ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440
https://elibrary.ru/THVKNB

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Применение нейронной сети для управления системой домашней гидропоники

Д. М. Бородулин, А. В. Шафрай, А. А. Максименко*

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 13.12.2022
Принята после рецензирования: 10.01.2023
Принята к публикации: 07.02.2023

**А. А. Максименко: sasha-maksimienko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6408-9839*
Д. М. Бородулин: https://orcid.org/0000-0003-3035-0354
А. В. Шафрай: https://orcid.org/0000-0003-4512-1933

© Д. М. Бородулин, А. В. Шафрай, А. А. Максименко, 2023

Аннотация.
Метод беспочвенного культивирования растений, называемый гидропоникой, является перспективным способом обеспечения населения продуктами растительного происхождения. Гидропонное производство характеризуется эффективным управлением водными ресурсами, сокращением вегетационного периода роста растений, низким уровнем их заболеваемости и поражения насекомыми, а также круглогодичным циклом выращивания. Однако существуют сложности в конструировании, эксплуатации и обслуживании гидропонных установок. В сельском хозяйстве все чаще применяются технологии на базе нейронных сетей, способные управлять технологическими процессами. Цель работы заключалась в применении нейронной сети для повышения эффективности выращивания растений в системе домашней гидропоники.
В исследовании использовалась установка гидропоники питательного слоя, в которую высаживались растения вида *Lactuca sativa* в количестве 10 штук. С помощью датчиков собиралась информация о температуре и влажности воздуха, освещенности растений и температуре поверхности листа. Обработка данных, обучение нейронной сети и программирование микроконтроллера проводились с помощью языка программирования Python 3, используя фреймворки PyTorch и MicroPython соответственно.
Наиболее эффективной архитектурой нейронной сети для решения поставленной задачи управления оказался четырехслойный персептрон. Данный тип архитектуры широко используется в качестве механизма управления. В экспериментах с меньшим количеством слоев нейронная сеть показала высокий уровень ошибки, который составил более 5 %. При увеличении слоев выше четырех ошибка обученной нейронной сети осталась на уровне четырехслойной и составила 0,2 %. Дальнейшие практические испытания обученной нейронной сети показали повышение энергоэффективности на 32,3 % по сравнению с классическим алгоритмом управления при близких значениях транспирации растений.
Данная технология может быть применена для интеграции в энергосберегающие жилые помещения и системы умного дома с целью повышения самообеспечения населения продуктами растениеводства.

Ключевые слова. Гидропоника, технологии растениеводства, современное растениеводство, автоматизация процесса

Финансирование. Исследование было проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Кемеровского государственного университета (КемГУ) в рамках соглашения № 075-15-2021-694 от 05.08.2021, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) и КемГУ (уникальный идентификатор контракта RF----2296.61321X0032).

Для цитирования: Бородулин Д. М., Шафрай А. В., Максименко А. А. Применение нейронной сети для управления системой домашней гидропоники // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 384–395. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440
https://elibrary.ru/THVKNB

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Neural Network and Home Hydroponics

Dmitry M. Borodulin, Anton V. Shafrai, Alexander A. Maximenko*

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 13.12.2022
Revised: 10.01.2023
Accepted: 07.02.2023

**Alexander A. Maximenko: sasha-maksimienko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6408-9839*
Dmitry M. Borodulin: https://orcid.org/0000-0003-3035-0354
Anton V. Shafrai: https://orcid.org/0000-0003-4512-1933

© D.M. Borodulin, A.V. Shafrai, A.A. Maximenko, 2023

Abstract.
Hydroponics is a method of soilless cultivation of plants. It shortens the vegetation period, reduces the risk of disease and insect infestation, and provides a year-round growing cycle. Hydroponics depends on efficient water management. It is associated with a complex design, operation, and maintenance. Neural networks can control complex technological processes in agriculture. The research objective was to use a neural network to increase the efficiency of a home hydroponics system.
The study involved a nutrient bed hydroponics setup with ten *Lactuca sativa* plants. Sensors collected information about the temperature and humidity of air, illumination, and the temperature of the leaf surface. Data processing, neural network training, and microcontroller programming relied on Python 3, PyTorch, and MicroPython.
The four-layer perceptron, which is a popular control mechanism, turned out to be the most effective neural network architecture. Fewer layers resulted in a high error rate (≥ 5%). When the number of layers was > 4, the error level remained at that of the four-layer experiment (0.2%). Further practical tests showed an increase in energy efficiency by 32.3%, compared to the classical control algorithm at close values of plant transpiration.
Neural net technology could be integrated into energy-saving residential premises and smart home systems in order to increase the self-sufficiency of hydroponics installations.

Keywords. Hydroponics, plant growing technologies, modern plant growing, process automation

Funding. The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center, Kemerovo State University (KemSU), based on agreement No. 075-15-2021-694, August 5, 2021, between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki) and KemSU (contract identifier: RF----2296.61321X0032).

For citation: Borodulin DM, Shafrai AV, Maximenko AA. Neural Network and Home Hydroponics. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(2):384–395. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440

Введение

Сельское хозяйство и пищевая промышленность столкнулись с множеством проблем, возглавляет которые рост численности населения [1, 2]. Прогнозируемые темпы роста общемирового потребления всей сельскохозяйственной продукции составляют 1,1 % в год, а к 2050 г. они достигнут 60 % от текущего уровня потребления [3]. Наличие природных ресурсов, таких как пресная вода и продуктивные пахотные земли, становится ограниченным.

Согласно исследованию, проведенному немецкими учеными, только из-за урбанизации приблизительные потери пахотных земель составят 5–6 % (8–9 млн га) при падении их продуктивности на 8–10 % (128–153 Пкал) в период с 2000 по 2030 гг. [4]. Стоит учитывать антропогенные и климатические факторы, к которым относится накопление вредных макро- и микроэлементов в растениях [5].

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что в текущем десятилетии большинству стран будет необходима «цифровая сельскохозяйственная революция», т. е. поиск новых подходов в агропроизводстве и его симбиоз с технологиями IT-индустрии, а также модернизация существующих сельскохозяйственных предприятий [6].

