

УДК 621.9:004.7+62-52

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ETHERNET-СЕТЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСУП

**В.А. Холопов[@],
Е.Н. Каширская,
М.В. Гусев**

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: holopov@gmail.com

В работе рассматривается оптимизация конфигурации промышленной сети на основе ее моделирования. Представлено описание проектирования промышленной сети по этапам, включающее алгоритмические и математические модели. Разработан алгоритм проектирования, сопоставлены метрики промышленной сети с факторами, влияющими на них, а также разработана целевая функция оптимизации. Предложено решение задачи комбинаторной оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей с помощью метода имитации отжига по Больцмановской схеме, который упорядочивает случайный поиск глобального минимума целевой функции. Этот метод оптимизации является перспективным решением, позволяющим повысить эффективность разработки проекта промышленной сети АСУП. Результатами использования метода являются: уменьшение числа ошибок на этапе создания рабочего проекта, структуризация процесса проектирования, четкая формализация требований, экономия времени квалифицированных сотрудников при составлении топологии, спецификаций и других проектных документов, снижение стоимости системы.

Ключевые слова: автоматизация производства, промышленная сеть, автоматизированная система управления, автоматизированная система управления проектами, автоматизированная система управления производством (АСУП), математические модели, алгоритмические модели, метод отжига, целевая функция, комбинаторная оптимизация.

OPTIMIZATION OF CONFIGURATION OF INDUSTRIAL ETHERNET NETWORKS DURING DESIGN OF THE AUTOMATED PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM

**V.A. Kholopov[@],
E.N. Kashirskaya,
M.V. Gusev**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: holopov@gmail.com

The paper considers optimization of industrial network configuration based on industrial network simulation. A description of step-by-step industrial network design including algorithmic and mathematical models is given. An algorithm for designing the APCS (Automated Process Control System) industrial network is developed, the metrics of the industrial network are compared with the factors affecting them, and the optimization objective function is developed. A solution of the problem of combinatorial optimization of the industrial Ethernet networks is proposed. Boltzmann scheme annealing method is used as an optimization method that regulates a random search for a global minimum of the objective function. The developed optimization method is a promising solution allowing to increase the efficiency of the APCS industrial network project design. The results of using the method are: reduction of the number of errors at the working project creation stage; design process structuring; clear requirements formalization; saving man hours of qualified employees in drawing up topologies, specifications and other project documents; reduction of the system cost.

Keywords: automation of production, industrial network, automated control system, automated process control system (APCS), automated production management system, mathematic model, algorithmic model, simulated annealing method, cost function, combinatorial optimization.

Современное цифровое машиностроительное производство подразумевает высокую степень автоматизации и технологического оборудования, и технологического процесса, и производства в целом [1]. Для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства требуется обеспечение более высокого уровня организации, функционирования и технологии использования информационно-программных средств [2–5], чем имеющийся в настоящее время. Сложность и комплексность задач автоматизации современного производства требует разработки и внедрения новой архитектуры системы управления исполнительного уровня цифрового производства [1], которая сочетает в себе использование системы SCADA для мониторинга состояния производственного оборудования [6–8] и системы выполнения производственных задач [9, 10].

Для функционирования исполнительного уровня цифрового производства в описываемой архитектуре необходимо обеспечить работу промышленной сети на качественно новом уровне, что может быть достигнуто путем применения оптимизационных методов ее проектирования.

В данной работе рассматривается метод оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей, который состоит из восьми этапов:

- разработка математической модели промышленной сети;
- решение задачи соединения и размещения оборудования;
- расчет максимальной загрузки на связях между оборудованием;
- постановка оптимизационной задачи;
- выбор оборудования;
- решение оптимизационной задачи;
- представление метода в виде программного продукта;
- апробация метода на реальном производстве.

Проектирование промышленной сети является сложным многоэтапным процессом, включающим в себя следующие обязательные части:

- формализацию требований к системе;
- соединение и размещение оборудования (выбор топологий);
- выбор технологий резервирования;
- расчет максимальной загрузки;
- выбор оборудования.

При проектировании автоматизированной системы управления производством (АСУП) необходимо гарантированно учесть параметры, требующиеся для передачи информации между подсистемами АСУП [9], центральной частью которой является промышленная сеть. При ее проектировании, кроме гарантированного учета требуемых параметров сети, необходимо минимизировать влияние человеческого фактора и, по возможности, уменьшить стоимость этой сети.

