ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 658.531.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Оригинальная статья / Original Paper

**Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего
оборудования для атомных электростанций методом моделирования**

И.А. Лоскутов^{1,2}

¹Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга,
информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)),

²Политехнический колледж им. Н.Н. Годовикова,

¹107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,

²125130, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских, 19, Россия

Резюме. Цель. Современный мир связан с электроэнергетикой и находится в явной зависимости от нее. Количество потребителей растет по экспоненте, возникает проблема долгосрочного планирования потребления электричества, наблюдается увеличение ее цены. С целью минимизации затрат предприятий было высказано предположение о рациональности увеличения количества атомных электростанций (АЭС). При рассмотрении сроков возведения атомных комплексов была выявлена чрезмерная длительность изготовления силового и управляющего оборудования для АЭС. С целью сокращения временных затрат было предложено нормировать работу сборочно-монтажных и упаковочных производственных объединений. **Метод.** Исследования в данной области практически не проводились и носили, зачастую, эпизодический характер. Изначально считалось, что операции технологического процесса изготовления указанного оборудования рационально нормировать классическими методами, однако в предыдущих работах автора был предложен новый подход, базирующийся на анализе характеристик занятого в техпроцессе сотрудника, специфике вида операционной работы, а также различных возмущающих факторов, негативно влияющих на срок изготовления. Далее проводится систематизация полученных данных и их дальнейшее моделирование. **Результат.** В работе показано выведение заключительного уравнения сборки каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС. Было дано обоснование применяемых методов, указана целевая аудитория, учтена нормативно-правовая база. Кроме того показаны результаты предшествующих работ, на основании которых и строилась математическая модель. Отдельно были даны рекомендации по поводу дополнительного использования функционала полученного уравнения. **Вывод.** Уравнение, полученное в работе, позволяет с максимальной точностью рассчитать время, затраченное на сборку каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС. Принципы, показанные в работах по направлению можно использовать и на другие области, имеющие похожую направленность с минимальным изменением выведенной модели.

Ключевые слова: каркас, сборка, модель, техпроцесс, нормирование, оборудование, АЭС

Для цитирования: И.А.Лоскутов. Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС методом моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 73-82. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Normalization of assembly technical process of the frame of power and control equipment for nuclear power plants by the method of simulation

I.A. Loskutov^{1,2}

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation 'Space Monitoring Systems, Electromechanical Complexes' ('VNIEM Corporation' JC),

²N.N. Godovikova Polytechnic College,

30 Volnaya Str., p. 10, Moscow 107078, Russia,

N.N. Godovikova Polytechnic College,

19 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh Str., Moscow 125130, Russia

Abstract. Objectives. The modern world is associated with a clear dependence on it. The number of consumers is growing exponentially. In order to minimize the costs of enterprises, an assumption was made about the rationality of the number of nuclear power plants. When considering the timing of the construction of nuclear complexes, an excessive duration of the manufacture of power and control equipment for nuclear power plants was revealed. In order to reduce time costs, it was proposed to standardize the work of assembly, assembly and packaging production associations. **Method.** Research in this area was practically not carried out and were, often, of an episodic nature. Initially, it was believed that the operations of the technological process of manufacturing equipment should be rationalized by classical methods, however, in the previous works of the author, a new approach was proposed, based on the analysis of the characteristics of the employee employed in the technical process, the specifics of the type of operational work, as well as various disturbing factors that negatively affect the production time. Then the systematization of the obtained data and their further modeling is carried out. **Results.** The paper shows the derivation of the final equation for the assembly of the frame of power and control equipment for nuclear power plants. The substantiation of the applied methods was given, the target audience was indicated, the regulatory framework was taken into account. In addition, the results of previous works are shown, on the basis of which the mathematical model was built. Separately, recommendations were given on the additional use of the functions of the resulting equation. **Conclusion.** The equation obtained in the work makes it possible to calculate with maximum accuracy the time spent on assembling the frame of the power and control equipment for a nuclear power plant. The principles shown in other works can be used in an area that has directionality with minimal model change.