Согласно прогнозу научно-технологического развития АПК в РФ до 2030 г. ожидается резкий скачок в развитии технологии урбанизированного сельского хозяйства, т. е. производства продуктов питания в городах в вертикальных фермах и роботизированных теплицах. Под «урбанизированным сельхозпроизводством» подразумевается эффективное,

высокотехнологичное, частично или полностью климатонезависимое городское всесезонное производство сельскохозяйственной продукции в искуственных условиях ферм внутри зданий или в естественных условиях на открытом воздухе преимущественно без использования почв (на питательных растворах) с применением искусственного освещения вместе с высоким уровнем автоматизации процесса производства.

Такие системы позволяют создать как частичное, так и полноценное самообеспечение городов широким спектром продуктов сельского хозяйства. Описанные выше решения не находят широкого применения в России, но могут быть полезны для повышения продовольственной безопасности удаленных северных городов [7].

Можно выделить следующие предпосылки, определяющие развитие урбанизированного сельского хозяйства, наблюдаемые в последние годы:

1. Запрос жителей городов на альтернативную систему самообеспечения продуктами питания. Цель такого запроса может быть разная. Для одной группы – это вопрос расширения доступа к качественным и свежим продуктам питания круглый год, для другой – это вопрос самообеспечения продовольствием для выживания;

2. Технологии производства продуктов питания стали доступнее в последнее десятилетие. Четвертая промышленная революция открывает необходимые для этого знания благодаря развитию и распространению информационных коммуникаций (Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 12.01.2017 № 3 «О Прогнозе научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года»).

Основой развития урбанизированного сельского хозяйства является запрос на здоровую пищу. Устойчивое развитие рынка экологических продуктов связывают с запросами молодежи, являющейся мотивированной на здоровый образ жизни, индивидуализацию рациона питания и «здоровое» питание группой населения [8]. Основными продуктами, входящими в термин «правильное питание», являются зелень, овощи, лекарственные и пряные травы [9]. Присутствие данных продуктов в рационе повышает его пищевую ценность, удовлетворяя потребность в необходимых макро- и микронутриентах, а также в минорных компонентах пищи.

Технологии сити-фермерства предлагают работоспособное решение в ответ на проблемы и запросы современного общества, поскольку сочетают в себе такие области, как биотехнология, автоматизация, роботизация и искусственный интеллект. Их применение порождает изменения в агропромышленном секторе, которые превращают «традиционное» сельское хозяйство в высокотехнологичную отрасль (AgTech) [10].

Одной из наиболее популярных технологий сити-фермерства является гидропоника – это технология выращивания растений на питательных средах без использования грунта. Существуют несколько систем, входящих в данную технологию. В исследовании были рассмотрены наиболее распространенные: глубоководная культура (DWC), Nutrient Film Technique (NFT или технология питательной пленки), технология капельного полива и аэропоника. Существуют другие системы, но они являются вариациями или сочетанием вышеупомянутых четырех типов.

Для создания автоматизированного комплекса гидропоники под управлением нейронных сетей требуется провести анализ и определить параметры окружающей среды, влияющие на рост растения. Это необходимо для разработки и сборки испытательного стенда гидропоники, который бы удовлетворял требованиям полноты получаемых данных о состоянии микроклимата помещения, в котором располагается система.

Реализовать максимальный потенциал растений при выращивании в открытом грунте сложно из-за влияния множества лимитирующих факторов, определяющих рост растений в почве. Управлять этими параметрами в открытом грунте практически невозможно [11].

При выращивании в почве растениям требуется регулярное питание и увлажнение, при этом велик риск их гибели из-за неблагоприятных погодных условий (град, проливные дожди, заморозки и т. п.). При использовании гидропоники растения защищены от воздействия неблагоприятных условий. Также осуществляется поддержка постоянных значений климатических факторов и регулярное получение необходимых питательных веществ. Это дает растению возможность тратить силы на быстрый рост, цветение и формирование максимального урожая с улучшенными питательными и вкусовыми качествами [12].

Стоит выделить следующие факторы, влияющие на рост и развитие растения:

1. Температура воздуха. Наиболее интенсивно питательные вещества потребляются растениями при температуре от 25 до 30 °C. При температуре выше 35 °C начинается инактивация ферментов, ответственных за поглощение питательных веществ. При температуре ниже 15 °C все физиологические процессы замедляются. Температура воздуха важна для растения, но подстраивать ее для конкретного вида затратно, что является критичным фактором для небольших домашних оранжерей. Достаточно контролировать температуру для того, чтобы растения не оказались в экстремальных условиях из-за непредвиденных ситуаций.

2. Влажность воздуха и концентрация CO_2. Во влажной среде у растений листья вырастают крупнее, чем в сухой. Контрольные эксперименты показали,

что максимальный рост листья растений имеют при влажности 65–75 %. Черенкам требуется около 90 % влажности, а семена лучше прорастают при 60 %. Данным параметром часто пренебрегают в небольших системах, поскольку достичь оптимального уровня влажности в них затруднительно.

Растение – единственный организм, способный питаться солнечным светом. В процессе фотосинтеза ему необходимо потреблять углекислый газ (CO_2), воду и световую энергию для синтеза углеводов, которые переносятся туда, где в них испытывается потребность. Есть много способов поддержания CO_2, самым популярным среди которых является установка газовых горелок и баллонов с газом.

Углекислый газ опасен, причем смертельно. У него нет запаха, поэтому без специального прибора его невозможно обнаружить. Если обогащать им помещение, то придется устанавливать вытяжной вентилятор.

Контролировать влажность и концентрацию углекислого газа затратно для домашней оранжереи, поэтому достаточно отслеживать влажность. Контроль за концентрацией углекислого газа неэффективен в домашней системе гидропоники.

3. Кислотность и электропроводность питательного раствора. Поскольку значение pH может влиять на фотосинтетическую активность растений, то в водном растворе его следует контролировать, чтобы избежать повреждения растения [13].

Все растения на гидропонике выращиваются в слегка кислой среде, независимо от того, какой pH они предпочитают в грунте. Для этого существуют разные причины, главная из них заключается в том, что при pH = 7 и выше из раствора осаждается железо. Поэтому максимально высокий допустимый pH составляет около 6,8. Однако в замкнутых системах лучше поддерживать его ниже 6,5, чтобы избежать нехватки марганца [14].

