

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Статья посвящена изучению вопроса создания энергоэффективных испытательных комплексов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока методом взаимной нагрузки. Для рассмотренных схем составлены математические модели, позволяющие исследовать статические и динамические режимы работы как в испытуемой и нагрузочной машинах, так и в элементах преобразователя частоты. Практическая ценность полученных математических моделей состоит в том, что они могут быть применены в процессе проектирования новых испытательных комплексов для определения необходимых параметров оборудования при известных параметрах испытуемых двигателей, а также для моделирования переходных процессов в электрических цепях схемы испытаний с целью виртуальной проверки возможных алгоритмов задания нагрузки испытуемому двигателю.

**Ключевые слова:** испытательный комплекс, электрическая машина, нагрузочные испытания, математическая модель, частотный преобразователь.

В настоящее время как на государственном, так и на отраслевом уровне одним из основных приоритетов развития железнодорожных перевозок является развитие и обслуживание инфраструктуры и подвижного состава на основе внедрения, в том числе нового подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями, что зафиксировано в различных документах, определяющих стратегии развития [1–3]. Предполагается также внедрение инновационных систем диагностики и мониторинга, направленных на повышение производительности труда и снижение издержек.

Одним из основных факторов снижения издержек выступает энергосбережение, и, следовательно, актуальной задачей является разработка и внедрение инновационных энергоэффективных комплексов, предназначенных для проведения испытаний в процессе ремонта и сдачи в эксплуатацию тяговых двигателей подвижного состава.

Порядок технического обслуживания и ремонта тяговых двигателей, виды и объём работ при каждом виде технического обслуживания и ремонта, а также объём испытаний тяговых двигателей после их ремонта определяет руководящий документ [4]. В соответствии с данным руководством каждый выпускаемый из ремонта тяговый двигатель необходимо подвергнуть приёмосдаточным испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ 2582 [5], в котором приводятся программы испытаний для различных категорий испытаний, наиболее энергозатратным из которых является испытание на нагревание. Метод проведения данного типа испытаний для асинхронных двигателей описан в ГОСТ 7218 [6].

С целью экономии электрической энергии в процессе испытаний двигателей постоянного тока достаточно давно и широко используется метод

взаимной нагрузки, который пока не нашел широкого применения для испытания асинхронных двигателей. Однако для реализации данного энергоэффективного метода испытаний в настоящее время разработан ряд схем [7, 8], позволяющих создать комплекс для нагрузочных испытаний асинхронных двигателей. С целью экономии капитальных затрат на изготовление испытательных комплексов на предприятиях, осуществляющих ремонт двигателей обоих типов (постоянного тока и асинхронных), предложены совмещенные схемы взаимной нагрузки машин обоих типов, позволяющие уменьшить число дорогостоящих преобразователей, задействованных в схеме [9, 10].

Внедрение данных схем в производственный процесс требует изучения особенностей их работы и разработки методик определения параметров элементов схем при известных параметрах двигателей, проходящих ремонт на конкретном предприятии.

Для изучения разработанных схем составим математические модели происходящих в них физических процессов.

В работе [11] рассмотрена математическая модель физических процессов при взаимодействии двух асинхронных машин, одна из которых работает в режиме двигателя, а другая — в режиме генератора [7]. Однако данная модель не рассматривает процессы, происходящие в преобразователях частоты (ПЧ) и не позволяет рассчитать токи и мощности в электрических цепях ПЧ. Для формирования более полной математической модели введем обозначения в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Математическая модель напряжения, моделируемого преобразователем частоты, может быть записана в виде следующих выражений.

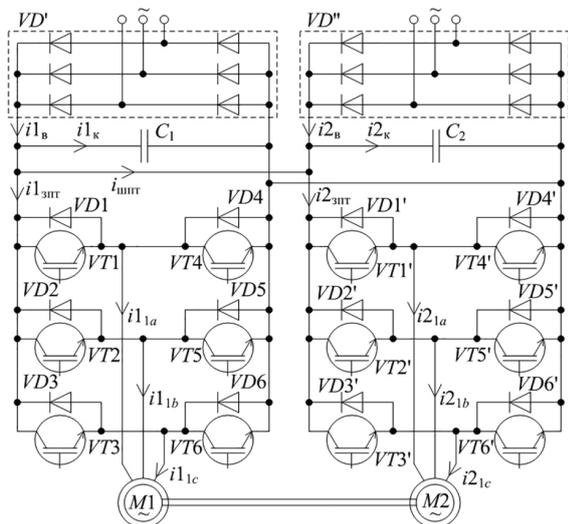


Рис. 1. Схема соединений испытательного комплекса с системой асинхронный двигатель — асинхронный генератор

