

**А.В. Сорокин***Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Математическая модель нагружающего устройства испытательного стенда механических трансмиссий

Аннотация. Работа посвящена разработке математической модели нагружающего устройства испытательного стенда механических трансмиссий. Задачей стенда является проверка работоспособности изделий перед крупно узловой сборкой механизмов. Процесс испытаний характеризуется передачей энергии через вращающийся вал трансмиссии с нагружением его по определенному закону, который определяется контролируруемыми рабочими и аварийными режимами трансмиссии. Нагружающее устройство выполнено в виде структуры «генератор — двигатель» на машинах переменного тока, включенных по схеме взаимной нагрузки и механическом покрытии потерь, с регулированием момента нагрузки трансмиссии посредством введения добавочной ЭДС в цепь ротора асинхронного двигателя. Разработано математическое описание автономной электроэнергетической системы переменного тока в фазовых координатах и с помощью преобразования Парка проведено преобразование фазных величин статоров и роторов в систему $d - q$. Получена зависимость для вычисления момента нагрузки передаваемого через трансмиссию. Рассмотрены ограничения, накладываемые на электропривод стенда.

Ключевые слова. Испытательный стенд, испытание трансмиссий, электропривод, система управления.

Информация о статье. Дата поступления: 20 декабря 2022 г.; дата принятия к публикации: 30 января 2023 г.; дата онлайн-размещения: 3 февраля, 2023 г.

Original article

A.V. Sorokin*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

Mathematical Model of the Loading Device of the Test Bench Mechanical Transmissions

Abstract. The work is devoted to the development of a mathematical model of a loading device for a test bench for mechanical transmissions. The task of the stand is to check the performance of products before the large-nodal assembly of mechanisms. The testing process is characterized by the transfer of energy through the rotating shaft of the transmission with its loading according to a certain law, which is determined by the controlled operating and emergency modes of the transmission. The loading device is made in the form of a “generator-motor” structure on AC machines connected according to the mutual load scheme and mechanical loss coverage, with control of the transmission load moment by introducing an additional EMF into the rotor circuit of the asynchronous. A mathematical description of an autonomous electric power system of alternating current

in phase coordinates has been developed and, using the Park transformation, the phase values of the stators and rotors have been converted into the $d-q$ system. A dependence is obtained for calculating the load moment transmitted through the transmission. The limitations imposed on the stand electric drive are considered.

Keywords. Test stand, transmission testing, electric drive, control system.

Article info. Received 20 December, 2022; Accepted 30 January, 2023; Available online 3 February, 2023.

Работа посвящена разработке математической модели нагружающего устройства испытательного стенда механических трансмиссий (ИСМТ). Задачей стенда является проверка работоспособности изделий перед крупно узловым сборкой механизмов. Процесс испытаний характеризуется передачей энергии через вращающийся вал трансмиссии с нагружением его по определенному закону, который должен с максимальной точностью воспроизводить нагрузки, возникающие в трансмиссиях при их эксплуатации в рабочих и аварийных режимах.

Исторически сложилось так, что первые нагрузочные устройства (НУ) ИСМТ были выполнены на электрических машинах постоянного тока [1]. Система управления такого НУ отличалась простотой построения и удобством настройки. Но с увеличением длины и передаваемой мощности испытуемых трансмиссий выполнить НУ на машинах постоянного тока оказалось невозможно.

ОАО «Электропривод» (ВНИИ Электропривод) совместно с другими организациями разработали НУ в виде структуры «генератор — двигатель» с машинами переменного тока, включенных по схеме взаимной нагрузки с механическим покрытием потерь и регулированием момента нагрузки посредством асинхронного вентильно-машинного каскада. Регулирование частоты вращения и компенсация потерь осуществляется приводным двигателем постоянного тока [2].

При моделировании испытательного стенда использованы данные установленных электрических машин: синхронный генератор СДНЗ-2-19-49, асинхронный двигатель М1 ФАЗМ 4000/6000 и машина постоянного тока, компенсирующая потери М 6327-6К.

Механическая часть стенда состоит из трех роторов электрических машин, соединенных между собой испытуемой трансмиссией с несколькими редукторами. Наличие протяженного вала (упругого звена) в механической подсистеме оказывает существенное влияние на динамику стенда при натурных испытаниях.

