

І.А. КОТОВ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІЙ НАДІЙНОСТІ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО ПЕРСОНАЛУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ

Метою статті є виклад результатів дослідження показників надійності роботи оперативно-диспетчерського персоналу (ОДП) енергосистеми при ліквідації аварійних ситуацій. Розглядаються варіанти ліквідації аварії стандартною зміною ОДП і зміною, що використовує засоби інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СППР). Для оцінки ступеня впливу системи підтримки рішень на надійність ОДП прийнята модель розподілу надійності по етапах операцій ліквідації аварії. Доведено, що використання СППР забезпечує додатковий запас надійності ОДП з урахуванням втоми.

Методи дослідження полягають у використанні методів теорії надійності, теорії множин, математичної логіки, теорії автоматів, електроенергетичних систем (ЕЕС), теорії графів, математичної статистики. Прийнято, що відмови в диспетчера є сукупністю закономірних і випадкових відмов. Інтенсивність відмов диспетчерської вахти вважається постійною, потік відмов має розподіл Пуассона, а функція надійності підпорядковується експоненціальному закону.

Наукова новизна полягає в новій моделі оцінки економічної ефективності СППР в аварійних режимах експлуатації енергосистеми. Розроблена СППР показала переваги перед аналогами по визначальним критеріям. Розроблено методику і зроблено оцінку надійності диспетчерської вахти в аварійному режимі. Проведена кількісна оцінка ефекту підвищення надійності ОДП від використання СППР при ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС.

Практична значимість роботи полягає в удосконаленні автоматизації управління режимами енергосистеми шляхом впровадження в середу оперативного інформаційно-управляючого комплексу (ОІУК) системи підтримки прийняття рішень. Це забезпечує запас надійності ОДП, який виражається як різниця між контрольним значенням коефіцієнта надійності і практичним значенням надійності при використанні СППР з урахуванням втоми.

Результатами роботи є модель оцінки надійності диспетчерської вахти в аварійному режимі, яка включає в себе розподіл видів надійності по частковим операціям при ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС, модель стомлюваності, яка підпорядковується експоненціальному закону. Результат використання СППР при ліквідації аварії може бути оцінений як приріст додаткового часу безперервної експлуатації ОДП при надійній ліквідації аварійної ситуації. Приведена графічна інтерпретація розподілу функції надійності ОДП для оцінки ефективності використання СППР.

Ключові слова: енергосистема, надійність, аварійна ситуація, коефіцієнт готовності, логістична функція, інтенсивність відмов.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-51-46-52

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Ефективність комплексу СППР і ОДП характеризується ступенем підвищення надійності ОДП при спільній роботі з СППР. В [1] зазначено, що «кількісна оцінка ризику аварій з вини персоналу утруднена невизначеністю характеристик надійності персоналу, а множинні помилки практично не піддаються аналізу». Однак, можна вважати, що ефект підвищення надійності виникає від розпаралелювання інформаційних потоків між ОДП і СППР, внаслідок чого знижується психофізіологічне навантаження на диспетчера і, тим самим, підвищується надійність його рішень і дій [2]. Тому в якості загальної оцінки підвищення ступеня надійності ОДП від впровадження та використання СППР в аварійних режимах будемо розглядати збільшення середнього періоду безвідмовної роботи диспетчерської вахти.

Аналіз досліджень і публікацій. Прийmemo, що відмови в роботі диспетчера є сукупністю закономірних і випадкових відмов. Інтенсивність відмов диспетчерської вахти може вважатися постійною, потік відмов має розподіл Пуассона, а функція надійності підпорядковується експоненціальним законом [3, 4].

Реалізуємо наступну схему випробування на надійність диспетчерської вахти – $[N, B, T]$, де N – кількість випробовуваних елементів (диспетчерських вахт), B – умова, при якій елемент, що відмовив, – диспетчерська вахта, негайно замінюється новою, T – час, протягом якого ведуться спостереження (випробування).

