

**В.И. НОСКОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА**

Разработана математическая модель системы управления тяговым асинхронным электроприводом дизель-поезда, которая позволяет исследовать работу дизель-поезда в различных режимах, оценивать эффективность предлагаемых регуляторов и осуществлять поиск их оптимальных параметров. Разработанные модели дают возможность с достаточной точностью воспроизводить статические и динамические характеристики тягового электропривода.

Розроблено математичну модель системи управління тяговим асинхронним електроприводом дизель-поїзду, яка дозволяє досліджувати роботу дизель-поїзду в різних режимах, оцінювати ефективність запропонованих регуляторів і здійснювати пошук їх оптимальних параметрів. Розроблені моделі дають можливість з достатньою точністю відтворювати статичні і динамічні характеристики тягового електроприводу.

The mathematical model of the traction control asynchronous electric diesel train, which allows to investigate the work of diesel train in various modes, evaluate the effectiveness of proposed controls and search their optimal parameters. The developed models allow with sufficient accuracy to reproduce the static and dynamic characteristics of electric traction.

**Постановка проблемы.** Проблемами математического моделирования и оптимизации с помощью средств вычислительной техники дизель- и электропоездов во всем мире занимаются уже около полувека, однако далеко не все задачи, сформулированные десятилетия назад, удалось решить с необходимой точностью даже для тяговых приводов постоянного тока. Проектирование и исследование перспективного подвижного состава, как правило, ставит новые, не менее сложные задачи, которые обычно предъявляют к характеристикам вычислительной техники чрезмерные требования. Поэтому актуально разрабатывать рациональные математические модели и методы оптимизации, находить и использовать упрощающие предложения, позволяющие выделить наиболее существенную информацию для оптимизации тяговых, динамических и энергетических характеристик моторвагонного подвижного состава.

**Анализ литературы.** Технично-економическiе и експлуатацiоннiе характеристики дизель- и електропоездов зависят от типа електропривода, системи управління об'єктом, опыта машиниста, состояния пути, погодных условий и других факторов [1 – 10]. Известно, что наилучших технико-економическiх и експлуатацiонных показателей дизель- и електропоездов можно добиться путем оптимизации структур и параметров их систем управления.

В качестве оптимизируемого может быть принят либо некоторый комплекс энергетических показателей работы тягового электропривода подвижного состава, либо его отдельный важный показатель: коэффициент полезного действия (КПД) электропривода, величина тока статора двигателей, потери, коэффициент мощности, активная или полная потребляемая двигателями мощность и т.п. [1 – 10].

**Цель статьи.** При создании асинхронного тягового электропривода важно иметь точные математические модели регуляторов генератора и электропривода, поскольку их фазовые координаты формируют управляющие воздействия по каналам напряжения и частоты. В связи с этим целесообразна разработка математической модели системы управления тяговым асинхронным электроприводом дизель-поезда, позволяющей исследовать его работу в различных режимах.

**Основной раздел.** Математическая модель системы автоматического управления электропередачей дизель-поезда состоит из моделей блоков генератора Г, преобразователей частоты ПЧ, тяговых электродвигателей ТЭД, каналов регулирования генератора и ТЭД и нагрузки. В данной работе рассматриваются вопросы моделирования устройств системы управления асинхронным тяговым электроприводом дизель-поезда.

Регулятор генератора РГ предназначен для формирования сигналов: управляющего воздействия по возбуждению тягового генератора  $U_{УГ}$ ; напряжения, пропорционального мощности  $P_{Г}$  генератора, активного и полного токов  $I_d$ ,  $I_g$ ; сигналов задания напряжения генератора  $U_{3Г2}$  и напряжения возбуждения  $U_{ЗВ}$ .

В качестве входных сигналов регулятора напряжения используются: напряжение  $U_{ЛГ}$ , пропорциональное частоте напряжения тягового генератора; напряжение  $U_{В}$  обмотки возбуждения; ток  $I_{ОТ}$  мостов выпрямителей; напряжение задания ( $U_{3НГ}$ ); активные ( $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ) и полные токи ( $I_{g1}$ ,  $I_{g2}$ ) обоих тяговых двигателей; напряжение генератора  $U_{ЛГ}$ .