Таким образом, автономная электроэнергетическая система, каковой является НУ испытательного стенда, представляет собой сложный взаимосвязанный электромеханический объект управления, динамика которого характеризуется следующими особенностями:

– отсутствие мощной сети и, следовательно, наличием резкого изменения значений напряжения и частоты тока при набросах нагрузки;

– наличием коротких линий соединений и связанное с этим отсутствие значительных реактивностей линий и в тоже время наличием относительно больших активных сопротивлений в цепи статора, что определяет небольшие постоянные времени электрических цепей НУ, обуславливающих большие скорости протекания электромагнитных процессов;

– присутствием упругих колебаний, возбуждаемых в механической конструкции стенда и испытываемой трансмиссии.

Решение задачи воспроизведения на испытываемой трансмиссии нагрузочных диаграмм и скоростных режимов с требуемым быстродействием и заданной статической и динамической точностью приводит к необходимости создания замкнутой взаимосвязанной системы регулирования координат стенда с управлением, обеспечивающим требуемые показатели качества. Для разработки такой системы управления необходимо иметь достаточно исчерпывающее представление о динамике стенда как объекта управления.

Данная работа является первой частью модели и в ней отражены только электромагнитные процессы, протекающие в НУ без детализации сложных взаимосвязей между электромагнитной и механической подсистемами ИСМТ.

Наиболее общее математическое описание процессов преобразования энергии в электрических машинах дают дифференциальные уравнения, которые справедливы как для переходных, так и для установившихся процессов.

Наличие в электромагнитной системе стенда явнополюсного синхронного генератора (СГ) однозначно решает вопрос о выборе осей координат для записи дифференциальных уравнений, описывающих работу электрических машин стенда. Уравнения синхронной машины записываются в осях $d - q$, жестко связанных с ротором СГ, а уравнения асинхронного двигателя (АД) целесообразно записать в координатных осях синхронной машины. При выборе варианта возможной записи уравнений Парка – Горева следует исходить из удобства использования уравнений для исследований или расчетов наиболее часто встречающихся режимов работы системы. При записи уравнений используются стандартные допущения для так называемой «идеализированной электрической машины» [3].

Исходная система уравнений СГ в фазных осях $A - B - C$ имеют вид

$$\begin{cases} U_S^r = -\dot{\Psi}_S^r - R_S^r I_S^r \\ U_R^r = \dot{\Psi}_R^r + R_R^r I_R^r \end{cases}, \quad (1)$$

или в развернутом виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} U_{SA}^r \\ U_{SB}^r \\ U_{SC}^r \end{bmatrix} = -\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{SA}^r \\ \Psi_{SB}^r \\ \Psi_{SC}^r \end{bmatrix} - R_S^r \cdot \begin{bmatrix} I_{SA}^r \\ I_{SB}^r \\ I_{SC}^r \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & R_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_f \\ I_{1d} \\ I_{1q} \end{bmatrix} \end{array} \right.,$$

где $U_{SA}^r, U_{SB}^r, U_{SC}^r$ — напряжение фаз генератора; U_f — напряжение приложенное к обмотке возбуждения генератора; $\Psi_{SA}^r, \Psi_{SB}^r, \Psi_{SC}^r, \Psi_f, \Psi_{1d}, \Psi_{1q}, I_{SA}^r, I_{SB}^r, I_{SC}^r, I_f, I_{1d}, I_{1q}$ — потокосцепления и токи соответственно фаз статора, обмотки возбуждения, продольного и поперечного успокоительных контуров ротора; R^r, R_f, R_{1d}, R_{1q} — активные сопротивления статора, обмотки возбуждения и успокоительных контуров.

Исходная система уравнений АД в тех же осях, что и СД пишется

$$\begin{cases} U_S^d = \dot{\Psi}_S^d + R_S^d I_S^d \\ U_R^d = \dot{\Psi}_R^d + R_R^d I_R^d \end{cases} \quad (2)$$

или в развернутом виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} U_{SA}^d \\ U_{SB}^d \\ U_{SC}^d \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{SA}^d \\ \Psi_{SB}^d \\ \Psi_{SC}^d \end{bmatrix} + R_S^d \cdot \begin{bmatrix} I_{SA}^d \\ I_{SB}^d \\ I_{SC}^d \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{RA}^d \\ U_{RB}^d \\ U_{RC}^d \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{RA}^d \\ \Psi_{RB}^d \\ \Psi_{RC}^d \end{bmatrix} + R_R^d \cdot \begin{bmatrix} I_{RA}^d \\ I_{RB}^d \\ I_{RC}^d \end{bmatrix} \end{array} \right.,$$

