

УДК 621.311

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ЖЕСТКО ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Романов С.В., Двинин В.А., Шуневич Н.А.

ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,
e-mail: vka@mil.ru

В статье рассматриваются вопросы перехода от стратегии технического обслуживания систем электро-снабжения по наработке к стратегии технического обслуживания по состоянию с учетом ограничения временных показателей проведения работ. В качестве показателей, характеризующих эффективность применения данной стратегии, выбраны показатели надежности системы электроснабжения и суммарные затраты на проведение работ по техническому обслуживанию и ремонту. Приведенная в статье методика позволяет определять параметры технического обслуживания на основании решения многокритериальной задачи оптимизации, результатом которой является множество эффективных (Парето-оптимальных) решений и последующего выбора компромиссного варианта. Дана оценка результатов реализации рассматриваемой методики на действующем объекте на основании сравнения значений коэффициента готовности и средних удельных затрат на эксплуатацию системы электроснабжения действующего объекта.

Ключевые слова: система электроснабжения, техническое обслуживание, техническое обслуживание по состоянию, парето-оптимальные решения

CONSTRUCTION OF OPTIMAL SYSTEM OF TECHNICAL SERVICE OF POWER SUPPLY SYSTEM WITH THE STRICTLY DETERMINED TIME RECORD MAINTENANCE

Romanov S.V., Dvinin V.A., Shunevich N.A.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

The article consider the issues of transition from a strategy of maintenance of power supply systems for the operating time to the maintenance strategy as taking into account the limitations of temporary performance of work. The indicators characterizing the effectiveness of this strategy, selected indicators of power system reliability and total costs of maintenance and repair. The information in the article method allows you to define service parameters based on the solution of a multicriterial optimization problem, the result of which is a set of efficient (Pareto-optimal) solutions and the subsequent choice of a compromise. The estimation results of the implementation of the considered methods on the object on the basis of comparison of the values of the coefficient of readiness and average unit cost of operation of the system of power supply of the current object.

Keywords: power supply system, maintenance, maintenance as, Pareto-optimal solutions

Техническая эксплуатация оборудования системы электроснабжения (СЭС) предполагает поддержание показателей надежности на требуемом уровне за счет своевременного обнаружения неисправностей и их дальнейшего устранения, выявления степени ухудшения эксплуатационных показателей, проведение предупредительных ремонтов. Оптимальная система эксплуатационного обслуживания элементов СЭС позволяет установить объем и сроки проведения работ, связанных с поддержанием готовности системы при минимальных затратах.

В настоящее время система технической эксплуатации СЭС основана на жесткой стратегии технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Применение данной стратегии в современных условиях (возросшая надежность элементной базы, применение современных систем контроля и диагностирования, систем автоматизиро-

ванного управления, возросшие требования к надежности СЭС и качеству электроэнергии, ограничения людских и материальных ресурсов) приводит к неоправданному простоям оборудования, росту числа эксплуатационно-ремонтного персонала, ухудшению технико-экономических показателей электрооборудования. Все это делает актуальным вопрос пересмотра существующей системы эксплуатации и перехода к гибкой системе ТО [5]. Данный переход обеспечивается возможностями применения элементов технологии SMART GRID, на базе которых в рамках энергетической стратегии России до 2030 года планируется создание высокоинтегрированных интеллектуальных сетей [1].

Определения значений параметров технического обслуживания (ТО) СЭС, таких как периодичность работ по ТО, количество и тип средств, выводимых на ТО, предпо-

лагает сравнение различных вариантов организации ТО СЭС по ряду показателей, характеризующих величину затрат и достигаемые при этом полезные результаты. В качестве таких показателей целесообразно использовать следующие основные группы показателей, описываемые векторами: $G_{\{I1\}}$ – вектор показателей надежности СЭС, ее функциональных подсистем и отдельных средств; $C_{\{I2\}}$ – вектор стоимостных показателей, характеризующих затраты на реализацию процедур ТО СЭС.

Целесообразность выбора того или иного варианта проведения ТО обуславливается требованиями, предъявляемыми к СЭС в целом. При этом стремятся к тому, чтобы обеспечивать как можно лучшие значения по всем показателям качества и при этом значения ни одного из показателей не оказались хуже заданных предельно допустимых значений.

