

# Способ применения сверхпроводящего накопителя энергии (СПИН) для повышения экономичности грузовых газотурбовозов

А.И. ХОЖАИНОВ, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, В.В. НИКИТИН, д-р техн. наук, Г.Е. СЕРЕДА, канд. техн. наук

**Подключение СПИН к тяговому генератору совместно со вспомогательным оборудованием (ВЭО) в режиме долевых тяговых нагрузок увеличит коэффициент использования мощности. В режиме холостого хода газотурбинного двигателя ВЭО получит от СПИН питание. Все это значительно повысит экономичность газотурбинного двигателя автономного локомотива.**

ной энергии сколь угодно долгое время, высокие быстродействие и маневренность при практически неограниченном количестве циклов (заряд-разряд).

Рассматриваются и предложения по использованию СПИН в качестве накопителей энергии на высокоскоростных пассажирских локомотивах [3].

## Режимы работы СПИН в электроэнергетической системе грузового газотурбовоза

В рассматриваемой системе СПИН совместно с ВЭО должен обеспечивать повышение стабилизации к.п.д. ГТД в широком диапазоне мощностей в режиме долевых тяговых нагрузок.

Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта России связано с повышением пропускной и провозной способностей железных дорог, что требует увеличения мощности локомотивов и скорости движения пассажирских и грузовых поездов.

В перспективе мощность автономных грузовых локомотивов должна достичь 6–8 МВт; скорость движения грузовых поездов предполагается увеличить до 100–110 км/ч [1]. Это позволит также решить проблему согласования тяговых характеристик автономного и электрического подвижного состава по мощности и скорости [2].

Использование дизеля в качестве главного двигателя для таких локомотивов неприемлемо из-за неудовлетворительных массогабаритных показателей. В этих условиях заслуживает большого внимания применение газотурбинных двигателей.

По сравнению с дизелем ГТД имеет следующие основные преимущества:

- существенно лучшие массогабаритные показатели;
- высокая ремонтпригодность;
- использование дешевого топлива и меньший расход смазки;
- меньшее количество вредных выбросов в окружающую среду.

Большой пусковой момент и, следовательно, максимальная сила тяги в начале движения — важное преимущество ГТД в составе тяговых энергетических установок грузовых газотурбовозов.

Вместе с тем, ГТД присущи недостатки, обусловленные существенной зави-

симостью его экономичности от мощности и частоты вращения, а также большой расход топлива в режиме холостого хода.

Одним из путей повышения экономичности ГТД в режиме долевых тяговых нагрузок является использование накопителей энергии, среди которых, по нашему мнению, заслуживает внимания СПИН, к достоинствам которого относятся: возможность хранения запасен-

