

О.В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

А.Н. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

А.Б. БОГАЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. ХНАДУ;

С.А. ЛИТВИНЕНКО, ст.преп., НТУ «ХПИ»;

Д.М. БАДАЛОВА, студ., НАКУ им.Жуковского «ХАИ»;

СИНТЕЗ ОБЪЕДИНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СТРУКТУРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Статья посвящена созданию обобщенной структуры и построению математических моделей преобразователей параметров движения топливозоизирующего органа и скорости вращения турбокомпрессора дизель – генераторной установки с наддувом в массу дополнительного воздуха, подаваемого в дизель при набросе нагрузки. На основании разработанных математических моделей синтезирована обобщенная структура преобразователя, обеспечивающего дополнительное воздушноснабжение дизель–генератора при набросе нагрузки.

Ключевые слова: математическая модель, дизель, клапан, двигатель.

Постановка проблемы. Дизель–электрические агрегаты получили широкое распространение в качестве источников электрической энергии во многих отраслях народного хозяйства. Для повышения энергетических показателей эти установки снабжаются автономным турбокомпрессором, подающим воздух в дизель и улучшающим, тем самым, процесс сгорания и превращения энергии топлива механическую работу. Однако в переходных режимах работы, вызванных набросами нагрузки, турбокомпрессор вследствие своей инерциальности не успевает в полной мере наращивать подачу наддувочного воздуха и рабочий процесс дизеля протекает неудовлетворительно [1]. Для улучшения последнего обеспечиваются специальные мероприятия по дополнительному воздушноснабжению дизеля [2].

Анализ литературы показывает, что в настоящее время уже имеются некоторые технические решения, обеспечивающие дополнительное воздушноснабжение дизель – генераторов с газотурбинным наддувом в переходных режимах работы [3 - 6], с учетом ряда управляющих и возмущающих воздействий. При этом, однако, отсутствует обобщенная структура преобразователя соответствующих параметров в массу дополнительного воздуха и математические модели происходящих при этом процессов.

Цель статьи. Построение математической модели и синтез обобщенной структуры преобразователя параметров управления и режима работы дизель–генератора при массе дополнительно подаваемого воздуха.

Составим математическую модель процессов, описанных в [7 - 9].

На работающем двигателе измеряются скорость движения топливodoзирующего органа V_{HP} и угловая скорость турбокомпрессора ω_κ с помощью датчиков, выходные сигналы которых можно записать как

$$U_{HP} = K_{HP} V_{HP} \quad (1)$$

$$U_{TK} = K_{TK} \omega_\kappa, \quad (2)$$

где K_{HP} – коэффициент передачи датчика скорости топливodoзирующего органа, K_{TK} – коэффициент передачи датчика угловой скорости ТК.

Разностный сигнал этих датчиков интегрируется

$$U = \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^{t_\kappa} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_\kappa) dt > 0, \quad (3)$$

где T_I – постоянная интегратора, и после усиления подается на обмотку электродинамического преобразователя (ЭДП), управляющего запорным клапаном дополнительного воздухообеспечения.

Перемещение якоря ЭДП определяется по формуле

$$X_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{K_{ЭМ} V_\Delta}{D_\Delta}, \quad (4)$$

где $D_\Delta = \left(T_\Delta \frac{di}{dt} + 1 \right) \left(T_1^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + 1 \right);$

T_Δ – электрическая постоянная времени электромагнита;

i – мгновенное значение тока в обмотке электромагнита;

X – перемещение якоря электромагнита;

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{k_{II}}};$$

$$T_2 = \frac{\eta_{ЭМ}}{k_{II}};$$

V_Δ – напряжение на обмотке электромагнита;

k_{II} – жесткость пружины электромагнита;

m – масса подвижных частей электромагнита;

$K_{ЭМ}$ – коэффициент передачи электромагнита;

$\eta_{ЭМ}$ – коэффициент демпфирования электромагнита.

$V(t) = K_{PEC} X(t)$, где K_{PEC} – коэффициент пропорциональности между выходным сечением клапана и перемещением якоря электромагнита.