Напряжение на выходе выпрямителя, входящего в состав силовой схемы ПЧ:

$$u_{\text{вып}}(t) = U_{\text{л max}} \times \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \pi / 3 - \text{Int}(300t) \pi / 3), \quad (1)$$

где  $U_{\text{л max}}$  — амплитудное значение линейного напряжения на входе ПЧ;  $\text{Int}(300t)$  — функция, выделяющая целую часть числа  $(300t)$ .

Пилообразное напряжение, формируемое в системе управления ПЧ:

$$u_n(t) = \begin{cases} U_{n \text{ max}}(4f_n t - 4 \text{Int}(f_n t) - 1), & \text{если } 0 \leq t - \text{Int}(f_n t) / f_n < 0,5 / f_n; \\ -U_{n \text{ max}}(4f_n t - 4 \text{Int}(f_n t) - 3), & \text{если } 0,5 / f_n \leq t - \text{Int}(f_n t) / f_n < 1 / f_n, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{n \text{ max}}$  — амплитудное значение пилообразного напряжения;  $f_n$  — частота пилообразного напряжения.

Задающее напряжение в системе управления, определяющее частоту и действующее значение переменного напряжения сформированного на выходе ПЧ по трем фазам:

$$\begin{cases} u_{3a}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi \cdot f_3 \cdot t); \\ u_{3b}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi \cdot f_3 \cdot t - 2\pi / 3); \\ u_{3c}(t) = U_{3 \text{ max}} \sin(2\pi \cdot f_3 \cdot t - 4\pi / 3), \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_{3 \text{ max}}$  — амплитудное значение задающего напряжения;  $f_3$  — частота задающего напряжения.

Напряжение, формируемое на выходе ПЧ по фазе «а»:

$$u_a(t) = \begin{cases} \frac{2}{3} u_{\text{вып}}(t) \text{sign}(u_{3a}(t) - u_n(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t) - u_n(t)) = \dots \\ \dots = \text{sign}(u_{3c}(t) - u_n(t)) \neq \text{sign}(u_{3a}(t) - u_n(t)); \\ \frac{1}{3} u_{\text{вып}}(t) \text{sign}(u_{3a}(t) - u_n(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t) - u_n(t)) \neq \text{sign}(u_{3c}(t) - u_n(t)); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

Аналогичным образом формируются напряжения по фазам «b» и «с».

В соответствии с введенными на рис. 1 обозначениями можно записать выражения для токов в транзисторах первого преобразователя частоты в виде следующей системы уравнений с логическими функциями:

$$\begin{cases} i_{VT1} = \begin{cases} i_{1a}, & \text{если } (u_{1a} > 0) \cap (i_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VT2} = \begin{cases} i_{1b}, & \text{если } (u_{1b} > 0) \cap (i_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VT3} = \begin{cases} i_{1c}, & \text{если } (u_{1c} > 0) \cap (i_{1c} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VT4} = \begin{cases} i_{1a}, & \text{если } (u_{1a} < 0) \cap (i_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VT5} = \begin{cases} i_{1b}, & \text{если } (u_{1b} < 0) \cap (i_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VT6} = \begin{cases} i_{1c}, & \text{если } (u_{1c} < 0) \cap (i_{1c} < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Для токов в вентилях справедлива следующая система:

$$\begin{cases} i_{VD1} = \begin{cases} i_{1a}, & \text{если } (u_{1a} > 0) \cap (i_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD2} = \begin{cases} i_{1b}, & \text{если } (u_{1b} > 0) \cap (i_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD3} = \begin{cases} i_{1c}, & \text{если } (u_{1c} > 0) \cap (i_{1c} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD4} = \begin{cases} i_{1a}, & \text{если } (u_{1a} < 0) \cap (i_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD5} = \begin{cases} i_{1b}, & \text{если } (u_{1b} < 0) \cap (i_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\ i_{VD6} = \begin{cases} i_{1c}, & \text{если } (u_{1c} < 0) \cap (i_{1c} > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Тогда ток в звене постоянного тока первого ПЧ:

$$i_{1 \text{ зпт}} = i_{VT1} + i_{VT2} + i_{VT3} + i_{VD1} + i_{VD2} + i_{VD3}. \quad (7)$$

Выражения (5) – (7) могут быть рассчитаны при заданных напряжениях на выходах ПЧ в программе *Mathcad*, которая позволяет формализовать данные выражения в виде математических функций от времени и построить их графики.