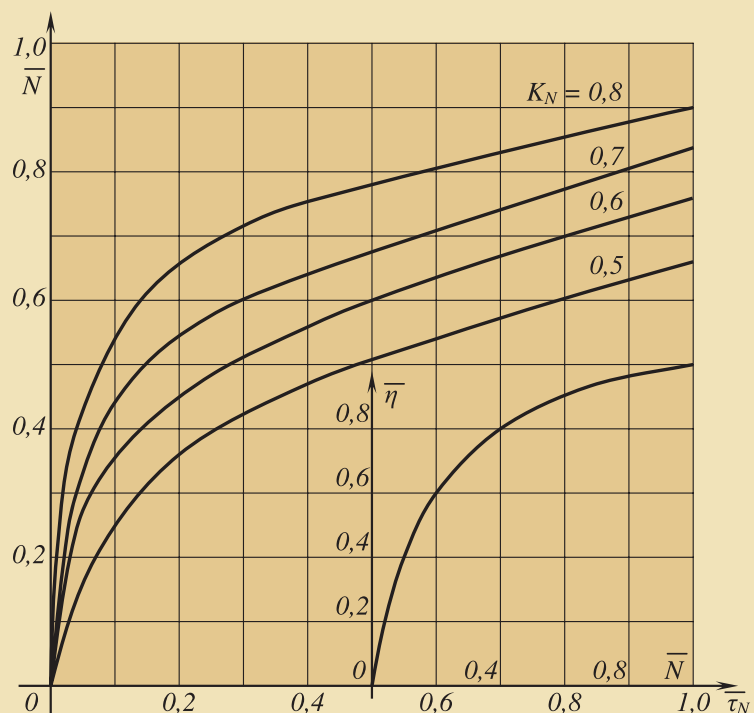


Рис. 1

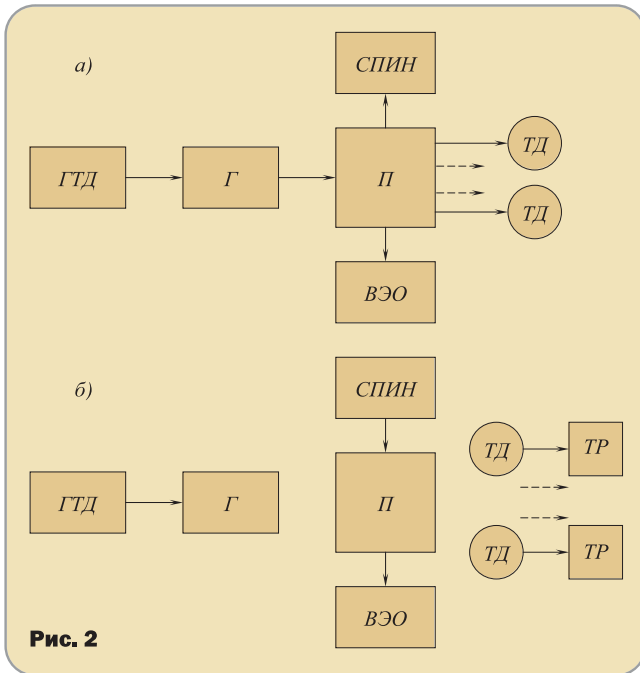


Рис. 2

Универсальные гистограммы распределения реализуемых в эксплуатации мощностей грузовых локомотивов по времени получены на основе предпосылки об однозначной связи частотного спектра мощностей и коэффициента использования мощности в режиме долевых тяговых нагрузок  $K_N$ . [4]. Обработка упомянутых выше гистограмм позволила построить график, приведенный на рис. 1, иллюстрирующий распределение относительной мощности  $\bar{N}$  по времени  $\bar{\tau}_N$  при различных значениях  $K_N = const$ ; где

$\bar{N} = \frac{N}{N_0}$  — мощность ГТД, отнесенная к номинальному значению;

$K_N = \frac{N_{cp,N}}{N_0}$ , где  $N_{cp,N}$  — средняя мощность в режиме долевых тяговых нагрузок;

$$N_{cp,N} = \frac{1}{\tau_N} \int_0^{\tau_N} N_{i,N} dt;$$

$\tau_N = \frac{\tau}{\tau_N}$ , где  $\tau_N$  — время режима долевых тяговых нагрузок.

Из приведенного графика следует, что в широком диапазоне  $K_N = const$  относительная мощность ГТД всегда меньше номинальной ( $\bar{N} < 1$ ), причем с увеличением величины  $K_N$  в его рабочем диапазоне возрастает степень стабилизации мощности, что приводит к увеличению коэффициента полезного действия ГТД ( $\bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0}$ ). Увеличения коэффициента  $K_N$  можно достигнуть путем подключения дополнительной нагрузки к тяговому генератору (Г) через преобразователь (П) в виде СПИН (режим заряда) и ВЭО.

В режиме холостого хода преобразователь отключается от тягового генератора и тяговых электродвигателей (ТД), а ВЭО получает через преобразователь питание от СПИН (режим разряда). ГТД

приведены на рис. 2.

Построение графика, приведенного на рис. 1, производилось путем осреднения величины  $N$  в диапазоне ее изменения на 0,1. В реальных условиях эксплуатации в зависимости от профиля пути значение мощности может претерпевать значительные изменения, на что должен реагировать СПИН, в том числе отключаясь в необходимых случаях от преобразователя.

Распределение энергии, поступающей от преобразователя к СПИН и ВЭО (рис. 2а), можно представить следующим образом:

Энергия, запасаемая в магнитном поле СПИН за время  $\tau_N$

$$W_c = q \cdot N_B \cdot \tau_N \quad (1)$$

Энергия, поступающая к ВЭО за то же время

$$W_B = N_B \cdot \tau_N \quad (2)$$

где  $N_B$  — мощность вспомогательно-го электрооборудования.