Для контроля данных параметров требуются дорогостоящие приборы. Многие фермеры, работающие с гидропоникой, готовя стандартный питательный раствор, не отслеживают параметры кислотности и электропроводности, поскольку скорость их изменения низкая и критически не влияет на процесс роста.

4. Аэрация корней. Аэрация корневой зоны важна для растений, поскольку обеспечивает корни кислородом, необходимым для дыхания. Растения могут использовать только растворенный в питательном растворе кислород. Аэрацию питательного раствора следует осуществлять круглосуточно, поскольку растениям требуется максимальное количество кислорода.

5. Освещение. Жизнь растений зависит от света из-за двух факторов: он обеспечивает энергию для производства органического вещества при фотосинтезе и воспринимается как морфогенетический стимул. Основными параметрами, влияющими на рост растений, являются качество и интенсивность света, фотопериод и смена дня и ночи. Этими параметрами можно управлять в тепличных условиях с помощью искусственных источников света.

Освещение – это один из наиболее доступных с точки зрения затрат фактор, т. к. контроль за ним позволит получать большое количество урожая.

Из всех физиологических характеристик выращиваемых растений необходимо обратить внимание на эффект транспирации. Транспирация – это процесс движения воды через растение и ее испарение через наружные органы растения, такие как листья, стебли и цветки. Транспирация является пассивным механизмом, который опирается на постоянно присутствующие комбинированные силы осмоса, гравитации и поверхностного натяжения воды, управляющие движением воды по всему растению.

Воздух способен удерживать только определенное количество водяного пара при данной температуре, прежде чем он начнет конденсироваться обратно в жидкую воду. Максимальное количество водяного пара, которое воздух может удерживать при определенной температуре, называется «давление насыщенного пара». По мере того как воздух становится более горячим, количество воды, которое он может удерживать, увеличивается. При остывании происходит уменьшение количества воды в воздухе.

В основе расчета транспирации лежит дефицит давления пара (VPD), контроль за которым важен для выращивания растения. Правильная настройка параметров гидропоники даст наилучшие результаты с учетом влияния VPD, который связан со следующими процессами:

– регулирование растением открытия и закрытия устьиц;
– регулирование поглощения CO_2;
– регулирование поступления питательных веществ к корням.

При увеличении VDP и транспирации корни втягивают больше питательных веществ. Таким образом, существует сложный компромисс между VPD и другими факторами. Можно увеличить количество поглощаемого растением CO_2, но уменьшить количество питательных веществ, или увеличить количество питательных веществ, но подвергнуть растение стрессу. VPD – мощный инструмент для управления растением, которым пользуются многие ученные и садоводы со всего мира.

Начиная с конца прошлого века, изучением возможностей автоматизации и применения нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта в точном сельском хозяйстве, а также гидропонном выращивании занимались отечественные и зарубежные ученные.

Одними из первых исследования провели японские ученые Т. Моримото, Ю. Хашимото и др. в конце прошлого века. Их работы [15–17] были посвящены

созданию и развитию компьютерно-интегрированного сельскохозяйственного производства. В работе [17] было предложено устанавливать физиологические отклонения и заболевания растений по их внешнему виду без применения компьютерного зрения. Определение осуществлялось после ввода рабочим в компьютер описания внешнего вида растения, на основании чего нейронная сеть выдавала предположение о имеющейся патологии. Данная работа показала эффект от симбиоза автоматизированного управления, сбора данных с датчиков и их использования в нейронной сети. Сельскохозяйственное предприятие, использующее данную технологию, получило в 3,3 раза больше урожая, чем без нее.

В одной из работ нейронная сеть использовалась для прогнозирования площади листа как показателя динамики роста растения в зависимости от освещенности и концентрации питательных веществ в питательном растворе [15]. Результаты показали, что предсказанная площадь листа практически полностью совпадает с наблюдаемой. По мнению авторов, это позволит более эффективно контролировать рост растений.

В результате расцвета эры искусственного интеллекта в начале XXI в. появились публикации, в которых авторы использовали различные архитектуры и виды нейронных сетей для изучения факторов, влияющих на рост растений, и обработки собранных в процессе роста данных для формирования дальнейшего управляющего воздействия на рабочие органы гидропоники [18–23]. Совместно с нейронными сетями часто используют технологию интернета вещей (IoT), которая позволяет по Wi-Fi передавать собранные данные с микроконтроллера на компьютер через сервер, что эффективно в условиях большого количества датчиков на предприятии [23–26].

Большая часть этих исследований охватывает модификацию установок промышленной гидропоники и не учитывает применение нейронных сетей для систем домашней гидропоники или небольших сити-ферм.

Целью работы являлось исследование возможности и эффективности внедрения нейронных сетей в качестве системы управления системой домашней гидропоники.

Предметом исследования стала совокупность теоретических, методологических и практических задач по созданию интеллектуального комплекса адаптивного управления параметрами работы гидропоники, а также соответствующее информационное, математическое, алгоритмическое и программное обеспечение.

В задачи исследования вошли:

– анализ различных видов конструкций гидропоники для выбора оптимальной в качестве исследовательского стенда;
– оценка факторов окружающей среды, которые необходимо учитывать при проектировании системы датчиков и проведении эксперимента;
– разработка и создание исследовательского стенда гидропоники, выбор вида растения и питательного раствора;
– сбор экспериментальных данных с испытательного стенда;
– построение и обучение нейронной сети, определение ее эффективности;
– внедрение обученной нейронной сети в систему управления гидропоникой.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования на разных этапах работы использовались:

– транспирация растения вида *Lactuca sativa.* Данный вид отличается быстрым ростом и крупным размером листьев, что позволяет эффективнее и качественнее получать данные о состоянии растения;
– обученная нейронная сеть для оптимизации системы управления гидропоникой.

Систему гидропоники собрали по технологии питательной пленки (NFT). Принцип работы заключается в циркуляции питательного раствора через корни растения, располагающиеся в специальном лотке (рис. 1).