Для обеспечения заданных динамических показателей объекта управления формирование управляющего сигнала  $U_{УГ}$  осуществляется с помощью специализированного устройства, обеспечивающего пропорциональный, интегральный, пропорционально-интегральный или иные более сложные законы управления.

В случае применения пропорционально-интегрального закона управления формирование значения  $U_{УГ}$  может быть осуществлено на основании соотношения:

$$U_{УГ} = (U_{ЛГ} - U_{3Г}) \left( K_{УГ} + \frac{1}{T_{1P}} \right), \quad (1)$$

где  $K_{УГ}$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей;

$T_{1P}$  – постоянная времени интегрирования;

$p$  – оператор Лапласа.

Величина  $U_{3Г}$  формируется согласно соотношению:

$$U_{3Г} = \min (U_{3Г1}, U_{3Г3}),$$

где  $U_{3Г1}$  – выходной сигналы управления по каналу регулирования напряжения возбуждения генератора;

$U_{3Г3}$  – сигнал управления по каналу регулирования напряжения возбуждения генератора в тормозном режиме.

Напряжение  $U_{3Г1}$  формируется с использованием блока задатчика интенсивности, обеспечивающего темп нарастания соответствующего сигнала в переходном режиме:

$$U_{3Г1} = U_{3Н} \frac{1}{T_2 p}, \quad (2)$$

где  $U_{3Н} = U_{3Г2} - U_{УТО} - U_{УВ}$ ;

$U_{3Г2}$  – сигнал задания напряжения генератора;

$U_{УТО}$  – сигнал управления ограничением максимального тока выпрямительной установки отопления;

$U_{УВ}$  – сигнал рассогласования по каналу задания напряжения возбуждения;

$$T_2 = \begin{cases} T_{21} & \text{при } U_{3Г1} \leq U_{3Г}, \\ T_{22} & \text{при } U_{3Г1} > U_{3Г}, \end{cases}$$

где  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  – постоянные времени интегрирования, определяемые в процессе исследований.

Сигнал  $U_{3Г2}$  осуществляет ограничение максимального тока выпрямительной установки, его величина определяется выражением:

$$U_{3Г2} = \min((0,98 \bar{f}_Г + 0,02), 1), \quad (3)$$

где  $\bar{f}_Г$  – нормированный сигнал  $f_Г$ .

Сигнал  $U_{УТО}$  осуществляет ограничение максимального тока выпрямительной установки, его значение определяется выражением:

$$U_{УТО} = 20(\bar{I}_{ОТ} - U_{3ОТ}), \quad (4)$$

где  $\bar{I}_{ОТ}$  – нормированный сигнал  $I_{ОТ}$ ;

$I_{ОТ}$  – сигнал задания, пропорциональный току нагрузки выпрямительной установки отопления;

$U_{3ОТ}$  – сигнал задания по каналу управления ограничением максимального тока выпрямительной установки отопления;  $U_{3ОТ} = 1$ .

Сигнал  $U_{УВ}$  обеспечивает ограничение максимального напряжения возбуждения генератора, его значение определяется выражением:

$$U_{УВ} = 10(\bar{U}_В - U_{3В}), \quad (5)$$

где  $\bar{U}_B$  – нормированный сигнал  $U_B$ ;

$U_B$  – напряжение возбуждения генератора;

$$U_{3B} = 0,43\bar{f}_\Gamma + 0,57.$$

Сигнал  $U_{3\Gamma 3}$  необходим для регулирования напряжения генератора в тормозном режиме, его величина определяется выражением:

$$U_{3\Gamma 3} = \max(0,33, 0,41(I_{d1} + I_{d2})). \quad (6)$$

Сигналы  $I_d$ ,  $I_g$ ,  $P_\Gamma$ , пропорциональные активному и полному токам и мощности генератора, формируются по законам:

$$I_d = \max(I_{d1}, I_{d2}), \quad (7)$$

$$I_g = \max(I_{g1}, I_{g2}, 1,02I_d), \quad (8)$$

$$P_\Gamma = 1,17U_{\Gamma\Gamma}I_d, \quad (9)$$

где  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  – активные токи тяговых электродвигателей ТЭД в звене постоянного тока преобразователей частоты;

$I_{g1}$ ,  $I_{g2}$  – полные линейные токи ТЭД.

