



# ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научно-теоретический журнал

Издается с января 2000 г.

Периодичность - 6 раз в год.

# 4(112)'2018

### СОДЕРЖАНИЕ

- ДРАГАН А. В., ПАРФИЕВИЧ А. Н., СОКОЛ В. А.** Виброакустическая диагностика многозубчатых приводов на основе использования нейронной сети векторного квантования ..... **2**
- ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., САЗОНОВ М. И., ХВИСЕВИЧ В. М., БАТРАК В. В., ОНЫСЬКО С. Р.** Поверхностное плазменное азотирование измельчителей древесных отходов ..... **6**
- ОМЕСЬ Д.В., ДРАГАН А.В.** Применение технологии вейвлет-преобразования в исследовании динамических процессов при зацеплении зубчатых колес ..... **9**
- САХАНЬКО С. А., БОСЯКОВ М. Н., НЕРОДА М. В.** Технологические особенности ионного азотирования изделий из инструментальных сталей для горячей и холодной обработки ..... **13**
- КАЛУГИН Ю. К., ЛЕЩИК С. Д.** Моделирование тепловых режимов и конструктивных параметров при оценке фрикционно-износных характеристик пары трения ..... **16**
- СОТНИК Л. Л., СИВАЧЕНКО Л. А., БОГДАНОВИЧ И. А.** Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибривалкового измельчителя ..... **19**
- САНЮКЕВИЧ Ф. М., МОНТИК С. В.** Особенности работы подшипников качения в узлах механических приводов ..... **22**
- ШУПАН П. И., ЛЕЩИК С. Д., ШАВИРИН П. Д.** Исследование структуры и свойств композиционных полимерных покрытий на основе полиамида 6 ..... **25**
- ЗАЕЦ Н. А., ВЛАСЕНКО Л. О., ЛУЦКАЯ Н. Н., ШТЕПА В. Н.** Современные технологии оценивания режимов работы технологических комплексов пищевых производств ..... **28**
- АЛЕКСЕЕВСКИЙ Д. Г., ПРОКОПЕНЯ О. Н., ПАНКОВА О. О., МАНАЕВ К. В.** Анализ эффективности алгоритмов управления ветрозонной установкой с аэродинамическим мультиплецированием ..... **31**
- ГАЗБАНЗАДЕХ Э., СОКОРОВ И. О., ВАНЮК Э. А.** Антифрикционное покрытие на основе сплава баббита и медного композита ..... **33**
- ХВЕСЬКО Г. М., ВАЙТЕХОВИЧ П. Е., БОРОВСКИЙ Д. Н.** Мощность привода дисковой заглаживающей машины с планетарным приводом ..... **37**
- ОНЫСЬКО С. Р., ХВИСЕВИЧ В. М., ТОМАШЕВ И. Г.** Определение усилий упрочненных цилиндрических пуансонов и их относительной деформации в технологических процессах пробивки отверстий ..... **39**
- УСТИНОВ Д. Б.** Учет вязко-пластичных свойств порошка из крошечных битумных отходов при разработке виброгрохота-классификатора ..... **43**
- ПАНТЕЛЕЕНКО Е. О., БОРОВСКИЙ Д. Н., ГАРАБАЖИУ А. А.** Сравнительный анализ процесса помола волокнистого материала в планетарной и роторной мельницах ..... **47**
- МЕДВЕДЕВ О. А.** Снижение трудоемкости сборки путем определения доли изделий, не требующих пригонки изначально изготовленных компенсаторов ..... **49**
- БАСИНЮК В. Л., ЕЛОВОЙ О. М., ШКОЛЫК С. Б., БУЛАВИЦКИЙ Н. Н., ЕРМАК А. О., ВОЛКОТРУБ Р. Е.** Методические подходы к созданию современного прецизионного оборудования точного электронного машиностроения ..... **54**
- ГАВРИЛОВА В. В., ВОРОНЦОВ А. С., ЧАУСОВА Т. А.** Оптимизация технологических режимов изготовления изотермических емкостей ..... **57**
- ИВАНОВ В. П., ВИГЕРИНА Т. В.** Определение остаточного ресурса автомобильных агрегатов ..... **60**
- ПОБОЛЬ И. Л.** Методы высокоэнергетической обработки материалов. Опыт освоения в промышленности ..... **64**
- ЛЯВШУК И. А., ЛЮПО В. А., ХВИСЕВИЧ В. М., ОВЧИННИКОВ Е. В., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., НИКИТИН А. В.** Связь температуры Дебая с параметрами свойств кристаллов ..... **68**
- ОСНОВИН В. Н., СЕРГЕЕВ К. Л., ДУБНОВИЦКИЙ С. К.** Исследование смазочно-охлаждающих жидкостей, полученных на основе рециклинга отходов производства, для механической обработки поверхностей деталей ..... **72**
- МАЗЫЛЮК П. В.** Техническая разработка метода безостановочного проезда светофорных объектов ..... **76**
- СИТОВСКИЙ О. Ф., ДЕРКАЧ В. Л.** Технология предпускового подогрева для подзаряжаемых гибридных электромобилей ..... **79**