В системе умной гидропоники использовали следующие датчики и исполнительные устройства:

1. Измерение температуры и влажности производилось датчиком BME280, который измеряет температуру в диапазоне от 0 до 85 °C. Он имеет низкое энергопотребление, высокую точность и стабильность работы, что позволяет использовать данный датчик для мониторинга окружающей среды;

2. Измерение температуры листа растения проводилось инфракрасным датчиком MLX90640. Термометр передает измеряемую температуру в диапазоне от –20 до 120 °C со выходным разрешением 0,14 °C. Связь с устройством реализуется по шине I2C;

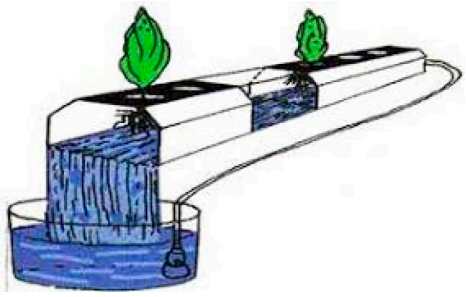


Рисунок 1. Система гидропонного выращивания по технологии питательной пленки

Figure 1. Nutrient film hydroponics

3. Измерение освещенности проводилось с помощью фоторезистора GL55. Он избирателен для диапазона видимого спектра электромагнитных волн. Считывание значений осуществлялось интерфейсом АЦП и измерялось в кОм;

4. В качестве аэратора использовался аквариумный компрессор производительностью 3,5 л/ч совместно с аэрационным камнем. Питание осуществлялось от сети с напряжением 220 В;

5. В качестве насоса, циркулирующего питательный раствор, использовался помповый насос для аквариумов с объемной подачей 4,5 л/мин. Питание осуществлялось от сети с напряжением 220 В;

6. Для освещения использовалась светодиодная лента на диодах 5050 с соотношением количества красных светодиодов (18) к синим (54) 1:3. По такой технологии изготавливается большинство фитоламп. Длина волн данных светодиодов практически совпадает с максимумом активности фотосистем растений. Питание осуществлялось от источника с напряжением 12 В;

7. В качестве вентилятора был взят кулер от компьютерного блока диаметром 120 мм, питающийся от источника с напряжением 12 В;

8. Для сбора, обработки и управления данными использовался микроконтроллер ESP32 – это единый комбинированный чип с Wi-Fi и Bluetooth с частотой 2,4 ГГц, разработанный с использованием 40-нанометровой технологии TSMC со сверхнизким энергопотреблением. Он создан для достижения наилучшей мощности и радиочастотных характеристик, демонстрируя надежность и универсальность в широком спектре приложений. Микроконтроллер оснащен двуядерным 32-битным микропроцессором Xtensa с тактовой частотой 240 МГц и поддерживает все основные интерфейсы связи с периферийными устройствами (GPIO, ADC, DAS, SPI, I2S, I2C, UART и др.). Программирование микроконтроллера осуществляется на языке MicroPython.

Измерение напряжения и тока проводилось с помощью мультиметра ZT102.

Потребляемая системой гидропоники мощность рассчитывалась по следующей формуле:

$$P = U \times I \tag{1}$$

где U – напряжение сети, равное 220 В; I – ток сети, А.

Для создания и обучения нейронной сети использовался язык программирования с открытым исходным кодом Python 3 совместно с библиотекой Numpy, предназначенной для ускоренных матричных вычислений.

Для эксперимента использовался питательный раствор Кнопа, состав которого приведен в таблице 1. Электропроводность раствора составила 730 ppm, pH = 5,5. Измерение электропроводности питательного раствора проводилось с помощью датчика TDSMeterv 1.0 for Arduino, pH – с помощью модуля датчика pH для Arduino

Таблица 1. Состав питательного раствора Кнопа

Table 1. Knop's nutrient solution

Компонент	Количество, г/л
$CaNO_3$	1,000
KNO_3	0,250
KH_2PO_4	0,250
$MgSO_4$	0,250
KCl	0,125
$FeCl_3$	0,125

Расчет транспирации растений происходит через определение дефицита давления пара (*VPD*, кПа). Его расчет проводился по следующим формулам:

$$VPD = VPsat - VPair \tag{2}$$

где *VPsat* – давление пара внутри листа, кПа; *VPair* – давление пара окружающего воздуха, кПа.

$$VPair = \frac{610,7 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3+T}}}{1000} \times \frac{RH}{100} \tag{3}$$

где T – температура воздуха, °C; RH – относительная влажность, %; 610,7 и 7,5 – коэффициенты, получаемые из уравнения Аррениуса.

$$VPsat = \frac{610,7 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3+T}}}{1000} \tag{4}$$

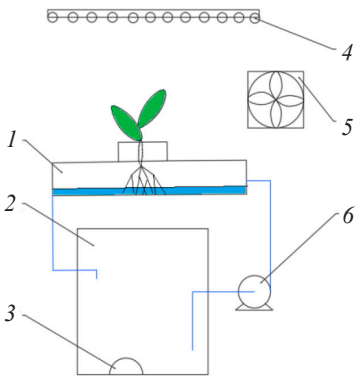
где T – температура поверхности листа растения, °C.

Эффективность обученной нейронной сети оценивали по потребляемой установкой мощности и совокупной площади листьев салата. Сбор данных проводился в 10–12-кратной повторности. Далее приведены средние значения показателей экспериментов (x ± Δx).

Результаты и их обсуждение

В системе гидропоники было решено использовать датчики температуры и влажности воздуха, температуры листа растения, а также освещенности для определения интенсивности света. Данный набор датчиков позволит отслеживать и контролировать наиболее важные факторы роста.

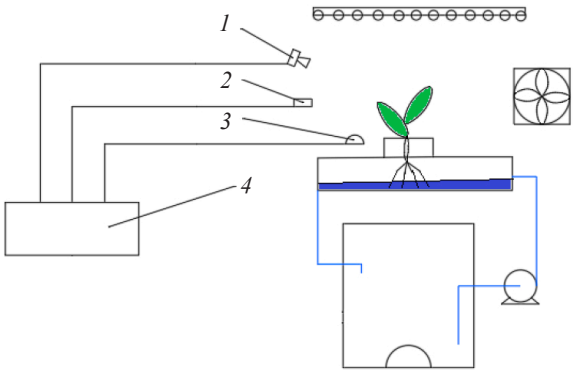
На основании вышеизложенного была разработана и собрана система гидропоники. За основу исследовательского стенда была взята технология питательной пленки (NFT), поскольку она отличается высокой оксигенацией корней растения за счет протекания через пленку питательного раствора. Это позволяет точно, по сравнению с аэропоникой, управлять корневой средой, не требуя применения



1 – лоток с растениями; *2* – бак с питательным раствором; *3* – аэратор; *4* – фитолампа; *5* – вентилятор; *6* – насос питательного раствора

Рисунок 2. Структурная схема исследовательского стенда

Figure 2. Block diagram of the experimental stand



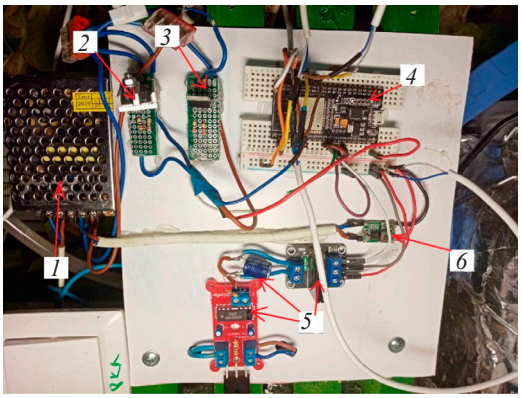
1 – инфракрасный датчик температуры; *2* – датчик температуры и влажности воздуха; *3* – датчик освещенности; *4* – микроконтроллер

Рисунок 4. Структурная схема исследовательского стенда

Figure 4. Block diagram of the experimental stand

дорогого оборудования. Система NFT является закрытой, что дает возможность использовать ее в качестве экспериментальной установки. Стоит отметить возможность высокой плотности посадки растений, что важно для их размещения в современных жилых помещениях. Данный тип подходит для выращивания большинства видов зелени, пряных и лечебных трав.

Структурная схема расположения исполнительных устройств изображена на рисунке 2. Экспериментальная установка состоит из пластикового лотка (*1*) для размещения растений, бака с питательным раствором (*2*), аэратора (*3*), повышающего количество растворенного кислорода в питательном растворе, фитолампы (*4*), вентилятора (*5*) и помпового насоса (*6*) для подачи питательного раствора в лоток с растениями.



1 – импульсный блок питания (12V); *2*, *3* – модули силового ключа на транзисторе L3705n; *4* – микроконтроллер ESP32; *5* – модуль управления насосом; *6* – DC-DC преобразователь питания микроконтроллера

Рисунок 3. Строение электронной части системы гидропоники

Figure 3. Electronic part of the hydroponics system

В качестве лотка для растений взят воздуховод (55×110×1000 мм), в котором были проделаны 12 отверстий под растения (d = 25 мм). Лоток был изолирован от света алюминиевой фольгой, которая позволила исключить развитие в нем водорослей. В качестве бака с питательным раствором взята пищевая емкость объемом 20 л, в крышке которой были проделаны необходимые технологические отверстия под аэратор и помповый насос. Бак, как и лоток, был изолирован от света. В системе аэрации был использован аквариумный компрессор совместно с аэрационным камнем. Для освещения использовалась светодиодная лента на диодах 5050 с соотношением количества красных светодиодов к синим 1:3. В качестве насоса взят помповый насос для аквариумов. Вся система смонтирована на деревянном каркасе.

Строение электронной части представлено на рисунке 3.

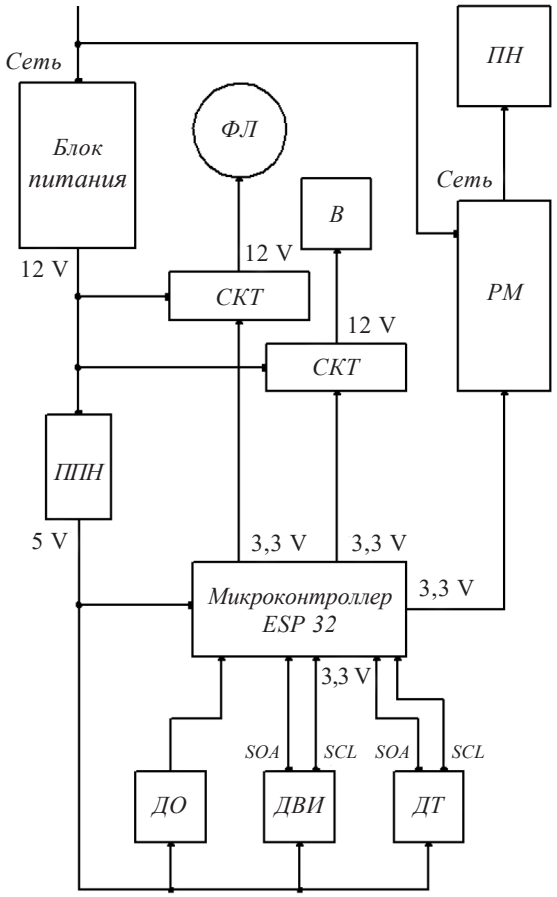
Структурная схема используемых датчиков представлена на рисунке 4. Система датчиков состоит из инфракрасного датчика температуры (*1*), измеряющего температуру поверхности листа, датчика температуры и влажности воздуха (*2*), фоторезистивного датчика освещенности (*3*) и микроконтроллера (*4*) для сбора и обработки данных.

Структурная электрическая схема представлена на рисунке 5.

Собранная установка представлена на рисунке 6.

Следующим шагом стало планирование эксперимента с целью сбора данных для формирования обучающей выборки для нейронной сети.

В начале планирования эксперимента производился выбор входных и выходных переменных.