С точки зрения морфологии, структура системы – это устойчивая упорядоченность ее элементов и связей; конфигурация системы есть совокупность функциональных частей системы обработки информации и связей между ними, обусловленная основными техническими характеристиками этих функциональных частей, а также требованиями решаемых задач. Конфигурация и структура определяют строение системы.

Как правило, к каждой системе предъявляется уникальный ряд требований. Однако есть и общие требования, предъявляемые к сети и системе в целом [11]: высокие рабочие характеристики; быстрая реакция; высокая надежность; высокая производительность; модульная сетевая организация, информационная доступность в любой точке системы; легкость наращивания и изменения программно-технических данных; гибкость структуры. Эти качественные требования должны быть выражены в виде количественных характеристик – метрик [12] промышленной сети и факторов, влияющих на них.

Анализ указанных требований к промышленным сетям АСУП дает возможность сопоставить метрики и факторы, влияющие на их значения (таблица).

Метрики промышленной сети и факторы, влияющие на них

Метрика	Влияющие факторы
Максимально допустимые задержки (Delay)	Длина кабеля Время обработки пакета коммутационным оборудованием Занятая емкость (Utilization), бит/с Размер пакета, байт Скорость интерфейса, бит/с Скорость распространения сигнала, с
Максимально допустимые изменения задержки (Delay Jitter)	Время обработки пакета коммутационным оборудованием, с Время обработки пакета конечным устройством Точность синхронизации времени между устройствами
Емкость каналов связи	Скорости интерфейса коммутатора, бит/с
Доступность сети	MTBF\ (MTBF+MTTR)
Максимальные потери пакетов на канале	Время конвергенции протоколов резервирования Ожидаемая загрузка

Обеспечение соответствия требованиям к промышленной сети АСУП предприятия достигается путем введения ограничений на характеристики промышленной сети, для расчета которых используется соответствующая математическая модель. Работоспособность сети обеспечивается за счет введения ограничений на параметры оборудования.

Эти ограничения определяют допустимое множество, из которого может быть выбрана каждая единица оборудования.

Чтобы описать конфигурации промышленной сети АСУП, необходимо определить следующие объекты, свойства которых представлены в виде векторов [13].

Конечное устройство – объект сети, подключенный как конечное устройство к коммутатору промышленной сети: $\bar{e} = [e_1, e_2, \dots, e_c]^T$.

Множество конечных устройств образует множество E : $E = \{\bar{e}\}$.

Коммутационные устройства – это устройства, к которым могут быть подключены конечные устройства и другие коммутационные устройства: $\bar{c} = [c_1, c_2, \dots, c_c]^T$.

Множество коммутационных устройств образует множество C : $C = \{\bar{c}\}$.

Связь – соединение между двумя любыми устройствами, обладающее набором таких свойств, как тип, скорость, длина соединения: $\bar{l} = [l_1, l_2, \dots, l_l]^T$.

Множество связей образует множество L : $L = \{\bar{l}\}$.

Узел сети (УС) – конечное или коммутационное устройство, то есть любое устройство, участвующее в отправке и получении потоков данных. Узел сети h образует множество узлов сети H : $h \in H$.

Сеть – это граф N [14]: $N = (H, V)$, где $V \subset H^2$ – бинарное отношение на множестве H , характеризующее физическое соединение между устройствами.

Набор метрик – набор значений параметров сети, формирующих технические требования для построения промышленной сети АСУП. В математическом виде набор метрик представлен виде вектора $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, а технические требования в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} y_1^- \leq y_1 \leq y_1^+ \\ \dots \\ y_n^- \leq y_n \leq y_n^+ \end{cases}$$

где y_n^- и y_n^+ – ограничения фактора снизу и сверху, соответственно.

Технология резервирования – это технология, позволяющая при наличии между двумя устройствами резервного маршрута переключать поток данных между ними на резервный маршрут в случае недоступности основного [12]: $r = [r_1, r_2, \dots, r_r]^T$, где r_i – элементы маршрута.

Базовая топология – это отображение множества конечных устройств τ_i на сеть:

$$\tau_i : 2^E \rightarrow \{N_i\},$$

где $i = 1 : n_\tau$;

$n_\tau = |T|$ – количество заданных базовых топологий;

$T = \{\tau_i\}$ – множество базовых топологий;

2^E – множество всех подмножеств E ;

E – совокупность подмножеств;

$\{N_i\}$ – множество всех сетей.

Отображение $\varphi: H \rightarrow C$ ставит в соответствие коммутационному устройству конкретную модель коммутатора.