**Заец Н. А., Власенко Л. О., Луцкая Н. Н., Штепа В. Н.**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Введение.** Технологические комплексы (ТК) пищевых производств имеют сложную структуру и состоят из большого количества взаимосвязанных аппаратов, объединенных материальными, информационными, тепловыми и энергетическими потоками в отделения, цеха и производства [1].

В качестве примера приведен анализ молочного производства, особенностью которого является широкий ассортимент производимой продукции, разнообразие и количество видов которой может потребовать изменений в силу объективных факторов (изменения качества сырья, поступающего на предприятие, изменения спроса, состояния оборудования и т. п.) в условиях переработки быстропортящихся сырья и полуфабрикатов [2]. Для эффективной работы ТК молокозавода особое значение имеет определение узких мест и недопущение появления нештатных ситуаций и простоев. Это возможно только при своевременной и объективной информации о состоянии производства.

Технологический комплекс молочного завода относится к классу сложных систем, поскольку относится к предприятиям средней или

высокой мощности, является многофункциональным, разнородным, с комбинированной технологической топологией соединения элементов, с иерархической структурой, количество элементов превышает  $10^3$ . Кроме того, следует отметить, что производство можно разделить на подсистемы, соответствующие отдельному технологическому процессу или производству продукта. Поэтому ТК обладает определенной степенью автономности составляющих с возможностью управления ими на основании разных критериев оптимальности. Подсистемы при этом связаны сложными структурными и функциональными отношениями, что требует координации их работы между собой [3].

Для эффективной работы ТК молокозавода необходимо обеспечить следующие требования для каждой составляющей:

Сырье:

- обеспечение соответствующего качества исходного сырья;
- сохранение сырья со строгим соблюдением регламентированных условий: температурных, качественных (влажность, pH и т. д.) и других режимов;

---

**Заец Наталья Анатольевна**, к. т. н., доцент кафедры автоматизации и робототехнических систем им. акад. И.И. Мартыненко Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, доцент, e-mail: z-n@ukr.net.

Украина, 04300, г. Киев, ул. Героев Оборона 15, корпус 11.

**Власенко Лидия Александровна**, к. т. н., доцент кафедры интегрированных автоматизированных систем управления Национального университета пищевых технологий Украины, доцент, e-mail: lutskanm2017@gmail.com.

**Луцкая Наталья Николаевна**, к. т. н., доцент кафедры автоматизации и интеллектуальных систем Национального университета пищевых технологий Украины, доцент, e-mail: lutskanm2017@gmail.com.

Украина, 04300, г. Киев, ул. Владимирская, 68.

**Штепа Владимир Николаевич**, к. т. н., доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета а, доцент, e-mail: shns1981@gmail.com.

Беларусь, 225710, г. Пинск, ул. Днепровской Флотилии, 23.

