УДК 519.23:519.24:621.365.7.014

ОПЕРАТИВНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАК СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТЬЮ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

Труфанов И.Д., д.т.н., проф., Лютый А.П., к.т.н., Рассальский А.Н., к.т.н, проф. Чумаков К.И., асп.
Запорожский национальный технический университет
69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64
E-mail: trufanov@zntu.edu.ua

На підставі екстремальності, наявності передісторії розвитку системи, випадковості виникнення катастроф й матеріальної та моральної шкоди в результаті реалізації технічної катастрофи, припинення функціонування складної системи в просторі і часі при статичному характері зовнішнього впливу на систему проводиться розробка і теоретичне обґрунтування математичних моделей відновлення працездатності системи та на їх базі розробка алгоритмів комп'ютерного управління технічною стійкістю складних електротехнічних систем в електрометалургії.

Ключові слова: екстремальність, катастрофа, модель, алгоритм.

On the basis of extremality, prehistory of system's development, randomness of catastrophes emergence, material and moral damage caused by the realization of technical catastrophe, cease of a complicated system existence in space and time with a static character of inner impact mathematic models of working capacity recovery development and theoretic justification is carried out. On its basis the algorithms of complicated electrotechnical and electrometallurgical technical durability computer control is developed.

Key words: extremality, catastrophe, model, algorithm.

Введение. Настоящий этап выполнения Энергетической программы Украины характеризуется рядом факторов нарушения взаимоотношений между организациями генерирования, передачи, перераспределения электроэнергии и субъектами хозяйствования, что является нарушением Правил пользования электрической энергией, утвержденных «Постановою НКРЕ від 31.07.96 р. №28 і зареєстрованих в Мінюсті України за №417/1442». Одним из таких факторов успешного выполнения Энергетической программы Украины является фактор развития работ по улучшению процессов технического обслуживания электрооборудования промышленных и агропромышленных предприятий, что предусмотрено „Розпорядженням президента України „Про розроблення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року та дальшу перспективу" від 27.02.2001 р. №42/2001", т.к. около 80 % энергетического оборудования энергопредприятий и промышленного комплекса состоит из морально и физически изношенного оборудования, эксплуатация которого требует, в отличие от нового оборудования, дополнительных экономических и физических затрат [1]. Отсутствие необходимых систем целенаправленного регулирования, обеспечивающих стабильную работу энергетического оборудования, в особенности мощного электротехнологического.

Анализ предыдущих исследований. Низкое качество эксплуатационно-технического обслуживания электрооборудования и другого энерготехнологического оборудования, качество его ремонта, режимы управления перераспределением электрической энергии по большим промышленным комплексам и распределительным сетям и системам и другие отклонения от оптимальных параметров и факторов режимных карт приводят к изменению цен на энергоносители, снижают эксплуатационную стойкость и срок службы, приводят к преждевременному выходу из строя. Согласно ГИД34.01.01-2003 необходимо выполнение правил технической эксплуатации, не приводящей к техническим катастрофам.

На базе указанных факторов эффективности динамических параметров технической эксплуатации сложных электротехнических систем и электротехнологических комплексов, в математической теории катастроф принимаемых за их характерные признаки, проводится разработка теоретической базы процессов восстановления.

Цель работы - разработка научных основ создания автоматизированной компьютерной системы управления технической стойкостью сложных электротехнических систем и электротехнологических комбинированных комплексов с использованием альтернативных энергетических первичных и вторичных ресурсов.

Материал и результаты исследований. Системотехнической базой проведения таких исследований является законодательная база в области энергосбережения [1]. Научно-методологической базой – результаты исследований в области повышения эффективности электроснабжения электропечей [3]. В качестве математического обеспечения используется современный математический аппарат математического моделирования стохастических систем [2], нечетких множеств в моделях управления и искусственного интеллекта [4], методологии машинного моделирования [5] и др.