Подача дополнительного воздуха приводит к увеличению давления наддува

$$P_S = P_{TK} + K_b K_{PEC} X(t), \quad (5)$$

где P_{TK} – давление наддува, создаваемое турбокомпрессором;

K_b – коэффициент пропорциональности между массой и давлением дополнительного воздуха.

При резком увеличении топливоподачи в случае наброса нагрузки сигнал (3) растет, поскольку ω_k изменяется много медленнее цикловой подачи топлива (на реальном двигателе), вызывает увеличение хода клапана, согласно (4), и подачу дополнительного воздуха в дизель, масса которого равна с учетом (3), (4), (5)

$$Q_D(t) = \frac{K_{pec}}{T_{II}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_k} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_k) dt}{D_3}, \quad (6)$$

где $K_{ЭДП}$ – коэффициент передачи электродинамического преобразователя по перемещению.

Подача дополнительного воздуха приводит к росту ω_k , что ранее уже отмечалось, и уменьшению напряжения (3). Увеличение ω_k влечет за собой возрастание P_{TK} , а снижение напряжения на обмотке исполнительного органа (электромагнитного или электродинамического преобразователя) – снижение массы дополнительного воздуха Q_D . Однако

$$P_s = P_{TK} + K_b Q_D \approx const. \quad (7)$$

При выходе дизеля в установившийся режим работы $K_{HP} V_{HP} = K_{TK} \omega_k$ и дополнительное воздухообеспечение согласно (3) отсутствует.

Таким образом, в рассмотренной модели $Q_D = Q_D(P_{TK}, h_p)$, благодаря чему имеет место согласование топливоподачи и воздухообеспечения дизеля в переходных режимах.

При плавном перемещении или неподвижном органе управления топливоподачей неравенство (3) не выполняется и дополнительный воздух не подается. Модель процессов, описанных в [8], отличается от рассмотренной выше в связи с двумя обстоятельствами. Во-первых, в переходном режиме дизеля, вызываемом набросом нагрузки, напряжение на обмотке запорного органа зависит еще и от разности фактического и минимально допустимого давлений в источнике сжатого воздуха, но не зависит от текущего значения угловой скорости ротора турбокомпрессора ω_k , во-вторых, отключение подачи дополнительного воздуха при окончании переходного процесса происходит при достижении частотой ω_k некоторого порогового значения. Таким образом, можно записать

$$U = \frac{1}{T_{II}} \int_{t_0}^{t_k} K_{HP} V_{HP} dt + K_{ДД} (P_{ИН} - P_{ИФ}), \quad (8)$$

где $K_{ДД}$ – коэффициент передачи датчика давления;
 $P_{ИН}$ – минимально допустимое давление в источнике сжатого воздуха;
 $P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.
 С учетом (8) вместо (6) запишем соотношение

$$Q_{Д} = \frac{K_{рес}}{T_{И}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_k} K_{НР} V_{НР} dt - K_{ДД} (P_{ИН} - P_{ИФ})}{D_3} \quad (9)$$

Кроме того, для момента отключения дополнительного воздухообеспечения имеем $Q_{Д} = 0$ при $\omega_k = \omega_{кп}$,

где $\omega_{кп}$ – пороговое значение угловой скорости турбокомпрессора.

Процесс управления двигателем [9] отличается от предыдущего тем, что напряжение на обмотке органа управления дополнительным воздухообеспечением описывается по закону:

$$U = \frac{1}{T_{И}} \int_{t_0}^{t_{НР}} (K_{НР} V_{НР} - K_{ДД} P_{ИФ}) dt, \quad (10)$$

где $t_{НР}$ – время перемещения топливodoзирующего органа.

Обобщенная блок – схема устройства подачи дополнительного воздуха в дизель показана на рис. 1.

