

## Л и т е р а т у р а

1. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. Минск, 1972.
2. Чистов В.П., Бондаренко В.И., Святославский В.А. Оптимальное управление электрическим приводом. М., 1968.
3. Ильин О.П., Галкин А.Л. О выборе оптимального передаточного числа редуктора приводов позиционных механизмов. — "Электричество", 1973, № 4.
4. Понтрягин Л.С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., 1961.

Л.С. Писарик

### ОПТИМИЗАЦИЯ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОНОМНОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА В СЛУЧАЕ ЕЕ ЛИНЕЙНОСТИ

Системы регулирования тяговых генераторов автономных транспортных установок стремятся выполнять таким образом, чтобы во всех режимах движения установки обеспечивалось постоянство мощности, потребляемой генератором от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), величина которой задана положением управляющего органа. Выполнение этого условия обеспечивает работу ДВС с неизменной заданной угловой скоростью и подачей топлива.

Внешняя характеристика генератора  $U = f(I)$ , обуславливающая постоянство его первичной мощности  $P_{1T}$ , должна выражаться уравнением

$$U = \frac{P_{1T} \eta_g}{I}, \quad (1)$$

которое описывает кривую, близкую к гиперболе. Практическое получение идеальной внешней характеристики, имеющей форму кривой (1), требует усложнения системы регулирования генератора, поэтому в ряде случаев предпочитают иметь характеристику, которая отклоняется от идеальной, чтобы выиграть в простоте и надежности системы регулирования.

Один из вариантов системы регулирования тягового генератора, применяемый в электропередачах тепловозов и большегрузных автомобилей, реализует в случае постоянства угло-

вой скорости генератора прямолинейную зависимость  $U = f(I)$  в пределах максимально-допустимых величин напряжения  $U_{\text{макс}}$  и тока  $I_{\text{макс}}$  генератора (рис. 1). Отклонение внешней характеристики генератора от идеальной приводит к тому, что режим работы ДВС отклоняется от оптимального и технико-экономические показатели ДВС (в частности, использование по мощности) ухудшаются.

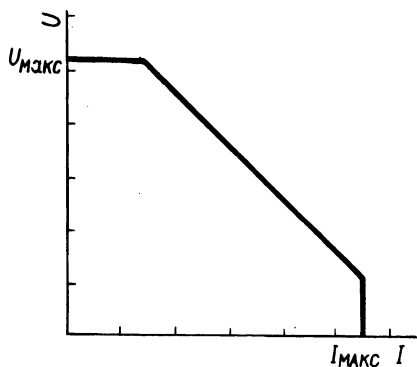


Рис. 1. Линейная внешняя характеристика генератора при постоянстве угловой скорости.

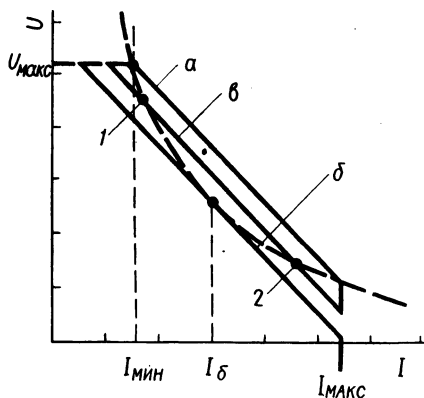


Рис. 2. Идеальная (гиперболическая) внешняя характеристика постоянства мощности и возможные положения а, б, в линейной внешней характеристики генератора.

Рассмотрим, как связано использование ДВС по мощности с расположением прямолинейной внешней характеристики генератора относительно идеальной кривой постоянства мощности на примере дизельгенераторной установки, имеющей только тяговую нагрузку, при наличии у дизеля предельного регулятора.

На рис. 2 показана идеальная характеристика, обеспечивающая постоянство первичной мощности генератора, равной номинальной мощности дизеля, и три положения а, б и в прямолинейной внешней характеристики. Характеристика а проходит через точки идеальной характеристики, соответствующие  $U_{\text{макс}}$  и  $I_{\text{макс}}$ , а, б и в параллельны ей. Положения а, б и в соответствуют различным настройкам системы регулирования гене-

ратора при скорости генератора, равной номинальной скорости дизеля.