Решение данной задачи целесообразно осуществлять с помощью нахождения мно-

жества эффективных (Парето-оптимальных) решений и последующего выбора компромиссного варианта.

Будем считать заданными:

– $\Lambda_{\{L\}} = \{l\}$ – множество дат начала ТО обслуживаемой СЭС, где l – даты начала очередного ТО, $L = \text{card}\{\Lambda\}$ – мощность множества Λ ;

– $B = \{b_1, \dots, b_j, \dots, N\}$ – множество обслуживаемых элементов СЭС;

– N – количество обслуживаемых элементов СЭС;

– N_i – множество элементов СЭС i -го вида, $i = 1, M$;

– M – количество видов элементов СЭС с однотипными операциями ТО;

– v_i – производительность бригад обслуживающего персонала (максимально допустимое количество обслуживаемых элементов СЭС i -го вида за один день).

Введем булеву переменную x_{ij} , являющуюся переменной в задаче выбора значений ТО:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й элемент выводится на ТО в } l\text{-й день,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Необходимо выбрать такой вариант значений параметров ТО $X_{\|L, N\|}$, при котором достигаются оптимальные значения выбранных показателей качества функционирования (ПКФ):

$$\begin{cases} K_r(X_{\|L, N\|}) \rightarrow \max_{X_{\|L, N\|} \in X_{\|L, N\|}^*} \\ C_{\text{зд}}(X_{\|L, N\|}) \rightarrow \min_{X_{\|L, N\|} \in X_{\|L, N\|}^*} \end{cases} \quad (1)$$

При ограничениях:

$$\sum_{l \in \Lambda} \sum_{j=1}^N x_{lj} = N, \quad (2)$$

$$\sum_{l \in \Lambda} x_{lj} = 1, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_{lj} \leq v_i, \quad \forall l \in \Lambda, \quad \forall i \in M, \quad (4)$$

Задача выбора оптимальных значений параметров ТО в постановке (1–4) относится к классу многокритериальных задач целочисленного программирования, а точнее, к задаче комбинаторного булева программирования. Для ее решения необходимо выполнить следующие этапы:

1. Сужение множества анализируемых вариантов.

2. Формирование множества Парето-оптимальных решений.

3. Выбор компромиссного варианта значений параметров ТО.

Алгоритм сужения множества анализируемых вариантов значений ТО

Для нахождения оптимального значения $l^* = T_0^*$ по каждому из введенных критериев необходимо решить относительно T_0 уравнения

$$\frac{dK_r(T_0)}{dT_0} = 0, \quad \frac{dC_{\text{зд}}(T_0)}{dT_0} = 0. \quad (5)$$

Для решения данной задачи предлагается использовать метод, основанный на сочетании методов «золотого сечения» и параболической интерполяции [2, 6].

В результате формируется множество дат ТО $\Lambda^* = \bigcup l^*$, $\Lambda^* \subset \Lambda$, где l^* – календарный день начала ТО элемента СЭС, при котором достигается оптимальное значение показателей качества функционирования. Далее из множества Λ^* исключаются даты, в которые вывод элемента СЭС на ТО запрещен.

На следующем этапе группируются элементы СЭС с однотипными операциями ТО. Для этого осуществляется перегруппировка номеров столбцов матрицы $X_{\|L, N\|}$, таким образом, чтобы $\{1, 2, \dots, N\} = \bigcup_{i=1}^M N_i$, –

множество видов элементов СЭС с однотипными операциями ТО.

Таким образом формируется сложное множество вариантов значений параметров ТО X^c . В дальнейшем за L принимается мощность суженного множества возможных дат начала очередных ТО элементов СЭС $L = \text{card}(\Lambda^*)$.

Формирование множества Парето-оптимальных вариантов значений параметров ТО

Определение множества эффективных решений $X_i^3(\Omega_i^3)$ можно формально записать следующим образом:

$$X_i \in X_i^3,$$

если

$$\begin{cases} K_r(X_i^3) \geq K_r(X_i^1), \\ S(X_i^3) \leq S(X_i^1) \end{cases}, \quad (6)$$

$X_i^1 \in X_i \setminus X_i^3$, и хотя бы одно из неравенств (6) окажется строгим.