Key words: frame, assembly, model, technical process, standardization, equipment, NPPs

For citation: I.A. Loskutov. Normalization of assembly technical process of the frame of power and control equipment for nuclear power plants by the method of simulation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 73-82. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Введение. Было предпринято немало попыток создания универсального уравнения, учитывающего большинство параметров и факторов производства, занятого созданием оборудования для АЭС. Выбор данного направления исследования был не случаен. Развитие отрасли и увеличение количества АЭС наблюдается во многих странах мира. Общая тенденция, показанная в работе [1] это подтверждает. Аналогичный вывод можно сделать, рассмотрев график изменения количества АЭС по годам [2].

Постановка задачи. Основная проблема поставленной задачи была связана с получением модели, максимально лишенной погрешностей и неточностей.

Как и логично предположить, техпроцесс изготовления такого оборудования весьма сложный, поэтому появилась необходимость разбить его на этапы, как это и происходит на реальном производстве. В данной статье будет показано уравнение базового компонента силового и управляющего оборудования для АЭС – каркаса. Однако

для начала стоит указать, на чем основываются доводы, принципы построения модели и эмпирическую базу исследования.

Методы исследования. Выведение универсального уравнения велось весьма продолжительное время. В частности, базой для дальнейшего построения служили ранние наработки [3-7], в которых постепенно были проведены первоначальные попытки нормирования сборочного техпроцесса каркаса.

С целью удобства отображения модели для пользователя (специалиста в области нормирования, начальника участка или других заинтересованных лиц) было решено выводить уравнение в циклическом виде.

Действительно, как показывает практика, применять суммирующие значения по принципам показанным, например, в [8], крайне не практично, вследствие отсутствия какой-нибудь конкретики об изготавливаемых объектах, внутренних зависимостях и т.п.:

$$T_i = f(M, N_T, C) \quad (1)$$

где:

T_i – время изготовления объекта

M – материалоемкость

N_T – количество технологических операций

C – сложность технологических операций при изготовлении объекта

Кроме того, цикличная форма близка к программной реализации (потенциальный задел для последующего составления модели в компьютерной среде) [9].

Далее необходимо объяснить, о каком оборудовании идет речь, с целью избавления от разногласий по поводу конструктивных соображений.

Под силовым и управляющим оборудованием в настоящей работе понимаются изделия типа «шкаф», иллюстративно показанные в работах [10-11] габаритов 600*800*2000 – однодверный или 800*800*2000 – двухдверный. Дополнительное описание функционирования и компонентного состава отмечено в [12-13].

За основу принципа построения уравнения сборки каркаса была взята модель типа «Вход» – «Выход», наиболее подробно, по мнению автора, показанная в отечественных работах [14, с.12-15], [15, с.41-46] и иностранной литературе [16, с.3-4] и [17, с.11-14].

В соответствии с концепцией была выведена следующая графическая зависимость, рис.1:

Рис.1. Графическая интерпретация модели типа «Вход» – «Выход» сборочного процесса
Fig. 1. Graphic interpretation of the model of the "Input" - "Output" type of the assembly process

где: X – готовое изделие/ ready product

Y – входной параметр/ input parameter

R – возмущающий параметр/ disturbing parameter

Вследствие принадлежности каркаса, как основы оборудования, к изделиям атомных комплексов, на него распространяются требования ГОСТ 29075-91 [18], которые были учтены, совместно с требованиями, показанными в уже упомянутой работе [11] и требованиями по качеству [19]. Кроме того, также были приняты во внимание комментарии со стороны МАГАТЭ относительно некоторых аспектов качества [20].

Обсуждение результатов. Как уже было отмечено, работа проводилась в несколько этапов. Поэтому, приняв во внимание базовые параметры из [3] и дополнения элементов в [6] были получены следующие важные уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j} \\ l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k} \\ \bar{X} = \bar{Z} + \sum_{\varphi=1}^{2\tau} (\bar{Q} + N_{\varphi}) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} < \bar{Z} \\ \bar{Z}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{Z} = F_{\min}(\bar{Z}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \\ \text{Если } \bar{W} \geq \bar{Z} \\ \bar{Z} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{Z} \geq \bar{Q} \\ \bar{Q} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{Z} < \bar{Q} \\ \bar{Q}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \bar{Q} = F_{\min}(\bar{Q}_k - (\bar{W} - \bar{Z}) > 0) \rightarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

А также:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j} \\ l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k} \\ \bar{T} = \bar{P} + \sum_{\varphi=1}^{2\tau} (\bar{S} + N_{\varphi}) \\ L_j^{i_j-\vartheta} - \text{первый элемент итерации } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega \\ L_k^{l_k-\rho} - \text{первый элемент итерации } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega \\ \text{Когда } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до} \\ L_{j-1}^{i_{j-1}-\vartheta} \in [0 : \bar{P}_j \leq 28800 \cdot \omega] = 1 \\ \text{Когда } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до} \\ L_{k-1}^{l_{k-1}-\rho} \in [0 : \bar{S}_k \leq 28800 \cdot \omega] = 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{P} > 28800 \\ \bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ v_m = F_{\max}(\bar{P}_j - 28800 - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi}) < 0; \\ \bar{P} = 28800(m-1) + v_m \\ \text{Если } \bar{S} > 28800 - v_m \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ u_n = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0; \\ \bar{S} = 28800(n-1) + u_n \\ \text{Если } \bar{S} \leq 28800 - v_m \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{P} \leq 28800 \\ \bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{S} > 28800 - \bar{P} \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ u_n = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0; \\ \bar{S} = 28800(n-1) + u_n \\ \text{Если } \bar{S} \leq 28800 - \bar{P} \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3)$$

Далее необходимо объединить отмеченные уравнения (2) и (3). Для этого примем один из вариантов входных переменных:

$$\begin{cases} \bar{Z} \rightarrow \bar{P} \\ \bar{Q} \rightarrow \bar{S}, \\ \bar{X} \rightarrow \bar{T} \end{cases}$$

В результате проверка остановки основной работы будет осуществляться по следующим условиям:

$$\text{Если } \bar{P} > 28800, \text{ то: } \bar{P} = 28800(m - 1) + v_m \quad (4)$$

Иначе – необходимо определить количество полных дней путем целочисленного деления. Остаточная часть также будет рассчитываться с целью определения времени остановки по следующему закону:

$$\begin{aligned} m &= \left\lfloor \frac{\bar{W}}{28800} \right\rfloor \\ \lambda &= \bar{W} - m \cdot 28800 \\ \lambda_* &= F_{\min}(\bar{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Сумма элементов определится путем перемножения количества дней, высчитанных из времени остановки и остатка λ_* :

$$\bar{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \quad (6)$$

Объединив (4) и (6) получится:

$$\begin{cases} \text{Если } \bar{W} \geq \bar{P} \\ \bar{P} = 28800(m - 1) + v_m \\ \text{Если } \bar{W} < \bar{P} \\ m = \left\lfloor \frac{\bar{W}}{28800} \right\rfloor \\ \lambda = \bar{W} - m \cdot 28800 \\ \lambda_* = F_{\min}(\bar{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \\ \bar{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \end{cases} \quad (7)$$

В случае, когда $\bar{P} \leq 28800$, при условии, что остановка происходит после сборки каркаса:

$$\bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \quad (8)$$

А если $\bar{W} < \bar{P}$, то:

$$\begin{aligned} \bar{P}_j &= \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{P} &= F_{\min}(\bar{P}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Объединив (8) и (9) получится:

$$\begin{cases} \text{Если } \bar{W} \geq \bar{P} \\ \bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \text{Если } \bar{W} < \bar{P} \\ \bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{P} = F_{\min}(\bar{P}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (10)$$

Проверка остановки дополнительной работы будет определяться следующим образом: если время остановки превышает время основной работы, то происходит переход к дополнительной работе, которая бывает:

$$\begin{aligned} \text{А) Если } \bar{S} \leq 28800 - v_m \\ \text{А1) Если } \bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S}, \text{ то, } \bar{S} &= 28800(n - 1) + u_n \end{aligned} \quad (11)$$

