

# Моделирование и разработка системы управления весовой ячейкой с электромагнитной компенсацией

Валерия Черкасова  
ТУ Ильменау  
Ильменау, Федеративная Республика Германия  
vcherkasovaleti@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты по разработке автоматической системы управления весовой ячейкой с электромагнитной компенсацией. В рамках исследования решены задачи: математическое моделирование механических процессов в блоке взвешивания компонентов и анализ физических основ электромагнитной компенсации; идентификация параметров и компьютерное моделирование процессов в весовой ячейке; разработка и компьютерное моделирование регулирующего контура.

**Ключевые слова:** система управления; ячейка нагрузки; блок взвешивания; электромагнитная компенсация; колебательная система

## I. ВВЕДЕНИЕ

Более пяти миллионов человек заняты в промышленности Федеративной Республики Германии. Виды промышленной деятельности включают в себя: машиностроение, нефтепереработку, пищевую, легкую, мебельную, химическую и фармацевтическую промышленности. Каждое производство включает весовые терминалы, которые являются элементами автоматизированных систем учета. Тензодатчики позволяют контролировать материальные потоки на производстве, что является оперативным управлением и ведет к увеличению объемов производства, улучшению качества продукции и снижению затрат.

Сегодня проводится много исследований и анализа в области баланса с использованием принципов электромагнитной компенсации. Доктор инженерии Арвид Амтор, Магистр наук Норберт Рогге и др. проводили подробный анализ структуры баланса с использованием принципа электромагнитной компенсации [1] и анализ динамических процессов при использовании контроллеров компенсации [2], внутренних моделей управления, пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов и при цифровом управлении [3]. Тем не менее, остается вопрос об изучении краткосрочного динамического поведения взвешивающего блока при внутренней и внешней нагрузке.

Объектом исследования в работе являются процессы в ячейке динамической нагрузки WZA224-ND.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ НАГРУЗКИ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

### A. Экспериментальная установка

Для экспериментальной установки система dSPACE должна быть подключена к ПК и модулю WZA224-ND. На ПК программные обеспечения ControlDesk и MATLAB используются в качестве инструментов тестирования и для визуализации результатов. Инструменты обеспечивают комплексное управление экспериментами. ControlDesk включает в себя создание виртуальных инструментов, а также визуальное управление переменными и параметрами и позволяет записывать данные в системе реального времени. Расположение экспериментальной установки показано на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Взвешивающая ячейка WZA224-ND, представленная на рис. 2, состоит из двух частей [4]: электромагнитной системы взвешивания в корпусе из нержавеющей стали IP44 и электроники в алюминиевом боксе, все разъемы находятся спереди блока. Тензометрическая измерительная система с разрешением 0,1 миллиграмм выполнена монолитно. Диапазон взвешивания ограничен до 220 грамм. Приемник нагрузки сверху – чаша весов, система имеет предохранитель от перегрузки. Данные об измеренном весе доступны через 250 миллисекунд.



Рис. 2. Динамическая ячейка нагрузки WZA224-ND. Источник изображения: [4]

### В. Анализ физических основ электромагнитной компенсации

Балансировка в исследуемых весах основана на принципе электромагнитной индукции и возникновении силы Ампера. Явление электромагнитной индукции подразумевает возникновение электрического тока, поля или поляризации при изменяющемся во времени магнитном поле или при движущейся материальной среде в магнитном поле. Сила Ампера показывает с какой силой магнитное поле действует на проводник с током, который находится в этом поле:

$$F = ILB \sin \alpha;$$

где  $\alpha$  – угол между текущим направлением движения тока в проводнике и направлением магнитного поля,  $B$  – плотность магнитного потока,  $L$  – длина участка проводника, на который воздействует магнитное поле,  $I$  – сила тока в проводнике.

Функциональная схема блока взвешивания компонентов с применением электромагнитной компенсации показана на рис. 3.