где $U_{SA}^d, U_{SB}^d, U_{SC}^d, U_{RA}^d, U_{RB}^d, U_{RC}^d$ — напряжения подводимые к обмоткам статора и ротора; $\Psi_{SA}^d, \Psi_{SB}^d, \Psi_{SC}^d, \Psi_{RA}^d, \Psi_{RB}^d, \Psi_{RC}^d, I_{SA}^d, I_{SB}^d, I_{SC}^d, I_{RA}^d, I_{RB}^d, I_{RC}^d$ — потокосцепления и токи фаз статора и ротора соответственно.

Учитывая электрическое соединение генератора и двигателя по схеме взаимной нагрузки системы уравнений (1) и (2) следует дополнить уравнениями связи

$$U_S^{\Gamma} = U_S^{\mathcal{D}} = U_S,$$

$$I_S^{\Gamma} = I_S^{\mathcal{D}} = I_S.$$

В результате получим общую систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в НУ ИСМТ записанную в фазных осях А – В – С

$$\begin{cases} -\dot{\Psi}_S^{\Gamma} - R_S^{\Gamma} I_S^{\Gamma} = \dot{\Psi}_S^{\mathcal{D}} + R_S^{\mathcal{D}} I_S^{\mathcal{D}} \\ \dot{\Psi}_R^{\Gamma} + R_R^{\Gamma} I_R^{\Gamma} = U_R^{\Gamma} \\ \dot{\Psi}_R^{\mathcal{D}} + R_R^{\mathcal{D}} I_R^{\mathcal{D}} = U_R^{\mathcal{D}} \end{cases}. \quad (3)$$

Используя матрицу линейного преобразования Парка Р, проведем преобразование фазных величин статоров и роторов СГ и АД в систему $d - q$

$$Y' = P \cdot Y. \quad (4)$$

Совершив преобразование (4), запишем систему уравнений (3) с учетом применения схемы соединения электрических машин с изолированной нейтралью

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \\ 0 \\ 0 \\ U_{Rd} \\ U_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ld} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{lq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_{ld} \\ I_{lq} \\ I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} +$$

$$+ \omega_{\Gamma} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + (\omega_{\Gamma} - \omega_{\mathcal{D}}) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\Psi_{Rd} \\ \Psi_{Rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_{ld} \\ \Psi_{lq} \\ \Psi_{Rd} \\ \Psi_{Rq} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где R_S, R_R — активные сопротивление общей статорной цепи СГ — АД и роторной цепи АД приведенное к статору; U_{Rd}, U_{Rq} — проекции вектора добавочного напряжения вводимого в цепь ротора АД; I_d, I_q, I_{Rd}, I_{Rq} — проекции тока статорной цепи и тока ротора АД на оси d и q ; $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}$ — проекции потокосцепления

статорной цепи и ротора АД; ω_r , ω_d — угловые скорости роторов СГ и АД.

Уравнения Парка-Горева получили в предположении, что ось q опережает ось d ; ось d направлена противоположно потоко-сцеплениям Ψ_f , Ψ_d , Ψ_q . Такой выбор направления осей d и q предпо-лагает положительные знаки I_d и I_q у синхронной машины в гене-раторном режиме.

Уравнение (5) содержит в качестве переменных состояния потоко-сцепления и токи, которые являются взаимосвязанными. Для данного случая целесообразно в качестве переменных состоя-ния выбрать токи.

Произведя перегруппировку строк системы уравнений (5) для разделения по осям и решив тих относительно токов получим

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U_f \\ 0 \\ U_{rd} \\ 0 \\ 0 \\ U_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & \omega_r L_q & \omega_r M_{a1q} & \omega_r M_{ar} \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{ld} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_R & -(\omega_r - \omega_d) M_{Ra} & 0 & -(\omega_r - \omega_d) L_R \\ -\omega_r L_q & \omega_r M_{af} & \omega_r M_{a1d} & -\omega_r M_{ar} & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{lq} & 0 \\ (\omega_r - \omega_d) M_{ra} & 0 & 0 & (\omega_r - \omega_d) L_R & 0 & 0 & R_R \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_f \\ I_{ld} \\ I_{Rd} \\ I_q \\ I_{lq} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{a1d} & -M_{ar} & 0 & 0 & 0 \\ -M_{fa} & L_f & M_{f1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M_{lad} & M_{lf} & L_{ld} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{ar} & 0 & 0 & L_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_q & -M_{a1q} & -M_{ar} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{a1q} & L_{lq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{ra} & 0 & L_R \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_f \\ I_{ld} \\ I_{Rd} \\ I_q \\ I_{lq} \\ I_{Rq} \end{bmatrix},$$