В качестве характерных признаков технических катастроф принимаются их наиболее значимые: 1) экстремальность (критичность, крайность, предельность) катастрофического состояния системы; 2) наличие предыстории развития системы в условиях, при которых катастрофа неизбежна; 3) случайность возникновения катастроф; 4) возникновение существенного материального и морального ущерба в результате реализации катастрофы; 5) прекращение функционирования системы в пространстве и времени, что эквивалентно выходу из строя, требующему практически полного восстановления работоспособности всех основных узлов и элементов; 6) наличие определенных внешних воздействий на систему; 7) неизбежность, и, как правило, малая предсказуемость возникновения катастрофы.

На базе указанных факторов разрабатывается теоретическая база восстановления работоспособности, как системотехнического алгоритма динамического функционирования сложной электротехнической системы и электротехнологического комплекса.

В соответствии с [2] такие процессы обладают зависимыми интервалами между событиями (длинами интервалов) второго порядка [2] для последовательности интервалов и соответствующего целочисленного процесса.

В общем случае теория таких процессов базируется на теории Марковских процессов интервалов Вильда, на базе которой разрабатывается функция правдоподобия для последовательности интервалов, и, таким образом, получаем возможность построения теории оценивания параметров и проверки гипотез с помощью метода максимального правдоподобия для больших выборок случайных последовательностей событий.

Основой теоретической оценки параметров процесса является предпосылка оценки по безусловному распределению длин интервалов $\{X_i\}$ и спектральной плотности целочисленного процесса $g_+(\omega)$, поэтому адекватность модели проверяется путем сравнения наблюдаемой спектральной плотности интервалов с ее оценкой $\tilde{f}_+(\omega)$ Бартлетта или Феллера [2], где интенсивность наступления событий является функцией времени $\lambda(t)$. Такой пуассоновский процесс с детерминистски изменяющейся интенсивностью наступления событий наиболее эффективен при регрессионном анализе трендов, как определяющих факторов технических катастроф. В реальной практике эксплуатации электротехнических систем функция $\lambda(t)$ является реализацией стационарного случайного процесса $\{\Lambda[\lambda(t)]\}$ с непрерывным временем. Данная методология введена в исследования процессов со случайной интенсивностью Д. Коксом. Такая последовательность на практике может быть неоднородной в течение периодов S_1, S_2,... обработки последовательности событий функция $\lambda(t)$ принимает постоянные значения λ_1, λ_2,..., образующие случайную выборку из некоторой совокупности.

Если $\lambda(t)$ является реализацией стационарного случайного процесса со средним значением $\bar{\lambda}$, дисперсией σ_λ^2 и автокорреляционной функцией $\rho(\tau)$, то соответствующий целочисленный процесс событий N_t будет также стационарным и для всех реализаций $\lambda(t)$ процесса $\{\Lambda(t)\}$ будет иметь место:

$$E\{N_t \mid \lambda(U), 0 \le U \le t\} = \int_0^t \lambda(U)dU;$$

$$E\{N_t\} = E_{\Lambda(t)}\left[E\{N_t \mid \lambda(U), 0 \le U \le t\}\right] = \qquad (1)$$

$$= E_{\Lambda(t)}\left\{\int_0^t \lambda(U)dU\right\} = \bar{\lambda}t,$$

где $E\{\bullet\}$ - оператор математического ожидания.

Для заданной конкретной реализации $\lambda(t)$, согласно выражению оценки ковариации процесса приращения, при $\tau > 0$ [2] будем иметь:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{E(\Delta N_t \Delta N_{t+\tau})}{(\Delta t)^2} = \lambda(t)\lambda(t+\tau). \qquad (2)$$

При взятии математического ожидания по всем реализациям процесса $\{\Lambda(t)\}$, согласно определению автокорреляционной функции $\rho(\tau)$, и плотности ковариации процесса приращений, будем иметь:

$$\gamma_+(t) = \sigma_\lambda^2 \rho(t), \qquad (3)$$

а для индекса дисперсии этой функции имеем:

$$I(t) = 1 + \frac{2\sigma_\lambda^2}{\lambda t}\int_0^t (t-U)\rho(U)dU. \qquad (4)$$

Практически функция $\lambda(t)$ для электротехнических систем характеризуется большой величиной дисперсии очень далеких членов, для которых по Тауберу $\rho(U) = 0\left(U^{-\alpha}\right)$, $0 < \alpha < 1$, т.к. (4) может не выполняться, в этом случае $I(x) \approx kx^{1-\alpha}$.