А2) Если $\bar{W} - \bar{P} < \bar{S}$, то необходимо учесть остаток λ_* . Для этого проводится поиск максимального значения первой итерации:

$$\lambda_1 = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \quad (12)$$

Затем вычисляется количество полных дней до преждевременной остановки, без λ_1 :

$$n = \left\lfloor \frac{\bar{W} - \bar{P} - \lambda_1}{28800} \right\rfloor \quad (13)$$

Остаток от целочисленного деления находится по:

$$\lambda_2 = \bar{W} - \bar{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \quad (14)$$

Реальное время $\bar{S}$ определим по:

$$\bar{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \quad (15)$$

Далее объединим наработки (11) - (15):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S} \\ \bar{S} = 28800(n - 1) + u_n \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{P} < \bar{S} \\ \lambda_1 = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \\ n = \left\lfloor \frac{\bar{W} - \bar{P} - \lambda_1}{28800} \right\rfloor \\ \lambda_2 = \bar{W} - \bar{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\ \lambda_3 = F_{\min}(\bar{S}_k - \sum_{\gamma=0}^{n-1} u_{\gamma} - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\ \bar{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \end{array} \right. \quad (16)$$

Б) Если $\bar{S} > 28800 - \bar{P}$

Б1) Когда $\bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S}$:

$$\bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \quad (17)$$

Б2) Когда $\bar{W} - \bar{P} < \bar{S}$:

$$\bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \quad (18)$$

$$\bar{S} = F_{\min}(\bar{S}_k - \bar{W} - \bar{P} > 0) \rightarrow 0$$

Объединив (17) и (18):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S} \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{P} < \bar{S} \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \bar{S} = F_{\min}(\bar{S}_k - \bar{W} - \bar{P} > 0) \rightarrow 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

Учитывая все вышепоказанные наработки, можно вывести полное уравнение сборки каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС:

$$i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j}$$

$$l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k}$$

$$\bar{T} = \bar{P} + \sum_{\varphi=1}^{27} (\bar{S} + N_{\varphi})$$

$$L_j^{i_j-\vartheta} - \text{первый элемент итерации } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega$$

$$L_k^{l_k-\rho} - \text{первый элемент итерации } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega$$

$$\text{Когда } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{i_1} \text{ до } L_{j-1}^{i_{j-1}-\vartheta} \in [0 : \bar{P}_j \leq 28800 \cdot \omega] = 1$$

$$\text{Когда } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до } L_{k-1}^{l_{k-1}-\rho} \in [0 : \bar{S}_k \leq 28800 \cdot \omega] = 1$$

Если $\bar{P} > 28800$

$$\bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta}$$

$$v_m = F_{\max}(\bar{P}_j - 28800 - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi}) < 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Если } \overline{W} \geq \overline{P} \\
 \overline{P} = 28800(m-1) + v_m \\
 \text{Если } \overline{W} < \overline{P} \\
 m = \left\lfloor \frac{\overline{W}}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda = \overline{W} - m \cdot 28800 \\
 \lambda_* = F_{\min}(\overline{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \\
 \text{Если } \overline{S} > 28800 - v_m \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 u_n = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0 \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = 28800(n-1) + u_n \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \lambda_1 = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \\
 n = \left\lfloor \frac{\overline{W}-\overline{P}-\lambda_1}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda_2 = \overline{W} - \overline{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\
 \lambda_3 = F_{\min}(\overline{S}_k - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \\
 \text{Если } \overline{S} \leq 28800 - v_m \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \overline{S} = F_{\min}(\overline{S}_k - \overline{W} - \overline{P} > 0) \rightarrow 0 \\
 \text{Если } \overline{P} \leq 28800 \\
 \text{Если } \overline{W} \geq \overline{P} \\
 \overline{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\theta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=c_{j-1}}^{c_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{c_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\theta} \\
 \text{Если } \overline{W} < \overline{P} \\
 \overline{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\theta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=c_{j-1}}^{c_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{c_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\theta} \\
 \overline{P} = F_{\min}(\overline{P}_j - \overline{W} > 0) \rightarrow 0 \\
 \text{Если } \overline{S} > 28800 - \overline{P} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 u_n = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0 \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = 28800(n-1) + u_n \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \lambda_1 = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \overline{P}) < 0 \\
 n = \left\lfloor \frac{\overline{W}-\overline{P}-\lambda_1}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda_2 = \overline{W} - \overline{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\
 \lambda_3 = F_{\min}(\overline{S}_k - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \\
 \text{Если } \overline{S} \leq 28800 - \overline{P} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \overline{S} = F_{\min}(\overline{S}_k - \overline{W} - \overline{P} > 0) \rightarrow 0
 \end{array} \right. \quad (20)$$