Теперь определим алгоритм, который будет лежать в основе метода оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей при их проектировании. Этот алгоритм

описывает выполнение двух основных процессов: выбор топологии сети и выбор параметров оборудования. Структурный синтез промышленной сети выполняется путем выбора топологии среди множества базовых. При этом базовая топология представляет собой правило, по которому строится топология реальной сети. Множество базовых топологий может быть расширено новыми.

Для каждой базовой топологии будет решена задача выбора оборудования и соединительных линий. Оборудование и соединительные линии выбираются среди множества реально существующих экземпляров, которое может быть изменено.

В качестве общего алгоритма проектирования промышленной сети АСУП нами выбран следующий:

Шаг 1. Для каждой топологии из множества базовых топологий выполнить шаги 2–4.

Шаг 2. Создать реальную топологию на основании базовой.

Шаг 3. Рассчитать максимальную загрузку сети.

Шаг 4. Найти оптимальные значения $\varphi = \varphi^*$:

$$\begin{cases} \varphi_i^* = f_0(\varphi) \rightarrow \min \\ y_j^- \leq y_j(\varphi) \leq y_j^+, j = \overline{1:n_y} \end{cases}$$

$$C_i = f_0(\varphi_i^*)$$

Шаг 5. Выбрать φ_k^*, N_k :

$$C_k = \min(C_1, \dots, C_{n_\tau}),$$

$$k = \overline{1:n_\tau}.$$

После определения алгоритма проектирования и метрики промышленных сетей возникает задача соединения и размещения оборудования, которая решается внутри одного здания. Модель здания представляет собой совокупность параллельных плоскостей, каждая из которых соответствует этажу здания. Внутри здания могут быть определены области для размещения коммутационного оборудования. Местоположение объектов внутри здания задается декартовыми координатами на этаже и номером этажа.

Входными данными этого этапа явятся несколько отображений, которые ставят в соответствие каждому устройству его положение в пространстве и порядковый номер. Подзадача соединения оборудования решается с применением метода одиночных связей, опирающегося на иерархическую кластеризацию [15]. На основе модификации метода сформирован следующий алгоритм размещения оборудования:

Шаг 1. Каждой точке присваивается свой кластер, каждый из которых содержит один элемент. Расстояние между кластерами равно расстоянию между точками.

Шаг 2. Находится ближайшая пара кластеров, которая объединяется в один при условии, что расстояние между ними менее 100 м и общее количество кластеров больше двух. Расстоянием между кластерами считается расстояние между ближайшими точками.

Шаг 3. Вычисляются расстояния между новым кластером и каждым из существующих.

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока количество кластеров не перестанет уменьшаться.

В случае использования трехмерной модели к декартовым координатам точки на этаже добавляем высоту этажа. Тогда задача размещения решается следующим образом:

Шаг 1. Для каждого кластера определяется центр масс.

Шаг 2. Соответствующий коммутатор каждого кластера помещается в ближайшую серверную относительно определенного центра масс.

Шаг 3. Центральные коммутаторы помещаются в серверную, ближайшую к центру масс всех устройств.

По итогам размещения получаем отображение, которое ставит в соответствие каждой связи длину, равную евклидову расстоянию между точками в пространстве.

После решения описанных выше задач наступает **этап расчета максимальной загрузки**. Данный этап имеет ключевое значение при выборе оборудования и каналов связи. Когда все устройства сети участвуют в обмене данными, то каждое состояние сети S_k соответствует максимальному сочетанию пар в полном графе с вершинами, символизирующими конечные устройства. Это может быть выполнено в соответствии со следующим алгоритмом:

Шаг 1. Для каждого остовного дерева графа T выполнить шаги 2–4. Перебрать остовные деревья можно путем последовательного удаления сочетаний цикломатического числа ребер $V(x) = m - n + p$, где m – количество ребер; n – количество вершин; p – количество связных частей графа.

Шаг 2. Для каждого состояния сети S_k выполнить шаг 3.

Шаг 3. Рассчитать максимальную загрузку всех ребер остовного дерева, для чего последовательно рассмотреть пути между парами взаимодействующих устройств в ориентированном графе, прибавляя каждому ребру соответствующее значение максимального потока данных каждого конечного устройства. Найти значение максимального потока данных на коммутаторе, равного входящей степени вершины.

Шаг 4. Для каждого ребра остовного дерева назначить вес, равный максимальному среди весов для каждого состояния этого дерева.