На практике эксплуатации электротехнических комплексов электрометаллургии значение проблемных задач теории восстановления параметрами вышеприведенной модели (4) являются: 1) идентификация функций надежности, функций распределения времени рабочего цикла на основе статистических данных; 2) прогностическая идентификация параметров функции надежности, функции аварийного восстановления на основе информации о предполагаемых режимах функционирования системы и технической модернизации отдельных агрегатов системы и технологических схем функционирования; 3) характеризация класса функций восстановления для различных моделей теории восстановления; 4) алгоритмизация решения интегрального уравнения восстановления; 5) идентификация функций восстановления непосредственно на основе статистических данных; 6) синтез оптимизационных математических моделей функционирования восстанавливаемых систем, адекватных выбранным критериям оптимизации и реальным условиям функционирования; 7) компьютеризация решения задач оптимизации, возникающих в теории восстановления; 8) исследование сложности и трудоемкости задач устойчивости оптимальных решений; 9) компьютинг расчета производственно-экономических, технических, надежностных, диагностических и др. характеристик восстанавливаемых систем.

Исходя из изложенных соображений, имеем последовательные рабочие периоды S_1, S_2,.., которые имеют фиксированную, но неизвестную величину S, для практики имеем, что $\rho(U) = \max(1-|U|/S, 0)$, т.е.:

$$I(\infty) = 1 + S\sigma_\lambda^2 / \lambda;$$

$$g_+(\omega) = \frac{1}{\pi}\left[\bar{\lambda} + 2\sigma_\lambda^2 \cdot \frac{1-\cos(\omega S)}{S\omega^2}\right].$$

Для реального случая $U_t = \int_0^t \lambda(t)dt$ является реализацией однородного во времени процесса U_t; функция $F(U,t)$ будет являться функцией распределения величины U_t и при ее заданной величине процесса U_t будем иметь $\varphi(\xi;t\,|\,U_t) = \exp[(\xi-1)U_t]$, а ее безусловная производящая функция имеет вид:

$$\varphi(\xi;t) = \int_{U=-\infty}^{U=+\infty} \exp[(\xi-1)U]dF(U;t), \qquad (5)$$

т.е. это выражение отражает выражение характеристики функции процесса U_t со значением аргумента $i(1-\xi)$ [4], но, к сожалению, уравнение (5) не учитывает флуктуаций наступления событий, поэтому, предполагая, что $\{\Lambda_t\}$ является стационарным процессом скорости изменения характерных процессов со случайной интенсивностью по алгоритму Орнштейна-Уленбека [5], для процесса Λ_t при любом значении времени t будет иметь место $E(\Lambda_t) = \bar{\lambda}$; $\sigma^2(\Lambda_t) = \sigma_\lambda^2$. Если рассматривать процесс в два момента времени, то Λ_t и $\Lambda_{t+\tau}$ будут иметь двумерное нормальное распределение с параметрами (с коэффициентом корреляции): $\operatorname{corr}(\Lambda_t, \Lambda_{t+\tau}) = \rho(\tau) = \exp(-\beta\tau)$; $(\beta > 0,\ \tau \geq 0)$.

Для рассматриваемых ситуаций (простой модели) накопленный процесс U_t будет нормальным со средним значением $\bar{\lambda}t$ и дисперсией $\sigma_t^2(U_t) = 2\sigma_\lambda^2 \frac{\exp(-\beta t) - 1 + \beta t}{\beta^2}$, поэтому равенство (5) примет вид:

$$\varphi(\xi;t) = \exp\left\{\begin{aligned}&(\xi-1)\bar{\lambda}t + (\xi-1)^2 \cdot \\ &\cdot \frac{\sigma_\lambda^2}{\beta^2}[\exp(-\beta t) - 1 + \beta t]\end{aligned}\right\}, \qquad (6)$$

