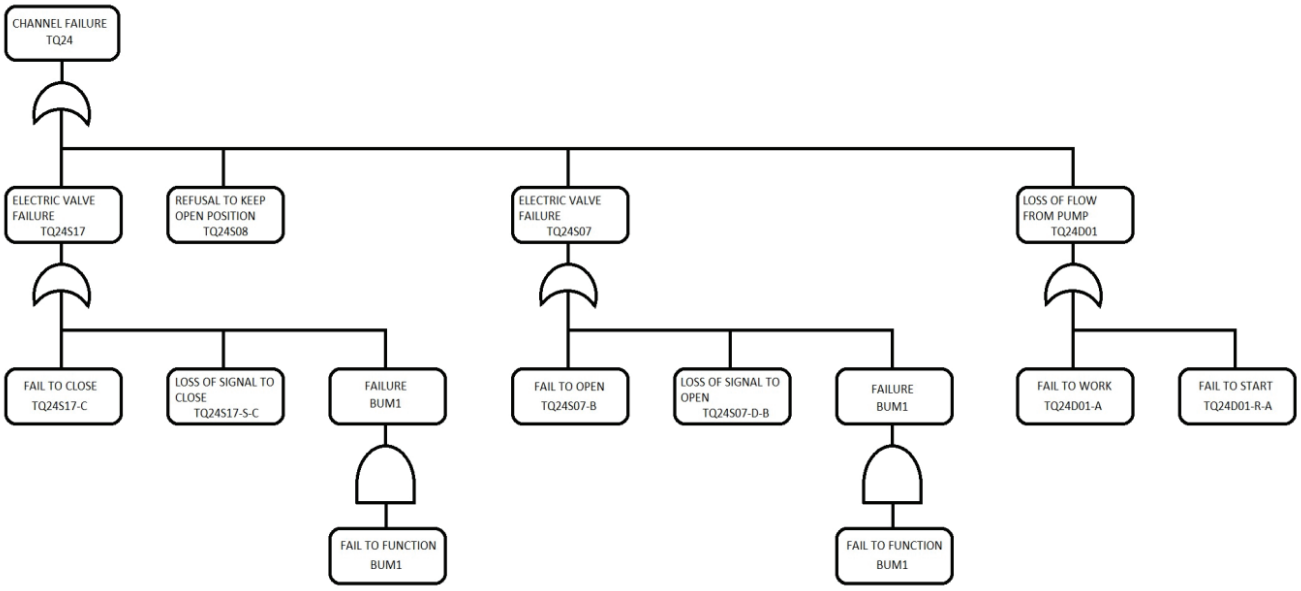
6. Архитектура на система за определяне на риска

Архитектурата на разработената система за предсказване на нивата на риска посредством съвместната работата на дърво на отказите и от информация, получена от предходно известни случаи на повреди и откази в системата, е дадена на *фиг. 3*.

Разработената система за предсказване на повреди и възможен отказ на работата следи за настъпили повреди, довели до отказ на някои от управляващите устройства, и генерира рискови събития (**RiskEvents**). Тези софтуерно създадени събития се подават към системния модул за определяне на нивото на риска. При повреда на измервателно или управляващо устройство се генерират сигнални събития. Този вид сигнални събития се формират въз основа на данните, получени/неполучени от измерваните технологични величини като температура, налягане, мощност (**Measurable Variables** (**MVi**)) и формират сигнални събития – **SignalEvent**. Обобщено казано, при наличие на повреда в измервателно устройство може да няма сигнал или сигналът да е слаб и други, което дава възможност за формиране на събитие за отказ на устройство (**DeviceEvent**). Тези събития в комбинация от прогнозираните (**CaseEvent**) постъпват за обработка към дървото на отказите и се генерират рискови събития (**RiskEvent**). Тези **RiskEvent** се подават към системата за определяне на нивата на риска. В зависимост от полученото рисково събитие се определя нивото на риска. По този начин се формират следните видове събития: информативно събитие (**Informative Event**), предупредително (**Warning Event**) и алармиращо ниво на риск (**Alarm Event**). Формираните рискови събития се подават към операторите в енергийната централа и се илюстрират на човеко-машинен интерфейс (**Human-Machine-Interface**, **HMI**) посредством звукови аларми, светлинни сигнали на повредени измервателни прибори (мигащи участъци), съобщения и други.