Шаг 5. Для каждого ребра графа T назначить максимальных вес из весов всех остовных деревьев.

Таким образом, по итогам выполнения алгоритма для каждой из базовых топологий получим набор взвешенных графов. Далее необходимо для каждой конфигурации подобрать оборудование и выбрать оптимальную конфигурацию из полученного множества, то есть возникает задача комбинаторной оптимизации. Выбор оборудования происходит среди объектов множества F , $F \subset C$. Множество F включает в себя устройства, соответствующие требованиям производства, таким, как класс защищенности, рабочие температуры, допустимая влажность и т. д. С математической точки зрения, задачей рассматриваемого этапа является поиск такого φ , которое обеспечит выполнение следующих ограничений:

$$\begin{cases} C(\varphi) \rightarrow \min - \text{стоимость сети} \\ A(\varphi) \geq A^- - \text{доступность сети} \\ D(\varphi) \geq D^+ - \text{максимальные задержки} \\ J(\varphi) \geq J^+ - \text{максимальный джиттер} \\ L(\varphi) \geq L^+ - \text{максимальные потери} \end{cases}$$

Оператор $\varphi: H \rightarrow F$, φ ставит в соответствие коммутационному устройству H конкретную модель коммутатора F , соответствующую требованиям производства.

С целью решения оптимизационной задачи нами разработана целевая функция, которая определяет критерии оптимального выбора. Главным из таких критериев является стоимость, то есть следует выполнить поиск такой конфигурации сети, при которой, не жертвуя параметрами качества сети, будет оптимизирована стоимость оборудования.

В математическом виде целевая функция примет следующий вид:

$$C = \sum_j C_2^{(j)}$$

где $C_2^{(j)}$ – стоимость коммутатора.

В математической модели комбинаторной оптимизации будем использовать следующие метрики промышленной сети.

Односторонняя задержка зависит от задержки распространения сигнала (*propagation delay*), задержки передачи пакета в сеть (*serialization delay*), задержки очередности на интерфейсе (*queuing delay*) [16]. Для произвольного участка сети формула расчета задержки будет выглядеть следующим образом:

$$D = \sum_i \left[\frac{8 \times PS}{l_1^{(i)}} + \frac{8 \times PS}{l_1^{(i)} - U_1} + l_2^{(i)} \times l_3^{(i)} \right]$$

где PS – размер пакета, байт;

l_1 – максимальный поток данных, который может быть обработан на интерфейсе, бит/с;

U_1 – текущий поток данных на канале связи, бит/с;

l_2 – скорость распространения сигнала, с;

l_3 – длина кабеля, м.

Доступность промышленной сети рассчитывается по формуле:

$$A_{net} = \frac{MTBF_{net}}{MTBF_{net} + CT_N},$$

где $MTBF_{net}$ – среднее время между сбоями промышленной сети;

CT_N – время конвергенции протокола резервирования при заданной конфигурации сети.

Джиттер возникает из-за очередей на интерфейсах коммутационного оборудования. Для кольцевой топологии максимальный джиттер определяется по формуле [16]:

$$J_r = CT_N + n_h \times pd_N$$

где n_h – количество устройств в кольцевой топологии;

pd_N – вносимая каждым коммутационным устройством сети дополнительная задержка ко времени конвергенции протокола резервирования.

Для топологии «зарезервированная звезда» максимальный джиттер будет рассчитываться по формуле [16]:

$$J_s = \max(CT_N^{(i)}), i = \overline{1:n_{rl}},$$

где n_{rl} – количество зарезервированных связей.

Максимальные потери на канале составляет разница между отправленным количеством пакетов и полученным количеством пакетов. Как правило, эта разница выражается в процентном соотношении.

$$L_k = \frac{\sum_i L_{ci}(CT_N, l_{4j}^{(i)}, C_{li})}{\sum_i CT_N \times \sum_i l_{4j}^{(i)}}$$

$$L_{ci}(CT_N, l_{4j}^{(i)}, C_{li}) = \begin{cases} 0 & \text{при } C_{li} > CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} \\ CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} - C_{li} & \text{при } C_{li} \leq CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} \end{cases}$$

где $j = \overline{1:n_l}$, здесь n_l – количество смежных с вышедшим из строя коммутаторов;

$i = \overline{1:n_j}$, здесь n_j – количество инцидентных связей для смежных вышедшему из строя коммутаторов;

C_{li} – размер буфера i -ого коммутатора, бит.