В режиме холостого хода (рис. 2б) энергия, запасенная СПИН, должна быть передана ВЭО за время  $\tau_{xx}$  (холостой ход ГТД)

$$q \cdot N_B \cdot \tau_N = N_B \cdot \tau_{xx} \quad (3)$$

Из (3) следует:  $q = \frac{\tau_{xx}}{\tau_N}$

Дополнительная мощность в режиме долевых тяговых нагрузок согласно (1) и (2) будет равна

$$N_d = q \cdot N_B + N_B = (1+q)N_B \quad (4)$$

и коэффициент использования мощности определится выражением

$$\bar{K}_{N,d} = K_N + \frac{(1+q)N_B}{N_0} \quad (5)$$

всегда  $\bar{K}_{N,d} > K_N$ .

Энергоемкость СПИН должна опре-

Таблица 1

№ п/п	Тип двигателя	$\eta_0$	$Q_{xx}$	$\nu$
1.	Одновальный ГТД-3,5	0,185	0,35	1,0
2.	Двухвальный LM-300	0,21	0,16	1,0
3.	Трехвальный ДО-12	0,28	0,15	1,25
4.	Трехвальный «Снекма»	0,31	0,20	1,0
5.	Трехвальный «Форд»	0,34	0,10	0,76

работает с параметрами, обеспечивающими минимальный расход топлива, ТД при торможении перед остановкой работают в генераторном режиме на тормозные резисторы (ТР).

Принципиальные структурные схемы, поясняющие режимы работы системы,

деляться по режиму холостого хода:

$$W_{СП} = N_B \cdot \tau_{xx} = m \cdot N_0 \cdot \tau_{xx} \quad (6)$$

где  $m$  — доля мощности ВЭО от  $N_0$ .

### Оценка эффективности применения СПИН

Эксплуатационный к.п.д. газотурбовоза определяется по формуле:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_0 \eta_{пер} \bar{\eta}_N \bar{\eta}_X \bar{\eta}_T, \quad (7)$$

где  $\eta_0$  и  $\eta_{пер}$  — расчетные к.п.д. ГТД и передачи;

$\bar{\eta}_N$  — коэффициент, учитывающий работу двигателя на долевых нагрузках и холостом ходу;

$\bar{\eta}_X$  — коэффициент, учитывающий негиперболический тяговой характеристики устойчивости; современная аппаратура обеспечивает  $\eta_X = 1$ ;

$\bar{\eta}_T$  — коэффициент, учитывающий изменение к.п.д. при отклонении температуры окружающего воздуха от расчетного значения.

При использовании СПИН и ВЭО в качестве дополнительной нагрузки

$$\eta_{\Sigma d} = \eta_0 \eta_{пер} \bar{\eta}_{N,d} \bar{\eta}_X \bar{\eta}_T \quad (8)$$

Для конкретного локомотива выражения для к.п.д. (7) и (8) отличаются только величиной третьего множителя, поэтому повышение эксплуатационного к.п.д. определится простым отношением:

$$\frac{\eta_{\Sigma d}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{\bar{\eta}_{N,d}}{\bar{\eta}_N}$$

и расчет величины повышения эксплуатационного к.п.д. в процентах может быть определен по формуле

$$\Delta \eta_{\Sigma} = \left( \frac{\bar{\eta}_{N,d}}{\bar{\eta}_N} - 1 \right) 100\% \quad (9)$$

Формулы для  $\bar{\eta}_N$  и таблица с данными для ряда транспортных ГТД [4]:

$$\bar{\eta}_N = \frac{\xi_{N,d} \cdot K_N}{Q_{xx}(1-\xi \cdot K_N) + \xi \cdot K_M [1 - (1-Q_{xx})(1-K_N)]} \quad (10)$$

где при  $K_N = 0,5-1,0 \rightarrow \xi = 1,25 \cdot e^{-0,4 \cdot K_N}$ ;

$\bar{Q}_{xx}$  — относительная величина расхода топлива в режиме холостого хода,

$$\bar{Q}_{xx} = \frac{Q_{xx}}{Q_0}$$

$Q_0$  — расчетное значение расхода топлива.

Из данных таблицы видны преимущества двух- и трехвальных ГТД.