ППН – понижающий преобразователь напряжения; *СКТ* – силовой ключ транзистора; *ФЛ* – фитолампа; *В* – вентилятор; *РМ* – регулятор мощности; *ПН* – помповый насос; *ДО* – датчик освещенности; *ДВИ* – датчик влажности и температуры; *ДТ* – датчик температуры листа

Рисунок 5. Структурная электрическая схема

Figure 5. Structural electrical diagram

Входные переменные X_i, i = (1, k) являются независимыми или управляющими факторами. Основным требованием, предъявляемым к таким факторам, является высокая управляемость, т. е. осуществимость установки и фиксации нужного уровня переменной в течение всего опыта.

Рисунок 6. Собранная установка гидропоники

Figure 6. Assembled hydroponics setup

Выходная переменная Y – это реакция объекта на входные воздействия, которая описывается формулой:

$$Y = f(a, b, c) \quad (5)$$

Входными данными (a, b, c) будут являться скорость вращения вентилятора (FV), освещенность растений (LP) и производительность помпового насоса (PV). Выходной переменной Y будет являться дефицит давления пара, т. е. транспирация растения (VPD).

Таким образом, результирующая формула примет следующий вид:

$$VPD = f(FV, LP, PV) \quad (6)$$

Вторым этапом планирования эксперимента является определение области значений входных переменных. Для этого необходимо составить таблицу пределов изменения факторов (табл. 2).

Получили матрицу планирования полного факторного эксперимента. На основе данных из матрицы был проведен эксперимент, состоящий из 27 состояний установки. Каждое измерение проводилось с интервалом 5 мин в течение суток.

Таблица 2. Пределы изменения факторов

Table 2. Change factor limits

Факторы	Скорость вращения вентилятора, об/мин	Освещенность растений, кОм	Производительность помпового насоса, мл/мин	Дефицит давления пара
Принятое обозначение	*FV*	*LP*	*PV*	*VDP*
Обозначение в МФЭ	X_1	X_2	X_3	*Y*
Верхний предел (1)	1350	4000	4000	–
Основной уровень (0)	700	3000	2500	–
Нижний предел (–1)	0	2000	1000	–

Следующим этапом исследования стала разработка структуры системы управления гидропоникой с использованием нейронной сети. В данной задаче работа нейронной сети сводится к преобразованию входных данных в выходные за счет матричных вычислений функций активации и подстройки синаптических весов связи.

Информация о микроклимате собирается с датчиков и передается в нейронную сеть, которая затем формирует управляющее воздействие для исполнительного устройства, которое влияет на контролируемый процесс.

Разработанная нейронная сеть совместно с регулятором состояла из трех основных блоков: базы данных, нейронной сети и модуля формирования управляющего воздействия (решения). Структура данного комплекса приведена на рисунке 7.

На вход нейронной сети подается информация о дефиците давления пара (*VPD*) и освещенности растений. Выходными данными являются объем подачи питательного раствора, необходимая яркость фитолампы и скорость вращения вентилятора. Данные от датчиков поступают в модуль базы данных, в котором они сохраняются некоторое время. Далее они подаются на нейронную сеть, которая выдает предсказания о необходимых параметрах управляющих воздействий. Модуль формирования решения использует эти данные для создания управляющих воздействий для исполнительных устройств.

При разработке нейронной сети для решения задачи контроля параметров исполнительных устройств гидропоники первым этапом стал выбор ее архитектуры. Подбор структуры осуществляется в зависимости от сложности решаемой задачи. Проведенный анализ литературных источников показал целесообразность использования нейронной сети типа многослойного персептрона, который способен учесть нелинейность системы.

Для подбора архитектуры необходимо определить критерий точности и ошибку предсказания для выходных данных. Точность – одна из важнейших характеристик системы автоматического управления, характеризующая степень близости реализации управляемого процесса к заданной величине. Отклонения управляемого процесса от требуемого вызываются динамическими свойствами объекта управления и системой автоматического управления, а также ошибками измерительных и исполнительных устройств. Объект управления обладает свойством инертности.

Таким образом, выбрана относительная погрешность предсказания нейронной сети, равная 1 %, что является минимальной разрешающей способностью регулирования исполнительных устройств. На основании данной ошибки производился дальнейший подбор архитектуры нейронной сети.

В работах [17, 22] было показано, что для решения большинства прикладных задач оптимальным количеством слоев нейронной сети типа многослойного персептрона являются 2–3 слоя. Данные работы основывались на теореме Колмогорова, которая теоретически обосновывает выбор количества скрытых слоев в нейронной сети.

В ходе эксперимента были рассмотрены разные структуры нейронной сети, которые обучались с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. На входные нейроны подавалась одинаковая обучающая выборка. Наименьшую ошибку (0,2 %) показала нейронная сеть, представленная на рисунке 8. Изменение ошибки в процессе обучения представлено на рисунке 9. При обучении сетей с меньшим количеством слоев уровень ошибки составлял более 5 %, а при увеличении слоев свыше четырех ошибка оставалась на уровне четырехслойной нейронной сети.

Значение выходного нейрона будет определяться по формуле:

$$y = f_{Sigmoida}\left(\sum_{k=2}^{M} w_{1k}^{(3)} f_{Sigmoida}\left(\sum_{i=1}^{L} w_{ki}^{(2)} f_{ReLU}\left(v_i\right)\right)\right) \quad (7)$$

где f_{Sigmoida} – сигмоидальная функция активации; f_{ReLU} – функция активации ReLU; w – веса; v – значение входного параметра.

