

**РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРВОДВИГАТЕЛЯ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА В ТЕПЛИЦЕ**
CALCULATION OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A SERVO MOTOR
DESIGNED TO MOVE A ROBOT IN A GREENHOUSE

Васильев В.В., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

Vasiliev V.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

Афоничев Д.Н., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

Afonichev D.N., DrSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

Аннотация. Представлена методика расчета технических характеристик серводвигателя, предназначенного для поперечного перемещения робота по территории роботизированной теплицы. При расчете необходимой мощности серводвигателя акцент поставлен на учете всех сил сопротивления, возникающих при вращении ходового винта, а также коэффициента полезного действия электропривода и винтовой пары, и окружной скорости ходового винта. В свою очередь в процессе расчета минимально допустимой угловой скорости вала серводвигателя учитываются требуемая линейная скорость перемещения робота вдоль ходового винта, шаг резьбы ходового винта и количество заходов резьбы у винтовой пары. Практическое использование предложенной методики позволит подобрать серводвигатель с наилучшими техническими характеристиками.

Ключевые слова: роботизированная теплица, робот, серводвигатель, ходовой винт, вал, мощность, угловая скорость, шаг резьбы.

Abstract. The paper presents a method for calculating the technical characteristics of a servo motor designed for the robot's lateral movement within a robotic greenhouse. When calculating the required power of the servo motor, attention is given to considering all the resistance forces that arise during the rotation of the lead screw, as well as the efficiency of the electric drive and the screw pair, and the circumferential speed of the lead screw. In turn, the calculation of the minimum allowable angular speed of the servo motor shaft takes into account the required linear speed of the robot's movement along the lead screw, the pitch of the lead screw, and the number of threads in the screw pair. The practical use of the proposed methodology will allow you to select a servo motor with the best technical characteristics.

Keywords: robotic greenhouse, robot, servo motor, lead screw, shaft, power, angular speed, thread pitch.

Выращивание овощей и фруктов в защищенном грунте, в том числе и по технологии вертикального земледелия, является одним из новых перспективных направлений в сельском хозяйстве [1-3]. Для реализации данного направления в современных условиях наиболее рационально использовать усовершенствованные роботизированные теплицы [4-6], где основные работы по посадке, уходу и сбору урожая выполняют роботы. В усовершенствованных теплицах [4-6] роботы находятся в подвешенном состоянии и маневрируют на территории теплицы по специальному транспортному пути, где приводятся в движение электроприводами.

Поперечное перемещение робота по территории роботизированной теплицы реализуется по ходовому винту и ограничителю, где ходовой винт устанавливается в подшипниковых узлах на опорных тележках и приводится во вращательное движение серводвигателем, а ограничитель жестко закреплен на опорных тележках. Серводвигателем ходовой винт приводится во вращение, в результате этого при взаимодействии резьбовых отверстий ходового винта и подвижной платформы робота подвижная платформа начинает перемещаться вдоль ограничителя до момента установки робота в заданное место назначения. Параметры поперечного передвижения робота по территории теплицы определяются правильным выбором серводвигателя, а именно расчетом требуемых технических характеристик применяемого серводвигателя.

Расчет требуемых технических характеристик серводвигателя, применяемого для вращения ходового винта, сводится к определению его минимально допустимой мощности и минимально допустимой угловой скорости, а, следовательно, должны выполняться следующие условия

$$N_{PS} \geq N_{RS} K_N ; \quad (1)$$

$$\omega_{PS} \geq \omega_{RS} K_{\omega}, \quad (2)$$

где N_{PS} – паспортная мощность серводвигателя, Вт; N_{RS} – расчетная мощность серводвигателя, Вт; K_N – коэффициент запаса мощности серводвигателя; ω_{PS} – паспортная угловая скорость вала серводвигателя, рад/с; ω_{RS} – расчетная угловая скорость вала серводвигателя, рад/с; K_{ω} – коэффициент запаса угловой скорости вала серводвигателя.

В неравенствах (1) и (2) коэффициент запаса мощности серводвигателя и коэффициент запаса угловой скорости вала серводвигателя принимаются таким образом, чтобы свести к минимуму работу данного электропривода на предельных режимах. Данные показатели устанавливаются индивидуально производителями роботизированных теплиц для конкретных условий эксплуатации.

В условии (1) паспортная мощность серводвигателя N_{PS} принимается из его технических характеристик, а расчетная мощность серводвигателя определяется по формуле

$$N_{RS} = F_{AR} \frac{v_{OV}}{\eta_s}, \quad (3)$$

где F_{AR} – сила сопротивления поперечному перемещению робота в теплице, Н; v_{OV} – окружная скорость ходового винта, м/с; η_s – коэффициент полезного действия серводвигателя.

Сила сопротивления поперечному перемещению робота в теплице, с учетом приведенных рекомендаций в работах [7, 8], составляет

$$F_{AR} = F_P + F_{AV} + F_{AN}, \quad (4)$$

где F_P – сила сопротивления вращению ходового винта в подшипниковых узлах, Н; F_{AV} – сила сопротивления перемещению подвижной платформы по ходовому винту, Н; F_{AN} – сила сопротивления перемещению подвижной платформы по ограничителю, Н.

Сила сопротивления вращению ходового винта в подшипниковых узлах из уравнения равновесия относительно оси ходового винта [9, 10] будет равна

$$F_P = K_T (G_V + G_{ARV}) \frac{d_p}{d_v}, \quad (5)$$

где K_T – коэффициент трения в подшипниках ходового винта при движении; G_V – вес ходового винта, Н; G_{ARV} – доля веса робота, передаваемого на ходовой винт, Н; d_p – диаметр подшипника оси ходового винта, м; d_v – диаметр ходового винта, м.

В формуле (5) показатель G_{ARV} рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе.

Взаимодействие подвижной платформы с ходовым винтом реализуется винтовой парой. С учетом рекомендаций, приведенных в работе [11, 12], сила трения в резьбе винтовой пары рассчитывается по формуле

$$F_{fr} = f_R N_R = N_R \operatorname{tg} \varphi_R, \quad (6)$$

где N_R – реакция опоры, Н; f_R – коэффициент трения в резьбе; φ_R – угол трения, рад.

В условии (6) показатель N_R устанавливается из выражения

$$N_R = F_T \sin \psi + F_A \cos \psi, \quad (7)$$

где F_T – окружная сила на окружности среднего диаметра резьбы ходового винта, Н; F_A – осевая сила в винтовой паре, Н; ψ – угол подъема резьбы, рад.

Окружная сила на окружности среднего диаметра резьбы ходового винта составит [11]

$$F_T = F_A \operatorname{tg}(\psi + \varphi_R). \quad (8)$$

Осевая сила в винтовой паре равна

$$F_A = \frac{\pi G_{ARV} r_v \eta_v}{p_R z}, \quad (9)$$

где π – число «пи», постоянная величина примерно равная 3,14; r_v – радиус ходового винта, м; η_v – коэффициент полезного действия винтовой пары; p_R – шаг резьбы ходового винта, м; z – число заходов резьбы.

Следует отметить, что в равенствах (6), (7), (8) и (9) такие показатели как f_R , φ_R , η_V , p_R и z принимаются в зависимости от материала винтовой пары и вида резьбы, а показатель G_{ARV} рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе робота. При этом сила трения в резьбе винтовой пары является силой сопротивления перемещению подвижной платформы по ходовому винту, то есть $F_{fR} = F_{AV}$.

Сила сопротивления перемещению подвижной платформы робота по ограничителю F_{AN} – сила трения скольжения. Отсюда следует, что сила F_{AN} равна

$$F_{AN} = f_s G_{ARO}, \quad (10)$$

где f_s – коэффициент трения скольжения; G_{ARO} – доля веса робота, передаваемого на ограничитель, Н.

В формуле (10) показатель f_s принимается в зависимости от вида используемого материала винтовой пары, а показатель G_{ARO} рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе робота.

В условии (2) паспортная угловая скорость вала серводвигателя принимается из его технических характеристик, а расчетная угловая скорость вала серводвигателя определяется расчетным путем. Обуславливаемся, что за один оборот ходового винта подвижная платформа совершает перемещение вдоль ходового винта на расстояние равное шагу резьбы, то справедливо записать следующее условие

$$v_{AR} = zp_R n_V, \quad (11)$$

где v_{AR} – линейная скорость робота вдоль ходового винта, м/с; n_V – частота вращения ходового винта, об/с.

Из равенства (11) частота вращения ходового винта составит

$$n_V = \frac{v_{AR}}{zp_R}. \quad (12)$$

На основании зависимости (12) расчетная угловая скорость вала серводвигателя будет равна

$$\omega_{RS} = 2\pi \frac{v_{AR}}{zp_R}. \quad (13)$$

Используя формулу расчета угловой скорости вала серводвигателя, запишем условие расчета окружной скорости ходового вина

