

Астапович Ю. М., Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П.

## ГИБКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕДИНЕННЫМИ ПО ВЫХОДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ

**Аннотация.** Описываются принципы построения гибких систем распределения мощности между нагруженными на общую динамическую нагрузку преобразовательными комплексами, обеспечивающих высокие энергетические показатели. Приводятся результаты исследования математической модели системы.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ, ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
МОЩНОСТИ, ГИБКОСТЬ, СТАБИЛИЗАЦИЯ, ИНВЕРТОРЫ, ФИЛЬТР, ИМПУЛЬСНЫЙ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Astapovich Yu. M., Mityashin N.P., Mirgorodskaya E.E.

## FLEXIBLE CONTROL SYSTEM OF THE CONVERSION UNITS UNITED IN OUTPUT

**The summary.** The principles of a flexible power distribution system between the transducer complexes with mutual dynamic load that provide high energy efficiency are described. The results of the study of the mathematical model of the system are adduced.

FREQUENCY CONVERTERS, PARALLEL OPERATION, THE DISTRIBUTION OF THE  
POWER, FLEXIBILITY, STABILIZATION, INVERTERS, FILTERS, PULSE CONVERTERS,  
ENERGY DATA

**Постановка задачи.** В связи с ростом потребления электроэнергии в преобразованном виде возрастают мощности преобразовательных устройств. Электропитание групповых потребителей, таких как, производственные участки и цеха, целесообразно организовывать с использованием групп объединенных по выходу преобразовательных агрегатов [1], на основе которых можно строить эффективные структуры электроснабжения. При этом достигается упрощение резервирования, предотвращение работы оборудования в неэффективных режимах, повышение его гибкости.

Основными задачами при применении подобных систем электроснабжения являются: распределение загрузки работающих агрегатов, согласованной с их номинальными мощностями, и обеспечение наилучших энергетических и качественных показателей при изменении нагрузки в широких пределах. Существенно, что эти задачи необходимо решать в реальном масштабе времени.

Решение первой задачи связано с необходимостью избежать перегрузки преобразователей, прежде всего в режимах максимальной нагрузки. Известные схемные решения с неизменяемой структурой распределяют нагрузку пропорционально номинальным мощностям преобразователей не только в номинальных режимах, но и в режимах, близких к холостому ходу, что приводит к снижению энергетических показателей [2].

### Методы решения

Проблема может быть решена за счет перехода к системе с гибкой структурой, изменяемой с изменением нагрузки. Эта система должна обеспечивать слежение за уровнем нагрузки и соответствующие отключения или подключения преобразователей так, чтобы обеспечивались высокие энергетические показатели всего комплекса.

Рассмотрим схему, показанную на рисунке 1. Здесь  $n$  преобразователей частоты  $П_k$  имеют явно выраженные звенья постоянного тока, выполненные на основе неуправляемых выпрямителей (НВ) и регулируемых импульсных преобразователей постоянного тока (ИППТ), представленных силовыми ключами  $K_1, K_2, \dots, K_n$ . Регулируемые знакопостоянные напряжения через  $\Gamma$ -образные LC-фильтры подаются на входы объединенных по выходу автономных инверторов тока (АИТ)  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , питающих общую нагрузку.

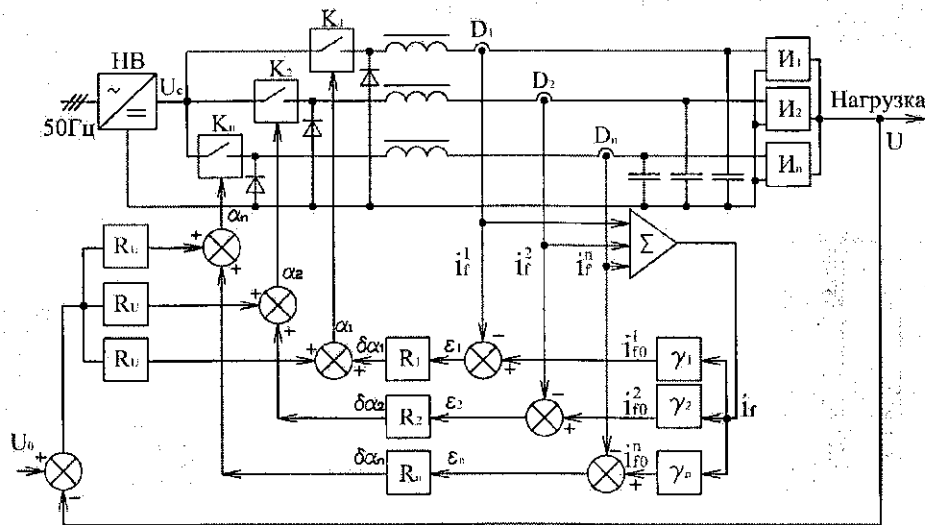


Рис. 1. Структура системы распределения мощности между объединенными по выходу преобразователями.