Мощность генератора, имеющего при номинальной угловой скорости внешнюю характеристику  $a$ , в диапазоне токов  $I_{\min} < I < I_{\max}$  больше мощности, развиваемой при этой скорости дизелем, т.е. генератор "стремится" перегрузить дизель. В результате скорость дизеля снижается и мощность, отдаваемая генератору, оказывается меньше номинальной.

Только на границах диапазона мощность дизеля равна номинальной и скорость дизель-генератора номинальная. При токе  $I < I_{\min}$  номинальная скорость дизеля поддерживается регулятором, уменьшающим подачу топлива. Таким образом, в положении  $a$  внешней характеристики мощность дизеля используется полностью только в двух точках — при токах  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$ , где она реализуется при максимальной скорости движения или при максимальной тяге соответственно.

В положении  $b$  характеристики генератора дизель недогружен при всех токах нагрузки, исключая значение  $I_6$ , при котором его нагрузка равна номинальной. В остальных точках характеристики генератора подача топлива в дизель снижена регулятором.

На характеристике  $b$  мощность дизеля используется полностью только в точках 1 и 2. Между этими точками характеристики скорость дизеля и его мощность снижаются, но в меньшей степени, чем при характеристике  $a$ . Вне участка 1—2 мощность дизеля также меньше номинальной, поскольку здесь подача топлива уменьшена регулятором.

Следует отметить, что характер недоиспользования мощности дизеля в точках характеристик генератора, лежащих выше идеальной характеристики, и в точках, лежащих ниже этой кривой, принципиально различен. В области перегрузок недоиспользование дизеля по мощности обусловлено просадкой его скорости при постоянной, или практически постоянной, подаче топлива, или иными словами снижением к.п.д. дизеля. Недоиспользование мощности дизеля в области недогрузок происходит вследствие сниженной относительно номинальной подачи топлива, хотя к.п.д. дизеля при этом также может изменяться.

Очевидно, что для определенного цикла тяговой нагрузки дизель-генератора максимальное использование дизеля по мощности будет иметь место только при каком-то одном по-

ложении характеристики генератора в области, ограниченной положением а и б . Найдем это положение, оптимизировав тем самым линейную внешнюю характеристику генератора по максимуму использования мощности дизеля в оговоренных условиях.

Статические характеристики дизель-генераторной установки получим совместным решением уравнений: внешней характеристики генератора, скоростной характеристики дизеля, уравнения связи мощностей генератора и дизеля. Запишем прямолинейную внешнюю характеристику генератора следующим образом:

$$U = k_1 I + b_1 - \Delta b_1 (\omega_H - \omega)^\gamma, \quad (2)$$

где  $k_1$  — угловой коэффициент прямой, на которой лежит характеристика;  $b_1$  — отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат;  $\Delta b_1$  — абсолютное изменение величины отрезка  $b_1$  при изменении угловой скорости генератора на единицу;  $\omega, \omega_H$  — угловая скорость дизель-генератора и ее номинальное значение;  $\gamma$  — безразмерный показатель, зависящий от структуры системы возбуждения генератора; если изменение  $\omega$  при разомкнутой системе регулирования генератора не влияет на величину его тока возбуждения, то  $\gamma=1$ .

Скоростная характеристика дизеля, обычно задаваемая графически, может быть аппроксимирована с достаточной точностью полиномом второй степени

$$M = a_2 \omega^2 + k_2 \omega + b_2. \quad (3)$$

Уравнение связи мощностей и генератора

$$U I = M \omega \eta_r, \quad (4)$$

где  $M$  — крутящий момент на выходном валу дизеля;  $\eta_r$  — к.п.д. генератора.

Из (2), (3) и (4) получим

$$(a_2 \omega^3 + k_2 \omega^2 + b_2 \omega) \eta_r = k_1 I^2 + b_1 I - \Delta b_1 I (\omega_H - \omega)^\gamma. \quad (5)$$

Решение этого уравнения относительно  $\omega$  при заданной величине тока нагрузки генератора  $I_i$  определяет угловую скорость дизель-генераторной установки  $\omega_i$  при максималь-

ной подаче топлива в дизель (рейка топливного насоса в упоре).