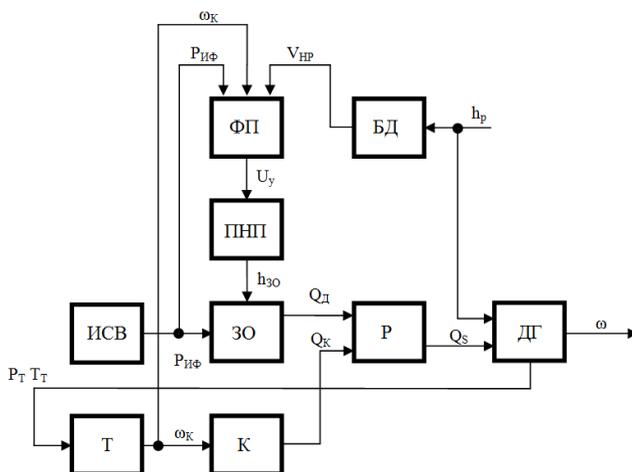


Рис. 1 – Обобщенная блок-схема устройства подачи дополнительного воздуха:

ФП – функциональный преобразователь;

БД – блок дифференцирования;

ПНП – преобразователь «напряжение – перемещение»;

ИСВ – источник сжатого воздуха;
ЗО – запорный орган;
Р – ресивер;
ДГ – дизель – генератор;
Т – турбина;
К – компрессор;
 h_p, V_{HP} – выход рейки топливodoзирующего органа и скорость его движения;
 ω, ω_K – угловая скорость дизель – генератора и компрессора;
 P_T, T_T – давление и температура газов перед турбиной;
 Q_K, Q_S, Q_D – суммарный расход, расход наддувочного и дополнительного воздуха;
 U_y – напряжение управления;
 h_{ZO} – перемещение запорного органа;
 $P_{ф}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.

Выражения (6), (9) и (10) представляют собой математические модели, достаточно полно описывающие процессы преобразования основных параметров, таких, как скорость движения топливodoзирующего органа, угловую скорость турбокомпрессора, фактическое и номинальное давления в источнике сжатого воздуха, коэффициенты передачи и постоянные времени ресивера и электродинамического преобразователя и др. в массу дополнительного подаваемого в дизель сжатого воздуха. Эти модели легли в основу создания обобщенной структуры устройства подачи дополнительного воздуха, показанной на рисунке.

Выводы. На основании разработанных математических моделей синтезирована обобщенная структура преобразователя, обеспечивающего дополнительное воздухообеспечение дизель – генератора при набросе нагрузки и, тем самым, повышающего его технико – экономические показатели.

Список литературы: 1. *Костромин А.М.* Оптимальное управление локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119с. 2. *Кольбин Ю.Н.* Квазиоптимальные электронные регуляторы переходных режимов стационарных дизель-генераторов с дополнительным воздухообеспечением: Автореферат дис. на соискание степени кандидата технических наук/ Харьковский политехнический институт. – Харьков, 1986. – 18с. 3. *Богаевский А.Б.* Повышение топливной эффективности мощной транспортной дизельной установки за счет применения микроконтроллерного регулятора частоты вращения и мощности. / А.Б. Богаевский // Сборник доклады, XI научно – техническая конференция с международно участие, «Транспорт, экология - устойчиво развитие», ЕкоВарна. – 2005. – с. 459 – 463. 4. *Богаевский А.Б.* Определение параметров управления мощной транспортной дизель – генераторной установкой в переходных режимах. / *А.Б. Богаевский* // Вестник НТУ «ХПИ», тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков. – 2005. - №45. – с. 291 – 292. 5. *Богаевский А.Б.* Применение электромагнитных исполнительных двигателей пропорционального типа в системах автоматического регулирования частоты транспортных дизелей / *А. Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский* // В кн. «Проблемы автоматизированного электропривода». Труды н. – тех. конф. Харьков. – 1997. с. 259 – 260. (Автором предложена модель электричного исполнительного органа як элементу системи забезпечення подачі палива). 6. *Богаевський О.Б.* Оптимізація пере-

72 ISSN 2079-083x. Вісник НТУ "ХПИ". 2015. № 29 (1138)

хідних процесів тепловозних дизелів з застосуванням електронних керуючих систем. / Е.Д. Тартаковський, В.О. Матяш, О.Б. Бogaевський, Д.О. Аулін. // 36. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2007. – вип. 86. – с. 177 – 181. (Автором показані переваги електронних систем при забезпеченні перехідних режимів тепловозів).