полагая $\xi = 0$, дифференцируя относительно t и изменяя знак, будем иметь для пуассоновской реализации прямого времени возвращения исходного состояния выражение:

$$f_w(t) = \left(\bar{\lambda} + \frac{\sigma_\lambda^2}{\beta}\exp(-\beta t) - \frac{\sigma_\lambda^2}{\beta}\right) \cdot$$

$$\cdot \exp\left\{-\bar{\lambda}t + \frac{\sigma_\lambda^2}{\beta^2}[\exp(-\beta t) - 1 + \beta t]\right\}.$$

Для соответствия этого выражения выражению плотности распределения должно быть выполнено условие $\bar{\lambda} \geq \sigma_\lambda^2 / \beta$, т.е. это условие необходимо и достаточно для того, чтобы функция, определяемая по (6), была для всех t производящей функцией случайной величины, принимающей неотрицательные целочисленные значения.

Для случая, когда $\lambda(t)$ является кусочно-постоянной функцией, принимающей два значения λ_1, λ_2, определяемые альтернирующим процессом восстановления, может быть использована модель Gavera D.P. на основе преобразования Лапласа [2] распределения интервалов времени между событиями.

Для практики эксплуатации электротехнических комплексов электрооборудования при использовании модели (6) принимается критериальная (целевая) функция, выражающая средний суммарный доход с учетом потерь продукции из-за простоя производства, затрат на ликвидацию аварий и затрат на планово-профилактические ремонты.

Для разработки практических алгоритмов динамического функционирования систем компьютерного управления технической стойкостью сложных электротехнических систем электротехнологических комплексов электрометаллургии (электросталеплавления, в частности) принимаются системообразующие факторы (статические параметры): 1) C_{ci} - стоимость произведенной продукции (стали) на печном агрегате «i» (i=1,2,…,n) за единицу времени Δt; C_{ai} - стоимость аварийного ремонта электротехнического комплекса «*i*» за единицу времени Δt; 3) $C_{\Pi i}$ - стоимость профилактического ремонта комплекса «i» за единицу времени Δt; 4) $N_H(t)$ - число всех аварийных проявлений на комплексе за интервал времени [0,t); 5) $N_B(t)$ - число всех восстановительных операций за интервал времени [0,t]; 6) T_{Hij} - продолжительность работы i-ой машины или печного агрегата в рабочем цикле j; 7) T_{Bij} - продолжительность восстановительной операции i-ой машины или печного агрегата в рабочем цикле j; 8) τ_{ik} - продолжительность профилактической операции (процесса) с номером k агрегата i; 9) m_i - число нормированных профилактических операций агрегата i на интервале времени [0,T]; 10) t_{ik} - время начала профилактической операции с номером k агрегата i.

В первом приближении принимается, что стоимости C_{ci}, C_{ai}, $C_{\Pi i}$ являются постоянными величинами для каждого агрегата; величины $N_H(t)$, $N_B(t)$, T_{Hij}, T_{Bij} являются случайными величинами, а величины τ_{ik}, m_i, t_{ik} - детерминированными неизвестными величинами, подлежащими определению в процессе планирования планово-профилактических работ.

Доход предприятия $G(t)$ за период [0,t] является для каждого фиксированного $\Delta t \geq 0$ случайной величиной, равной сумме доходов (или убытков) $G_i(t)$ от каждого агрегата i, т.е.

$$G(t) = \sum_{i=1}^{n} G_i(t), \qquad (7)$$

где величины $G_i(t)$ зависят от заданных постоянных величин C_{ci}, C_{ai}, $C_{\Pi i}$, случайных величин $N_H(t)$, $N_B(t)$, T_{Hij}, T_{Bij}, выбранных плановых величин τ_{ik}, m_i, t_{ik}.