Входными сигналами для регулятора генератора, являются напряжение возбуждения генератора  $U_B$ , линейное напряжение тяговых обмоток генератора  $U_{\Gamma 1}$ ,  $U_{\Gamma 2}$ ,  $U_{\Gamma 3}$  и частота напряжения генератора  $f_\Gamma$ .

В данном случае моделирование генератора можно выполнить по упрощенной схеме: в модели генератора напряжение возбуждения  $U_B$  при увеличении сигнала  $U_{\Gamma\Gamma}$  может быть определено согласно выражения:

$$U_B = \frac{U_{\Gamma\Gamma}}{3} \cos(0,833\pi U_{\Gamma\Gamma}), \quad (10)$$

а при уменьшении  $U_{\Gamma\Gamma}$  – зависимостью:

$$U_B = \frac{U_{\Gamma\Gamma}}{3} \frac{1 + \cos(\frac{\pi}{6} + 0,833\pi U_{\Gamma\Gamma})}{\sqrt{3}}. \quad (11)$$

Формирование выпрямленного напряжения генератора  $U_d$  осуществляется на основе использования внешних характеристик генератора  $U_d = f(I_d)$ .

Для исследования электропередачи необходима и модель регулятора выходного напряжения инверторов электропривода, работающих в режиме широтно-импульсного регулирования. С целью определения его структуры и параметров, разработана модель регулятора, состоящая из моделей канала ограничения тока (выходной сигнал управления  $U_{\Gamma\Gamma}$ ) и канала поддержания постоянной мощности (выходной сигнал управления  $U_{P\Gamma}$ ). Эти каналы предназначены для формирования сигнала управляющего воздействия по выходному напряжению инверторов  $U_{\Gamma\Gamma}$ .

В режиме тяги без учета процессов буксования значение  $U_{\Gamma\Gamma}$  формируется согласно закону:

$$U_{\delta\delta} = \frac{K_1 U_1}{T_1 p}, \quad (12)$$

где  $K_1$  и  $T_1$  – соответственно коэффициент усиления и постоянная времени задатчика интенсивности;

$$U_1 = \frac{\min(U_{УТ}, U_{РГ})}{T_2 p + 1}, \quad (13)$$

где  $U_{УТ}$  – выходной сигнал канала регулирования тока;

$U_{РГ}$  – результирующий сигнал управления по каналу задания мощности;

$T_2$  – постоянная времени.

Значение  $U_{УТ}$  формируется согласно пропорционально-интегральному закону управления:

$$U_{УТ} = K_3 (U_{ЗТ} - I_g) \left( K_4 + \frac{1}{T_3 p} \right), \quad (14)$$

где  $U_{ЗТ}$  – сигнал задания по каналу регулирования тока;

$K_3, K_4$  – коэффициенты усиления;

$I_g$  – сигнал обратной связи канала регулирования тока;

$T_3$  – постоянная времени.

При исследовании электропривода использовались и другие законы управления.

Формирование сигнала задания  $U_{ЗТ}$  осуществляется на основе нормированного сигнала  $\bar{f}_Г$  частоты напряжения тягового генератора и напряжения  $U_{КМ}$ , пропорционального номеру позиции контроллера машиниста:

$$U_{ЗТ} = \min(U_{ЗТ1}, U_{ЗТ2}, 1), \quad (15)$$

где  $U_{ЗТ1} = K_5 (\bar{f}_Г + K_6)$ ;

$U_{ЗТ2} = U_{ЗТ3} + K_7$ ;

$U_{ЗТ3} = \frac{1}{T_4 p} U_{КМ}$ ;

$K_5, K_6, K_7$  – коэффициенты усиления;

$T_4$  – постоянная времени задатчика интенсивности.