Нахождения множества эффективных решений на основе метода последовательного сужения множества альтернатив [6] осуществляется в несколько этапов:

На подготовительном этапе осуществляется выбор решения $X_i^0 \in X_i$ для построения множества $Q[X_i^0] \supseteq X_i^3$. Точка X_i^0 выбирается из множества X_i^* :

$$X_i^0 \in X_i^* = X_i^p \cap X_i^s,$$

где

$$X_i^{K_r} = \text{Arg max}_{X_i \in X_i^3} K_r(X_i),$$

$$X_i^{C_{уд}} = \text{Arg min}_{X_i \in X_i^3} C_{уд}(X_i).$$

Этап № 1. Строится множество X_{i1}^3 . Процедуры выполняются итеративно, число итераций на каждом этапе конечно, но заранее неизвестно.

Начальная итерация: полагаем $X_{i1}^1 = X_i$. j -я итерация: находим множество

$$X_{i1j}^* = \text{Arg min}_{X_i \in X_{i1}^1} K_r(X_i).$$

Из множества X_{i1j}^* выделяем подмножество X_{i1j}^{**} , содержащее все точки, удовлетворяющие условиям.

Формируем множество $\Delta_j^1 = X_{i1j}^{**}$. Сужаем множество альтернатив $X_{ij}^1 = X_i \setminus X_{i1j}^*$.

Поскольку $K_r[X_i] = K_r[X_i^0]$, то переходим ко второму этапу, принимая в качестве множества альтернатив $X_{i1}^2 = X_{ij}^1$.

Этап № 2. Начальная итерация: решаем задачу:

$$X_{i21}^* = \text{Arg min}_{X_i \in X_{i1}^1} C_{уд}(X_i).$$

Находим

$$X_{i21}^{**} = \{X_i \in X_{i21}^* \mid K_r(X_i) \geq K_r(X_i^1)\}.$$

Присваиваем переменной $K_{r\text{max}}$ значение $K_r(X_i)$

$$K_{r\text{max}} = K_r(X_i), X_i \in X_{i21}^{**}.$$

Формируем множество $\Delta_1^2 = X_{i21}^{**}$.

Поскольку $C_{уд}(X_i) < C_{уд}(X_i^0)$, то переходим ко второй итерации, $j = 2$

$$X_{ij}^2 = X_{i1}^2 \setminus X_{i21}^*.$$

Решаем задачу

$$X_{i2j}^* = \text{Arg min}_{X_i \in X_{ij}^2} C_{уд}(X_i).$$

Формируем множество

$$\Delta_j^2 = \{X_i \in X_{i21}^* \mid K_r(X_i) \geq K_{r\text{max}}\}.$$

Если $\Delta_j^2 \neq 0$, то присваиваем переменной значение

$$K_{r\text{max}} = K_r(X_i), X_i \in \Delta_j^2.$$

Сужаем множество альтернатив

$$\Delta_{j+1}^2 = \Delta_j^2 \setminus X_{i2j}^*.$$

Если $K_r(X_i) < K_r(X_i^0)$, то $j = j + 1$.

Если $K_r(X_i) < K_r(X_i^0)$, то $X_i^3 = \Delta_1^j \cup \Delta_j^2$.

Таблица 1

Перечень оборудования СЭС

Исходные данные	Высоковольтные выключатели, 24 шт.	АВР, 4 шт	Трансформаторы, 25 шт.	Автоматические высоковольтные переключатели, 25 шт.	Рубильники низковольтные, 25 шт.
Среднее кол-во отказов N	21	15	19	18	21
τ_B , час	1,89	2,12	2,29	2,11	2,4
$\tau_{ТО}$, час	4	5	3	5	5
$T_{откр}$, час	329	400	398	401	415

Отметим, что на каждой итерации решаются оптимизационные задачи с использованием алгоритма целенаправленного перебора вариантов, причём на каждой итерации происходит сужение множества альтернатив, т.е.

$$card(X_{ij}) < card(X_{i(j-1)}).$$

Выбор компромиссного варианта значений параметров ТО

Компромиссным решением многокритериальной задачи дискретной оптимизации является такое эффективное решение, для которого взвешенные относительные потери (отклонения от оптимумов) по всем частным показателям одинаковы и минимальны [3], т.е.

$$\rho_1 w_1(u^k) = \dots = \rho M^w M^{(u^k)} = \min_U \rho_i w_i(u), \quad (7)$$

где M – множество частных показателей качества, ρ_i – весовые коэффициенты относительной важности частных показателей эффективности функционирования системы в целом, удовлетворяющие условиям $\rho_i > 0$, $\sum_{i \in I} \rho_i = 1$, $w_i(u)$ – относительные отклонения от оптимумов показателей качества функционирования на значениях параметров $0 \leq w_i \leq 1$.

