

УДК 629.424.001

А. Г. Кузнецов

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

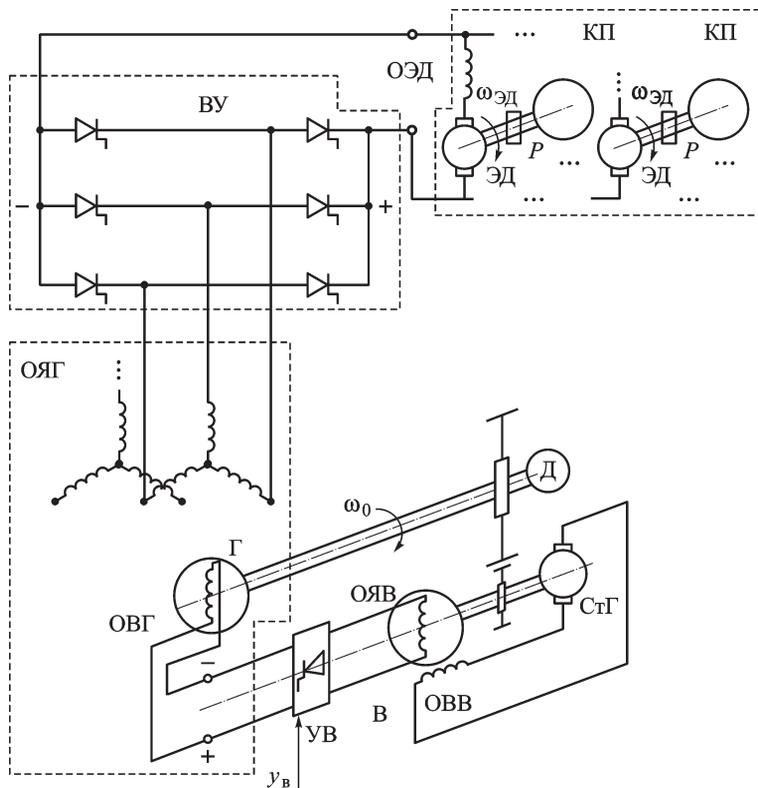
*Рассмотрена динамическая математическая модель энергетической установки тепловоза, предназначенная для расчета переходных процессов при полунатурном моделировании режимов движения тепловоза.*

**Ключевые слова:** тепловоз, модель, динамика, процесс, расчет, моделирование.

Энергетическая установка тепловоза состоит из источника механической энергии — дизеля, устройств преобразования и передачи энергии от дизеля к осям движущих колесных пар и вспомогательного оборудования. Для описания переходных процессов, возникающих при изменении режима движения тепловоза, используется динамическая модель его энергетической установки. Характерным примером таких моделей является модель, составленная на базе передаточных функций и типовых нелинейностей [1]. В работе [2] рассматривается более точная модель тепловозного дизеля, содержащая уравнения течения рабочего тела по элементам двигателя и системы воздухообеспечения. Развитие современных методов моделирования, в том числе полунатурного, и средств вычислительной техники поставило задачу разработки математических (компьютерных) моделей энергетических установок тепловозов, достаточно точно описывающих динамические режимы работы в реальном масштабе времени.

В настоящей работе рассматривается математическая модель энергетической установки тепловоза 2ТЭ116 с устройством передачи энергии от вала дизеля к колесным парам, содержащим тяговый синхронный генератор, выпрямительную установку и тяговые электродвигатели постоянного тока. При таком типе передачи энергии наиболее трудно описывать динамические режимы. Принципиальная схема энергетической установки тепловоза 2ТЭ116 приведена на рис. 1. В состав установки входят дизель (Д), стартер-генератор (СтГ), генератор — возбудитель переменного тока (В), управляемый выпрямитель тока возбуждения (УВ), тяговый синхронный генератор переменного тока (Г), выпрямительная установка (ВУ), тяговые электродвигатели постоянного тока (ЭД), колесные пары (КП), редукторы (Р).