Ожидаемую загрузку l_4 инцидентных связей вышедшего из строя коммутатора считаем равной нулю.

Приведенная формула представляет собой отношение количества пакетов, суммарный размер которых превышает размер буфера коммутатора, к сумме всех передаваемых пакетов за время конвергенции CT_N .

$$L = \max(L_k), k = \overline{1:n_c},$$

где n_c – количество коммутационных устройств.

Решение поставленной оптимизационной задачи не может быть получено простым перебором в силу огромного множества различных комбинаций параметров промышленной сети.

Для выбора метода оптимизации были проанализированы различные техники оптимизации. Наиболее перспективным оказался метод отжига – разновидность метода Монте-Карло, использующий упорядоченный случайный поиск на основе аналогии с процессом образования в веществе кристаллической структуры с минимальной энергией при охлаждении [17]. Аналогом энергии в данном исследовании является стоимость оборудования $E = f(x)$, а аналогом температуры T – вектор параметров системы.

При поиске минимума целевой функции $f(x)$ – стоимости оборудования рассчитываемой характеристикой является вероятность $h(\Delta E, T)$ перехода системы из текущего состояния к следующему, где ΔE – изменение стоимости системы при переходе к новому состоянию.

В качестве функции $h(\Delta E, T)$ будем использовать $h(\Delta E, T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$, что соответствует характеру изменения суммарной стоимости оборудования при уменьшении количества его единиц.

Представим применение метода отжига следующим алгоритмом:

1. Произвольный выбор начального состояния $x_0 \in S$, где x – состояние системы, S – пространство состояний.
2. Определение текущего значения $E = f(x_0)$
3. Итерационный процесс определения глобального минимума целевой функции по методу отжига.

Оптимизируемая система представляет собой граф с n вершинами, каждой из которых может быть поставлена в соответствие модель коммутатора. Отображение элементов графа на определенный коммутатор представим в виде n -мерного вектора $x = [x_0 \dots x_{n-1}]$, в котором каждый элемент является идентификатором модели соответствующего узла сети. Все возможные значения x образуют пространство состояний S .

Суммарная стоимость всех коммутаторов сети определяется по формуле:

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} C_i$$

Согласно Больцмановской схеме, изменение параметров задается формулой [17]:

$$T(k) = \frac{T_0}{\ln(1+k)}, k > 0$$

где T_0 – начальный вектор параметров;

k – номер шага итерационного процесса.

Далее выбирается семейство нормальных распределений $G(x, T)$ с математическим ожиданием x и дисперсией T , задаваемое плотностью:

$$g(x, T) = (2\pi T)^{-\frac{D}{2}} \times \sum_{i=0}^{n-1} e^{-\frac{|x_i-x|^2}{2T}},$$

где D – размерность пространства состояний.

Данное распределение является частью Больцмановской схемы, для которой доказано, что при достаточно больших T_0 и общем количестве шагов k глобальный минимум может быть гарантированно найден.

Заключение

Предложенный метод оптимизации проектирования промышленной сети позволяет многократно ускорить процесс разработки проекта сети и предоставить проектировщику системы готовое техническое решение. Метод представлен в виде программного продукта, который апробирован в производстве фрикционных углеродных дисков на ОАО АК «Рубин». Промышленная сеть на производстве предназначается для передачи управляющих программ, технологической документации, команд, обеспечивающих управление вспомогательным оборудованием. От систем ЧПУ и ПЛК на SCADA систему в режиме реального времени по сети передается также диагностическая информация. По результатам выполненной оптимизации стоимость проектирования системы снижена на 18%, трудозатраты – на 20 рабочих часов. Очевидные выгоды от использования метода:

- уменьшение числа ошибок на этапе создания рабочего проекта;
- структуризация процесса проектирования;
- четкая формализация требований;
- экономия времени квалифицированных сотрудников при составлении топологии, спецификаций и других проектных документов;
- снижение стоимости системы.

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008).