Вывод. Выведенное уравнение с максимальной точностью позволяет рассчитать время, затраченное на сборочные операции техпроцесса изготовления каркаса силового и управляющего шкафов для АЭС. Кроме того, если учесть такие параметры, как тип управления [21] и организационная структура отдела / цеха и т.п. [22], путем составления коэффициентов влияния на указанную модель, можно подобрать, при необходимости, оправданный путь модернизации структуры управления предприятия в целом.

Библиографический список:

1. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. и др. – Париж, Лондон, Вашингтон, июль 2014, 158с.
2. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes - Режим доступа: <https://pris.iaea.org/pris/>, свободный (Дата обращения 25.09.2021)
3. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС // Журнал исследований по управлению – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №6, с. 29-42
4. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Второе приближение // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.2. с.12-19
5. Лоскутов И.А. Определение нормированного времени сборки устройств для АЭС с учетом временных особенностей рабочих смен // Журнал исследований по управлению – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №8, с. 24-32
6. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудование на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Третье приближение // Журнал исследований по управлению – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №10, с. 46-54
7. Лоскутов И.А. Учет обнуления усталости в уравнении нормирования времени сборки каркаса оборудования для АЭС // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции / под ред. С.У. Увайсов – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018, с.456-463
8. Кравченко П.Д., Косогова Ю.П. Оценка фактора времени в технических системах на примере изготовления изделий тяжелого и атомного машиностроения // Инженерный вестник Дона, 2020, №3, 13с.
9. Yaguang Yang. Cycling problems in linear programming // Optimization and Control (math.OC) – Ithaca: Cornell University, 20.07.2021, 13с. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2101.01805v1>, свободный (Дата обращения 24.09.2021)
10. Крутикова Л.П. и др. Применение средств автоматизации при проектировании и производстве электрооборудования для АЭС с широким использованием кооперации // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 2004. Том 101. С.35-44
11. Лоскутов И.А. Стандарты, применяемые при разработки силового и управляющего оборудования для АЭС // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020, №1, с.144-150
12. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов ВВЭР-440 - Режим доступа: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, свободный (Дата обращения 07.01.2021)
13. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 - Режим доступа: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, свободный (Дата обращения 07.01.2021)
14. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления – Томск, Томский политехнический университет, 2011, 197с.
15. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 493с.
16. Trentelman H.L., Stoorvogel A.A., Malo H. Control theory for linear systems – Berlin, Springer, ISBN 978-1-4471-0339-4, 2001, 389p.
17. Sontag E.D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition /

E.D. Sontag – New York: Springer, 1998, 530p.

18. ГОСТ 29075-91 Системы ядерного приборостроения для атомных станций. Общие требования
19. Гродзенский С.Я. Управление качеством: учебник. – 2-е изд. М.: Проспект, 2018 – 320с.
20. Quality assurance standards: comparison between IAEA 50-C/SG-Q and ISO 9001:1994 – Вена: IAEA, 2000 – 34с.
21. Лоскутов И.А. Выбор типа управления на производстве, занимающегося разработкой оборудования в области мирного атома // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.3. с.18-26
22. Лоскутов И.А. Организационные структуры управления на предприятиях, занимающихся разработкой оборудования для АЭС // Журнал исследований по управлению – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №.4, с. 40-46.