Стартер-генератор (подвозбудитель) вырабатывает постоянное напряжение, которое поддерживается регулятором напряжения неизменным на всех режимах работы. Этим напряжением запитывается обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ). В качестве возбудителя используется синхронный однофазный обращенный генератор. Переменное



**Рис. 1. Принципиальная схема энергетической установки тепловоза**

напряжение, вырабатываемое в обмотке якоря возбuditеля (ОЯВ), преобразуется в управляемом выпрямителе в постоянное и подается на обмотку возбуждения тягового синхронного генератора (ОВГ). Переменное напряжение с обмоток якоря тягового генератора (ОЯГ) после выпрямления на неуправляемой выпрямительной установке подводится к шести тяговым электродвигателям постоянного тока последовательного возбуждения, валы которых через редукторы связаны с колесными парами тепловоза.

На рис. 2 приведена функциональная схема энергетической установки тепловоза в виде совокупности следующих укрупненных составных частей: дизель и тяговый генератор (Д+Г — механическая часть); возбuditель, управляемый выпрямитель и обмотка возбуждения тягового генератора (В+ОВГ — электрическая часть); тяговый генератор, выпрямительная установка и тяговые электродвигатели (Г+ЭД — электрическая часть); тяговые электродвигатели, колесные пары тепловоза и поезд (ЭД+П — механическая часть).

Входными воздействиями для энергетической установки тепловоза являются управляющие воздействия в виде положения рейки топливных насосов  $h$  и сигнала управления выпрямителем ОВГ  $y_v$  и возмущающее воздействие — характер дороги (ХД), определяющий момент сопротивления движению поезда  $M_{п}$ . Выходной параметр — угловая скорость валов тяговых электродвигателей  $\omega_{ЭД}$  или пересчитанная че-

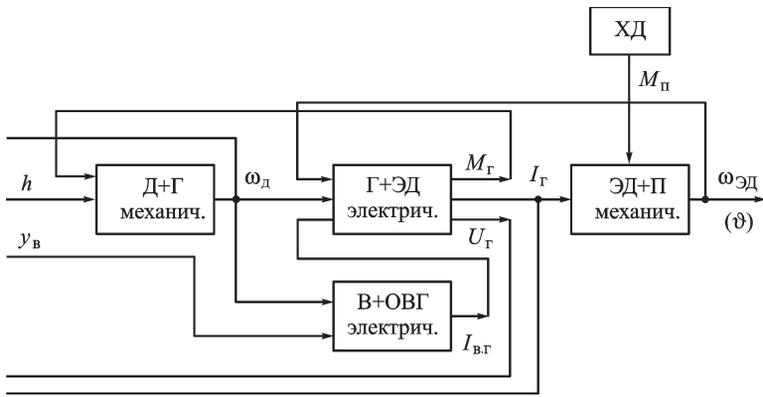


Рис. 2. Функциональная схема энергетической установки тепловоза

рез нее скорость поезда  $v$ . Внутренними сигналами схемы, связывающими между собой элементы установки, являются: угловая скорость вала дизель-генератора  $\omega_d$ ; ток  $I_G$  и напряжение  $U_G$  генератора; ток обмотки возбуждения генератора  $I_{в.г}$ ; момент, необходимый для вращения вала генератора  $M_G$ .

Динамическая модель тепловозного дизеля приведена в работе [3]. Для остальных частей энергетической установки тепловоза получены математические модели в виде дифференциальных уравнений, описывающих изменение выходных параметров во времени при изменении входных параметров.

В электрической схеме тепловоза 2ТЭ116 есть две цепи электропередачи энергии, содержащие контуры переменного и постоянного тока:

обмотка якоря возбuditеля–управляемый выпрямитель–обмотка возбуждения тягового генератора (ОЯВ–УВ–ОВГ);

обмотка тягового генератора–выпрямительная установка–обмотки возбуждения и якорей тяговых электродвигателей (ОЯГ–В–ОЭД).