Токи в транзисторах, вентилях и в звене постоянного тока второго преобразователя частоты определяются аналогично выражениям (5) – (7) путем замены номеров токов и напряжений с «1» и «u1» на «2» и «u2» соответственно.

Суммарный ток, протекающий по звеньям постоянного тока (см. рис. 1):

$$i_{1 \text{ зпт}} = i_{1 \text{ зпт1}} + i_{1 \text{ зпт2}}. \quad (8)$$

Обозначим суммарную емкость конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2. \quad (9)$$

Напряжения на конденсаторах определяются в зависимости от направления и величины тока  $i_{3nm}$  и скорости изменения разности напряжений на конденсаторах  $U_c$  и выходе выпрямителя  $u_{вып}$ :

$$\begin{cases} U_c = u_{вып}, & \text{если } i_{3nm} \geq 0; \\ dU_c = -\frac{i_{3nm} dt}{C}, & \text{если } i_{3nm} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Суммарный ток, протекающий по цепи обоих конденсаторов:

$$I_\kappa = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (11)$$

Суммарный ток, протекающий по выпрямителем:

$$i_{вып} = i_{3nm} + I_\kappa. \quad (12)$$

Ток, протекающий по общей шине постоянного тока:

$$\begin{cases} i_{шнм} = \frac{i_{13nm} - i_{23nm}}{2}, \\ \text{если } \text{sign}(i_{13nm}) = \text{sign}(i_{23nm}); \\ i_{шнм} = \left( \frac{|i_{13nm} - i_{23nm}|}{2} + \min(i_{13nm}, i_{23nm}) \right) \text{sign}(i_{13nm}), \\ \text{если } \text{sign}(i_{13nm}) \neq \text{sign}(i_{23nm}). \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, полная математическая модель, позволяющая определить токи и напряжения во всех элементах схемы испытательного комплекса с системой асинхронный двигатель — асинхронный генератор, состоит из системы уравнений, приведенной в [11] с учетом выражений, описывающих напряжения, сформированные преобразователем частоты (1)–(4), дополненной уравнениями (5)–(13).

Схема соединений испытательного комплекса с системой асинхронный двигатель — асинхронный генератор [8] имеет вид, приведенный на рис. 2.

На приведенной схеме механически соединены валы асинхронного двигателя и нагрузочной машины постоянного тока с независимым возбуждением.

Математическая модель генератора постоянного тока с независимым возбуждением может быть записана в виде следующей системы из двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a} \left( u_{вып} - I_a \Sigma R_a - \omega \Phi \cdot \frac{U_n}{\omega_n} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{rnm}} \left( I_a \Phi \cdot \frac{M_n}{I_{ан}} - M_B \right), \end{cases} \quad (14)$$

где  $I_a$  — ток якоря;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;  $\Sigma L_a$ ,  $\Sigma R_a$  — суммарные индуктивность и сопротивление цепи якоря нагрузочного генератора;  $J_{rnm}$  — момент инерции нагрузочного генератора;  $U_n$  — номинальное напряжение нагрузочного генератора;  $\omega_n$  — номинальная угловая скорость вращения ротора нагрузочного генератора;  $M_n$  — номинальный момент нагрузочного генератора;  $I_{ан}$  — номинальный ток якоря нагрузочного генератора;  $\Phi^*$  — отношение значения основного магнитного потока нагрузочного генератора к номинальному значению потока;  $M_B$  — внешний вращающий момент (при отрицательном значении становится моментом сопротивления вращению).

Для учета насыщения магнитопровода в системе уравнений (14) величина  $\Phi^*$  может быть задана в виде зависимости  $\Phi^* = f(I_a^*)$  от тока возбуждения, выраженного в долях от его номинального значения.