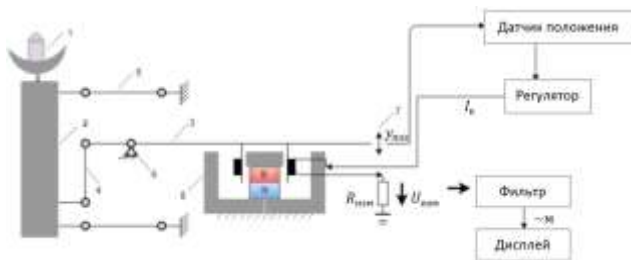


Рис. 3. Функциональная схема WZA224-ND

Механически устройство состоит из чаши весов (1), соединительной колонны – нагрузочной ветви (2), рычага (3), соединительной детали (4), параллельной тяги (5), шарнирного соединения (6), датчика положения (7) и постоянного магнита с катушкой (8).

Когда на чашу весов ставится груз, колонна опускается. Это движение передается через соединительную деталь на рычаг, который создает отклонение положения покоя относительно шарнира. Все соединения выполнены монолитно, поэтому обеспечена хорошая механическая воспроизводимость. Отклонение рычага определяется датчиком положения. Датчик положения состоит из прорези в рычаге, перемещаемом между инфракрасным светодиодом и дифференциальным фотодиодом. Такой тип

датчика позволяет быстро преобразовывать отклонение рычага в электрический сигнал для регулятора. Магнитная катушка прикреплена к рычагу и находится в приблизительно постоянном магнитном поле, которое генерируется постоянным магнитом. Когда электрический сигнал, вырабатываемый датчиком положения, проходит через магнитную катушку, магнитное поле воздействует на катушку электромагнитной силой. Работа регулятора заключается в управлении токами в катушке, чтобы рычаг вернулся в положение равновесия. Сигнал определяемой массы анализируется через смещение и изменение токов, преобразуется в массу и отображается.

### III. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ НАГРУЗКИ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Упрощенное представление взвешивающей ячейки с внутренним воздействием на рычаг и внешним воздействием на чашу весов представляет собой вращательно-колебательную систему с пятью массами (рис. 4).

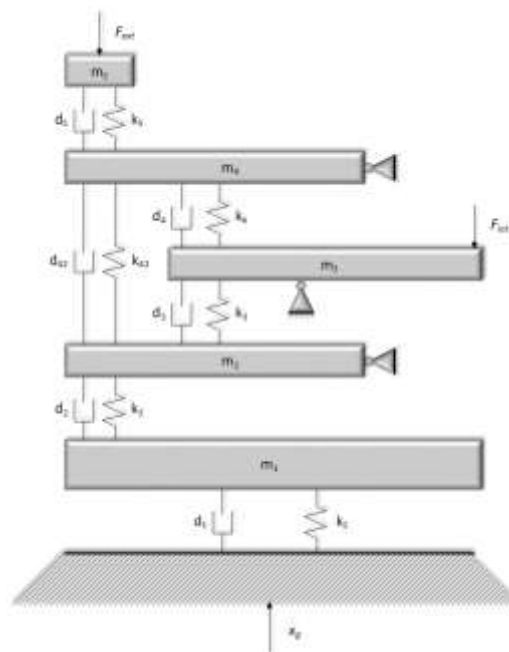


Рис. 4. Упрощенное представление механической части динамической ячейки нагрузки WZA224-ND при внутреннем и внешнем воздействии

На данной схеме:  $m_1$  – масса опорной части ячейки;  $m_2$  – масса нижней части параллельной тяги;  $m_3$  – масса рычага и катушки с постоянным магнитом;  $m_4$  – масса верхней части параллельной тяги;  $m_5$  – масса чаши весов;  $k_1$  – коэффициент жесткости пружины один между землей и опорной частью ячейки;  $d_1$  – коэффициент демпфирования демфера один между землей и опорной частью ячейки;  $k_2$  – коэффициент жесткости пружины два между опорной частью ячейки и нижней частью параллельной тяги;  $d_2$  – коэффициент демпфирования демфера два между опорной частью ячейки и нижней