Литература:

1. Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Proceed. of the 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity (SCoReD 2016). IEEE, 2016. P. 7810088.
2. Kurnasov E.V. Creation of plastic zones and their cross sections in NC CAD equipment // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 2. P. 191–193.
3. Kurnasov E.V. Design of housing components in NCCAD system // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 8. P. 841–847.
4. Кушнир А.П. Визуализация геометрической задачи ЧПУ // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 4(9) (т. 2). С. 127–139.
5. Кушнир А.П. Виртуальный контроль сборки изделия на стадии проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 5. С. 54–56.
6. Holopov V., Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceed. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. IEEE. 2017. P. 863–868.
7. Курнасов Е.В. Метод ситуативного изменения поведения объектов АСУТП в пользовательских интерфейсах SCADA-систем // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 4. С. 20–28.
8. Kurnasov E.V. Object attachment of devices in SCADA systems // Russian Engineering Research. 2013. V. 33. № 3. P. 152–155.
9. Курнасов Е.В. Оценка эффективности автоматизированного технологического процесса с учетом его декомпозиции и синтеза подпроцессов // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 4. С. 31–35.
10. Курнасов Е.В. Оценка степени межуровневого взаимодействия информационных потоков производственного предприятия с MES-системой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 3. С. 3–5.
11. Офицеров А.И. Проектирование сетей передачи данных автоматизированных систем управления промышленных предприятий: дис. ... канд. тех. наук. Орел, 2010. 110 с.
12. Руководство по технологиям объединенных сетей: справ. по сетевым технологиям Cisco Systems Inc. пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2005. 76 с.

13. Золотарев А.А. Методы оптимизации распределительных процессов. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
14. Хаггарти Р. Дискретная математика для программистов. М.: Техносфера, 2012. 400 с.
15. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия. М.: Финансы и статистика, 1988. 345 с.
16. Sean R. Cisco Systems Inc. Designing for Cisco Internetwork Solutions (DESGN) Foundation. USA: Cisco Press, 2011. 576 p.
17. Лопатин А.С. Метод отжига. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2005. 149 с.

References:

1. Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Proceed. of the 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity (SCOReD 2016). IEEE, 2016. P. 7810088.
2. Kurnasov E.V. Creation of plastic zones and their cross sections in NC CAD equipment // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. N. 2. P. 191–193.
3. Kurnasov E.V. Design of housing components in NCCAD system // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. N. 8. P. 841–847.
4. Kushnir A.P. Visualization of geometrical problems CNC // Vestnik MGTU MIREA (Bulletin of MSTU MIREA). 2015. № 4(9) (vol. 2). P. 127–139. (in Russ.).
5. Kushnir A.P. Virtual control of the product assembly at the design stage // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii (Assembling in Mechanical Engineering, Instrument Making). 2009. № 5. P. 54–56. (in Russ.).
6. Holopov V., Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceed. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. IEEE. 2017. P. 863–868.
7. Kurnasov E.V. Situational change method of the APCS objects behavior in the user SCADA systems interfaces // Automation and modern technology. 2014. № 4. P. 20–28. (in Russ.).
8. Kurnasov E.V. Object attachment of devices in SCADA systems // Russian Engineering Research. 2013. V. 33. N. 3. P. 152–155.
9. Kurnasov E.V. The effectiveness valuation of the automatic process, by taking into account its decomposition and subprocesses synthesis // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii (Automation. Modern technology). 2016. № 4. P. 31–35. (in Russ.).
10. Kurnasov E.V. Estimation of the degree of interlevel interaction of information streams of manufacturing enterprise with system MES // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii (Assembling in Mechanical Engineering, Instrument Making). 2012. № 3. P. 3–5. (in Russ.).
11. Ofitserov A.I. Designing data transmission networks of automated control systems for industrial enterprises: dissertation ... Ph.D (Eng). Orel, 2010. 110 p. (in Russ.).
12. A guide to integrated network technologies. Cisco Systems Inc. Trans. from English.

М.: O.D. Williams, 2005. 76 p. (in Russ.).

13. Zolotarev A.A. Methods of distribution processes optimization. Moscow: Infra-Engineering, 2014. 160 p. (in Russ.).

14. Haggarty R. Discrete mathematics for programmers. Moscow: Technosphere, 2012. 400 p. (in Russ.).

15. Zhambu M. Hierarchical cluster analysis and correspondence. Moscow: Finance and Statistics, 1988. 345 p. (in Russ.).

16. Sean R. Cisco Systems Inc. Designing for Cisco Internetwork Solutions (DESGN) Foundation. USA: Cisco Press, 2011. 576 p.

17. Lopatin A.S. Annealing method. Saint Petersburg: St. Petersburg State University, 2005. 149 p. (in Russ.).

Об авторах:

Холопов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Каширская Елизавета Натановна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Гусев Максим Викторович, аспирант кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir A. Kholopov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Elizaveta N. Kashirskaya, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Maxim V. Gusev, Postgraduate Student of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).