Схема замещения рассматриваемых цепей приведена на рис. 3, на котором для цепи ОЯВ–УВ–ОВГ введены следующие обозначения:  $E_{я} = E_{я.в}$  – действующее значение ЭДС ОЯВ;  $R_{я} = R_{я.в}$  и  $L_{я} = L_{я.в}$  – активное сопротивление и индуктивность ОЯВ;  $U_{я} = U_{я.в}$  и  $I_{я} = I_{я.в}$  – действующие значения напряжения и тока ОЯВ;  $U = U_{ОВГ}$  и  $I = I_{ОВГ}$

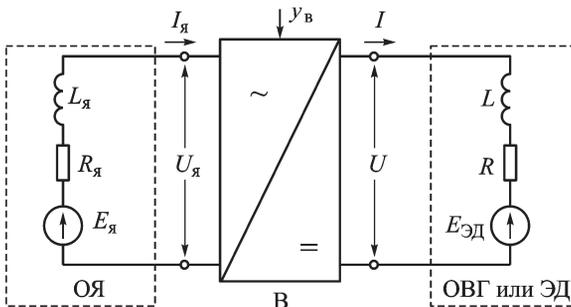


Рис. 3. Схема замещения электрической цепи

— напряжение и ток ОБГ;  $R = R_{\text{ОБГ}}$  и  $L = L_{\text{ОБГ}}$  — активное сопротивление и индуктивность ОБГ;  $E_{\text{ЭД}}$  отсутствует. Для цепи ОЯГ–В–ОЭД:  $E_{\text{я}} = E_{\text{я.г}}$  — действующее значение ЭДС ОЯГ;  $R_{\text{я}} = R_{\text{я.г}}$  и  $L_{\text{я}} = L_{\text{я.г}}$  — активное сопротивление и индуктивность ОЯГ;  $U_{\text{я}} = U_{\text{я.г}}$  и  $I_{\text{я}} = I_{\text{я.г}}$  — действующие значения напряжения и тока ОЯГ;  $U = U_{\text{Г}}$  и  $I = I_{\text{Г}}$  — напряжение и ток после выпрямительной установки;  $R = R_{\text{ЭД}} = R_{\text{ОВД}} + R_{\text{я.ЭД}}$  и  $L = L_{\text{ЭД}} = L_{\text{ОВД}} + L_{\text{я.ЭД}}$  — активное сопротивление и индуктивность обмоток возбуждения и якорей ЭД;  $E_{\text{ЭД}}$  — ЭДС ЭД;  $y_{\text{В}}$  отсутствует.

Описание динамических режимов двухконтурных схем, содержащих цепи переменного и постоянного тока, связанные через выпрямительную установку, представляет сложную задачу, так как выпрямительная установка является нелинейным элементом. При работе генератора на выпрямитель ток в фазах обмотки якоря генератора не синусоидальный, а представляет собой последовательность импульсов, форма которых близка к трапеции. Предлагаемая модель предназначена для полунатурного моделирования, при котором натурные элементы системы управления тепловозом сопрягаются с компьютерной моделью энергетической установки. Поэтому модель должна обеспечивать расчеты динамических режимов в реальном масштабе времени с обменом информацией между натурной и модельной частями установки с быстродействием несколько миллисекунд. Попытки подробного описания параметров контуров переменного тока приводят к громоздким моделям, время расчета по которым неприемлемо при полунатурном моделировании по временному критерию. В связи с этим предлагается упрощенное описание переходных процессов рассмотренных двухконтурных цепей одним уравнением. Однако это не означает значительной потери точности описания, так как используются соотношения между электрическими параметрами переменной и постоянной частей цепи [4]. Возможность такого подхода подтверждается хорошим совпадением расчетных и экспериментальных переходных процессов энергетической установки тепловоза.

Электрическая цепь переменного-постоянного типа в целом рассматривалась как цепь постоянного тока. Изменение тока в цепи описывалось с помощью второго закона Кирхгофа:

$$L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + L \frac{dI}{dt} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + RI = U - E_{\text{ЭД}}.$$

На установившихся режимах индуктивность учитывается только в переменной части цепи. В цепи возбуждения тягового генератора это  $L_{\text{я.в}}$ , в цепи питания тяговых электродвигателей —  $L_{\text{я.г}}$ . Для переменной части схемы определялись действующие значения напряжения и тока через полное сопротивление

$$z = \sqrt{R_{\text{я}}^2 + (\omega L_{\text{я}})^2},$$

где  $\omega$  — циклическая частота синусоидальной ЭДС в ОЯВ или ОЯГ.

В балансе напряжений учитывалось падение напряжения на  $R_{\text{ОВГ}}$  для цепи питания ОВГ и на  $R_{\text{ЭД}}$  для цепи питания ЭД.

В переходных процессах ток изменяется во всей электрической схеме, поэтому для тягового генератора необходимо учитывать также наличие  $L_{\text{ОВГ}}$ , а в цепи питания ЭД —  $L_{\text{ЭД}}$ .

Действующее значение ЭДС в ОЯВ или фазе ОЯГ следующие:

$$E_{\text{я}} = 4,44k_{\text{об}}fw\Phi,$$

где  $k_{\text{об}}$  — обмоточный коэффициент;  $w$  — число витков в обмотке;  $\Phi$  — магнитный поток полюса статора В или ОВГ;  $f = pn/60$  — частота синусоидальной ЭДС;  $2p$  — число пар полюсов;  $n$  — частота вращения ротора.

Принято, что изменение тока в цепи ОЯВ–УВ–ОВГ при изменении управляющего сигнала  $y_{\text{в}}$  происходит за счет изменения ЭДС ОЯВ

$$E_{\text{я.в}} = E_{\text{я.в.н}}y_{\text{в}}/y_{\text{в.н}},$$

где  $E_{\text{я.в.н}}$  и  $y_{\text{в.н}}$  — действующие значения ЭДС и управляющего сигнала на номинальном режиме.

Действующее значение напряжения ОЯВ или ОЯГ

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}}z.$$

С учетом соотношений электрических параметров [4] значения постоянных напряжения и тока после однофазного управляемого выпрямителя составляют  $U_{\text{ОВГ}} = 0,9U_{\text{я.в}}$ ,  $I_{\text{ОВГ}} = 0,9I_{\text{я.в}}$ ; после трехфазной выпрямительной установки —  $U_{\text{Г}} = 2,34U_{\text{я.г}}$ ,  $I_{\text{Г}} = 1,23I_{\text{я.г}}$ .

Электромагнитный момент тягового ЭД и ЭДС можно записать как

$$M_{\text{ЭД.Э}} = C_{\text{м}}I_{\text{ЭД}}\Phi_{\text{ОВД}}, \quad E_{\text{ЭД}} = C_{\text{Е}}n_{\text{ЭД}}\Phi_{\text{ОВД}},$$

где  $C_{\text{м}} = 9,57C_{\text{Е}}$  — конструктивный коэффициент момента;  $I_{\text{ЭД}} = I_{\text{Г}}/6$  — ток якоря;  $\Phi_{\text{ОВД}}$  — магнитный поток полюса, пропорциональный току (для ЭД последовательного возбуждения);  $C_{\text{Е}} = pn/(60a)$  — конструктивный коэффициент ЭДС;  $p$  — число пар полюсов;  $a$  — число параллельных ветвей;  $N$  — число проводников в обмотке якоря.

При работе тягового генератора на выпрямитель ток в фазах обмотки якоря является несинусоидальным. Вследствие большой индуктивности обмоток тяговых ЭД ток в них  $I_{\text{Г}}$  можно принять постоянным. Из-за индуктивности фаз ОЯГ в течение времени, соответствующего углу коммутации  $\gamma$ , ток проходит одновременно через два вентиля и две фазы, в результате чего ток фазы отстает от напряжения на угол, примерно равный  $(0,5 \dots 0,6)\gamma$ . Угол коммутации определяется по его косинусу [5]:

$$\cos \gamma = 1 - 0,816x_{\text{к}}I_{\text{Г}}/E_{\text{к}},$$

где  $x_{\text{к}}$  — сопротивление фазы в режиме коммутации,  $E_{\text{к}}$  — действующее значение фазной ЭДС за сопротивлением  $x_{\text{к}}$ .

При коммутации одновременно открыты однополярные вентили двух фаз, вследствие чего эти фазы оказываются замкнутыми накоротко,  $x_{\text{к}}$  принимают как индуктивное сопротивление режима внезапного

двухфазного короткого замыкания [5]:

$$x_k \approx 0,25 (3x_d + x_q).$$

Здесь  $x_d$  и  $x_q$  — сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря соответственно по продольной и поперечной осям;  $x_d = U_{я.г} x_{дотн} / I_{я.г}$ , где  $x_{дотн}$  — синхронное индуктивное сопротивление в относительных единицах. По рекомендации [5] —  $x_{дотн} = 0,12 \dots 0,35$  (в модели  $x_{дотн} = 0,3$ ), можно также принять  $x_q \approx x_d$ .

Поскольку  $x_k$  обусловлено индуктивностью ОЯГ, в модели принята пропорциональная зависимость  $x_k$  от частоты вращения вала генератора.

Электрическая мощность тягового генератора после трехфазной мостовой схемы выпрямления [5]

$$P_{г.э} = 2,34 I_{г} U_{я.г} \cos(\gamma/2).$$

Тяговые генератор и электродвигатели тепловоза работают в условиях переменных режимов по частоте вращения и нагрузке. Электрические потери изменяются при изменении нагрузки пропорционально квадрату тока  $\Delta P_э = k_э I^2$ . В расчетах принято, что механические и магнитные потери в стали увеличиваются пропорционально квадрату частоты вращения вала машины  $\Delta P_м = k_м n^2$ . Таким образом, потери мощности в тяговых электроагрегатах тепловоза представлены в виде суммы двух составляющих:

$$\Delta P = k_э I^2 + k_м n^2.$$

Механическая мощность тягового генератора

$$P_{г.м} = P_{г.э} + \Delta P.$$

Момент, необходимый для вращения тягового генератора,

$$M_{г} = P_{г.м} / \omega_{д}.$$

Электрическая мощность тягового электродвигателя

$$P_{эд.э} = U_{эд} I_{эд},$$

где

$$U_{эд} = E_{эд} + I_{эд} R_{эд}.$$

Коэффициент полезного действия электродвигателя

$$\eta_{эд} = 1 - \Delta P_{эд} / P_{эд.э}.$$

Крутящий момент (механический) электродвигателя

$$M_{эд.м} = M_{эд.э} \eta_{эд}.$$

Динамический баланс механических энергий шести тяговых электродвигателей и поезда в процессе поступательного движения описывается уравнением второго закона Ньютона