Постоянная времени  $T_4$  определяется соотношением:

$$T_4 = \begin{cases} T_4', & \text{при } U_{ЗТ3} \leq U'_{ЗТ3}, \\ T_4'', & \text{при } U_{ЗТ3} > U'_{ЗТ3}, \end{cases} \quad (16)$$

где  $U'_{ЗТ3} = K_8 (U_{КМ} - 1) / 7 + K_9$ ;

$K_8, K_9$  – коэффициенты усиления.

Значение  $U_{РГ}$  формируется по закону:

$$U_{PG} = K_{10}(U_{3M} - U_P)(1 + \frac{1}{T_{5P}}), \quad (17)$$

где  $U_{3M} = \min((K_{11}\bar{f}_T + K_{12}\frac{\bar{f}_T U_{PG}}{1,25} - K_{13}), (K_{14}(U_{KM} - 1)/7 + K_{15}))$ ;

$K_{1j}$  ( $j = 0, 5$ ) – коэффициенты усиления;

$U_{PG}$  – сигнал управления от регулятора мощности дизеля.

Модель САР электропривода моторного вагона в виде уравнений (1)–(17) может быть использована для исследования регуляторов, формирующих управляющие воздействия по каналам ограничения тока и поддержания постоянства мощности, определения параметров регуляторов, исходя из требований к качественным показателям переходных процессов, а также для проведения исследований объекта управления как в разомкнутой, так и в замкнутой системе автоматического регулирования.

**Выводы.** Разработана математическая модель системы управления тяговым асинхронным электроприводом дизель-поезда, которая позволяет исследовать работу дизель-поезда в различных режимах, оценивать эффективность предлагаемых регуляторов и осуществлять поиск их оптимальных параметров. Разработанные модели дают возможность с достаточной точностью воспроизводить статические и динамические характеристики тягового электропривода. Полученные результаты были использованы при создании первого украинского дизель-поезда ДЭЛ-02.

**Список литературы:** 1. Горин Н.Н. Проблемы применения бесколлекторных тяговых двигателей / Н.Н. Горин, В.Д. Кондратов // Железнодорожный транспорт. –1978. – № 6. – С. 42 – 47. 2. Будницкий А.А. Тягово-энергетические характеристики макетного тепловоза типа ТЭ120 с электропередачей переменного тока / А.А. Будницкий, В.С. Строков, П.Ш. Мельман // Труды ВНИИЖТ. – 1980. – № 51. – С. 23 – 32. 3. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. / Ю.П. Петров // М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 216 с. 4. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов // – М.: Энергия, 1987. – 328 с. 5. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков // М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с. 6. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов // – М.: Энергоатомиздат, 1985. –128 с. 7. Петров Ю.П. Синтез устойчивых систем управления, оптимальных по среднеквадратичным критериям качества (обзор) / Ю.П. Петров // Автоматика и телемеханика. – 1983. – №7. – С. 15 – 24. 8. Коропец П.А. К вопросу оценки тяговых свойств привода локомотива // Повышение эффективности и качества работы электроподвижного состава / П.А. Коропец, Н.И. Горбунов // Межвузовский тематический сборник Ростовского института инженеров жел.-дор. тр-та., 1984. – Вып. 176. – С. 21 – 25. 9. Грапонов В.Г. О новом подходе к решению проблем тягового электропривода переменного тока тепловоза / В.Г. Грапонов, М.В. Мажинский, В.С. Марченко, В.И. Носков, А.А. Чернышев // Сб. научных трудов. – М.: МЭИ, – 1987. – Вып. 136. – С. 36 – 40. 10. Панасюк А.М. Оптимальное частотное управление асинхронным двигателем с учетом электромагнитных процессов в нормированных переменных / А.М. Панасюк, А.С. Шмаков // Автоматика и вычислительная техника. Выпуск 15. Респ. межвед. сборник. – Минск: Высшая школа, 1986. – С. 28–30.

Поступила в редакцию 04.04.2012