Фиг. 3. Архитектура за прогнозиране на повреди в измервателните устройства, използвайки дърво на отказите и предходно знание в енергийни централи (Power Plants, PP)



Фиг. 4. Дърво на отказите за система за аварийно въвеждане на борен разтвор в активната зона с високо налягане – TQ4 [5]

7. Дърво на отказите

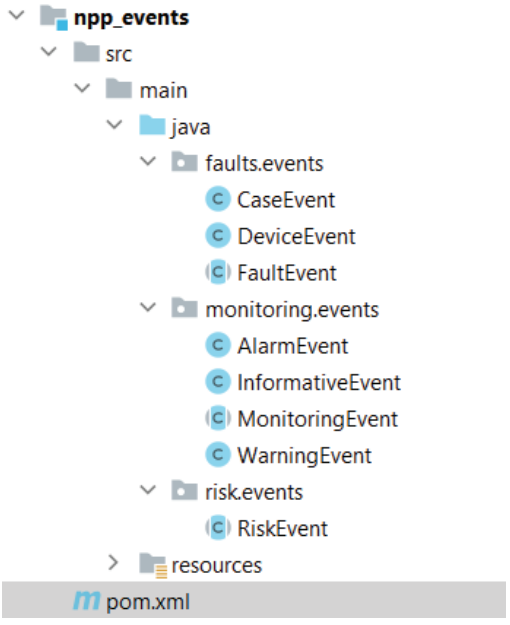
В разработката е използвана част от дървото на отказите, приложено от АЕЦ „Козлодуй“ в TQ4 [5]. Част от дървото на отказите за система за аварийно въвеждане на борен разтвор в активната зона с високо налягане е показана на *фиг. 4*. Дървото демонстрира част от възможните откази на устройствата и системите в контура за въвеждане на борен разтвор. Данните, получени от информацията, предоставена от АЕЦ „Козлодуй“ в TQ4 [5], са използвани за съставяне на софтуерния модул, съдържащ техническата спецификация за елементите на контура. Софтуерният модул е представен от подсистема, съдържаща информация за управляващите и измервателните устройства: **npp_devices**. Този модул съдържа техническа спецификация за устройствата и техните характеристики и е използван при разработване на **npp_fault_tree (Fault Tree)** модула. При софтуерната имплементация се отчитат данни, атрибути и други характеристики за устройствата и те са представени в **npp_technical_data** частта от системата. Текущата разработка не представя информация за софтуерната имплементация на **npp_fault_tree** модула. Подробната реализация и имплементация на системата ще бъде представена в бъдещи разработки.

8. Реализация на системата

Разработена е софтуерна система за определяне на риска в енергийни централи [5]. Представената система е в начална фаза на разработка, тъй като подлежи на бъдещо изменение и разширение на програма за определяне на нивата на риска. Системата за определяне на нивата на риска **npp-risk-assessment-system** е базирана на архитектурата, показана на *фиг. 3*.

Софтуерната реализация на **npp-risk-assessment-system** се състои от следните модули:

- **npp_events** – програмна реализация на модела на събитията, използвани за определяне на риска, които са групирани в три вида групи: събития, предизвикани при повреда на устройство (**FaultEvent**); събития, характеризиращи риска (**RiskEvent**); събития за мониторинг – информативни, предупредителни и алармиращи (**MonitoringEvent**), показани на *фиг. 5*.