частью параллельной тяги;  $k_3$  – коэффициент жесткости пружины три между нижней частью параллельной тяги и рычагом;  $d_3$  – коэффициент демпфирования демпфера три между нижней частью параллельной тяги и рычагом;  $k_4$  – коэффициент жесткости пружины четыре между рычагом и верхней частью параллельной тяги;  $d_4$  – коэффициент демпфирования демпфера четыре между рычагом и верхней частью параллельной тяги;  $k_{42}$  – коэффициент жесткости пружины четыре-два между нижней и верхней частями параллельной тяги;  $d_{42}$  – коэффициент демпфирования демпфера четыре-два между нижней и верхней частями параллельной тяги;  $k_5$  – коэффициент жесткости пружины пять между верхней частью параллельной тяги и чашей весов;  $d_5$  – коэффициент демпфирования демпфера пять между верхней частью параллельной тяги и чашей весов;  $F_{ext}$  – внешние силы воздействия на чашу весов;  $F_{int}$  – внутренние силы воздействия на рычаг;  $x_g$  – колебания земли. При таком представлении датчик положения измеряет отклонение рычага (массы три).

На основе описанных минимальных координат, баланса сил и баланса моментов сил выражается система дифференциальных уравнений упрощенной модели объекта в пространстве состояний (каноническая форма Коши):

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = q_6; \\ \dot{q}_2 = q_7; \\ \dot{q}_3 = q_8; \\ \dot{q}_4 = q_9; \\ \dot{q}_5 = q_{10}; \\ \dot{q}_6 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1} \cdot q_1 + \frac{k_2 l_{21k}}{m_1} \cdot q_2 - \frac{d_1 + d_2}{m_1} \cdot q_6 + \frac{d_2 l_{21d}}{m_1} \cdot q_7 + \frac{k_1}{m_1} \cdot x_g + \frac{d_1}{m_1} \cdot \dot{x}_g; \\ \dot{q}_7 = \frac{k_2 l_{21k}}{J_2} \cdot q_1 - \frac{(k_2 l_{21k}^2 + k_3 l_{23k}^2 + k_{42} l_{24k}^2)}{J_2} \cdot q_2 + \frac{k_3 l_{32k}^2}{J_2} \cdot q_3 + \frac{k_{42} l_{42k}^2}{J_2} \cdot q_4 + \\ + \frac{d_2 l_{21d}}{J_2} \cdot q_6 - \frac{(d_2 l_{21d}^2 + d_3 l_{23d}^2 + d_{42} l_{24d}^2)}{J_2} \cdot q_7 + \frac{d_3 l_{32d}^2}{J_2} \cdot q_8 + \\ + \frac{d_{42} l_{42d}^2}{J_2} \cdot q_9; \\ \dot{q}_8 = \frac{k_3 l_{32k} l_{23k}}{J_3} \cdot q_2 - \frac{(k_3 l_{32k}^2 - k_4 l_{34k}^2)}{J_3} \cdot q_3 + \frac{k_4 l_{34k} l_{43k}}{J_3} \cdot q_4 + \frac{d_3 l_{32d} l_{23d}}{J_3} \cdot q_7 - \\ - \frac{(d_3 l_{32d}^2 - d_4 l_{34d}^2)}{J_3} \cdot q_8 + \frac{d_4 l_{34d} l_{43d}}{J_3} \cdot q_9 - \frac{l_{32}}{J_3} F_{int}; \\ \dot{q}_9 = \frac{k_{42} l_{24k}^2}{J_4} \cdot q_2 + \frac{k_4 l_{43k} l_{34k}}{J_4} \cdot q_3 - \frac{(k_4 l_{43k}^2 + k_{42} l_{42k}^2 + k_5 l_{45k}^2)}{J_4} \cdot q_4 + \\ + \frac{k_5 l_{45k}}{J_4} \cdot q_5 + \frac{d_{42} l_{24d}^2}{J_4} \cdot q_7 + \frac{d_4 l_{43d} l_{34d}}{J_4} \cdot q_8 - \\ - \frac{(d_4 l_{43d}^2 + d_{42} l_{42d}^2 + d_5 l_{45d}^2)}{J_4} \cdot q_9 + \frac{d_5 l_{45d}}{J_4} \cdot q_{10}; \\ \dot{q}_{10} = \frac{k_5 l_{45k}}{m_5} \cdot q_4 - \frac{k_5}{m_5} \cdot q_5 + \frac{d_5 l_{45d}}{m_5} \cdot q_9 - \frac{d_5}{m_5} \cdot q_{10} + \frac{1}{m_5} \cdot F_{ext}. \end{cases}$$

