

А.Н. БОРИСЕНКО, докт. техн. наук, проф., НТУ “ХПИ”, Харьков;
В.И. РЕВУЦКИЙ, преподаватель – стажер, НТУ “ХПИ”, Харьков

СИНТЕЗ ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЬ - ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С НАДДУВОМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕМ

Статья посвящена созданию обобщенной структуры и построения математических моделей преобразователей параметров движения устройства дозирования топлива и скорости вращения турбокомпрессора дизель - генераторной установки с нагнетанием в массу дополнительного воздуха, подаваемого в дизель при резком приросте нагрузки.

Стаття присвячена створенню узагальноної структури та побудови математичних моделей перетворювачів параметрів руху пристрою дозування палива і швидкості обертання турбокомпресора дизель - генераторної установки з нагнітанням в масу додаткового повітря, що подається в дизель при різкому прирості навантаження.

The creation of a generalized structure and mathematical models of motion parameters of transducers fuel dosing body and the rotational speed of a turbocharger diesel engine - generator set with a lot of additional pressurized air to the diesel in the load-on has been described in the article.

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 воздухообеспечению дизеля [2].

Анализ литературы показывает, что в настоящее время уже имеются некоторые технические решения, обеспечивающие дополнительное воздухообеспечение дизель – генераторов с газотурбинным наддувом в переходных режимах работы [3 - 6], с учетом ряда управляющих и возмущающих воздействий. При этом, однако, отсутствуют 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_k с помощью датчиков, выходные сигналы которых можно записать как

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

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

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

Разностный сигнал этих датчиков интегрируется

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

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

$$X_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{K_{\text{ЭМ}} V_{\text{Э}}}{D_3}, \quad (4)$$

$$\text{где } D_3 = \left(T_3 \frac{di}{dt} + 1 \right) \left(T_1^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + 1 \right);$$

T_3 – электрическая постоянная времени электромагнита;

i – мгновенное значение тока в обмотке электромагнита;

X – перемещение якоря электромагнита;

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

$$T_2 = \frac{\eta_{\text{ЭМ}}}{k_{II}};$$

V_s – 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)

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

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 воздуходобавление согласно (3) отсутствует.

Таким образом, в рассмотренной модели $Q_D = Q_D(P_{TK}, h_p)$, благодаря чему имеет место согласование топливоподачи и воздуходобавления 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 изменением 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

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

где $K_{ДД}$ – коэффициент передачи датчика давления;

$P_{ИИ}$ – минимально допустимое давление в источнике сжатого воздуха;

$P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.

С учетом (8) вместо (6) запишем соотношение

$$Q_D = \frac{K_{pec}}{T_{II}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_k} K_{HP}V_{HP}dt - K_{ДД} (P_{ИИ} - P_{ИФ})}{D_3} \quad (9)$$

Кроме того, для момента отключения дополнительного воздуходобавления имеем $Q_D = 0$ при $\omega_k = \omega_{kn}$,

где ω_{kn} – пороговое значение угловой скорости турбокомпрессора.

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

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

где t_{HP} – время перемещения топливodosирующего органа.

Соотношение для массы дополнительно подаваемого сжатого воздуха с учетом (10) можно записать в виде

$$Q_{Д} = \frac{K_{pec}}{T_{II}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_{HP}} (K_{HP} V_{HP} - K_{ДД} K_{ИФ}) dt}{D_3}. \quad (11)$$

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

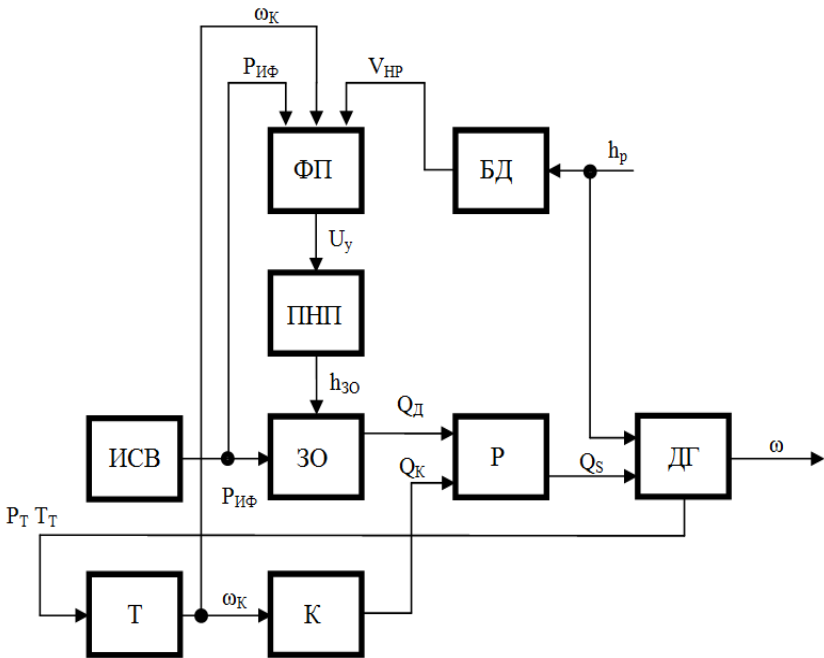


Рис. Обобщенная блок – схема устройства подачи дополнительного объема воздуха

На рисунке обозначены следующие элементы системы подачи дополнительного объема воздуха: ФП – функциональный преобразователь (может представлять собой микроконтроллер и усилитель мощности

выходного сигнала, который подается на исполнительный орган), БД – блок дифференцирования, ПНП – преобразователь «напряжение – перемещение», ИСВ – источник сжатого воздуха, ЗО – запорный орган (представляет собой в простейшем случае клапан с электромагнитным приводом, обеспечивающий два крайних положения (“открыто”/”закрыто”), а в более совершенных системах может использоваться линейный электромагнит, у которого перемещение якоря пропорционально изменению напряжения на обмотке), Р – ресивер, ДГ – дизель – генератор, Т – турбина, К – компрессор, h_p и V_{HP} – выход рейки топливodosирующего органа и скорость ее движения, ω и ω_K – угловая скорость дизель – генератора и компрессора, нагнетающего воздух в цилиндры дизеля, P_T и T_T – давление и температура газов перед турбиной, Q_K , Q_S и Q_D – суммарный расход, расход наддувочного и дополнительного воздуха, U_y – напряжение управления, h_{ZO} – перемещение запорного органа, $P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха. Чтобы входной сигнал микроконтроллера не превышал допустимого диапазона изменения, между первичными датчиками режимов работы двигателей и непосредственно входными каналами микроконтроллера предусмотрены блоки согласования уровней сигналов.

Наиболее эффективно подобная система проявляет себя при увеличении нагрузки, превышающих 25 процентов номинальной мощности агрегата. При меньших приращениях нагрузки штатная система регулирования дизель – генератора обеспечивает его удовлетворительное воздухообеспечение и показатели качества переходного процесса.

Выражения (6), (9) и (11) представляют собой математические модели, достаточно полно описывающие процессы преобразования основных параметров, таких, как скорость движения топливodosирующего 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 выше на рисунке.

Действующий образец рассмотренной системы успешно прошел экспериментальные исследования и был внедрен на ПО “Завод им. Малышева” в составе системы автоматического регулирования дизель – генераторов мощностью около 2000 - 3000 кВт, благодаря чему улучшились показатели качества при эксплуатации. В частности, снизился расход топлива и провал оборотов, сократилась длительность переходного процесса, и уменьшилась дымность отработанных газов энергоустановки при внезапных приращениях нагрузки в среднем на 25 – 35 процентов.

В случае использования дизель – генератора комплексно с рассмотренной системой управления в качестве автономной электростанции

для выработки электроэнергии промышленной частоты наблюдается существенное повышение качества электроснабжения, а именно стабильность частоты и напряжения даже при самых неблагоприятных режимах эксплуатации.

Выводы. На основании разработанных математических моделей синтезирована обобщенная структура преобразователя, обеспечивающего дополнительное воздушное снабжение дизель – генератора при увеличении нагрузки (резком увеличении потребления активной мощности нагрузкой) и, тем самым, повышающего его технико – экономические показатели.

Список литературы: 1. *Костромин А.М.* Оптимальное управление локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119с. 2. *Колыбин Ю.Н.* Квазиоптимальные электронные регуляторы переходных режимов стационарных дизель-генераторов с дополнительным воздушным снабжением: 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 микроконтроллера 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 запропонована модель електричного виконавчого органу як елементу системи забезпечення подачі палива). 6. *Богаевський О.Б.* Оптимізація перехідних процесів тепловозних дизелів з застосуванням електронних керуючих систем. / *Е.Д. Тартаковський, В.О. Матяш, О.Б. Богаєвський, Д.О. Аулін.* // Зб. 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., Колыбин Ю.Н.* –№4238090/25-06; Заявл.28.04.87; Опубл.23.07.89. Бюл. № 27. – 3 с.:ил. 8. Пристрій керування дизелем з наддуванням : Декларацийний патент на корисну модель. № 8373. М. Кл. F02D43/00 41/00. Опубл. 15.08.2005. Бюл. №8. / *Кравець В.О., Колибін Ю.М., Пимтер А.В.* 9. Пристрій для керування дизелем з наддуванням: Патент на корисну модель №35848, Україна, 2008 : *Кравець В.О., Колибін Ю.М., Запольський М.Й., Баленко О.І.*

Надійшла до редакції 14.04.12