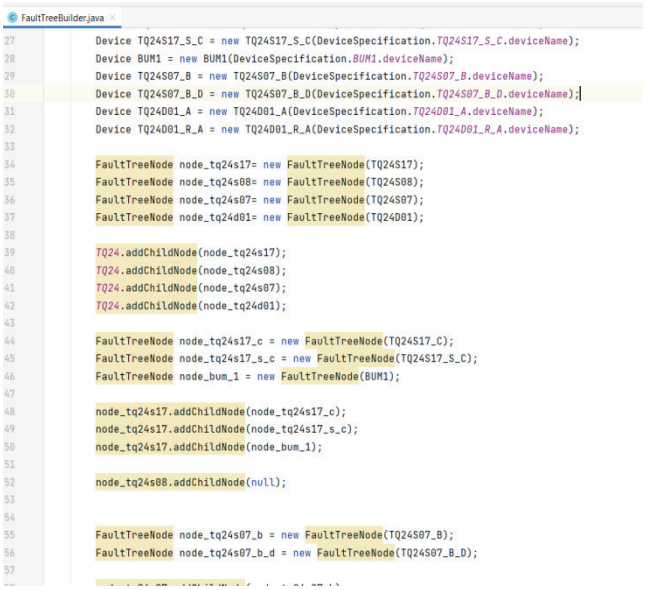
Фиг. 5. Видове събития

- **npp_technical_data** – съдържа софтуерен модел на устройствата, включени в дървото на отказите (*фиг. 6*).

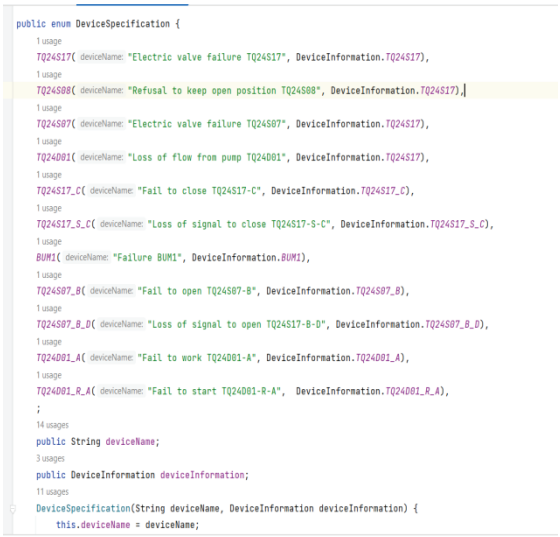
Фиг. 6. Елементи от контура за управление на енергийна централа

- **npp_fault_tree** – софтуерна реализация на дървото на отказите, получено от предварителен FTA анализ и предоставено [5]. Част от кода, разработен за конструиране на дърво на отказите, е даден на *фиг. 4*. На *фиг. 7* е показана имплементацията при моделирането на дървото на отказите и FaultEvent.
- **npp_cbr_system** – разработена е софтуерна система за определяне на най-близкия случай до текущото състояние и генериране на събитие (**CaseEvent**), което се наблюдава от дървото на отказите. Използван е алгоритъмът на най-близкия съсед. Текущата разработка не разглежда изграждането и начина на работа на CBR модула, а само отчита интеграцията и възможността на работа за дървото на отказите посредством събития, придобити от предходни режими и откази в системата. Част от системата за генериране на събитие за отказ на базата на случай е показана на *фиг. 5*.
- **npp_devices** – съдържа техническо описание на устройствата в контура за охлаждане, както и неговите характеристики.
- **npp_events_queue** – модулна софтуерна част, която следи и регистрира настъпило събитие на отказ в системата, независимо дали е регистрирано от устройства (липса на сигнал, повреда на попа, отказ на вентил и други) или е прогнозирано събитие за отказ, получено от системата за работа на базата на прецеденти (CBR).

Системата за генериране на прогнозно събитие за отказ е представена на *фиг. 9*, която съдържа модел на случай на отказ (Case) и предоставя възможност за извличане на подобен случай на отказ **(NearestCaseEvent)**, който се трансформира в предсказано събитие за отказ, подава се към модула за регистрация на откази **(npp_events_queue)** и се третира еднозначно с отказите, получени от устройствата в контура.