Основная задача при идентификации состоит в том, чтобы повторить резонанс, возникающий при 113,7 Гц. Эффект этого резонанса характерен для резкого изменения нагрузки. Перед определением параметров были сделаны следующие предположения:

$$\begin{aligned} l_2 &= l_4; \\ l_{21d} &= l_{24d} = l_{45d} = l_{42d}; \\ l_{21k} &= l_{24k} = l_{45k} = l_{42k}; \\ l_{23k} &= l_{43k}; \\ l_{23d} &= l_{43d}; \\ l_{32k} &= l_{34k}; \\ l_{32d} &= l_{34d}. \end{aligned}$$

Сравнение амплитудно-частотных характеристик реальной системы с колебательной вращающейся системой с пятью массами при использовании оптимизированных параметров представлено на рис. 5.

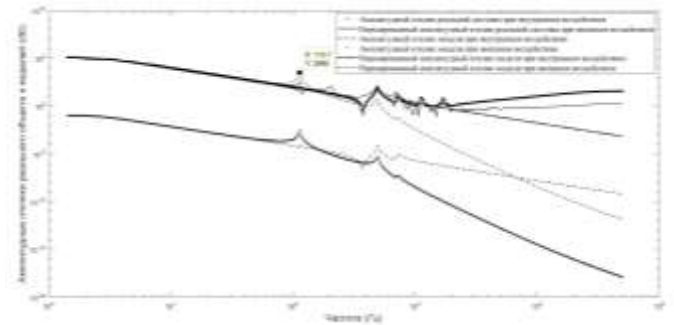


Рис. 5. Амплитудно-частотный отклик ячейки нагрузки WZA224-ND и моделей в форме вращательно-колебательной системы с пятью массами

На рис. 5 показано, что упрощение весовой ячейки до колебательной вращающейся системы с пятью массами позволяет получить хорошую идентификацию с внутренним воздействием на весовую ячейку. Кроме того, резонансы на частоте 113,7 Гц качественно повторяются при внутренних и внешних воздействиях на объект.

На рис. 6 представлена компьютерная модель ячейки нагрузки WZA224-ND с регулирующим контуром посредством ПИД-регулятора.

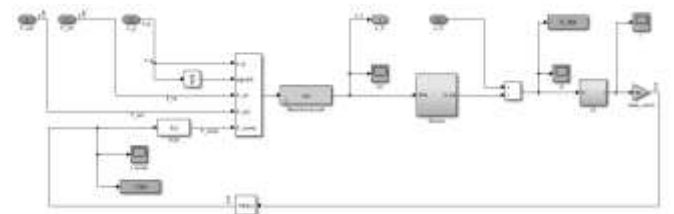


Рис. 6. Компьютерная модель блока взвешивания WZA224-ND с ПИД-регулятором

Механическая часть блока представлена через пространство состояний *LTI* блок [5]. Вес катушки учитывается в механической отклоняющейся части блока. Датчик положения переводит изменение положения рычага в напряжение через коэффициент усиления (*Gain*). Преобразователь напряжения в ток выполнен на одном операционном усилителе. Через нагрузку течет тот же ток, что и через резистор. Ток в нагрузке не зависит от сопротивления нагрузки, если операционный усилитель работает в линейном режиме: он не насыщен. Соответственно, преобразователь состоит из элемента насыщения и функции, описывающей закон Ома, со значением сопротивления 500 Ом.

Использован принцип управления по ошибке. Контроллер был настроен с помощью дополнительного инструмента Simulink Control Design, PID Tuner.