Дополнив математическую модель асинхронного двигателя, приведенную в [12], системой (14) и задавшись зависимостью  $\Phi^* = f(I_a^*)$ , получим следующую математическую модель для механически связанной системы асинхронный двигатель — генератор постоянного тока:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}}{dt} = \frac{1}{L_{1\sigma 1}} \left[ u_{1a} - i_{1a} R_{11} + k_{1r} \left[ i'_{2a} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1b} - i_{1c}) + L_{12}(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1b}}{dt} = \frac{1}{L_{1\sigma 1}} \left[ u_{1b} - i_{1b} R_{11} + k_{1r} \left[ i'_{2b} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1c} - i_{1a}) + L_{12}(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1c}}{dt} = \frac{1}{L_{1\sigma 1}} \left[ u_{1c} - i_{1c} R_{11} + k_{1r} \left[ i'_{2c} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1a} - i_{1b}) + L_{12}(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L_{2\sigma 1}} \left[ k_{1s} (u_{1a} - i_{1a} R_{11}) + \left[ i'_{2a} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1b} - i_{1c}) + L_{12}(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L_{2\sigma 1}} \left[ k_{1s} (u_{1b} - i_{1b} R_{11}) + \left[ i'_{2b} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1c} - i_{1a}) + L_{12}(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L_{2\sigma 1}} \left[ k_{1s} (u_{1c} - i_{1c} R_{11}) + \left[ i'_{2c} R'_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(i_{1a} - i_{1b}) + L_{12}(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{-L_{12} p}{(J_{rnm} + J) \sqrt{3}} \left[ i_{1a} (i'_{2b} - i'_{2c}) + i_{1b} (i'_{2c} - i'_{2a}) + i_{1c} (i'_{2a} - i'_{2b}) \right] + \dots \\ \dots + \frac{-1}{(J_{rnm} + J)} \left( I_a \Phi \cdot \frac{M_n}{I_{ан}} - M_B \right) - \frac{M_{ном}}{(J_{rnm} + J)} \text{sign}(\omega); \\ \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a} \left( -u_{вып} - I_a \Sigma R_a + \omega \Phi \cdot \frac{U_n}{\omega_{rnm}} \right); \\ \Phi^* = f(I_a^*) \end{cases} \quad (15)$$

где  $\omega_{н.гнм}$  — номинальная угловая частота вращения нагрузочного генератора;  $J_{гнм}$  — момент инерции нагрузочного генератора;  $I_b^* = I_b/I_{вн}$  — отношение тока возбуждения к его номинальному значению (исходя из достаточно большой индуктивности обмотки возбуждения принято постоянным).

Изменяя в математической модели значение тока возбуждения  $I_b^*$ , получим режим нагрузки испытуемого асинхронного двигателя с различной механической мощностью на рис. 2.

Токи в транзисторах, вентилях и в звене постоянного тока первого преобразователя частоты могут быть найдены исходя из выражений (5) – (7).

Токи в цепях схемы:

$$i_{унм} = I_a - I_b; \quad (16)$$

$$i_{зnm} = i_{зnm} - i_{унм}. \quad (17)$$

Напряжение на конденсаторе и токи, протекающие по конденсатору и выпрямителю, могут быть определены по выражениям (10) – (12).

Совокупность выражений (1) – (7), (10) – (12), (15) – (17) является математической моделью испытательного комплекса с системой асинхронный двигатель — генератор постоянного тока, изображенного на рис. 2.

При составлении математической модели испытательного комплекса с системой двигатель постоянного тока — генератор постоянного тока необходимо учесть то, что питание обмоток испытуемой и нагрузочной машины осуществляется от выпрямителя, на вход которого подается напряжение от преобразователя частоты в соответствии с выражениями (1) – (4).

При этом задающие сигналы, формируемые в соответствии с выражением (3) позволяют регулировать частоту и амплитуду первой гармоники напряжения, формируемого на выходе ПЧ, которое подается на вход трехфазных выпрямителей [9, 10].

Как известно, при соединении диодов по схеме Ларионова из диодов катодной группы в любой момент времени будет открыт тот, на аноде которого оказался наиболее высокий положительный потенциал. Из диодов анодной группы в любой момент времени будет открыт тот, на катоде которого оказался наибольший по модулю отрицательный потенциал.