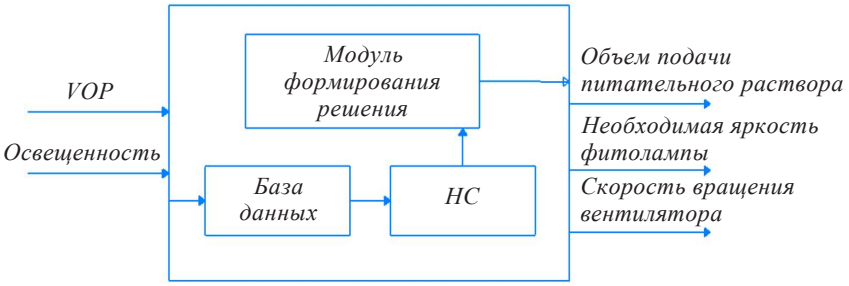


Рисунок 7. Структура регулятора нейронной сети

Figure 7. Structure of the neural network regulator

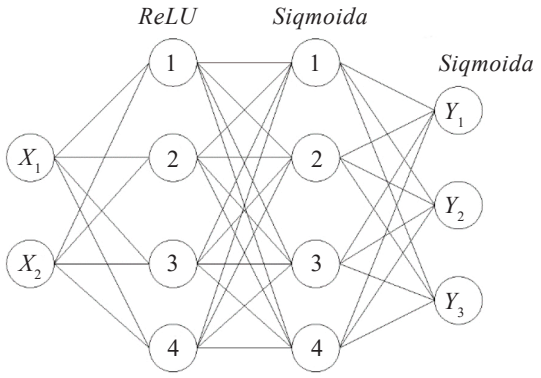


Рисунок 8. Структура нейронной сети

Figure 8. Neural network structure

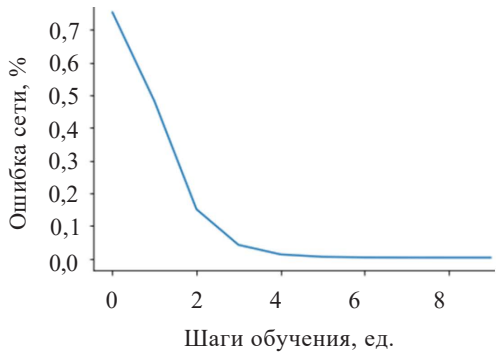


Рисунок 9. График изменения ошибки в процессе обучения нейронной сети

Figure 9. Error variance in the process of training the neural network

Входной вектор [X_1, X_2] состоит из таких параметров микроклимата, как *VPD* и освещенность помещения. Выходной вектор [Y_1, Y_2, Y_3] состоит из скорости вращения вентилятора, яркости фитолампы и производительности помпового насоса.

Данная нейронная сеть способна эффективно решать задачу контроля параметров исполнительных устройств гидропоники, связанную с недостаточной определенностью параметров ПИД-регулирования. Благодаря использованию функции активации сигмоиды нейронная сеть способна аппроксимировать нужную нам нелинейную функцию. Разработанная сеть способна выполнять функции регулятора.

После обучения сеть была интегрирована в систему управления гидропоникой. Данная операция облегчена тем, что язык программирования MicroPython, используемый для программирования микроконтроллеров ESP32, является производным от языка Python, в котором была создана и обучена нейронная сеть. Это позволило с минимальными изменениями перенести код в программу для микроконтроллера. В программу были добавлены обученные веса *w* и функция прямого прохода сети.

Управление гидропоникой осуществляется по следующему алгоритму:

1. Сбор данных. С помощью датчиков собирается информация о влажности и температуре воздуха, температуре поверхности листа растения и освещенности установки;

2. Подготовка данных для нейронной сети. Рассчитывается *VPD* и формируется вектор входных значений для нейронной сети [X_1, X_2];

3. Получение выходных данных из нейронной сети. Сеть на выход подает вектор [Y_1, Y_2, Y_3], где Y_1 – производительность насоса, Y_2 – скорость вентилятора, Y_3 – яркость фитолампы;

4. Формирование управляющего сигнала для исполнительных устройств.

Управление системой гидропоники реализуется в автоматическом режиме для процесса выращивания растения. Пользователь осуществляет контроль параметров, замену питательного раствора и посадку саженцев растений в лоток. Помимо автоматического режима, возможно ручное управление, реализованное через команды микроконтроллера.

Для определения энергоэффективности разработанной системы автоматизации необходимо измерить потребляемую среднюю мощность электроприбора в течение заданного промежутка времени.

Для реализации сравнения энергоэффективности модели управления на основе нейросетевого регулятора необходима контрольная модель управления, которая была осуществлена следующим образом:

– объем подачи питательного раствора: 4 л/мин безостановочно;
– интенсивность вращения вентилятора: 1000 об/мин безостановочно;
– интенсивность света фитолампы: 3000 кОм. Периодичность работы составила 18 ч для светового дня, 6 ч – для ночи.

При данных параметрах днем установка имеет потребление 0,13 А, ночью – 0,1 А. Суточное потребление электроэнергии составляет 647 Вт/сут.

Для расчета потребления электроэнергии установкой, управляемой нейросетевым регулятором, в течение суток каждый час проводился замер потребляемого тока. Результаты замеров приведены на рисунке 10.

Суточное потребление электроэнергии установкой, управляемой нейросетевым регулятором, составило E = 442 Вт/сут, что на 32,3 % меньше, чем за аналогичный период времени работы установки под управлением контрольной модели.

Выводы

В результате исследования была подтверждена возможность использования нейронной сети в качестве управляющей части системы гидропоники для дома. Архитектура использованной сети представляет собой многослойный персептрон. Обучен-

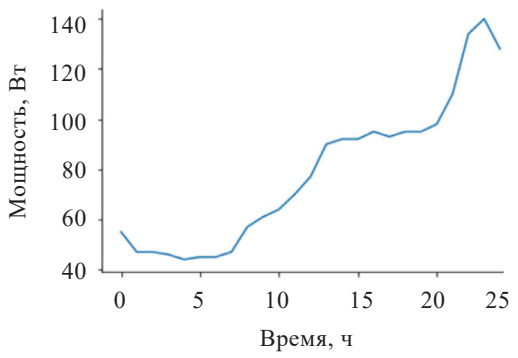


Рисунок 10. График потребления тока системой гидропоники, управляемой нейронной сети

Figure 10. Current consumption of the hydroponics system controlled by a neural network

ная нейронная сеть формирует управляющее воздействие, регулирующее количество подаваемого насосом питательного раствора, интенсивность освещения растений фитолампой и движение воздушных масс вентилятором.

Проделанная работа может быть использована фермерами для снижения затрат энергии на выращивание растений без снижения производительности гидропоники. Технология может быть реализована как в домашних системах гидропоники, так и в сити-фермах с возможностью интеграции в энергосберегающие жилые помещения и системы умного дома. Технология выполняет ограниченный набор операций в системе управления гидропоникой, фокусируясь на определенном виде растения.