Диспетчерська вахта може вважатися високонадійним елементом, тому $\lambda T \ll 1$, де λ – інтенсивність відмов, рік⁻¹, T – час спостереження, рік. Тоді умовну щільність розподілу моментів відмов можна прийняти як щільність рівномірного розподілу

$$\frac{\lambda e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda T}} \quad (1)$$

Інтенсивність відмов (небезпека відмов [4]) диспетчерської вахти енергосистеми визначається як

$$\lambda = \frac{r(T)}{N \cdot T}, \quad (2)$$

де $r(T)$ – кількість відмов, що відбулися за період T .

При допущенні постійної інтенсивності відмов ОДП функція надійності буде підкорятися експоненціальному закону

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Кваліфікації диспетчерів зміни вважаються однаковими: $\lambda_1 = \lambda_2$.

На основі прийнятого інструментарію оброблений великий фактологічний масив експериментальних даних [2, 3, 5 – 10]. Фактичні дані про надійність дій ОДП в стресових аварійних ситуаціях отримані методом спостережень і хронометражу, частково – за допомогою електроенцефалографічних досліджень і характеризують ризики прийняття диспетчерських рішень в умовах невизначеності [2].

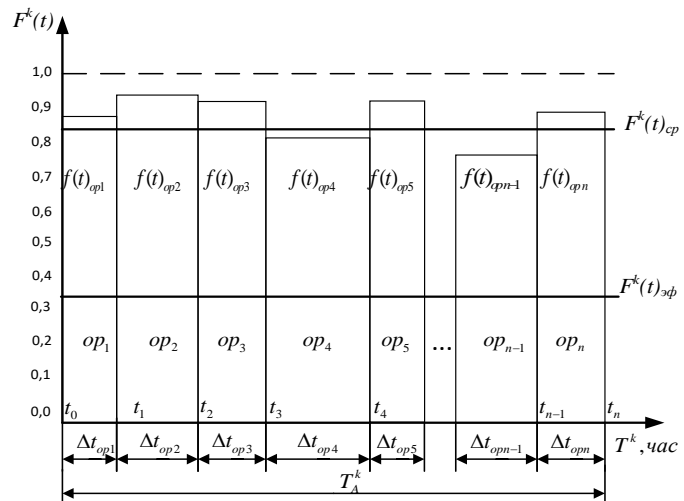
Постановка завдання. На основі фактичних даних зробимо оцінку надійності диспетчерської вахти в аварійному режимі. Під надійністю в аварійному режимі будемо розуміти надійність ОДП при ліквідації конкретної аварії в конкретних технологічних умовах при часових і психофізіологічних обмеженнях. Виходячи з цього, модель оцінки надійності ОДП повинна розглядати відмови ОДП в проміжок часу розвитку і ліквідації однієї аварії. Час обслуговування аварії складається з періодів ліквідації окремих аварійних етапів, а підсумкова надійність є результат комплексування часткових показників надійності обробки зазначених аварійних етапів. Кожен етап характеризується глибиною і масштабом аварійних збурень, часом проходження інформації і реалізованих рішень, кваліфікацією ОДП. Графічна ілюстрація використовуваної моделі оцінки надійності ОДП при ліквідації аварійної ситуації k -ого типу зображена на рис. 1.

Рис. 1. Модель розподілу надійності по етапах операцій ліквідації аварії k -го типу

Викладення матеріалу та результати. Для чисельного моделювання та аналізу надійності дій ОДП розглянута аварійна ситуація зниження частоти в енергосистемі і дії оперативного персоналу при зниженні частоти [11]. Згідно [12], діяльність диспетчера може бути представлена як композиція типових дій (операцій), що характеризуються індивідуальною надійністю і часом виконання. Тому, на основі аналізу змісту дій ОДП при ліквідації аварії виявлені типові диспетчерські операції (реакції) і відповідні їм величини надійності [13 – 15]. Кожну операцію по ліквідації аварійної ситуації зниження частоти в енергосистемі, регламентовану інструкцією ОДС-8 з попередження і ліквідації технологічних порушень в електричній частині електростанцій, підстанцій і електричних мереж, представимо у вигляді комбінації елементарних дій. Дані про кодування інструктивних операцій наведені в табл. 1.