$$a = (F_T - F_c) / m_{п},$$

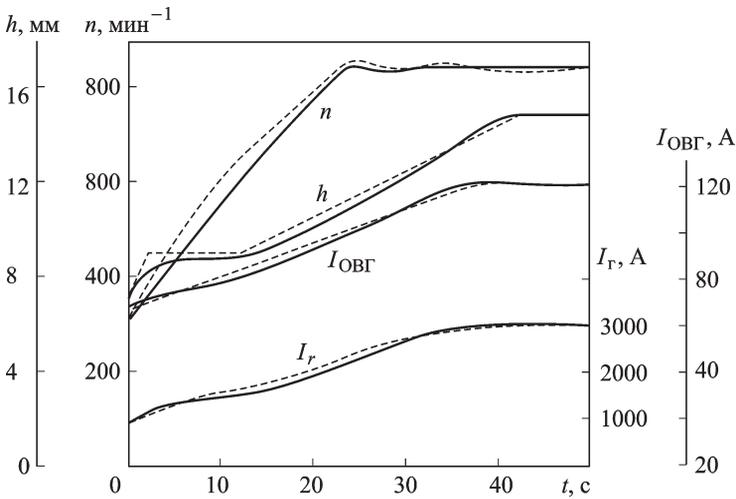


Рис. 4. Переходные процессы дизель-генератора

где  $m_{п}$  — масса поезда;  $a$  — ускорение;  $F_T = M_{к.п}/R_k$  — сила тяги;  $F_c$  — сила сопротивления движению поезда;  $M_{к.п}$  — момент на колесных парах тепловоза;  $R_k$  — радиус колес тепловоза.

С учетом передаточного отношения  $i_{к.п}$  редукторов, установленных между шестью тяговыми электродвигателями и колесными парами,

$$M_{к.п} = 6i_{к.п}M_{ЭД.м.}$$

Для проверки описанной модели проводилось сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты стендовых динамических испытаний дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116 (сплошные линии) и расчетные переходные процессы (штриховые линии) изменения положения рейки топливных насосов дизеля  $h$ , частоты вращения вала дизель-генератора  $n$ , тока генератора  $I_T$  и тока возбуждения  $I_{ОВГ}$ . Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что принятые при создании модели подходы к описанию электрических процессов и допущения справедливы, обеспечивают достаточную для расчетов динамических режимов точность, а предложенная модель адекватно описывает изменения параметров установки и может применяться для полунатурного моделирования. Разработанная модель энергетической установки тепловоза использовалась при полунатурном моделировании переходных процессов, возникающих при изменении режимов движения поезда, при создании системы управления тепловозом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н и к у л и н М. А., Ш е г а л о в И. Л. Оптимизация систем регулирования и управления тепловозов. — М.: Транспорт, 1971. — 192 с.
2. К о с о в Е. Е. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. — М.: Интекст, 1999. — 184 с.

3. Кузнецов А. Г. Стенд полунатурного моделирования динамических режимов энергетических установок с дизелями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. 2008. – № 4. – С. 25–29.
4. Луков Н. М., Стрекопытов В. В., Рудая К. И. Передачи мощности тепловозов. – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.
5. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины. Ч. 2. – М.: Высш. шк., 1979. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 13.07.08



Александр Гаврилович Кузнецов родился в 1952 г. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области моделирования и автоматического регулирования теплоэнергетических установок.

A.G. Kuznetsov (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Thermal Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of simulation and automatic control of thermal power generation facilities.

---

### **В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. вышла в свет книга**

#### **Колесников К.С.**

Рассказ о моей жизни. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.

Автобиографическая книга профессора МГТУ им. Н.Э. Баумана, академика РАН Константина Сергеевича Колесникова представляет собой яркое жизнеописание человека интереснейшей судьбы. Перед нами история личности на фоне крупнейших событий двадцатого столетия, пример целеустремленности фронтовика-бауманца, который жаждал учиться и добился максимальной самореализации.

Читатель — студент или выпускник МГТУ им. Н.Э. Баумана — почерпнет из этой книги немало ценной информации о развитии университета во второй половине XX в., воспитании молодежи, замечательных ученых, блестящих педагогах, которыми по праву гордится наша alma mater.

Неподдельная искренность автора, рассказывающего о пройденном им пути, побуждает к серьезному размышлению, поиску ответов на волнующие современника вызовы нынешней эпохи.

По вопросам приобретения обращаться по тел. (499)-263-60-45;  
e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)