Относительные отклонения от оптимумов определяются следующим образом:

$$w_i = \frac{f_i(\bullet) - f_i^0}{f_i^* - f_i^0}, \quad (8)$$

где f_i^0 и f_i^* – соответственно оптимальное и наихудшее значения i -го показателя качества, достигаемые на множестве вариантов решений с учетом ограничений.

Определение весовых коэффициентов относительной важности является самостоятельной задачей. В данной работе они предполагаются заданными.

Согласно [3] нахождение компромиссного решения может быть сведено к решению следующей задачи:

$$u^k = \arg \min \max \rho_i w_i(u). \quad (9)$$

Таким образом, решением задачи определения варианта значений параметров ТО СЭС является такой набор значений параметров ТО, при котором максимальное взвешенное отклонение от оптимума на множестве показателей является минимальным.

Анализ эффективности предложенной методики определения объемов и моментов начала ТО был проведен на основе сравнения значений коэффициента готовности и средних удельных затрат на эксплуатацию за 12 месяцев при различных стратегиях обслуживания СЭС на одном из действующих объектов. В качестве исходных данных для

проведения расчетов взята статистика по отказам элементов СЭС, накопленная за 12 месяцев эксплуатации. Эти данные приведены в табл. 1.

Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты перехода к стратегии технического обслуживания по состоянию

ПКФ	Стратегии ТО	
	Жесткая	Гибкая
K_r	0,9834	0,993
Трудозатраты, чел/час	48	19,2
Матер. средства, усл/ед.	6	1

Из табл. 2 видно, что при переходе к гибкой стратегии технического обслуживания значения выбранных показателей качества функционирования системы эксплуатации СЭС возрастают.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности перехода к гибким стратегиям технического обслуживания СЭС на основе предлагаемого подхода. Реализация данной стратегии позволяет экономить людские и материальные ресурсы, а также удовлетворять требованиям, предъявляемым к надежности функционирования СЭС объектов.

Список литературы

1. Авсеенко А.И., Вишняков Е.П., Шуневич Н.А. Механизмы создания адаптивных систем электроснабжения специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – № 649. – С. 120–128.
2. Михалевиц В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевиц, В.Л. Волкович. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
3. Ногин В.Д. Принятие решений в много критериальной среде / В.Д. Ногин. – СПб.: Физматлит, 2002. – 176 с.
4. Пеньков М.М., Петров Г.Д., Птушкин А.И. Новые принципы построения системы эксплуатации космодромов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 55–65.
5. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
6. Пшеничный Б.Н. Численные методы в экстремальных задачах / Б.Н. Пшеничный, Ю.М. Данилин. – М.: Наука, 1975. – 319 с.

References

1. Avseenko A.I., Vishnjakov E.P., Shunevich N.A. Mechanisms of creation of adaptive systems of power supply of special objects // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo. 2015. no. 649. pp. 120–128.
2. Mihalevich V.S. Vychislitelnye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnyh sistem / V.S. Mihalevich, V.L. Volkovich. M.: Nauka, 1982. 286 p.
3. Nogin V.D. Prinjate reshenij v mnogo kriterialnoj srede / V.D. Nogin. Spb.: Fizmatlit, 2002. 176 p.
4. Penkov M.M., Petrov G.D. Ptushkin A.I. Novye principy postroeniya sistemy jeks-pluatacii kosmodromov // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2015. no. 4. pp. 55–65.
5. Podinovskij V.V. Pareto-optimalnye reshenija mnogokriterialnyh zadach / V.V. Podinovskij, V.D. Nogin. M.: Nauka, 1982. 256 p.
6. Pshenichnyj B.N. Chislennye metody v jekstremalnyh zadachah / B.N. Pshenichnyj, Ju.M. Danilin. M.: Nauka, 1975. 319 p.