Подамо інструктивні операції ОДП з табл. 1 у вигляді комбінації надійності типових дій, запропонованих А.І. Губинським [13], і визначимо показники програмної – F_β , часової – F_θ і параметричної – F_δ надійності ОДП, які наведені в [13, 16]. Для наведеної моделі очевидні наступні показники [16].

Загальний час ліквідації аварії k -го типу.



Зміст операцій зміни ДД ОДС по ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС – зниження частоти

Зміст операції
Отримавши команду, на відключення споживачів по ГАВ, СпецГАВ або ГПО ДД ОДС дає розпорядження підпорядкованому оперативному персоналу на відключення споживачів за графіками
Очікування дій підлеглого оперативного персоналу по запису величин навантаження і відключення приєднань
Прийом повідомлень від підлеглого оперативного персоналу про відключення приєднань
Прийом доповіді від підлеглого оперативного персоналу про спрацювання пристроїв АЧР із зазначенням величини відключеною навантаження
Повідомлення про причини введення графіків ДД ОДГ, про введення графіків і причини введення, про відключення споживачів від АЧР технічного керівника
Контроль заборони ручного включення приєднань, відключених від дії АЧР без дозволу ДД ОЕС і ОДС
Контроль запасів палива і гідроресурсів з метою недопущення розвалу ОЕС України
Контроль масового спрацювання пристроїв АЧР. Допускаються багаторазові відключення одних і тих же приєднань по ГАВ, СГАВ з проміжком між відключенням 1-2 години
Перевірка відключення споживачів від спецчерги АЧР і зависання частоти на рівні 49,0 Гц
Заміна обсягу спецчереди АЧР відключенням і обмеженням споживачів за графіками обмежень та відключень, не допускаючи перерви харчування цих споживачів більш ніж на 2 години
Контроль включення приєднань, відключених від АЧР
Контроль випадків відключення по ГАВ, СГАВ і ГПО тільки частини ліній, які живлять одного споживача. ДЕМ ПС повинні зафіксувати навантаження всіх ліній, які живлять даного Споживача
Контроль навантаження ліній, які залишилися в роботі. Отримання доповідей про збільшення навантаження цих ліній
Контроль не зниження навантаження Споживача протягом 10 хвилин
Розпорядження відключити інші приєднання, що живлять даного споживача

$$T_A^k = \sum_{i=1}^n \Delta t_{opi}, \tag{4}$$

де Δt_{opi} – проміжок часу для виконання однієї i -ої часткової операції.

Середня надійність ОДП при ліквідації аварії k -го типу.

$$F^k(t)_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{opi} f(t)_{opi}}{T_A^k}, \tag{5}$$

де $f(t)_{opi}$ – надійність ОДП при виконанні однієї i -ої часткової операції.

Ефективна результуюча надійність при ліквідації аварії k -го типу

$$F^k(t)_{эф} = \prod_{i=1}^n f(t)_{opi} = (F^k(t)_{cp})^n. \tag{6}$$

На підставі отриманих в дослідженні даних отримаємо такі графічні інтерпретації розподілу видів надійності по частковим операціям при ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС – зниження частоти, наведені на рис. 2.