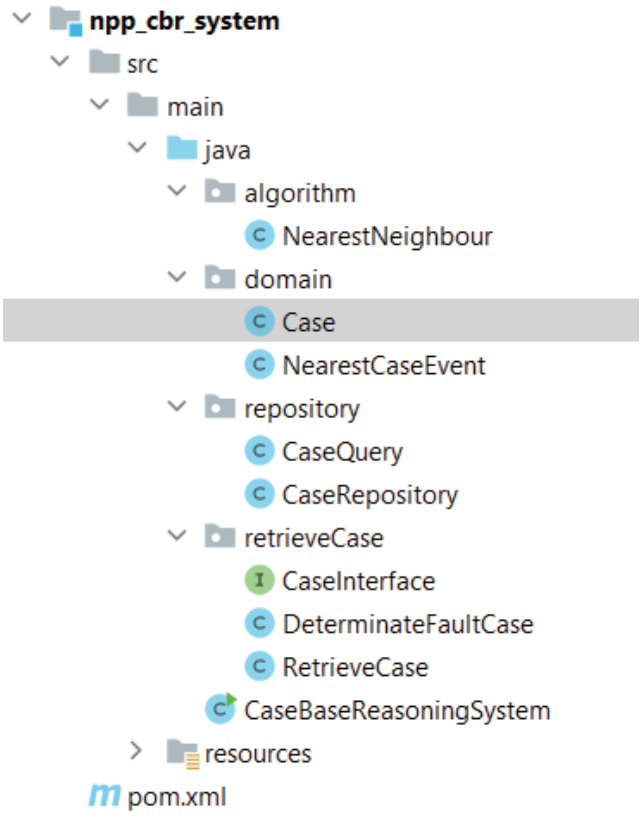
Фиг. 7. Изграждане на дърво на отказите



Фиг. 8. Елементите от дървото на отказите

Заключение

Разработена е система за определяне на риска в електроцентрали, която комбинира дърво на отказите със система за определяне на текущото и бъдещето състояние, използвайки предходен опит и знания за работа на контурите за управление. Представена е архитектура на система за предсказване на риска при повреди на управляващи устройства чрез изграждане на комбинирана система за предсказване на повреди на елементи от контурите за управление на енергийна централа **(Fault Control Device Prediction)**. Представени са съвместната работа на система, базирана на предходно знание и дърво на отказите (FTA), както и механизмът за генериране на специфично прогнозно системно събитие на повреда на управляващо устройство (помпа, вентил, сензор).



Фиг. 9. Система за прогнозиране на отказ (CBR)

Архитектурата на системата демонстрира възможността за използване на дърво на отказите в комбинация с технологично знание за устройствата. Разработката показва възможности за ранна диагностика и прогнозиране на откази на измервателни устройства, осигурявайки безопасността на електроцентралата и определяне на нивата на риск.

Литература

1. Corchado, E., J. Corchado, and A. Abraham (Eds). Innovations in Hybrid Intelligent Systems. Springer, 2007.

2. Prentzas, J., and Hantzilygeroudis. Categorizing Approaches Combining Rule-Based and Case-Based Reasoning. – *Expert Systems*, 24, 2007, No. 2.

3. Berka, P. NEST: A Compositional Approach of Rule-Based and Case-Based Reasoning. – *Advances in Artificial Intelligence*, 1, 2011.

4. Hadjiski, M. and V. Boishina. Hybrid Supervisory Control of Complex Systems Incorporating Case Based Reasoning. Proc. of the Int. Conf. on Complex Systems, COSY 2011, Ohrid, Macedonia, 2011, 179-186, Sofia, Bulgaria, 2012.

5. Internship Program in Kozloduy NPP. https://kznpp.org/.

6. Rausand, M. System Analysis Fault Tree Analysis, Marvin. Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications. https://lundteig.folk.ntnu.no/Presentations/SIS-book/chapt5-2-FTs.pdf.

7. A Case-Based Reasoning System for Fault Detection and Isolation: A Case Study on Complex Gearboxes Soumava Boral, Sanjay Kumar Chaturvedi, V.N.A. Naikan. – *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, January 2019, DOI: 10.1108/JQME-05-2018-0039.

8. Маринов, М., Т. Джамийков, Ф. Цербе, Т. Ташев. Изследване на точността на сензори за въглероден диоксид в системи за вентилация, управлявани според потребностите. – *Инженерни науки*, LII, 2015, 4, 15-27. Институт по металознание, съоръжения и технологии "Акад. А. Балевски" с Център по хидро- и аеродинамика, БАН, ISSN: 1312-5702.

За контакти:
Д-р инж. **Венелина Боишина**
venelin_b@yahoo.com
Миглена Шаркова
miglena.sharkova@yahoo.com
Химикотехнологичен и металургичен университет – София