где M_{af} — коэффициент взаимоиндукции фазы статора СГ, обу-словленный потоком обмотки возбуждения; M_{fa} — коэффициент взаимоиндукции обмотки возбуждения обусловленный потоками обмотки статора; M_{a1d} , M_{ad1} — коэффициенты взаимоиндукции об-мотки статора СГ, обусловленные потоками соответственно про-дольного и поперечного успокоительных контуров; L_{ld} и L_{lq} — ко-эффициенты самоиндукции успокоительных контуров; M_{ld} — ко-эффициенты самоиндукции обмотки возбуждения; M_{lda} , M_{lqa} , M_{ldf} , M_{fld} — коэффициенты взаимоиндукции успокоительных контуров и обмотки возбуждения; L_d и L_q — коэффициенты самоиндукции статорной цепи; M_{ar} — коэффициенты взаимоиндукции статора и ротора АД; L_R — коэффициенты самоиндукции роторной цепи АД по продольной и поперечной осям.

Как ранее упоминалось, в выбранном НУ типа «генератор — двигатель» регулирование момента передаваемого через испытыуе-мую трансмиссию осуществляется введением в цепь выпрямлен-ного тока ротора АД добавочной ЭДС $E_{доб}$, с помощью которой можно регулировать ток ротора, а следовательно, и создаваемый

АД момент. Для этого на ИСМТ применяется асинхронный вентильно-машинный каскад (АВМК) [4].

В схемах такого типа на напряжение, подводимое ко вторичной цепи, накладывается ограничение, вытекающее из наличия выпрямителя между двигателем и источником внешнего напряжения со стороны ротора АД. Выпрямленный ток I_R может иметь только одно направление. Это ограничение отражает вентильное свойство цепи, как при любом увеличении U_D ток I_R может лишь снизиться до нуля, поскольку в выпрямительной схеме ток не может протекать под действием противоположного напряжения. Поэтому в модель вводится дополнительное ограничение

$$\begin{cases} U_D < U_R \Rightarrow I_R \neq 0 \\ U_D \geq U_R \Rightarrow I_R = 0 \end{cases}$$

Одной из особенностей АВМК является то, что вектор добавочной ЭДС, введенной в цепь выпрямленного тока ротора, всегда находится в противофазе с вектором выпрямленного тока I_R . Поэтому проекция вектора добавочного напряжения, вводимого в ротор АД, определяется

$$\begin{cases} U_{Rd} = U_D \cdot \frac{I_{Rd}}{\sqrt{I_{Rd}^2 + I_{Rq}^2}} \\ U_{Rq} = U_D \cdot \frac{I_{Rq}}{\sqrt{I_{Rd}^2 + I_{Rq}^2}} \end{cases},$$

где U_D — приведенное к статору добавочное напряжение, вводимое в цепь ротора.

$$U_D = \frac{E_{доб} \cdot K_u}{K_s \cdot S},$$

где K_u — коэффициент приведения ЭДС и напряжения АД; K_s — коэффициент, зависящий от схемы соединения вентилей выпрямителя; S — скольжение АД.

Следует отметить, что АД в ИСМТ будет работать всегда с постоянным скольжением. Это объясняется тем, что СГ и АД соединены как механически, так и электрически, благодаря чему ротор двигателя принудительно вращается относительно поля статора с постоянным скольжением.