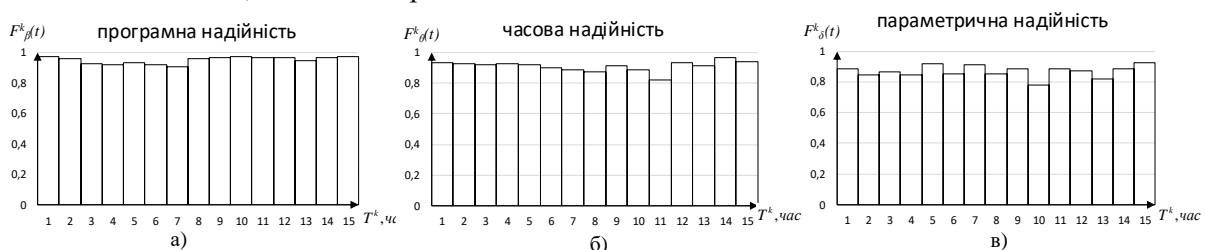


Рис. 2. Розподіл видів надійності по частковим операціям при ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС: а – розподіл програмної надійності; б – розподіл часової надійності; в – розподіл параметричної надійності

Беручи отримані дані в якості вхідних, визначимо ефект підвищення надійності ОДП від використання СППР при ліквідації аварійного порушення режиму ЕЕС – зниження частоти. Для співвіднесення з теоретичними даними інтерпретуємо надійність ОДП як його коефіцієнт готовності (K_g) в конкретні моменти часу [17]. В якості умов, зазначених в [17, 18], приймемо наступний набір значень параметрів, наведених в табл. 2.

Крім того, врахуємо, що при оцінці розглядаються закономірні і випадкові відмови диспетчерів, а в кінці періоду $t_{Аср}^k$ показники надійності диспетчерів знижуються в основному за рахунок випадкових відмов [3]. Оцінка надійності проведена для умов безперервної роботи

однієї і тієї ж зміни ОДП протягом 2 років. В якості проміжний контрольної точки настання аварії обраний період – 1 рік [17].

Таблиця 2

Вихідні умови оцінки підвищення надійності ОДП від використання СППР

Характеристика умови	Позначення	Значення
Середній період настання аварійної ситуації k -ого типу	$t_{\text{Авр}}^k$	24 міс
Інтенсивність забування оперативної одиниці діяльності	λ_0	0,20 міс ⁻¹
Середній час підтримування знань	$T_{0\text{зн}}$	5 міс
Інтенсивність відновлення знань	μ_1	0,5 г ⁻¹
Середній час відновлення знань	$T_{\text{в}}$	2 г
Інтенсивність забування після відновлення	λ_1	0,1 міс ⁻¹
Контрольний термін відліку коефіцієнта готовності	t_c	12 міс
Контрольне значення коефіцієнта готовності ОДП за 1 рік	K_T	0,68
Шкала рівня підготовки ОДП	θ	0 – 10
Шкала рівня складності завдання - ліквідації аварії	β	0 – 10

З огляду на те, що функція надійності ОДП з урахуванням стомлюваності, підпорядковується експоненціальному закону, використовуємо дані та методу обробки експериментальних результатів хронометражу і випробувань ОДП з [10, 19]. В якості базисного підходу використана теорія – Item Response Theory (IRT), призначена для оцінки латентних параметрів випробовуваних за допомогою застосування математико-статистичних моделей вимірювання [20]. Застосовані логістичні функції – Item Response Function (IRF) – $P(\theta)$ і $P(\beta)$, які реалізують однопараметричну модель Г.Раша і оцінюють співвідношення між складністю завдання, і рівнем його підготовки [20, 21]

$$P_j(\theta) = \frac{e^{1.7(\theta - \beta_j)}}{1 + e^{1.7(\theta - \beta_j)}}, \quad (7)$$

$$P_i(\beta) = \frac{e^{1.7(\theta_i - \beta)}}{1 + e^{1.7(\theta_i - \beta)}}, \quad (8)$$

$$\beta_j = \ln \frac{q_j}{p_j}, \quad \theta_i = \ln \frac{p_i}{q_i}. \quad (9)$$

Результати випробувань ОДП і обробки даних для прийнятих умов наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри функції надійності ОДП з використанням СППР в контрольній точці часового періоду

Параметри	Без СППР		З СППР	
	без стомлення	з втомою	без стомлення	з втомою
R	0,65492	0,45012	0,99399	0,82214
λ	-0,42324	-0,79824	-0,00603	-0,19584

На основі параметрів функції надійності $R(t)$ ОДП знайдемо розподіл її значень за досліджуваний період – 2 роки. Побудуємо графічну інтерпретацію розподілу функції надійності ОДП, яка приведена на рис. 3.

Величина коефіцієнта готовності $K_T(t)$ оцінювалася згідно [17]

$$K_T(t) = \left(1 + \frac{\lambda_0 \mu_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\mu_1 - \lambda_0)} \right) e^{-\lambda_0 t} + \frac{\lambda_0 \mu_1}{(\lambda_0 - \lambda_1)(\mu_1 - \lambda_0)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_0 \mu_1}{(\lambda_0 - \mu_1)(\lambda_1 - \mu_1)} e^{-\mu_1 t}. \quad (10)$$

Для періоду 1 рік отримаємо $K_T(t) = 0,68$; а для періоду 2 роки – $K_T(t) = 0,4624$.

На рис. 3 цифрами позначені наступні графіки:

- 1 – функція надійності для випадку «без СППР, без втоми»;
- 2 – функція надійності для випадку «без СППР, з втомою»;
- 3 – функція надійності для випадку «з СППР, без втоми»;
- 4 – функція надійності для випадку «з СППР, з втомою».

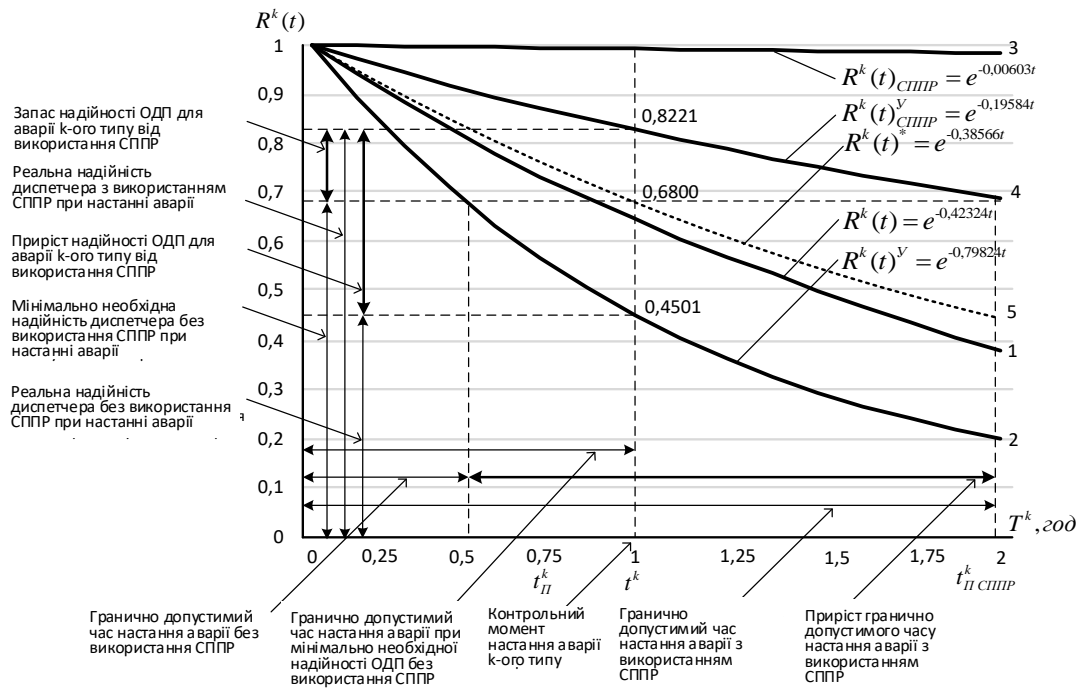


Рис. 3. Графічна інтерпретація розподілу функцій надійності ОДП для оцінки ефективності використання СППР