Дальнейшая работа будет направлена на расширение набора параметров управления и видов культивируемых растений, что приведет к возможности масштабирования системы на крупные предприятия.

Критерии авторства

Д. М. Бородулин – руководство работой, написание рукописи статьи. А. А. Максименко – поиск статей, проведение эксперимента, обработка результатов и написание рукописи статьи. А. В. Шафрай – консультация в ходе написания рукописи статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

D.M. Borodulin supervised the research and wrote the manuscript. A.A. Maximenko reviewed scientific publications, conducted the experiment, processed the results, and wrote the manuscript. A.V. Shafrai provided consultation.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. World population prospects: Population division department of economic and social affairs. United Nation; 2019. 46 p.

2. The state of food security and nutrition in the world. Building climate resilience for food security and nutrition. Rome: Food and Agriculture Organization; 2018. 202 p.

3. Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome: Food and Agriculture Organization; 2012. 155 p. https://doi.org/10.22004/ag.econ.288998

4. Bren d'Amour C, Reitsma F, Baiocchi G, Barthel S, Güneralp B, Erb K-H, *et al.* Future urban land expansion and implications for global croplands. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016;114(34):8939–8944. https://doi.org/10.1073/pnas.1606036114

5. Kaledin AP, Stepanova MV. Bioaccumulation of trace elements in vegetables grown in various anthropogenic conditions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):10–16. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-551

6. Bychkova SM, Zhidkova EA, Andreeva OO. Innovative controlling technologies. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(3):479–486. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-479-486

7. Rutkin NM, Lagutkina LYu, Lagutkin OYu. Urban agrotechnologies (city-farming) as a perspective branch of development of world agribusiness and the way to improve the cities food security. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2017;(4):95–108. (In Russ.). https://doi.org/10.24143/2073-5529-2017-4-95-108

8. We are what we eat: Healthy eating trends around the world. Nielsen; 2015. 27 p.

9. Gerasimenko NF, Poznyakovskiy VM, Chelnokova NG. Healthy eating and its role in ensuring the quality of life. Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products. 2016;12(4):52–57. (In Russ.). [Герасименко Н. Ф., Позняковский В. М., Челнакова Н. Г. Здоровое питание и его роль в обеспечении качества жизни // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2016. Т. 12. № 4. С. 52–57.]. https://elibrary.ru/VIPFHU

10. From agriculture to AgTech. An industry transformed beyond molecules and chemicals. Monitor Delloite; 2016. 24 p.

11. Sedych TV, Pogrebnyak SV. Growth and productivity of cucumbers in winter greenhouses in autumn-winter crop rotation on hydroponics succinct in LLC “Sibagroholding” in a suburb of the city of Omsk. Vestnik of Omsk SAU. 2016;23(3):53–58. (In Russ.). [Седых Т. В., Погребняк С. В. Рост и продуктивность огурца в зимних теплицах в осенне-зимнем культурообороте на малообъемной гидропонике (ООО «Сибагрохолдинг») // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. Т. 23. № 3. С. 53–58.]. https://elibrary.ru/WLSMER

12. Dmitriev VM, Gandzha TV, Kurin’ka VS. Structural-functional scheme of a computer model of the smart hydroponic greenhouses. Informatika i Sistemy Upravleniya. 2018;55(1):51–63. (In Russ.). https://doi.org/10.22250/isu.2018.55.51-63

13. Saaid MF, Sanuddin A, Ali M, Yassin MSAIM. Automated pH controller system for hydroponic cultivation. IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE); 2015; Langkawi. Langkawi: IEEE; 2015. p. 186–190. https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2015.7298353

14. William T. Hydroponics for everybody: All about home horticulture. Mama Publishing; 2015. 288 p.

15. Morimoto T, Hashimoto Y. Optimal control of plant growth in hydroponics using neural networks and genetic algorithms. Acta Horticulturae. 1996;406:433–440. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.406.43

16. Hashimoto Y. Computer integrated plant growth factory for agriculture and horticulture. IFAC Proceedings Volumes. 1991;24(11):105–110. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041273-3.50023-9

17. Hatou K, Nonami H, Itoh M, Tanaka I, Hashimoto Y. Computer integrated plant growth factory for agriculture and horticulture. IFAC Proceedings Volumes. 1991;24(11):301–306. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041273-3.50058-6

18. Yumeina D, Aji GK, Morimoto T. Dynamic optimization of water temperature for maximizing leaf water content of tomato in hydroponics using an intelligent control technique. Acta Horticulturae. 2017;5:55–64. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1154.8

19. Son JE, Kim H, Ahn TI. Hydroponic systems. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M, editors. Plant factory. An indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic Press; 2020. pp. 273–283. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0

20. Aji GK, Hatou K, Morimoto T, Modeling the dynamic response of plant growth to root zone temperature in hydroponic chili pepper plant using neural networks. Agriculture. 2020;10(6). https://doi.org/10.3390/agriculture10060234

21. Ferentinos KP, Albright LD. Fault detection and diagnosis in deep-trough hydroponics using intelligent computational tools. Biosystems Engineering. 2003;84(1):13–30. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00232-5

22. Saraswathy VR, Nithiesh C, Palani Kumaravel S, Ruphasri S. Integrating intelligence in hydroponic farms. International Journal of Electrical Engineering and Technology. 2020;11(4):150–158. https://doi.org/10.34218/IJEET.11.4.2020.017

23. Jung D-H, Kim H, Jhin C, Kim H-J, Park S. Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. Computers and Electronics in Agriculture. 2020;173. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402

24. Saraswathi D, Manibharathy P, Gokulnath R, Sureshkumar E, Karthikeyan K. Automation of hydroponics green house farming using IoT. 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA); 2018; Pondicherry. Pondicherry: IEEE; 2018. p. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2018.8541251

25. Mehra M, Saxena S, Sankaranarayanan S, Tom RJ, Veeramanikandan M. IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. Computers and Electronics in Agriculture. 2018;155:473–486. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.015

26. Kularbphettong K, Ampant U, Kongrodj N. An automated hydroponics system based on mobile application. International Journal of Information and Education Technology. 2019;9(8):548–552. https://doi.org/10.18178/ijiet.2019.9.8.1264