- быстрое использование сырья в производстве из-за быстрого ухудшения качества;
- использование сырья в производстве в строго указанные сроки.
- Электроэнергия:
- обеспечение бесперебойной подачи электроэнергии.
- Тепловая энергия:
- обеспечение бесперебойной подачи тепловой энергии;
- обеспечение заданных параметров тепловой энергии (температуры, расхода, давления и т. п.).
- Газ:
- обеспечение бесперебойной подачи газа;
- обеспечение заданных параметров (расход, давление и т. д.).
- Хладагенты:
- обеспечение бесперебойной подачи хладагентов;
- обеспечение заданных параметров хладагентов (температуры, расхода, давления и т. п.).
- Оборудование:
- обеспечение бесперебойной работы технологических аппаратов;
- обеспечение бесперебойной работы микропроцессорных контроллеров;
- обеспечение бесперебойной работы электродвигателей;
- обеспечение бесперебойной работы электронасосов;
- обеспечение бесперебойной работы измерительных приборов;
- соблюдение графика проведения профилактических ремонтных работ.
- Готовая продукция:
- строгое соблюдение технологического регламента при производстве;
- обеспечение соответствующего качества готовой продукции;
- сохранение готовой продукции со строгим соблюдением регламентированных условий и режимов;
- обеспечение требований по транспортировке готовой продукции в распределительной сети и / или до конечного потребителя;
- реализация готовой продукции в строго указанные сроки.

Учитывая указанные особенности, современные молочные предприятия ставят высокие требования к обеспечению ресурсами надлежащего качества, согласованности по времени и месту проведения совокупности технологических процессов, что достигается за счет бесперебойной работы технологического оборудования, электрооборудования, элементов систем автоматизации и информационных устройств. Первоочередной задачей в этих условиях является удовлетворение требований по повышению оперативности и достоверности информации о состоянии оборудования, производственной информации, улучшению прогнозирования возможных простоев, поломок, незапланированных ремонтных работ.

Существующие автоматизированные системы основаны на разных методах и подходах оптимального и робастного управления [4], координации, ситуационно-сценарного подхода [5], экспертных оценках и др. Как правило, работа их основана на анализе и коррекции технологических параметров, а состояние оборудования не учитывается. При этом следует отметить, что разного рода поломки оборудования приводят к нештатным ситуациям, а иногда и к предаварийным и аварийным.

Для обеспечения стабильной работы ТК молокозавода следует разработать автоматизированную систему, которая формировала бы управляющие воздействия на основании технологических параметров объекта, но и обеспечивала бы анализ текущей ситуации (штатная / нештатная / аварийная), оцениванием состояния оборудования.

**Постановка задачи.** Разработать структуру системы автоматизированного управления молокозаводом на основании сценарно-целевого подхода с учетом состояния оборудования.

**Материалы и методика исследований.** При автоматизации ТК возникает ряд специфических задач [6]: определение количества подсистем, связанных между собой сложными структурными, информационными, энергетическими, электрическими и функциональными отношениями; возможность управления выделенными подсистемами на основе различных критериев оптимальности; решения

задач оперативной оптимизации для выделенных подсистем; реализация координации их работы. Решение поставленных задач невозможно без учета основной причины увеличения финансовых затрат при работе ТК, а именно, возникновение поломок и, как следствие, простоев. Причин выхода технологического, электрического и технического оборудования из строя много, к основным можно отнести:

- несоблюдение технологического регламента;
- изменение качества сырья;
- резкие колебания в электрической сети;
- несвоевременное проведение регламентных ремонтных работ;
- несвоевременное / некачественное тестирование оборудования, в частности микропроцессорного;
- нарушение графика профилактических работ;
- разного типа повреждения оборудования и приборов (например, механические);
- дефекты в конструкции, которые проявляются со временем;
- чрезмерная нагрузка на подшипники и валы;
- засорения и заклинивания клапанов;
- различные виды закупорки;
- неправильное распределение вещества в аппаратах, недостаточное перемешивание, перегрев, появление осадка, разрушения материалов под химическим воздействием различных веществ, которые используются в процессе, и др.

Для оценки режимов функционирования ТК целесообразно выделить последовательность состояний системы  $E_1, E_2 \dots E_k, \dots$  каждый из которых оценивается определенными показателями системы  $X_k, Y_k, U_k$  и внешней среды (включая риски)  $\Theta_k$  [7]:

$$E_k \{R_{sd}, R_{os}, R_{tr}^-, R_{tr}^+\} = f(X_k, Y_k, U_k, \Theta_k), \quad (1)$$

где  $X_k$  – вектор внутренних параметров (конструктивные, технологические и др. показатели);  $Y_k$  – вектор внешних параметров (технические, экономические и др. показатели качества функционирования системы);  $U_k$  – вектор управляющих параметров.

Все действия и мероприятия, которые проводятся на заводе, направленные на обеспечение штатного режима  $R_{sd}$  работы ТК, при котором все показатели  $X_k, Y_k, U_k, \Theta_k$  находятся в априорно заданных интервалах. Когда отдельные показатели или определенные сообщения показателей выходят за пределы заданных интервалов, система переходит в нештатный режим  $R_{os}$ . Переход системы в нештатный режим соответствует переходному режиму: неуправляемый  $R_{tr}^-$ , который обусловлен действием множества  $M_{tr}$  факторов риска, которые приводят к нештатному режиму:

$$R_{tr}^- : R_{sd} \xrightarrow{M_{tr}} R_{os}. \quad (2)$$

Переход системы в нештатный режим соответствует переходному режиму: управляемому  $R_{tr}^+$ , когда под действием влияния управления  $U_{tr}$  система возвращается из нештатного режима в штатный:

$$R_{tr}^+ : R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}. \quad (3)$$

Для нахождения системы в рабочем состоянии необходимо обеспечить соответствие следующим условиям:

$$\eta_i^- < \eta_i \leq \eta_i^+, W_i^- < W_i \leq W_i^+, T_{oi} \leq T_{oi}^{don}, \quad (4)$$

где  $\eta_i$  – степень риска, то есть вероятность появления нежелательных последствий действия каких-либо факторов риска в момент времени  $T_i \in T^\pm$  в процессе функционирования системы;  $W_i$  – уровень риска, то есть величина ущерба нежелательных последствий любых факторов риска в момент времени  $T_i \in T^\pm$ ;  $T_o$  – ресурс допустимого риска, то есть продолжительность периода функционирования системы в определенном режиме, в течение которого степень и уровень риска в результате действия факторов риска не превысят априорно заданных допустимых значений.

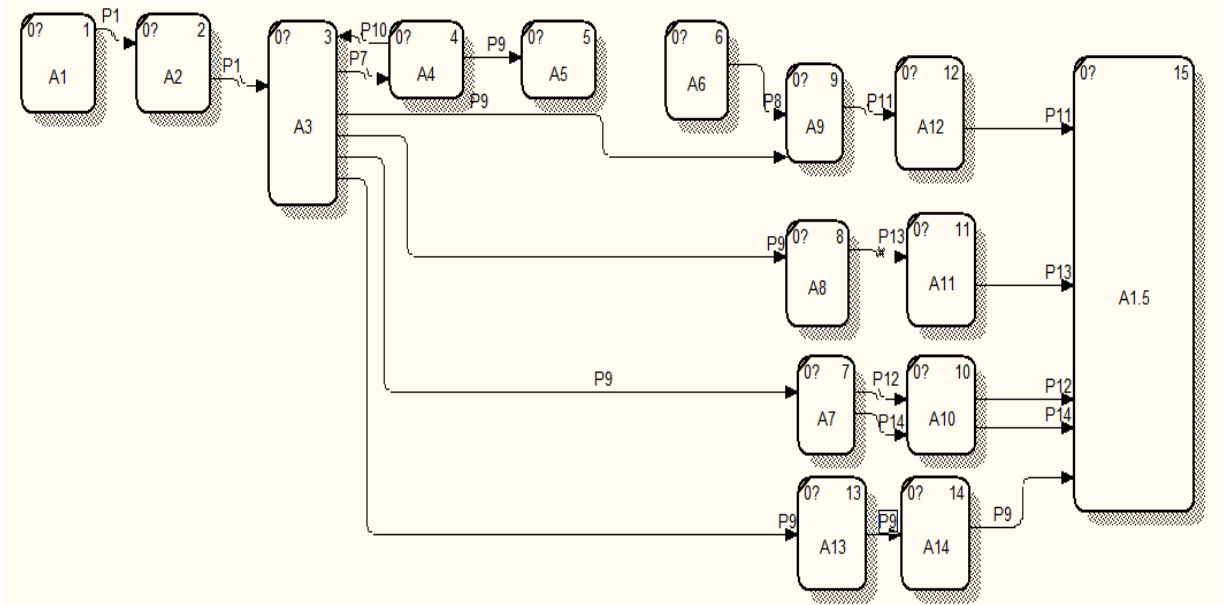


Рисунок 1 – А-сценарий работы ТК молокозавода

Решение поставленных проблем невозможно без проведения грамотного системного анализа ТК на начальном этапе, которое позволит установить четкие связи между его элементами, определить проблемные и узкие места, которые являются основой для разработки эффективных стратегий в дальнейшем. Обязательным условием является четкое формулирование единых целей и задач для дальнейшего определения путей наиболее эффективного их решения как для системы в целом, так и для отдельных ее составляющих. Для этого используем сценарно-целевой подход, предложенный А. С. Юдицким [8].

**Результаты исследований.** Работу ТК молокозавода в общем виде можно представить в виде А-сценария (абстрактного сценария), который описывает преобразования входного объекта в выходной без учета внутренней структуры объектов (рис. 1). Выделяются цели и факторы, влияющие на их достижения.

А-сценарий не раскрывает внутреннюю структуру объектов, взаимосвязи в системе и задается набором:

$$AS = \langle F, P, \Phi, R, C \rangle, \quad (5)$$

где  $F$  – множество операций;  $P$  – множество потоков;  $\Phi$  – множество факторов, влияющих на выполнение сценария;  $R$  – множество ресурсов;  $C$  – множество целей.

В сценарии (рис. 1)  $A_0$  – это верхний уровень, соответствующий сценарию в целом, он, в свою очередь, детализируется операциями  $A_1, \dots, A_n$ . На вход подаются объектные (согласно заказам, мощности завода, технологического графика выпуска) и ресурсные (как правило, определяются запасами на складе) потоки, которые могут быть также входящими потоками для любой внутренней операции в разном соотношении; на выходе указываются выходные потоки, причем для предотвращения путаницы каждой одной исходной стрелке ставится в соответствие строго одна исходная внутренняя стрелка.

Для построения А-сценария выделены операции:  $A_1$  – приемка и учет количества молока;  $A_2$  – накопление и охлаждения сырого цельного молока;  $A_3$  – пастеризация;  $A_4$  – сепарирование;  $A_5$  – резервирование нормализованного молока;  $A_6$  – приготовление закваски;  $A_7$  – приготовление сметаны;  $A_8$  – приготовления творога;  $A_9$  – приготовление кефира;  $A_{10}$  – фасовка сметаны;  $A_{11}$  – фасовка творога;  $A_{12}$  – фасовка кефира;  $A_{13}$  – охлаждение пастеризованного молока;  $A_{14}$  – фасовки молока;  $A_{15}$  – хранение готовой продукции.

Для построения абстрактного  $A_0$ -сценария ТК молокозавода приведены основные объектные и ресурсные потоки. Основные потоки:  $P_1$  – сырое цельное молоко;  $P_7$  – информационные потоки;  $P_8$  – закваска;  $P_9$  – пастеризованное молоко;  $P_{10}$  – сливки;  $P_{11}$  – кефир;  $P_{13}$  – творог;  $P_{14}$  – сметана.

Построение А-сценария производилось с помощью программного продукта AllFusion Process Modeler (рис 1).

При построении С-сценария, детализирует А-сценарий, согласно

с методологией объектно-ориентированного подхода, учитывается "мутация" или эволюция объектов, передаваемых между операциями, описываются определенным множеством атрибутов с соответствующим набором значений. Этот же набор значений атрибутов является основой для определения текущего состояния объекта.

В С-сценарии каждая операция А-сценария рассматривается как отдельный класс, а экземпляры – соответствующие операциям объекты.

Для детализации А-сценариев выделяются атрибуты  $a_{1.1} - a_{n.m}$ . Для наследственных атрибутов начальные значения формируются в тех классах, из которых эти атрибуты наследуются. Атрибуты является одним из оснований для построения эволюционно-поточной диаграммы.

На рис. 2 представлен фрагмент С-сценария для ТК молокозавода, класс 7, где  $a_{1.1}$  – температура молока,  $a_{1.2}$  – жирность молока,  $a_{1.3}$  – кислотность молока,  $a_{7.1}$  – жирность сливок,  $a_{7.2}$  – температура подогретых сливок,  $a_{7.3}$  – температура сквашивания,  $a_{7.4}$  – pH,  $a_{7.5}$  – время выдержки,  $a_{7.6}$  – органолептические требования;  $S_{7.1}$  – подогрев сливок,  $S_{7.2}$  – охлаждение до температуры сквашивания,  $S_{7.3}$  – внесение закваски,  $S_{7.4}$  – проверка качества сметаны.

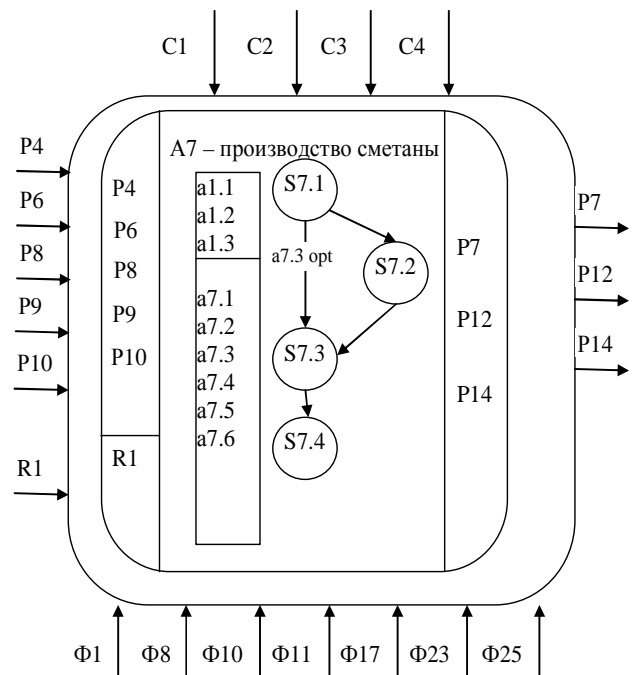


Рисунок 2 - Фрагмент С-сценария для ТК молокозавода, класс 7

C1, C2, C3, C4 – векторы целей соответственно изготовления продукции, технического обслуживания оборудования, обеспечения качества, управление запасами, которые согласуются с вектором экономических целей C0; R1 – заквасочные культуры; P4 – горячая вода; P6 – холодная вода; Ф1 – соблюдение технологического регламента; Ф8 – проверка изоляции теплового оборудования согласно графику; Ф10 – обеспечение бесперебойной работы котла; Ф11 – соблюдение технологии охлаждения воды; Ф17 – соблюдение графика плановых ремонтных работ; Ф23 – прогнозирование затрат на ремонт оборудования, узлов и механизмов; Ф25 – анализ причин поломок.

На основании составляющих C-сценария, на каждом жизненном цикле можно построить оптимизационную задачу и найти оптимальные значения атрибутов. Примером такой постановки задачи для класса 7 будет

$$J(\bar{a}, \bar{P}, \bar{R}, \bar{\Phi}) = \varphi(\bar{a}, \bar{P}, \bar{R}, \bar{\Phi}) \rightarrow \underset{\substack{\Phi \in \Omega_{\Phi}, \\ P \in \Omega_P}}{exrt}}{\Rightarrow} a7.3opt,$$

где множества  $\bar{a}, \bar{P}, \bar{R}, \bar{\Phi}$  задаются соответственно своими составляющими;  $\Omega_{\Phi}, \Omega_P$  – ограничения на соответственные множества; функция  $\varphi()$  описывает сводный критерий класса, основанный на целях C1–C4.