Як видно з наведених графіків, для контрольного терміну тестування – 12 міс коефіцієнт готовності оперативного персоналу складає 0,6800. Практичні результати тестування ОДП дають результат – 0,6549 (без використання СППР і без втоми, тобто, – без урахування випадкових відмов). При урахуванні чинника втоми (додатковому урахуванні впливу випадкових відмов ОДП) без використання СППР надійність становить – 0,4501. Застосування СППР при ліквідації аварії підвищує надійність ОДП. У випадку з СППР без урахування стомлення результуюча надійність складе – 0,9940. При урахуванні втоми (випадкових відмов ОДП) результуюча надійність дорівнює – 0,8221.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, використання СППР забезпечує запас надійності ОДП при ліквідації аварії, який виражається як різниця між контрольним значенням коефіцієнта надійності і практичним значенням надійності з використанням СППР з урахуванням втоми. Для періоду – 12 міс запас надійності становить: $0,8221 - 0,68 = 0,1421$. При збільшенні періоду безперервної роботи ОДП запас надійності зростає. Практичний приріст надійності ОДП від використання СППР при ліквідації аварії k -ого типу виражається як різниця між надійністю ОДП з урахуванням втоми без використання СППР і надійністю ОДП з урахуванням втоми з використанням СППР і становить: $0,8221 - 0,4501 = 0,3720$ (тобто, підвищується на 37,2%). Причому, при настанні аварійної ситуації через 2 роки безперервної роботи ОДП використання СППР дає ще більший ефект і приріст надійності, рівний: $0,675916 - 0,20260 = 0,473316$ (47,3%).

Крім цього, ефект використання СППР при ліквідації аварії може бути оцінений як приріст додаткового часу безперервної експлуатації ОДП при надійній ліквідації аварійної ситуації. При цьому необхідним рівнем надійності будемо вважати контрольний коефіцієнт готовності – 0,6800. З графіка видно, що гранично допустимий час безперервної експлуатації ОДП до настання аварії без використання СППР складає близько 0,5 року (6 міс). Контрольний час (при забезпеченні мінімально необхідної надійності ОДП – 0,6800) для цих же умов становить – 1 рік (12 міс). При використанні СППР гранично допустимий час безперервної експлуатації ОДП до настання аварії при її надійній ліквідації становить близько 2 років (24 міс). Таким чином застосування СППР забезпечує наступний приріст гранично допустимого часу безперервної експлуатації ОДП при надійній ліквідації аварії: $2 - 0,5 = 1,5$ року (18 міс).

Напрямок подальших досліджень полягає в удосконаленні моделей врахування впливу використання програмних засобів автоматизації прийняття рішень і моделей надійності при втомі оперативного персоналу енергосистем.

