

УДК 621

ПОРОГОВАЯ МОДЕЛЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
«ЧЕЛОВЕК – РОБОТ» В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ  
ИНДУСТРИИ 5.0

В. OZDEMIR, В. М. ШЕМЕНКОВ, А. А. СТАЦЕНКО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В области современного машиностроительного производства вследствие цифровизации и автоматизации в настоящее время производительность производственных систем растёт чрезвычайно быстрыми темпами. Концепция Индустрии 4.0, сформированная на основе внедрения киберфизических систем, интернета вещей и методов принятия решений, ориентированных на производственные данные, на сегодняшний день обеспечила высокий уровень автоматизации производственных процессов; однако при таких условиях роль человеческого фактора, по всей видимости, оказывается минимизированной. Указанные недостатки учитываются в рамках концепции Индустрии 5.0, которая не отвергает технологии, ранее разработанные в Индустрии 4.0, а стремится к их дальнейшему развитию и переходу к более ориентированной на человека, устойчивой и кооперативной модели производства. Существенной особенностью Индустрии 5.0 является человеко-роботное взаимодействие вместо полностью автономных производственных систем.

В данной работе рассматривается проблема оценки влияния человеческого фактора на эффективность производственных систем, реализующих принципы Индустрии 5.0. Целью исследования является анализ взаимосвязи между рабочей нагрузкой, уровнем человеческой усталости и производительностью системы в условиях человеко-роботного взаимодействия на основе упрощённой математической модели и численного моделирования. В работе влияние человеческой усталости на производственную эффективность исследовалось аналитически, а результаты моделирования были представлены в графическом виде. Это позволило визуализировать особенности изменения производительности при наступлении определенных критических значений нагрузки.

*Математическая модель*

В рамках реализации концепции Индустрии 5.0 в работе используется пороговая модель, описывающая влияние рабочей нагрузки на утомляемость человека и производительность системы «человек – робот». Предполагается, что уровень утомляемости возрастает с увеличением рабочей нагрузки и при достижении критического значения приводит к снижению эффективности производственного процесса. До наступления критического порога производительность системы поддерживается за счёт роботизированной поддержки, тогда как при его превышении наблюдается зона потери производительности. Модель основана на предположении о монотонном росте утомляемости и учитывает

положительный вклад роботизированных систем в рамках человеко-ориентированного подхода Индустрии 5.0.

### *Программная реализация модели*

Программная реализация предложенной модели выполнена с использованием языка Python и стандартных библиотек численных расчётов и визуализации. В рамках реализации рабочая нагрузка задаётся в виде дискретного диапазона значений, для каждого из которых автоматически вычисляется уровень утомляемости человека и соответствующий показатель производительности системы «человек – робот». Алгоритм учитывает наличие критического порога утомляемости и автоматически переключает режим расчёта производительности при его превышении. Результаты численного моделирования представляются в графической форме, что позволяет наглядно проанализировать взаимосвязь между рабочей нагрузкой, утомляемостью человека и производительностью системы в условиях реализации концепции Индустрии 5.0.

На рис. 1, полученном в результате численной реализации разработанной модели, показано, что с увеличением рабочей нагрузки уровень утомляемости человека монотонно возрастает, а при превышении критического порога наблюдается заметное снижение производительности системы «человек – робот».

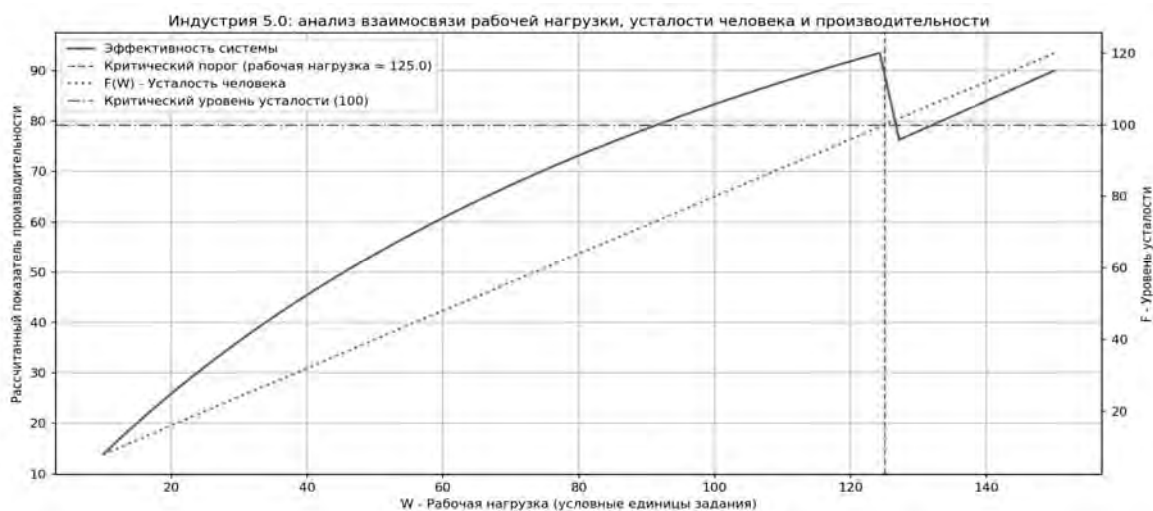


Рис. 1. Анализ взаимосвязи рабочей нагрузки, усталости и производительности в человеко-роботной системе Индустрии 5.0

В данной работе на основе упрощённой математической модели и численного моделирования в рамках концепции Индустрии 5.0 рассматривается взаимосвязь между рабочей нагрузкой, утомляемостью человека и производительностью человеко-роботных производственных систем. Полученные результаты показывают, что человеческий фактор остаётся важным при моделировании и эксплуатации таких систем, а предложенный подход может использоваться как инструмент предварительного анализа и поддержки принятия решений при проектировании гетерогенных человеко-центрированных производственных объектов.