Выражение (10) можно существенно упростить, положив  $\nu = 1,0$

$$\bar{\eta}_N = \frac{\xi_{N,d} \cdot K_N^2}{Q_{xx} + \xi \cdot K_{N,d}^2 (1 - \bar{Q}_{xx})} \quad (11)$$

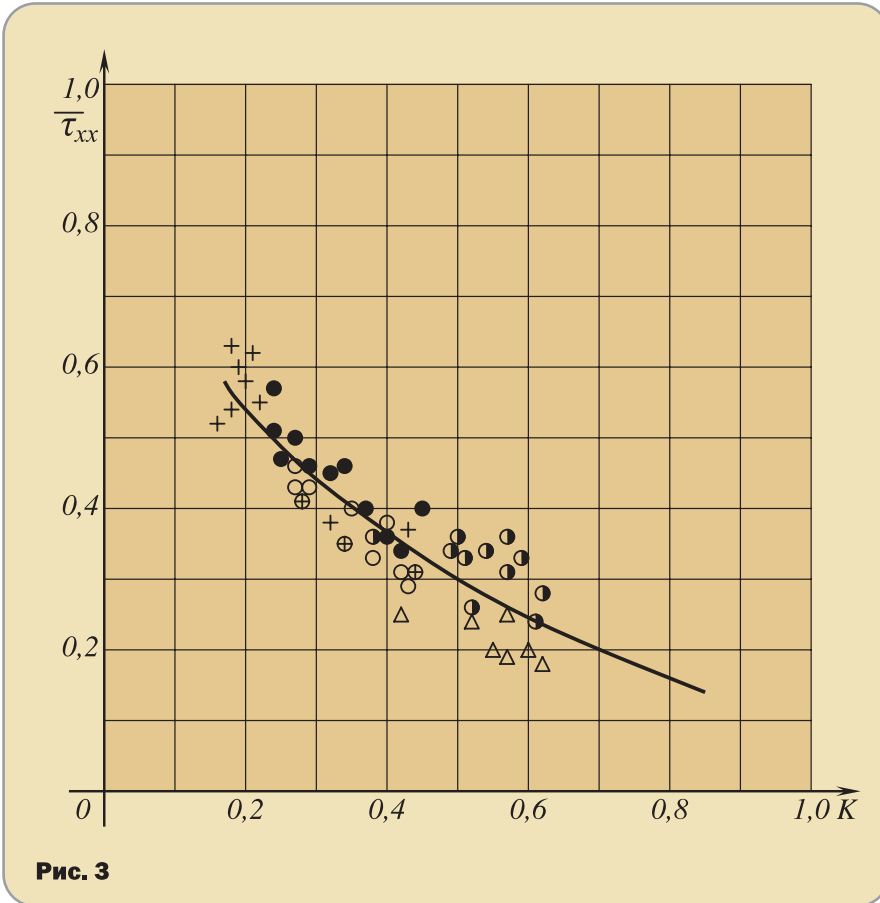


Рис. 3

С учетом дополнительной нагрузки, выражение (11) по форме остается прежним

$$\eta_{NI} = \frac{\xi_N \cdot K_{NI}^2}{\bar{Q}_{xx} + \xi \cdot K_{NI}^2 (1 - \bar{Q}_{xx})} \quad (12)$$

Для получения количественных результатов необходимо воспользоваться опытными данными для грузовых локомотивов, приведенных на рис. 3, где по оси абсцисс отложен полный коэффициент мощности \$K\$, а по оси ординат — относительное время холостого хода:

$$K = \frac{1}{N_0} \int_0^{\tau_{II}} N d\tau$$

где \$\tau\_{II}\$ — полное время пробега локомотива, \$\bar{\tau}\_{xx} = \frac{\tau\_{xx}}{\tau\_{II}}\$.

Между коэффициентами \$K\$ и \$K\_N\$ установлена эмпирическая связь \$K = K\_N (1 - \bar{\tau}\_{xx})\$. По приведенным формулам были выполнены расчеты \$\Delta \eta\_{\Delta}\$ (%), приведенные на рис. 4 и 5.

Из представленных данных следует, что величина \$\Delta \eta\_{\Delta}\$ существенно зависит

от \$\bar{N}\_6\$, \$\bar{Q}\_{xx}\$ и \$\bar{\tau}\_{xx}\$ и может составлять от 2 до 10%. Для среднего значения \$\bar{\tau}\_{xx} = 0,35\$ и \$m=0,05\$ в зависимости от \$\bar{Q}\_{xx}\$ величина \$\Delta \eta\_{\Delta}\$ находится в пределах \$(4 \div 9)\%\$.