Исходя из вышесказанного для выпрямителей, подключенных к силовым цепям МПТ, можно записать следующие выражения для определения их выходных напряжений:

$$\begin{cases} u_{1b}(t) = \max(u_{1a}(t), u_{1b}(t), u_{1c}(t)) - \\ \quad - \min(u_{1a}(t), u_{1b}(t), u_{1c}(t)); \\ u_{2b}(t) = \max(u_{2a}(t), u_{2b}(t), u_{2c}(t)) - \\ \quad - \min(u_{2a}(t), u_{2b}(t), u_{2c}(t)). \end{cases} \quad (18)$$

Пример расчетных импульсов напряжения, полученных по выражению (14), при различных соотношениях  $U_{з\max} / U_{н\max}$  приведен на рис. 3.

Проведенный анализ результатов расчета показывает, что частота импульсов напряжения на выходе выпрямителя приблизительно соответствует удвоенной частоте пилообразного напряжения в системе управления ПЧ, а среднее значение выпрямленного напряжения является функцией отношения  $U_{з\max} / U_{н\max}$ .

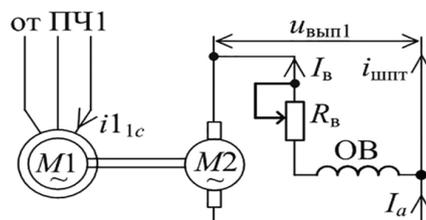


Рис. 2. Фрагмент испытательного комплекса с системой асинхронный двигатель — генератор постоянного тока

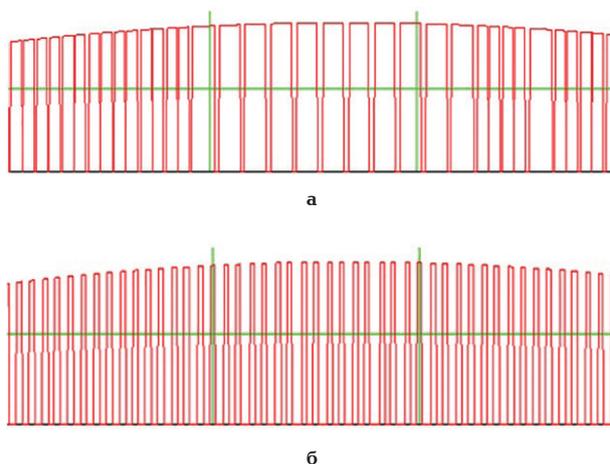


Рис. 3. Форма напряжений на выходе выпрямителей: а — при  $U_{з\max} = 0,9U_{н\max}$ ; б —  $U_{з\max} = 0,5U_{н\max}$

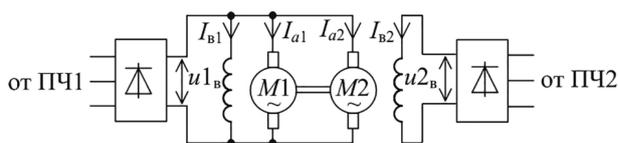


Рис. 4. Фрагмент испытательного комплекса при независимом возбуждении испытуемой и нагрузочной машин постоянного тока

При испытании ДПТ при независимом возбуждении [9] электрические цепи обмоток испытуемой и нагрузочной машины имеют схему, представленную на рис. 4. Для данной схемы можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_{a1}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a1}} \left( -u_{1b} + I_{a1} \Sigma R_{a1} + \omega \Phi_1 \frac{U_{н1}}{\omega_{н.гнм1}} \right); \\ \Phi_1 = f(I_{b1}); \\ I_{b1} = \frac{u_{1b}}{R_{b1} I_{bн1}}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{(J_1 + J_2)} \left( \frac{I_{a1} \Phi_1 M_{н1}}{I_{aн1}} - \frac{I_{a2} \Phi_2 M_{н2}}{I_{aн2}} - M_{ном} \text{sign}(\omega) \right); \\ \frac{dI_{a2}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a2}} \left( -u_{2b} - I_{a2} \Sigma R_{a2} + \omega \Phi_2 \frac{U_{н2}}{\omega_{н.гнм2}} \right); \\ \Phi_2 = f(I_{b2}); \\ I_{b2} = \frac{u_{2b}}{R_{b2} I_{bн2}}, \end{cases} \quad (19)$$