$$v_{OV} = 2\pi r_V \frac{v_{AR}}{zp_R}. \quad (14)$$

Представленная методика расчета технических характеристик серводвигателя, который предназначен для поперечного перемещения робота в теплице, позволяет определить минимально допустимые мощность и угловую скорость вала серводвигателя, и учитывает влияние различных факторов на движение подвижной платформы робота по ходовому винту. При этом конечным этапом подбора серводвигателя является обязательное выполнение условий (1) и (2) для обеспечения запаса мощности серводвигателя и его угловой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greenhouse design and control / P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda [et al.]. – CRC Press, 2011. – 380 p.
2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D45/00; A01D45/26; A01D45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse: № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022 / M. Gao, B. Xu; patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY. – 8 p.
3. Васильев, В. В. Автоматизация процесса выращивания овощей и фруктов в защищенном грунте / В. В. Васильев, И. И. Аксенов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов; г. Воронеж, 9-10 ноября 2023 года. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Ч. II. – 2023. – С. 33-39.
4. Васильев, В. В. Обоснование параметров специального пути для перемещения робота в теплице / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1(84). – С. 70-83.
5. Патент 2818343 Российская Федерация, МПК A01G 9/00. Роботизированная теплица: № 2023127402; заявл. 25.10.2023; опубл. 02.05.2024 / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 8 с.
6. Патент 2830888 Российская Федерация, МПК A01G 9/14. Роботизированная теплица: № 2024124576; заявл. 23.08.2024; опубл. 26.11.2024 / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 15 с.
7. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами: 3-е издание, дополненное и переработанное / под общ. ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. – Москва : «Энергоиздат», 1982. – 416 с.
8. Фоменков, А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий: 2-е издание, переработанное и дополненное / А. П. Фоменков. – Москва : «Колос», 1984. – 288 с.
9. Ивановский, К. Е. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства / К. Е. Ивановский, А. Н. Раковщик, А. Н. Цоглин. – Москва : «Машиностроение», 1973. – 216 с.
10. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики: в 2-х томах, Т. 1 Статика и кинематика, 8-е издание, перераб и доп. / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – Москва : «Наука», 1982. – 352 с.
11. Устюгов, И. И. Детали машин: учебное пособие: 2-е издание, переработанное и дополненное / И. И. Устюгов. – Москва : «Высшая школа», 1981. – 399 с.
12. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение. Износ. Смазка / Под общ. ред. Д. Н. Решетова – Москва : «Машиностроение», 1995. – 864 с.

REFERENCES

1. Greenhouse design and control / P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda [et al.]. – CRC Press, 2011. – 380 p.

2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D45/00; A01D45/26; A01D45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse: № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022 / M. Gao, B. Xu; patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY. – 8 p.
3. Vasilyev, V. V. Automation of the process of growing vegetables and fruits in a protected environment / V. V. Vasilyev, I. I. Aksenov // Innovative Technologies and Technical Means for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists; Voronezh, November 9-10, 2023. – Voronezh: FGBOU VO Voronezh State Agrarian University. – Part II. – 2023. – P. 33-39.
4. Vasilyev, V. V. Justification of the Parameters of a Special Path for Moving a Robot in a Greenhouse / V. V. Vasilyev, D. N. Afonichev // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. – 2025. – No. 1(84). – P. 70-83.
5. Patent 2818343, Russian Federation, IPC A01G 9/00. Robotic greenhouse: No. 2023127402; application no. 10/25/2023; published 05/02/2024 / V. V. Vasilyev, D. N. Afonichev; applicant and patent holder Voronezh State Agrarian University. – 8 p.
6. Patent 2830888 Russian Federation, IPC A01G 9/14. Robotic greenhouse: No. 2024124576; application 08/23/2024; publ. 11/26/2024 / V. V. Vasilyev, D. N. Afonichev; founder and patent holder of Voronezh State Agrarian University. – 15 p.
7. Handbook on the Design of Automated Electric Drive and Process Control Systems: 3rd Edition, Supplemented and Revised / Edited by V. I. Krupovich, Yu. G. Barybin, and M. L. Samover. – Moscow: Energoizdat, 1982. – 416 p.
8. Fomenkov, A. P. Electric Drive of Agricultural Machines, Units, and Flow Lines: 2nd Edition, Revised and Expanded / A. P. Fomenkov. – Moscow: Kolos, 1984. – 288 p.
9. Ivanovsky, K. E. Roller and Disc Conveyors and Devices / K. E. Ivanovsky, A. N. Rakovshchik, and A. N. Tsoglin. – Moscow: Mashinostroenie, 1973. – 216 p.
10. Loitsyansky, L. G. Course of Theoretical Mechanics: in 2 volumes, Vol. 1 Statics and Kinematics, 8th edition, revised and expanded / L. G. Loitsyansky, A. I. Lurie. – Moscow: Nauka, 1982. – 352 p.
11. Ustyugov, I. I. Machine Parts: Textbook for College Students: 2nd edition, revised and expanded / I. I. Utyugov. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1981. – 399 p.
12. Machine Parts. Structural Strength. Friction. Wear. Lubrication / Edited by D. N. Reshetov – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 864 p.