Важное значение при реализации рассматриваемого способа имеет энергоемкость СПИН (6), которую удобно представлять следующей формулой

$$W_{СП} = m \cdot N_0 \cdot \bar{\tau}_{xx} \cdot \tau_{II} \quad (13)$$

По (13) для средней относительной величины \$\bar{\tau}\_{xx} = 0,35\$ при \$m=0,05\$ \$N\_0 = 6\$ МВт и \$\tau\_{II} = 2,3\$ часа;

$$W_{СП} \approx 0,87 \text{ ГДж}$$

С учетом удельных параметров обмотки для СПИН, например, тороидального типа — 17 т/ГДж, 115 м<sup>3</sup>/ГДж, ее масса и объем занимаемого пространства составят 14,8 т, 100 м<sup>3</sup>, что позволит разместить СПИН в одной секции локомотива.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Першин С.П., Шетитько Т.В.* Рационализация скоростного движения поездов//Железнодорожный транспорт. — 1998. — №5. — С. 15-20.

2. *Using a superconducting magnetic energy storage coil to improve efficiency of a gas turbine powered high speed rail locomotive: докл. [Applied Superconductivity Conference, Virginia Beach, Va. Sept. 17-22, 2000]. Johnson Brian K., Law Joseph D., Saw Gerald P. (University of Idaho, Moscow, США). IEEE Trans. Appl. Supercond. — 2001. — 11, № 1, ч. 2. — С. 1900-1903.*

3. *Коссов Е.Е., Перец В.В.* Перспективы применения газотурбинных двигателей на тяговом подвижном составе//Вестник ВНИИЖТ. — 2000. — № 5. — С. 16-19.

4. *Бартош Е.Т.* Газотурбовозы и турбопоезда. М.: Транспорт, 1978.

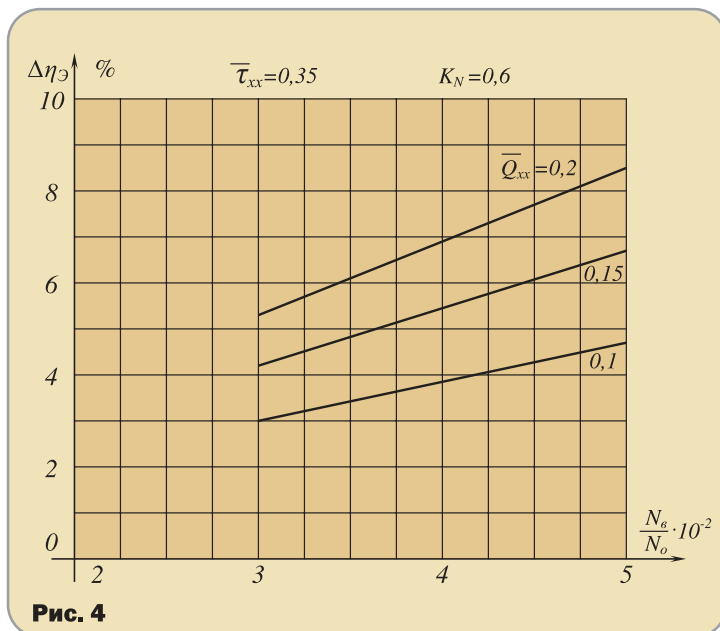


Рис. 4

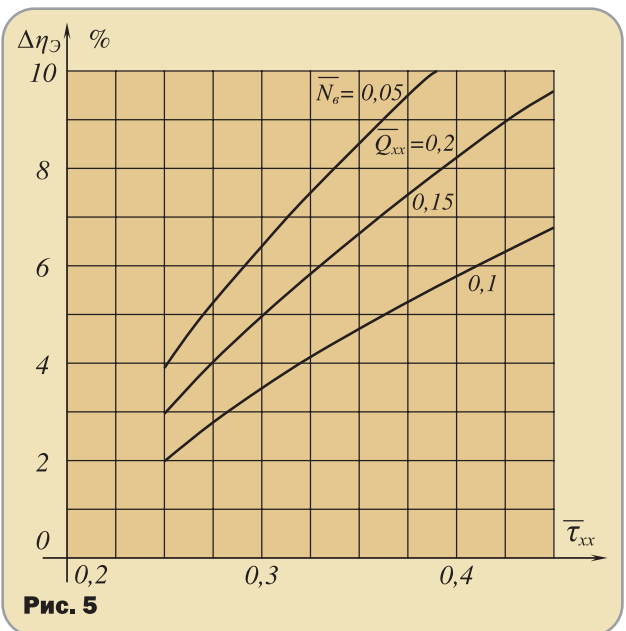


Рис. 5