При обосновании параметров закона управления n=1 (индекс i опускается) принимается план $(m, \tau_1, \tau_2, ..., \tau_m, t_1, t_2, ..., t_m)$, при этом $\tau_1, \tau_2, ..., \tau_m, t_1, t_2, ..., t_m$ должны выбираться так, чтобы были выполнены неравенства:

а) $0 < t_1 < t_2 < ... < t_m < T$;

б) $\sum_{k=1}^{m} \tau_k < T$; $\tau_k > 0$;

в) $t_k + \tau_k < t_{k+1}, \forall(k = 1, 2, ..., m)$, при

$$k = 0, t_0 = 0, \tau_0 = 0, \qquad (8)$$

где условие а) определяет порядок начала профилактических процедур; условие б) означает естественное требование, чтобы суммарное время всех профилактик было меньше всего периода планирования, так как рассмотрение других вариантов не имеет экономического эффекта (доход получится отрицательный).

Время между двумя профилактическими процедурами составит величину (при этом $T_k = t_{k+1} - t_k - \tau_k = 1, 2, ..., m$):

$$T_k = \sum_{j=1}^{N_{HK}} T_{HKj} + \sum_{j=1}^{N_{BK}} T_{BKj}, \qquad (9)$$

где N_{HK} - число всех производительных участков времени за период k; N_{BK} - число всех восстановительных процедур за период k; T_{HKj}, T_{BKj} - соответствующие отрезки длительности времени.

Доход от работы печных агрегатов в производственном цехе с номером k составит:

$$G_k = \sum_{j=1}^{N_{HK}} C_{C1} T_{HKj} - \sum_{j=1}^{N_{BK}} CaiT_{BKj}, \qquad (10)$$

после применения тождества Вальда [5] к (10) получим:

$$M[G_k] = C_C M[N_{HK}] M[T_{HK}] - C_a M[T_{BK}] M[N_{BK}].$$

При $M[N_{HK}] \approx M[N_{BK}] = B(t_{k+1} - t_k - \tau_k)$ ($B(x)$ - функция восстановления для случайной величины $T_{HK} + T_{BK}$), $M[T_{HK}] = T_H$; $M[T_{BK}] = T_B$ получим:

$$M[G_K] = (C_C T_H - C_a T_B) B(t_{k+1} - t_k - \tau_k),$$

$k = 1, 2, ..., m$.

Суммарный расход R на профилактические работы: $R = \sum_{k=1}^{m} \tau_k (C_C + C_\Pi)$.

С учетом всех затрат и потерь на отрезке времени $t = [0, T]$ будем иметь:

$$M[G] = \sum_{k=1}^{m} (C_C T_H - C_a T_B) \cdot B(t_{k+1} - t_k - \tau_k) - \\ - \sum_{k=1}^{m} (C_C + C_\Pi). \qquad (11)$$

Чтобы получить средний суммарный доход для систем из n агрегатов, необходимо просуммировать величины $M[G_i]$ и вычесть затраты и потери на остановку машин для профилактики, т.е. $M[G] = \sum_{i=1}^{n} M[G_i] - \sum_{i=1}^{n} R_i$, откуда получим:

$$M[G] = \sum_{i=1}^{n} \left[\sum_{k=1}^{m} \left((C_{Ci} T_{Hi} - C_{ai} T_{Bi}) \cdot \right.\right. \\ \left.\left. \cdot B(t_{t+1} - t_{ki} - \tau_{ki}) \right) - \sum_{k=1}^{m_i} \tau_{ki} (C_{Ci} + C_{\Pi i}) \right] \qquad (12)$$

Функция (12) является целевой функцией, при помощи которой формулируется задача выбора оптимального плана восстановления работоспособности и управления технической стойкостью сложной системы, обеспечивающего максимум среднего дохода предприятия.

Выводы. Из условия возможного возникновения катастрофического состояния сложной электротехнической системы, применительно к структуре электросталеплавильного производства, получены математические модели процедур восстановления работоспособности как параметры управления технической стойкостью сложных электротехнологических комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Збірник основних нормативно-правових актів, які визначають функції Урядового органу державного управління – Державної інспекції з енергозбереження. – Київ, 2007. – 1193 с.
2. Чернецкий В.И. Математическое моделирование стохастических систем. – Петрозаводск: Петрозаводский гос. ун-т, 1994. – 488 с.
3. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Повышение эффективности электроснабжения электропечей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др.; Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
5. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

Стаття надійшла 8.04.2008 р.