Matlab автоматически предлагает решатель Рунге-Кутты 4-5 с переменным шагом для системы колеблющихся масс, [6]. Предполагается дальнейшее использование модели в системе реального времени, соответственно, шаг интегрирования определяется как фиксированный [7]. Модель явно не содержит элементов библиотеки Simscape, но подразумевает механические и электрические компоненты. Согласно [8], рекомендуется использовать неявный решатель для моделирования систем с физическими компонентами. Однако вычислительная стоимость этого решателя выше, чем интеграция явным методом. Перед окончательным выбором решателя жесткость модели была определена на основе моделирования и сравнения различных методов интеграции: переменный шаг (ode45), переменный шаг (ode23), фиксированный шаг (ode14x), фиксированный шаг (ode3 – явный решатель), фиксированный шаг (ode4), фиксированный шаг (ode5). За эталонный метод взят ode14x (неявный решатель). Поскольку графическое различие в моделировании между первым и четвертым методами приблизительно равно нулю, время моделирования с использованием решателя Bogacki-Shampine короче и требуется решатель с фиксированным шагом, этот решатель используется в дальнейшем моделировании. Размер шага  $10^{-6}$ . Результаты моделирования при воздействии внутренней нагрузки 100 г в 0,1 с и внешней нагрузки 200 г в 0,4 с (ступенчатые функции) представлены на рис. 7, 8.

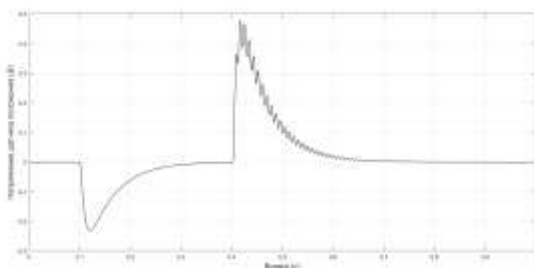


Рис. 7. Напряжение датчика положения

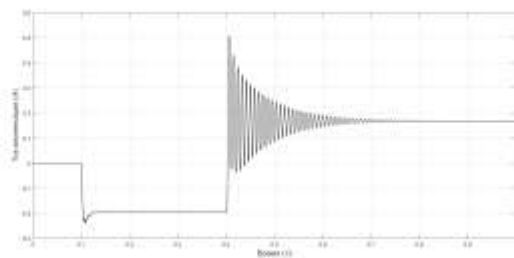


Рис. 8. Ток компенсации

На основании рис. 7 воздействия компенсируются с помощью ПИД-регулятора.

#### ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Отдельное спасибо проф., д.инж.н. Томасу Фрейлиху и магистру т.н. Норберту Рогге за возможность осуществить это исследование. Кроме того, я благодарю за поддержку, проф. Душина Сергея Евгеньевича.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основным преимуществом принципа электромагнитной компенсации является линейная зависимость между измеренной массой и током, генерируемым катушкой.
2. Выявлены особенности устройства блока взвешивания компонентов WZA224-ND.
3. Произведено уточнение математической модели механических процессов в системе взвешивания и проведена идентификация параметров системы по результатам реальных экспериментов.
4. Модель качественно отображает поведение весов – возникновение различия резонансных частот при внешнем возбуждении (на чашке весов).
5. Была разработана система управления током катушки, которая обеспечивает баланс и корректное взвешивание в ячейке динамической нагрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Arvid Amthor. Abschlussbericht zum Werkvertrag Nr.2372008875. November 2013.
- [2] Amthor A. et al. Analysis, physically motivated modeling and system identification of electromagnetic force compensated balances (EMFC) //Shaping the Future by Engineering: Proceedings; 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, 8-12 September 2014. 2014. T. 58.
- [3] Arvid Amthor, Irina Kaiser, Norbert Rogge, and Heiko Weiß. Digitale Regelung von EMKWaagen. November 2014.
- [4] WZA224-ND technische Daten. <https://www.sartorius.de/sartoriusDE/de/EUR/Produkte/Labor/OEM-W{a}gezellen/Dynamische-W{a}gezelle/p/WZA224-ND>. Sartorius GmbH.
- [5] MathWorks. <https://ch.mathworks.com>, 1994-2019. The MathWorks, Inc.
- [6] MathWorks. "Mass-Spring-Damper in Simulink and Simscape" <https://ch.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples/mass-spring-damper-in-simulink-and-simscape.html#d117e106>. The MathWorks, Inc.
- [7] MathWorks. "Solvers for Real-Time Simulation" <https://ch.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/solvers-for-real-time-simulation.html>. The MathWorks, Inc.
- [8] MathWorks. "Choose a Solver" <https://ch.mathworks.com/help/simulink/ug/types-of-solvers.html#f11-69449>. The MathWorks, Inc.