Таким образом, уравнение (5) справедливо для токов генератора, лежащих в области перегрузки дизеля (между абсциссами точек пересечения линейной внешней характеристики генератора и идеальной характеристики). Подстановка  $I_i$  и  $\omega_i$  в (2) дает величину напряжения генератора  $U_i$  в данном режиме работы дизель-генератора

$$U_i = k_1 I_i + b_1 - \Delta b_1 (\omega_n - \omega_i)^{\delta}. \quad (6)$$

Значение мощности, развиваемой дизелем в  $i$ -ом режиме работы,

$$P_{ди} = U_i I_i \frac{1}{\eta_{Гi}}. \quad (7)$$

Потеря мощности дизеля в этом режиме

$$\begin{aligned} \Delta P_{ди} &= P_{дн} - P_{ди} = U I_i \frac{1}{\eta_{Г}} - U_i I_i \frac{1}{\eta_{Гi}} = \\ &= I_i \left( U \frac{1}{\eta_{Г}} - U_i \frac{1}{\eta_{Гi}} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $U$  и  $\eta_{Г}$  — напряжение и к.п.д. генератора на идеальной характеристике при  $I = I_i$ .

Оценим недоиспользование дизеля по мощности при работе дизель-генераторной установки по циклу, состоящему из  $n$  нагрузочных режимов генератора, характеризующихся током  $I_k$  и продолжительностью  $\Delta t_k$  каждый. Работа, совершаемая дизелем за  $n$  цикл, определится суммой

$$A_{ц} = \sum_1^n U_k I_k \frac{1}{\eta_{Гк}} \Delta t_k. \quad (9)$$

Недоиспользование дизеля по мощности (недовыполнение работы за цикл)

$$\Delta A_{ц} = P_{дн} \sum_1^n \Delta t_k - \sum_1^n U_k I_k \frac{1}{\eta_{Гк}} \Delta t_k. \quad (10)$$

В этом выражении значение  $U_k$  для режимов перегрузки дизеля определяется по (6), а для режимов недогрузки — как соответствующая ордината внешней характеристики генератора.

Оптимальное по использованию дизеля по мощности положение характеристики генератора означает достижение минимума выражением (10). В изложенной методике параметром, влияющим на величину  $\Delta A_{\text{ц}}$ , является параметр  $b_1$  в уравнении (2). Таким образом, задача указанной оптимизации состоит в нахождении такого  $b_{1\text{опт}}$ , при котором  $\Delta A_{\text{ц}}$  имеет минимум. Решение этой задачи производится в следующей последовательности. 1. Рассчитывают и строят кривую (1) и проводят характеристики а и б генератора. 2. Находят коэффициенты уравнения (2) для характеристик а и б. 3. Находят коэффициенты полинома, аппроксимирующего скоростную характеристику дизеля. 4. Определяют токовую нагрузочную диаграмму тягового генератора за цикл работы на предельной характеристике. 5. Устанавливают значения коэффициента  $b_1$  (т.е. положения характеристики в), для которых будет рассматриваться выражение (10). 6. При каждом значении  $b_1$  решают уравнение (5) относительно  $\omega$  для значений токов нагрузочной диаграммы, соответствующих перегрузке дизеля при данном  $b_1$ . 7. Вычисляют выражение (6), находя величины напряжения генератора в рассматриваемых режимах. 8. Для каждого значения  $b_1$  вычисляют (10), находя  $\Delta A_{\text{ц}}$ . 9. Строят кривую  $\Delta A_{\text{ц}} = f(b_1)$  и находят по ней оптимальное значение коэффициента  $b_{1\text{опт}}$ .

Вычисления по пп. 6, 7, 8 целесообразно производить на ЭВМ.

Изложенная методика оптимизации внешней характеристики автономного тягового генератора может быть применена в своей основе и для оптимизации нелинейной характеристики генератора.

В.В. Кривцов, Н.Н. Михеев, Е.П. Раткевич

## РЕВЕРСИВНЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассматривается тиристорный электропривод постоянного тока, обеспечивающий независимое реверсивное управление и регулирование скорости вращения нескольких электро-