Для АВМК $E_{доб}$ равно ЭДС машины постоянного тока включенной в цепь ротора АД. Поскольку управляющим воздействием в этом случае является напряжение, прикладываемое к обмотке независимого возбуждения вспомогательной машины $U_{вмт}$, то в случае анали-

за электромагнитных процессов протекающих в ИСМТ, связанных с изменением управляющего воздействия по моменту, модель должна быть дополнена описанием преобразовательного агрегата в каскаде

$$\begin{cases} U_{\text{вмн}} = I_{\text{с}} R_d + L_{\text{с}} \dot{I}_{\text{с}} \\ E_{\text{ооб}} = K K_{\phi} \omega I_{\text{с}} \end{cases},$$

где $I_{\text{с}}$, $R_{\text{с}}$, $L_{\text{с}}$ — ток, активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения; K — коэффициент связи скорости вращения СГ со скоростью преобразовательного агрегата через общую сеть; K_{ϕ} — коэффициент наклона кривой намагничивания машины постоянного тока работающей на линейном участке.

Электромагнитный момент СГ, действующий на ротор, можно представить выражением, полученным из уравнения обобщенной электрической машины [3]

$$\begin{aligned} M^{\text{СГ}} = & -\frac{3}{2} \left[(M_{af} I_f - L_d I_d + M_{al d} I_{ld}) I_q + \right. \\ & \left. + (L_q I_q + M_{al q} I_{lq}) I_d \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение для электромагнитного момента АД получается аналогично

$$M^{\text{АД}} = \frac{3}{2} M_{ar} (I_{Rd} I_q - I_{Rq} I_d). \quad (7)$$

Так как СГ и АД соединены по схеме взаимной нагрузки, можно, пренебрегая потерями записать равенство мощностей генератора и двигателя

$$P^{\text{Г}} = P^{\text{Д}}.$$

Физически это означает, что двигатель потребляет всю электрическую мощность, вырабатываемую генератором, а генератор — механическую мощность, развиваемую двигателем, т.е. в системе стенда существует замкнутый поток мощности. Так как скорость СГ равна скорости АД, можно записать

$$M^{\text{СГ}} = M^{\text{АД}}.$$

То есть момент генератора равен моменту двигателя по величине и противоположен по направлению.

В результате работы была разработана математическая модель описывающая электромагнитные процессы, протекающие в автономной электроэнергетической системе переменного тока нагружающего устройства испытательного стенда механических

трансмиссий. Получена зависимость для вычисления момента нагрузки передаваемого через трансмиссию (уравнения 6 и 7). Рассмотрены ограничения, накладываемые на электропривод стенда.

Создание быстродействующей и высокоточной системы управления испытательным стендом невозможно без учета статических и динамических характеристик объекта. Поэтому в дальнейшем необходимо рассмотреть взаимосвязанные процессы, протекающие как в нагрузочном устройстве, так и в системе поддержания скорости ИСМТ.

Список использованной литературы

1. Борцов Ю.А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. — Ленинград: Энергия, 1979. — 159 с.
2. Устройство оптимизации электропривода стенда для испытаний трансмиссий: патент №4375112 СССР: заявл. 08.02.1988 : опубл. 30.09.1990 / Ю.А. Борцов, С.Е. Голик, Н.Д. Поляхов [и др.]. — 5 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. — 3-е изд. — Москва: Высшая школа, 2001. — 327 с.
4. Онищенко Г.Б. Теория электропривода: учебник / Г.Б. Онищенко. — Москва: Инфра-М, 2018. — 384 с.

References

1. Bortsov Yu.A., Sokolovskii G.G. *Thyristor electric drive systems with elastic links*. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 159 p.
2. Bortsov Yu.A., Golik S.E., Polyakhov N.D., Putov V.V., Sorokin A.V., Shmelev V.A. *Transmission Test Bench Electric Drive Optimization Device*. Patent no. 4375112, USSR; Applicant and Patent 08.02.1988; publ. 30.09.1990. 5 p.
3. Kopylov I.P. *Mathematical modeling of electrical machines*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
4. Onishchenko G.B. *Electric drive theory*. Moscow, Infra-M Publ., 2018. 384 p.

Информация об авторе

Сорокин Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: sorokinav@bgu.ru.

Information about the Author

Alexander V. Sorokin — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: sorokinav@bgu.ru.

Для цитирования

Сорокин А.В. Математическая модель нагружающего устройства испытательного стенда механических трансмиссий / А.В. Сорокин. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(1).66-74. — EDN QDXVHM // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 1. — С. 66–74.

For Citation

Sorokin A.V. Mathematical Model of the Loading Device of the Test Bench Mechanical Transmissions. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 66–74. (In Russian). EDN: QDXVHM. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(1).66-74.