References:

1. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. и др. – Paris, London, Washington, July 2014; 158.
2. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes - Access mode: <https://pris.iaea.org/pris/>, free (Date of treatment 25.09.2021)
3. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(6):29-42. (In Russ)
4. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs. second approximation [Vestnik KemRIIPK] *Bulletin of KemRIIPK* – Kemerovo, 2018; 2:12-19(In Russ)
5. Loskutov I.A. Determination of the normalized assembly time for devices for NPPs, taking into account the temporary features of work shifts. [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(8): 24-32. (In Russ)
6. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs. Third approximation. [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018;4(10): 46-54.
7. Loskutov I.A. Accounting for zero fatigue in the equation of normalization of the time of assembly of the frame of equipment for NPPs . Innovative, information and communication technologies: proceedings of the XV International scientific-practical conference. / under edited by S.W. Uvaisov –M: Association of alumni and staff via im. prof. Zhukovsky, 2018; 445-450 (In Russ)
8. Kravchenko P.D., Kosogova Yu.P. Estimation of the time factor in technical systems on the example of the manufacture of products of heavy and nuclear engineering. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*, 2020; 3:13. (In Russ)
9. Yaguang Yang. Cycling problems in linear programming // Optimization and Control (math.OC) – Ithaca: Cornell University, 20.07.2021; 13. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2101.01805v1>, free (Date of treatment 24.09.2021)
10. Krutikova L.P. and others. Application of automation tools in the design and manufacture of electrical equipment for nuclear power plants with widespread use of cooperation . Questions of electromechanics. *VNIIEM Proceedings*. – M: VNIIEM. 2004;101: 35-44 (In Russ)
11. Loskutov I.A. Standards used in the development of power and control equipment for NPPs / Fundamental and applied problems of engineering and technology – Orel: Oryol State University named after I.S Turgenev, 2020; 1: 144-150 (In Russ)
12. Joint-stock company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information Control and Electromechanical Complexes» named after A.G. Iosifyan / CPS electrical equipment for VVER-440 reactors. Access mode: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440 &catid = 89% 3A2015-03-12- 20-31-17 & Itemid = 63](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440%2031-17%2031-17&Itemid=63), free (Date of treatment 01.07.2021)
13. Joint-stock company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information Control and Electromechanical Complexes» named after A.G. Iosifyan / CPS electrical equipment for VVER-1000, VVER-1200 reactors – Access mode: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id = 652% 3A-1000-1200 &catid = 89% 3A2015-03-12- 20-31-17 & Itemid = 63](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200%2031-17%2031-17&Itemid=63), free (Date of treatment 01/07/2021) (In Russ)
14. Dyadik V.F., Baidali S.A., Krinitsyn N.S. Automatic control theory – Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011; 197. (In Russ)
15. Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. Theory of automatic control of technical systems – M., MSTU named after N.E. Bauman, 1993; 493. (In Russ)

16. Trentelman H.L., Stoorvogel A.A., Malo H. Control theory for linear systems – Berlin, Springer, 2001; 389. ISBN 978-1-4471-0339-4.
17. Sontag E.D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition / E.D. Sontag – New York: Springer, 1998; 530.
18. GOST 29075-91 Nuclear instrumentation systems for nuclear power stations. General requirements (In Russ)
19. Grodzensky S.Ya. Quality management: textbook. – 2nd ed. M.: *Prospect*, 2018; 320. (In Russ)
20. Quality assurance standards: comparison between IAEA 50-C/SG-Q and ISO 9001:1994 – Vienna: IAEA, 2000; 34.
21. Selection of management type on production developed by the development of equipment for a peaceful atom [Vestnik KemRIPK] Bulletin of KemRIPK – Kemerovo, 2018; 3:18-26 (In Russ)
22. Loskutov I. A. Organizational management structures at enterprises developing equipment for NPPs. *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(4): 40-46. (In Russ)

Сведения об авторе:

Лоскутов Иван Андреевич, инженер – конструктор, отдел № 55, преподаватель автоматизации, e-mail: faxvex@ya.ru

Information about the author:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor in the Department 55, Teacher of Automation, e-mail: faxvex@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 22.07.2021.

Одобрена после рецензирования/Reviced 12. 08.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 14.08.2021.