где  $I_{a1}, I_{a2}, I_{b1}, I_{b2}$  — токи якоря и относительные токи возбуждения испытуемой и нагрузочной машины;  $M_{n1}, M_{n2}, U_{n1}, U_{n2}, I_{an1}, I_{an2}, I_{bn1}, I_{bn2}$  — номинальные моменты, напряжения, токи якоря и возбуждения испытуемой и нагрузочной машины;  $\Sigma L_{a1}, \Sigma L_{a2}, \Sigma R_{a1}, \Sigma R_{a2}, R_{b1}, R_{b2}$  — суммарные индуктивности и сопротивления цепей якоря и возбуждения;  $J_1, J_2$  — моменты инерции испытуемой и нагрузочной машины;  $\omega_{н.мтм1}, \omega_{н.мтм2}$  — номинальная угловая частота вращения испытуемой и нагрузочной машины;  $\Phi_1^* = f(I_{b1}^*), \Phi_2^* = f(I_{b2}^*)$  — аппроксимации кривых намагничивания испытуемой и нагрузочной машины.

При испытании ДПТ при последовательном возбуждении [10] электрические цепи обмоток испытуемой и нагрузочной машины имеют схему, представленную на рис. 5.

Система уравнений, описывающая работу данной схемы по сравнению с (19), будет изменена в части определения тока возбуждения обеих машин и примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{a1}}{dt} &= \frac{1}{\Sigma L_{a1}} \left( -u_{1b} + I_{a1} \Sigma R_{a1} + \omega \Phi_1 \frac{U_{n1}}{\omega_{н.мтм1}} \right); \\ \Phi_1^* &= f \left( \frac{I_{b1}}{I_{bn1}} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{(J_1 + J_2)} \left( \frac{I_{a1} \Phi_1^* M_{n1}}{I_{an1}} - \frac{I_{a2} \Phi_2^* M_{n2}}{I_{an2}} - M_{ном} \text{sign}(\omega) \right); \\ \frac{dI_{a2}}{dt} &= \frac{1}{\Sigma L_{a2}} \left( -u_{2b} - I_{a2} \Sigma R_{a2} + \omega \Phi_2 \frac{U_{n2}}{\omega_{н.мтм2}} \right); \\ \Phi_2^* &= f \left( \frac{I_{b2}}{I_{bn2}} \right). \end{aligned} \right. \quad (20)$$

Токи, потребляемые выпрямителями в схемах на рис. 4 и 5, будут равны токам звеньев постоянного тока соответствующих преобразователей частоты. В целом математические модели для данных схем можно ограничить выражениями, определяющими напряжения на выходе ПЧ и выпрямителей (1)–(3), (14), и системами (19) и (20) при независимом и последовательном возбуждении соответственно.

Полученные математические модели позволяют изучать физические процессы в рассмотренных схемах испытаний двигателей в динамических и статических режимах работы [7–10].

Практическая ценность полученных математических моделей состоит в том, что они могут быть применены в процессе проектирования новых испытательных комплексов для определения необходимых параметров оборудования при известных параметрах испытуемых двигателей, а также для моделирования переходных процессов в электрических цепях схемы испытаний с целью виртуальной проверки возможных алгоритмов задания нагрузки испытуемому двигателю.

#### Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г., № 877-р. 110 с. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory\\_documents/01Rasporyazhenie877-r.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory_documents/01Rasporyazhenie877-r.pdf) (дата обращения: 08.05.2018).

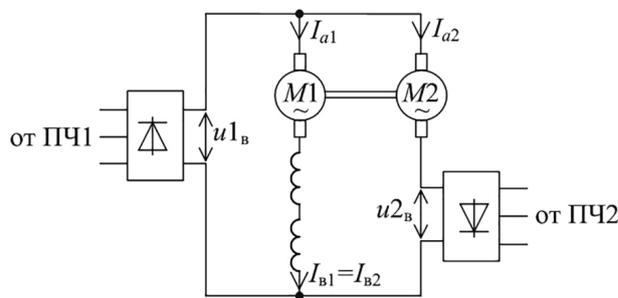


Рис. 5. Фрагмент испытательного комплекса при последовательном возбуждении испытуемой и нагрузочной машин постоянного тока

2. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г., № 1756-р. 68 с. URL: <https://government.consultant.ru/documents/3719785> (дата обращения: 08.05.2018).

3. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года («Белая книга»): одобрена науч.-техн. советом ОАО «РЖД», протокол № 31 от 08.10.2015 г. 69 с. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf) (дата обращения: 08.05.2018).

4. О введении в действие руководства по техническому обслуживанию и текущему ремонту тяговых электродвигателей локомотивов: распоряжение ОАО «РЖД» от 02.11.2009, № 2229р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

5. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.

6. ГОСТ 7218-87 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 1988–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 42 с.

7. Пат. 140678 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / Попов Д. И., Авилов В. Д., Литвинов А. В. № 2013147519/28; заявл. 24.10.13; опубл. 20.05.14. Бюл. № 14.

8. Пат. 178716 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И. № 2017143232; заявл. 11.12.2017; опубл. 17.04.2018. Бюл. № 11.

9. Пат. 168633 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34, G 01 M 15/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением / Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В., Данковцев В. Т., Лузин В. М., Молчанов В. В. № 2016139746; заявл. 10.10.2016; опубл. 13.02.2017. Бюл. № 5.

10. Пат. 178539 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением / Харламов В. В., Попов Д. И. № 2017143233; заявл. 11.12.2017; опубл. 06.04.2018. Бюл. № 10.

11. Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 58–66.

12. Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов: моногр. Омск, 2016. 160 с.

**ПОПОВ Денис Игоревич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника». SPIN-код: 8506-9250

Для цитирования

Попов Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических ма-

Статья поступила в редакцию 18.05.2018 г.  
© Д. И. Попов

УДК 662.925.6  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-84-87

**Е. М. РЕЗАНОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕРМОМАСЛОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены преимущества тепловой работы термомаслогрейных котлов. Предложен алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения топлива в котлоагрегатах нефтехимического производства, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуперативное устройство и сжигаемое топливо.

Обоснована целесообразность использования разработанного алгоритма, что позволяет снизить расход топлива, повысить коэффициент полезного действия термомаслогрейного котельного агрегата.

**Ключевые слова:** эффективность, затраты, воздух, теплопередача, топливо, котельный агрегат, температура.

Наиболее актуальным направлением сегодня в нефтехимической промышленности является сбережение топливно-энергетических ресурсов. Создание современных котельных агрегатов, которые соответствуют технико-экономическим и экологическим показателям, является главным техническим направлением отрасли.

Одним из решений, которое соответствует безопасности, и эффективности нефтехимического производства стало инновационное направление в России по проектированию и исследованию котлоагрегата с использованием в качестве теплоносителя диатермического масла. Сегодня термомаслогрейные котельные агрегаты считаются инновационным вариантом получения тепловой энергии в сфере производства нефтехимии и добычи нефти. Уникальность данного оборудования заключается в том, что можно получить высокие температуры теплоносителя (диатермического масла до + 350 °С) при относительно низких показателях давления 2–5 бар. Именно данный критерий способствует снижению стоимости рассматриваемого оборудования и повышению уровня безопасности его работы [1].

В исследуемых установках с использованием высокотемпературного теплоносителя имеется ряд преимуществ [2, 3]: возможность получения высоких температур при низких давлениях; отсутствует водоподготовка, так как не используется вода; теплоноситель не замерзает; эксплуатация котельного

агрегата осуществляется автоматически; исключена коррозия и эрозия металлов. Но, как и в обычных котельных установках, греющей средой является тепловая энергия сжигающего топлива.

Эффективность сжигания топлива в высокотемпературных теплотехнологических агрегатах повышается при сочетании полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с возможно более полной утилизацией тепловой энергии уходящих газов. Использование физической теплоты отходящих газов для подогрева воздуха является основным мероприятием повышения коэффициента полезного действия, снижения расхода сжигаемого топлива и улучшения экологических показателей [4–6]. Но при этом увеличивается поверхность нагрева рекуперативного устройства (рис. 1). Это приводит к дополнительным затратам на утилизирующий тепловую энергию аппарат. Поэтому необходимо определять оптимальную температуру подогрева воздуха, идущего для горения сжигаемого топлива в топке котла.

Для решения задачи определения оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения сжигаемого топлива в термомаслогрейных котельных агрегатах, мною был разработан алгоритм утилизации тепловой энергии уходящих газов.

Алгоритм разработан на основании нормативного метода теплового расчета котлов, современного решения уравнений теплообмена и баланса теплоты, экономических показателей [7–11]: