

Управление дизель-генераторной установкой большегрузного автопоезда в переходных режимах

к.т.н. доц. Фомин А.П.
Университет машиностроения

Аннотация. В статье рассмотрена задача повышения топливной экономичности и моторесурса дизель-генератора в системе дополнительной энергетики и активизации большегрузного автопоезда, содержащей тяговый электропривод. Предложена программа управления скоростью вращения и нагрузкой в переходных режимах, позволяющая решить поставленную задачу. Программа проверена в стендовых испытаниях.

Ключевые слова: большегрузный автопоезд, система дополнительной энергетики и активизации, тяговый электропривод, дизель-генератор, система автоматического регулирования.

При транспортировке автомобильным транспортом длинномерных тяжеловесных неделимых грузов специального и общехозяйственного назначения, таких как трубы большого диаметра, химические колонны и другие, традиционно используются большегрузные автопоезда в составе мощного тягача КЗКТ или МАЗ с гидромеханической трансмиссией и специального полуприцепа. Чтобы обеспечить надежную доставку грузов в зимних условиях, полуприцеп выполняют активным. Для активизации используют тяговый электропривод с питанием от электрогенератора, устанавливаемого на тягач.

Энерговооруженность автопоездов достигает 750-1000 кВт, что превышает возможности серийно выпускаемых тягачей. Для повышения мощности используют дополнительный источник энергии, устанавливаемый на прицепное звено. Им является автономный блок в составе теплового двигателя, обычно дизельного, и тягового генератора. К генератору подключают тяговые электродвигатели колес прицепного звена, образуя систему дополнительной энергетики и активизации (СДЭА) автопоезда [1].

Работа дизельных двигателей и разнородных трансмиссий автопоезда должна быть определенным образом согласована для получения необходимых тягово-динамических и тягово-сцепных качеств. В основу согласования закладывают принцип равного участия двигателей в выполнении транспортной работы, предполагающий равную относительную загрузку мощностью, что способствует их равномерному износу и повышению долговечности. В режимах трогания автопоезда и движения с малой скоростью переходят на распределение сил тяги звеньев пропорционально их сцепным весам, позволяющее наилучшим образом использовать тягово-сцепные возможности.

Управление мощностью дизель-генератора СДЭА осуществляется путем автоматического регулирования тягового генератора по сигналу задатчика, связанного с педалью акселератора на тягаче [2]. Этот сигнал задает требуемую мощность и максимальный ток генератора. По первому параметру ведется основное регулирование мощности СДЭА, по второму ограничивается сила тяги прицепного звена в соответствии с соотношением сцепных весов. Чтобы не перегрузить дизель, его заранее выводят на стационарный скоростной режим исходя из ожидаемой нагрузки. Этот режим соответствует внешней регуляторной характеристике дизеля в случае, если автопоезд груженный, и определенной частичной регуляторной характеристике, если порожний. В порожнем состоянии потребная мощность энергоустановки меньше, что позволяет снизить скорость вращения и перейти в более благоприятную область работы по расходу топлива, износу и уровню шума.

Данный вариант управления достаточно прост и обеспечивает готовность дизеля к приему быстро изменяющейся нагрузки со стороны генератора. Но приводит к повышенному расходу топлива и длительной работе дизеля на предельных скоростях вращения, что увеличивает износ.

С целью снижения расхода топлива обычно применяют пропорциональное регулирование мощности генератора в функции частоты вращения установки, соответствующее линии

наибольшей экономичности [3]. В рамках поставленной задачи такое регулирование предполагало бы первоначальное задание скорости вращения дизель-генератора, а затем отработку соответствующей мощности. При этом было бы необходимо, чтобы энергоустановки автопоезда были способны разгоняться под нагрузкой в одинаковом темпе. Однако темп разгона оказывается различным.

Движение энергоустановок тягача и СДЭА описывается известным уравнением:

$$M_e - M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где: M_e – эффективный момент двигателя; M – момент сопротивления вращению; J – момент инерции; ω – угловая скорость установки.

При равенстве номинальных мощностей дизелей и принятом варианте распределения мощности соотношение величин M_e и M в уравнении будет примерно одинаково для тягача и СДЭА, и различия в динамике разгона будут в основном определяться величинами момента инерции J

$$J = J_d + \frac{J_n}{u^2},$$

где: J_d – суммарный момент инерции вращающихся частей, связанных с дизелем; J_n – суммарный момент инерции нагрузки; u – передаточное число механической передачи между дизелем и нагрузкой.

На практике энергоустановки существенно отличаются значениями u и J_n . Для тягача величина u близка к единице (0,7 – 0,9). Для СДЭА она много меньше единицы (0,35 и менее), что связано с желанием разработчиков использовать быстроходные генераторы. Момент инерции J_n тягача, в основном определяемый параметрами насосного колеса гидротрансформатора, оказывается меньше аналогичного момента инерции СДЭА. Это объясняется массивностью ротора тягового генератора и наличием дополнительного генератора для питания вспомогательных потребителей. В результате величина J для СДЭА в несколько раз превышает указанную величину для тягача, что сказывается на характере протекания переходных процессов. Двигатель СДЭА существенно «отстает» от двигателя тягача.

В реальных условиях эксплуатации значительную часть времени занимают переходные режимы, вызываемые изменением продольного профиля пути, дорожной обстановки, включением вспомогательных нагрузок и другими причинами. В этих режимах двигатель СДЭА «уходил» бы с линии наибольшей экономичности на продолжительные отрезки времени, расход топлива повышался бы. Чем больше доля таких режимов в общем времени работы, тем больше было бы повышение путевого расхода топлива, достигающее на практике 30-50%. В связи с этим целесообразно предложить другой способ управления, который позволил бы до минимума снизить продолжительность и количество переходных режимов, связанных с изменением скорости вращения дизель-генератора.

В основе такого способа лежит использование нескольких стационарных скоростных режимов, определяемых регуляторными характеристиками дизеля, например, согласно рисунку 1.

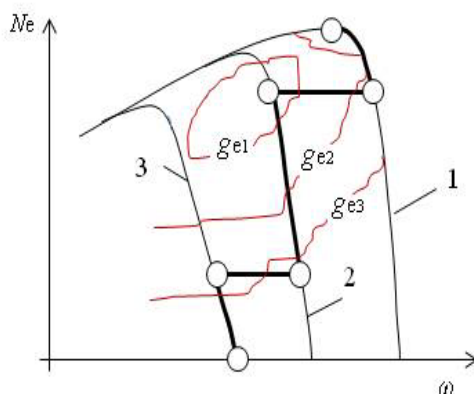


Рисунок 1. Многопараметровые характеристики дизеля: g_e – удельный расход топлива ($g_{e1} < g_{e2} < g_{e3}$); N_e – эффективная мощность; ω – угловая скорость

Одна характеристика (кривая 1) является внешней регуляторной для обеспечения отбора максимальной мощности, другие (кривые 2 и 3) – частичными для работы на малой и средней мощности. Частичные характеристики выбираются так, чтобы они лежали в зоне малых удельных расходов топлива с целью обеспечения экономичности. Зона работы на каждой характеристике определяется нагрузкой (жирная линия на рисунке 1). Средняя характеристика является основной и охватывает большую часть диапазона по мощности. Переход из одной зоны в другую происходит автоматически.

В рамках каждой зоны скоростной режим практически постоянен и поддерживается регулятором скорости дизеля. Благодаря этому дизель-генератор готов к приему нагрузки и за счет своей инерции способен «проглатывать» ее возможные короткие забросы.

Изменение скоростного режима необходимо только при смене зоны работы. Причем снижение угловой скорости может проходить независимо от нагрузки. Увеличение же должно сопровождаться динамической коррекцией для предотвращения перегрузки двигателя и для ускорения его разгона.

Динамическую коррекцию во время переходного процесса можно вести тремя основными способами:

- 1) с частичным или полным снятием нагрузки;
- 2) с увеличением мощности нагрузки пропорционально текущей скорости вращения;
- 3) с задержкой увеличения мощности нагрузки до момента выхода на заданную угловую скорость.

Первый вариант известен и предлагался для использования на тепловозах и относительно легких грузовых автомобилях с тяговым электроприводом [4, 5]. Ему соответствует наиболее быстрый разгон энергоустановки. Но при этом наблюдается кратковременное падение или полное отсутствие силы тяги на колесах. На подъемах при малом запасе скорости это может вызвать остановку транспортного средства.

Для тяжелых автопоездов характерны малые скорости движения на подъемах (7 – 12 км/ч), и снижение силы тяги даже на несколько секунд способно привести к потере скорости и остановке вместо ожидаемого водителем разгона. Поэтому данный вариант нельзя считать приемлемым.

Сравнительная оценка двум другим вариантам дана расчетом на примере автопоезда с полнопоточным теплоэлектрическим приводом. В расчете моделировались два одновременных процесса разгона: разгон дизель-генератора при изменении мощности по одному из вариантов управления и разгон всего автопоезда. Данные расчета: полная масса автопоезда $m = 130$ т; коэффициент приведения вращающихся масс $\gamma = 0,2$; КПД трансмиссии с учетом собственных нужд дизеля $\eta = 0,5$; коэффициент сопротивления качению колес $f = 0,015$; аэродинамический коэффициент $k = 0,52 \text{ Н} \cdot \text{ч}^2 / \text{км}^2$; суммарный момент инерции дизель-генератора $J = 180 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

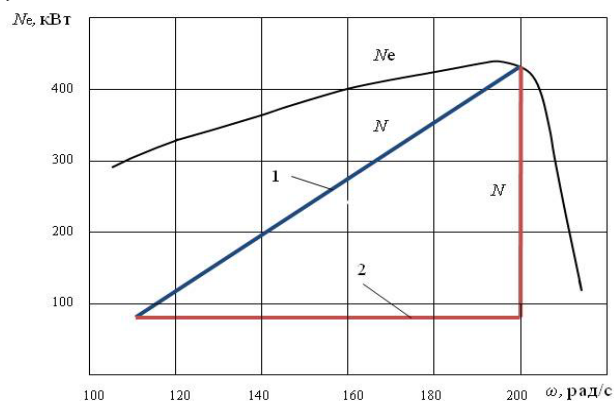


Рисунок 2. Зависимости $N_e(\omega)$ и $N(\omega)$ для двух вариантов управления:
1 – пропорциональная зависимость; 2 – с задержкой роста мощности

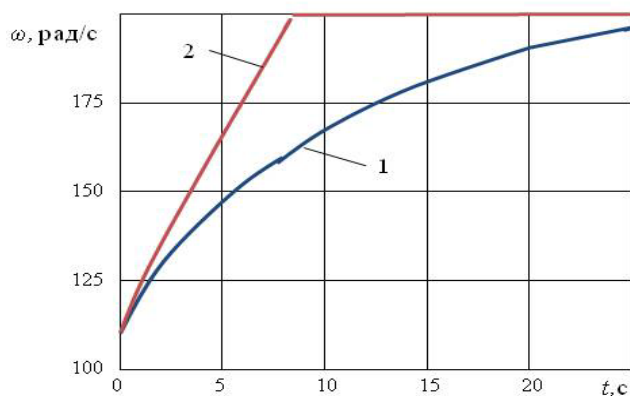


Рисунок 3. Разгон дизель-генератора:
1 – при пропорциональном управлении;
2 – при задержке роста мощности

Внешняя скоростная характеристика дизеля $N_e(\omega)$ приведена на рисунке 2. Здесь же показаны зависимости для мощности нагрузки $N(\omega)$, соответствующие принятым вариантам управления.

Расчет начат при $N=N_0=80$ кВт и угловой скорости $\omega=110$ рад/с, а завершен при $\omega=200$ рад/с, что соответствует режиму максимальной мощности дизеля.

Разгон дизель-генератора рассчитан на основании уравнения (1) путем интегрирования методом конечных приращений. По задаваемому приращению угловой скорости определено приращение времени и остальные параметры. Учитывалось соотношение:

$$M_e - M = 1000 \frac{N_e - N}{\omega}.$$

Значения мощностей N_e и N взяты с графика (рисунок 2) для текущего среднего значения угловой скорости ω . В результате построены временные зависимости $\omega(t)$ и $N(t)$, приведенные на рисунке 3.

Далее проведен расчет разгона автопоезда с использованием уравнения:

$$F - f m g - k V^2 = \frac{(1 + \gamma)}{3,6} m \frac{dV}{dt},$$

где: F – сила тяги, определяемая текущей скоростью движения V :

$$F = 3600 \frac{N \eta}{V}.$$

Решение данного уравнения выполнено аналогично путем интегрирования, исходя из задаваемого приращения времени. Значения мощности N взяты по графику $N(t)$ согласно рисунку 3. Текущая скорость V на каждом шаге интегрирования приравнивалась начальному значению скорости для этого шага. Чтобы уменьшить погрешность расчета, приращения времени задавались не более одной секунды.

Начальное значение скорости V_0 определено без учета аэродинамического сопротивления:

$$V_0 = \frac{N_0 \eta}{f m g}.$$

Результаты расчета приведены на рисунке 4.

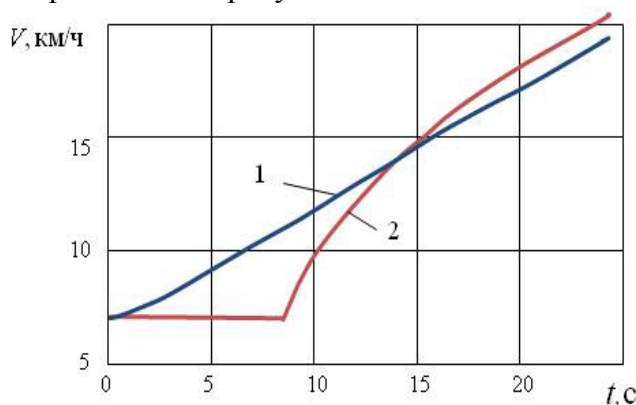


Рисунок 4. Разгон автопоезда: 1 – при пропорциональном управлении; 2 – при задержке роста мощности

Из рисунков видно, что в варианте управления с задержкой нарастания мощности разгон как дизель-генератора, так и автопоезда в целом происходит быстрее. Время изменения угловой скорости сокращается до 8 с. А скорость движения к моменту $t=24$ с больше на 1 км/ч.

Улучшение общей динамики разгона транспортного средства с теплоэлектрическим приводом в результате понижения нагрузки двигателя отмечается и в работе [5].

Из данных расчета также следует, что по окончании задержки происходит скачкообразное увеличение силы тяги, что может приводить к неприятному для водителя рывку. Однако рывок сглаживается большой массой транспортного средства (прирост ускорения по расчету в пределах $0,6$ м/с²) и инерцией цепи возбуждения тягового генератора, присутству-

ющей в реальности. При необходимости для сглаживания можно применить дополнительное ограничение темпа роста нагрузки.

На практике при наличии тягача и при спокойном варианте вождения резкие переходы по уровню мощности обычно не встречаются. Тем более, что прирост ускорения в переходном процессе можно уменьшить, если применить деление диапазона изменения мощности на зоны согласно рисунку 1. Наибольший эффект достигается, когда средняя зона берется достаточно широкой.

Существенное ускорение разгона энергоустановки подтверждается данными испытаний на реостатном стенде. Дизель-генератор с близкими к расчету параметрами работал на мощный реостат, предназначенный для имитации тяговых электродвигателей. На рисунке 5 приведены осциллограммы изменения угловой скорости $\omega(t)$ для трех вариантов управления мощностью.

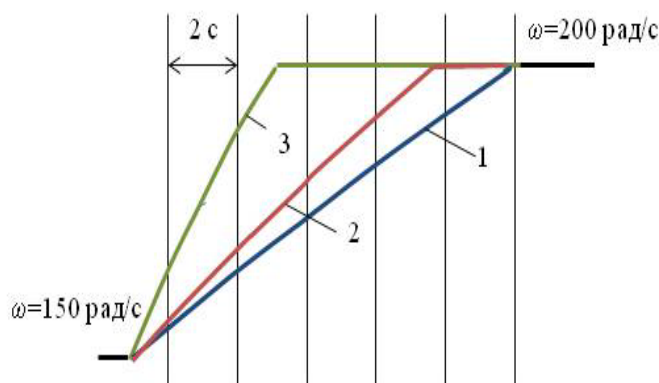


Рисунок 5. Осциллограммы разгона дизель-генератора на стенде:

1 – при пропорциональном управлении; 2 – при задержке роста мощности; при полном снятии мощности нагрузки

Здесь угловая скорость изменяется в реальном рабочем диапазоне: от 150 до 200 рад/с. Мощность N - в пределах от 300 до 345 кВт, в соответствии с возможностями стенда. Из осциллограмм видно, что нагрузка сильно влияет на время переходного процесса. И даже относительно небольшой ее пропорциональный рост (45 кВт) затягивает процесс на 2,5 с. Следует полагать, что затягивание было бы в несколько раз больше, если конечная мощность нагрузки была бы задана на уровне максимума.

Для сравнения отметим, что в экспериментах время разгона двигателя тягача под нагрузкой с минимальной угловой скорости до максимальной при полном нажатии педали акселератора не превышало 2,0 с.

На основании данных расчета и эксперимента отдано предпочтение третьему варианту динамической коррекции нагрузки.

В целом же предлагаемый способ управления обеспечивает следующие преимущества:

- 1) повышает экономичность дизель-генератора за счет работы в области малых удельных расходов топлива и сокращения продолжительности переходных режимов, связанных с увеличением угловой скорости;
- 2) увеличивает ресурс установки в связи с уменьшением времени работы на внешней регуляторной характеристике;
- 3) уменьшает производимый дизель-генератором шум на частичной мощности, что особенно заметно при маневрировании на площадках ограниченных размеров.

Реализация этих преимуществ мало влияет на готовность дизель-генератора принимать задаваемую нагрузку, то есть практически не ухудшает его динамические качества.

Определенным ограничением применимости данного способа управления является требование поддерживать заданное напряжение вспомогательного генератора на малой скорости вращения. Это обычно приводит к увеличению номинальной мощности генератора, его массы и размеров.

Рассматриваемый способ управления может использоваться не только в автопоездах с

СДЭА, но и на пневмоколесных транспортных средствах с полнопоточным теплоэлектрическим приводом, имеющим большой момент инерции двигатель-генератора.

Литература

1. Гладов Г.И., Петренко А.М. Специальные транспортные средства: Проектирование и конструкции. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 320 с.
2. Фомин А.П. Управление мощностью в системе дополнительной энергетики большегрузного автопоезда // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. №6. – С. 49-53.
3. Погарский Н.А., Степанов А.Д. Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин повышенной единичной мощности. – М.: Машиностроение, 1976, – 224 с.
4. Устройство для возбуждения главного генератора тепловоза. Авт.: Гундоров М.П., Балусев В.Л., Мягих О.В., Сидячев Н.В. – Авторское свидетельство СССР № 751674.
5. Устройство для управления теплоэлектрическим приводом самоходных машин. Авт.: Подъяков А.А., Степанов А.Д., Артемов И.М., Новиков Г.В., Киселев Д.В. и др. – Авторское свидетельство СССР № 653149.

Магнитоэлектрические машины на современных автотранспортных средствах

д.т.н. проф. Лохнин В.В., Колесник Н.А., д.т.н. проф. Марсов В.И.

Университет машиностроения,

Московский автодорожный государственный технический университет (МАДИ)

8(495)223-05-23, ekems@mami.ru, iouitt@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена возможность выполнения бесконтактного генератора постоянного тока на постоянных магнитах с транзисторным регулятором напряжения, работающим в режиме высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Ключевые слова: автотранспортные средства, генератор на постоянных магнитах, транзисторный регулятор напряжения, высокочастотная ШИМ.

На автотранспортных средствах (АТС) перспективны магнитоэлектрические генераторы (МЭГ) постоянного тока с импульсным транзисторным регулятором и высокочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1].

Одна из структур такого МЭГ приведена на рисунке 1.

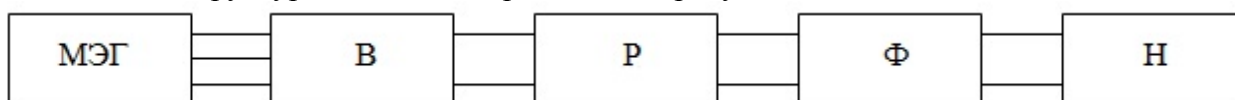


Рисунок 1. Структурная схема МЭГ постоянного тока с импульсным транзисторным регулятором напряжения: МЭГ – бесконтактный генератор переменного тока на постоянных магнитах; В – полупроводниковый выпрямитель; Р – транзисторный импульсный регулятор; Ф – L-С-фильтр; Н – нагрузка.

На выходе импульсного регулятора (Р) получаем последовательность однополярных импульсов (рисунок 2) на частоте в десятки кГц.

Диапазон частоты вращения привода генератора на АТС достигает шестикратных значений, при этом уровни напряжения и пульсаций его на нагрузке ограничиваются техническим заданием.

Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке определяется емкостью конденсатора L-С-фильтра и рассчитывается по формуле:

$$K_U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{U_H}{U_d} \right)^2 - 1}, \quad (1)$$

где: U_H – действующее значений выпрямленного напряжения;