Результатом выполнения C-сценария является вектор из элементов множеств  $X_7, Y_7, U_7, \Theta_7$ , который описывает текущие состояния системы на каждом жизненном цикле  $E_7$ . На основании данной информации можно сделать вывод о рабочей или нештатной оперативной ситуации.

В дальнейшем планируется разработка программного обеспечения подсистемы поддержки принятия решений, которая в оперативном режиме будет обеспечивать советы оператору относительно работы отделений молокозавода, уменьшать простои за счет своевременного выявления и устранения возможных причин поломок, проведение внеплановых мелких ремонтных работ с целью предотвращения серьезных ремонтов.

**Заключение.** Системный анализ ТК молокозавода позволил выявить ряд причин выхода технологического, электрического и автоматического оборудования из строя, что приводит к переходу систе-

мы в нештатный режим работы. Формализован переход системы из нештатного режима в рабочий при помощи использования сценарно-целевого подхода, построения A- и C-сценариев, которые являются основанием для проведения имитационного моделирования на этапе разработки подсистемы поддержки принятия решения.

Внедрение предложенной подсистемы поддержки принятия решений позволит повысить эффективность работы ТК за счет уменьшения простоев, своевременного определения текущей ситуации и принятия, на основании сделанных выводов, оперативного решения относительно состояния оборудования и технологического процесса.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Korobichuk, I. Modern Development Technologies and Investigation of Food Production Technological Complex Automated Systems / I. Korobichuk, A. Ladanyuk, L. Vlasenko, N. Zaiets Proceedings of 2nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering ICMSC 2018. – Amsterdam, Netherlands. – February 21–23. – 2018. – P. 52–56.
2. Машкін, М. І. Технологія молока і молочних продуктів: Навч. видання / М. І. Машкін, Н. М. Париш. – К.: Вища освіта, 2006. – 351 с.: іл.
3. Ладанюк, А. П. Системний аналіз складних систем управління: навч. посіб. / А. П. Ладанюк, Я. В. Смітюх, Л. О. Власенко, Н. А. Заєць, І. В. Ельперін – К.: НУХТ, 2013. – 274 с.
4. Лощак, Т. В. Оптимальне управління технологічним комплексом молочного заводу / Т. В. Лощак // Аграрна наука і освіта. – К.: НАУ, 2006. – Том 7. – № 1–2. – С. 108–113.
5. Власенко, Л. О. Особливості проведення системного аналізу технологічного комплексу молокозаводу на основі ситуаційно-сценарного підходу / Л. О. Власенко, Т. В. Савченко, Є. В. Довженко // Вісник інженерної академії України. – 2014. – № 1. – С. 159–264.
6. Ладанюк, А. П. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування): монографія / А. П. Ладанюк, Н. А. Заєць, Л. О. Власенко – К.: Видавництво Ліра-К, 2016. – 312 с.
7. Згуровський, М. З. Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова – К.: Видавничка група BVH, 2007. – 544 с.: іл.
8. Юдицкий, А. С. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем / А. С. Юдицкий – М.: СИНТЕГ, 2001. – 112 с.

*Матеріал посту́пил в редакцію 20.11.2018*

#### **ZAIETS N.A., VLASENKO L.O., LUTSKAYA N.N., SHTEPA V.N. Modern technologies for estimating the operation modes of technological complexes of food production**

A systematic analysis of a typical technological complex of a dairy plant was carried out to further predict equipment malfunction. Dairy production is divided into separate components, on the basis of which an A-scenario was developed for the entire production. The task of assessing the operating modes of the control system (standard, non-standard, transitional), as well as options for the transition to normal mode is formalized.

The subsystem C-script is executed, the use of which on each life cycle will make it possible to solve the optimization problem.