7. Устройство для регулирования подачи дополнительного воздуха в двигатель внутреннего сгорания: А.с. 1495474. СССР. МКИ F02D41/10,23/02/ Борисенко А.Н., Кольбин Ю.Н. – №4238090/25-06; Заявл.28.04.87; Оpubл.23.07.89. Бюл. № 27. – 3 с.:ил. **8.** Пристрій керування дизелем з наддуванням : Деклараційний патент на корисну модель. № 8373. М. Кл. F02D43/00 41/00. Оpubл. 15.08.2005. Бюл. №8. / Кравец' В.О., Колибін Ю.М., Ріттер А.В.

9. Пристрій для керування дизелем з наддуванням: Патент на корисну модель №35848, Україна, 2008 : Кравец' В.О., Колибін Ю.М., Запововський М.Й., Баленко О.І.

Bibliography (transliterated): **1.** Kostromin A.M. *Optimal'noe upravlenie lokomotivom.* – М.: Transport, 1979. – 119p. **2.** Kolybin Ju.N. *Kvazioptimal'nye jelektronnye reguljatory perehodnyh rezhimov stacionarnykh dizel'-generatorov s dopolnitel'nym vozduhosnabzheniem:* Avtoreferat dis. na soiskanie stepeni kandidata tehniceskikh nauk/ Har'kovskij politehniceskij institut. – Kharkov, 1986. – 18p. **3.** Bogaevskij A.B. *Povyshenie toplivnoj jeffektivnosti moshhnoj transportnoj dizel'noj ustanovki za schet primenenija mikrokontrollernogo reguljatora chastoty vrashhenija i moshhnosti.* / A.B. Bogaevskij // Sbornik dokladi, XI nauchno – tehniceskaja konferencija s mezhdunarodno uchastie, «Transport, ekologija - ustojchivo razvitie», EkoVarna. – 2005. – p. 459 – 463. **4.** Bogaevskij A.B. *Opreделение parametrov upravlenija moshhnoj transportnoj dizel' – generatornoj ustanovkoj v perehodnyh rezhimah.* / A.B. Bogaevskij // Vestnik NTU «KhPI», tem. vyp. «Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda. Teorija i praktika». Kharkov. – 2005. - No45. – p. 291 – 292. **5.** Bogaevskij A.B. *Primenenie jelektromagnitnyh ispolnitel'nykh dvigatelej proporcional'nogo tipa v sistemah avtomaticheskogo regulirovanija chastoty transportnykh dizeleju* / A. B. Bogaevskij, A.V. Basov, S.G. Burjakovskij // V kn. «Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda». Trudy n. – teh. konf. Kharkov. – 1997. p. 259 – 260. **6.** Bogaev'skij O.B. *Optimizacija perehidnih procesiv teplovoznih dizeliv z zastosuvannjam eelektronnih kerujuchih sistem.* / E.D. Tartakov'skij, V.O. Matjash, O.B. Bogaev'skij, D.O. Aulin. // Zb. nauk. prac'. – Kharkiv: UkrDAZT. – 2007. – vol. 86. – p. 177 – 181. **7.** *Ustrojstvo dlja regulirovanija podachi dopolnitel'nogo vozduha v dvigatel' vnutrennego sgoranija:* А.с. 1495474. SSSR. МКИ F02D41/10,23/02/ Борисенко А.Н., Кольбин Ю.Н. – No4238090/25-06; Заявл.28.04.87; Оpubл.23.07.89. Бюл. No 27. – 3 p. **8.** *Prisrij keruvannja dizelem z nadduvannjam :* Декларациjnij патент на корисну модел'. No 8373. М. Кл. F02D43/00 41/00. Оpubл. 15.08.2005. Бюл. No8. / Кравец' В.О., Колибін Ю.М., Ріттер А.В. **9.** *Prisrij dlja keruvannja dizelem z nadduvannjam:* Patent на корисну модел' No35848, Ukraine, 2008 : Kravec' V.O., Kolibin Ju.M., Zapolov'skij M.J., Balenko O.I.

Поступила в редколлегию 12.05.2015