Список літератури

1. **Будовский В.П.** Методология оценки риска диспетчерского управления в условиях дефицита мощности энергосистемы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Будовский Валерий Павлович; [место защиты: Сев.-Кавказ. гос. техн. ун-т] – Ставрополь, 2011. – 274 с.
2. **Єна Т.А., Кальниш В.В., Кудієвський Я.В.** Гігієнічна і психофізіологічна оцінка професійної діяльності диспетчерів енергосистем при аварійній ситуації // Т.А. Єна, В.В. Кальниш, Я.В. Кудієвський – Київ: Український журнал з проблем медицини праці – №1(17) – 2009 – С. 42 – 48
3. **Меркурьев Г.В.** Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами: учебное пособие. - СПб.: Центр подготовки кадров энергетики (ЦПКЭ) – 2002 – 117 с.
4. **Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.** Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев – М.: «Наука». Глав. ред. физ.-мат. лит. – 1965 – 524 с.
5. **Єна Т.А.** Професійно важливі якості диспетчерів енергосистем // Т.А. Єна – Київ: Український журнал з проблем медицини праці – №4(24) – 2010 – С. 11 – 20
6. **Лавров Е.А., Пасько Н.Б.** Подход к формализованному описанию дискретной деятельности в системах "человек-техника-среда" / Е.А. Лавров, Н.Б. Пасько // Вісник Сумського державного університету. Сер.: Технічні науки № 3 – 2012 – С. 55 – 67.
7. **Мясоедов Ю.В., Мясоедова Л.А., Подгурская И.Г.** Диспетчерское и технологическое управление: / Ю.В. Мясоедов, Л.А. Мясоедова, И.Г. Подгурская – АмГУ: Благовещенск. Изд-во Амур. гос. ун-та – 2014 – 94 с.
8. **Бобко Н.А.** Влияние утомления на функционирование сердечно-сосудистой системы операторов умственного труда при двухдневном чередовании 12-часовых смен // Бобко Н.А. – Київ: Український журнал з проблем медицини праці – №3-4 – 2005 – С. 24 – 28.
9. **Бобко Н.А.** Динамика рабочей нагрузки и ее отражение в показателях функционального состояния диспетчеров электросетей // Бобко Н.А. – Київ: Український журнал з проблем медицини праці – №2(22) – 2010 – С. 55 – 62.
10. **Єна Т.А., Кальниш В.В.** Психофізіологічні кореляти професійної діяльності диспетчерів енергосистем // Т.А. Єна, В.В. Кальниш – Київ: Український журнал з проблем медицини праці – №3(19) – 2009 – С. 41 – 45.
11. Инструкция ОДС-8 по предупреждению и ликвидации технологических нарушений в электрической части электростанций, подстанций и электрических сетей – Кировоград: «Кировоградоблэнерго» – 2015 – 32 с.
12. **Гальперин М.И., Зараковский Г.М.** Операционно-психофизиологический метод априорной оценки загрузки оператора / М.И. Гальперин, Г.М. Зараковский – Проблемы инженерной психологии и эргономики – Вып. 2. М.: ВНИИТЭ – 1974 – С. 38—40.
13. **Губинский А.И., Кобзев В.В.** Оценка надежности деятельности человека- оператора в системах управления – М.: «Машиностроение» – 1974 – 52 с.
14. **Душков Б.А., Ломов Б.Ф.** Основы инженерной психологии / Б.А. Душков и др.; под ред. Б. Ф. Ломова – М.: Высшая школа – 1977 – 335 с.
15. **Цибулевский И.Е.** Ошибочные реакции человека-оператора в системе управления (обзор зарубежных исследований) // И.Е. Цибулевский – Автомат. и телемех. – №6 – 1977 – С. 112 – 144.
16. **Шибанов Г.П.** Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника – М.: Машиностроение – 1983 – 263 с.
17. **Гасов В.М.** и др. Организация взаимодействия человека с техническими средствами АСУ. В 7 кн. Кн. 7. Системное проектирование взаимодействия человека с техническими средствами: Практик. пособие / В.М. Гасов, А.В. Меньков, Л.А. Соломонов, А.В. Шигин; Под ред. В.Н.Четверикова – М.: Высш. шк. –1991 – 142 с.
18. **Галактионов А.И.** Представление информации оператору (исследование деятельности человека-оператора производственных процессов) / А.И. Галактионов – М.: Энергия – 1969 – 132 с.
19. **Кулик С.Д.** Метод последовательного анализа для тестирования человека-оператора // С.Д. Кулик – Прикладная информатика – Vol.10 – No.3(57) – 2015 – С. 100 – 108.
20. **Чельшкова М.Б.** Теория и практика конструирования педагогических тестов: Учебное пособие / М.Б. Чельшкова – М.: Логос – 2002 – 432 с.
21. **Frank B. Baker, Seock-Ho Kim** Item Response Theory: Parameter Estimation Techniques, Second Edition (Statistics: A Series of Textbooks and Monographs) – CRC Press 2nd Edition, Kindle Edition – 2004 – 528 p.

Рукопис подано до редакції 12.10.2020