Заданное распределение определим положительными параметрами  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  такими, чтобы выполнялись условия

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = 1, \quad P_k/P_j = \gamma_k / \gamma_j, \quad (1)$$

где  $P_k$  и  $P_j$  – номинальные мощности любых двух преобразователей.

Поскольку для объединенных по выходу инверторов их входные напряжения  $U_d^k$  близки по величине, то второе из условий (1) можно заменить условием

$$I_f^k/I_f^j = \gamma_k / \gamma_j, \quad (2)$$

где  $I_f^k$  и  $I_f^j$  – токи индуктивностей фильтров соответствующих преобразователей.

Такое распределение достигается следующим образом.

Ввиду нестабильности входной сети и нагрузки преобразователи снабжены системами стабилизации выходного напряжения, в которых используются силовые регуляторы на основе ИППТ, управляемыми за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Поскольку преобразователи  $П_k$  объединены по входу и выходу, формируемые регуляторами  $R$  составляющие сигнала управления ИППТ, обеспечивающие стабилизацию выходного напряжения, имеет общее значение  $\alpha_0$ . Для обеспечения выполнения условия (2) сигнал управления ИППТ преобразователя  $П_k$  формируется следующим образом

$$\alpha_k = \alpha_0 + \delta\alpha_k, \quad (3)$$

Здесь  $\delta\alpha_k$  – составляющие сигнала управления ИППТ, формируемые регуляторами системы распределения  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Они рассчитываются по формулам

$$\delta\alpha_k = \kappa_p \cdot (I_{f0}^k - I_f^k), \quad (4)$$

где  $\kappa_p$  – коэффициент усиления регуляторов системы распределения,  $I_{f0}^k$  и  $I_f^k$  – уставки системы распределения токи индуктивностей входных фильтров инверторов  $I_k$  и их текущие значения соответственно. Уставки определяются по формулам

$$I_{f0}^k = \gamma_k I_f, \quad (5)$$

где  $I_d$  – сумма токов индуктивностей входных фильтров всех инверторов.

Таким образом, для уставок  $I_{f0}^k$  выполняются условия вида (2) и, следовательно, если регуляторы системы распределения обеспечат минимальные значения разностей в скобках формулы (4), то требуемое распределение мощности между преобразователями будет достигнуто. При этом из-за низкого входного сопротивления инверторов значения  $\delta\alpha_k$  малы и, следовательно, напряжения  $U_d^k$  на входе инверторов отличаются незначительно.

Особенностью рассмотренной системы распределения является то, что уставки  $I_{f0}^k$  определяются в процессе работы преобразователя и изменяются автоматически с изменением величины нагрузки. Это делает систему независимой от режима работы системы во всем диапазоне от холостого хода до любых плавных перегрузок. Но, как сказано выше, такая система не обеспечивает высоких средних значений энергетических показателей. Следовательно, целесообразно изменять набор работающих преобразователей  $K$ , выбирая его из общего множества преобразователей  $N$  так, чтобы при текущей величине потребляемой мощности  $P$ , во-первых, обеспечивался необходимый запас по мощности и, во-вторых, средние значения энергетических показателей системы преобразования были близки к оптимальным.

Обозначим через  $N/K$  – набор преобразователей из  $N$ , не подключенных к нагрузке в рассматриваемый момент,  $P_N$  и  $P_K$  – номинальные значения мощности преобразователей из  $N$  и  $K$ , т.е.

$$P_N = \sum_{i \in N} P_i, P_K = \sum_{i \in K} P_i.$$

Пусть далее  $\Delta P$  – требуемое значение запаса мощности, на которое мощность  $P_K$  должна превышать мгновенное значение мощности  $P$  для надежного электроснабжения.

Предлагаемая система, помимо элементов, показанных на рисунке 1, содержит блок управления структурой (БУС) комплекса, который осуществляет отключения и подключения преобразователей к нагрузке таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$P + \Delta P < P_K < P + \Delta P', \quad (6)$$

где  $\Delta P'$  – допустимое с точки зрения эффективности преобразования превышение мощности  $P_K$  над мгновенной мощностью нагрузки  $P$ . Очевидно, что  $\Delta P' > \Delta P$ . В случае нарушения левого неравенства БУС выбирает из множества  $N/K$  такой минимальный по мощности набор преобразователей  $M_1$ , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает правое неравенство. Наоборот, в случае нарушения правого неравенства БУС выбирает из множества  $K$  такой максимальный по мощности набор преобразователей  $M_2$ , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает левое неравенство.

При изменении набора инверторов необходимо изменять коэффициенты  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ , которые для преобразователей из нового набора  $K$  должны удовлетворять равенствам

$$\gamma_i = P_i / \sum_{j \in K} P_j.$$

Для преобразователей из  $N/K$  коэффициенты  $\gamma_k$  равны нулю.

Переходные процессы в системе возникают при каждом изменении структуры системы и соответствующем изменении значений коэффициентов  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ . Особенность системы с этой точки зрения состоит в том, уставки  $I_{f0}^k$  формируются самой системой и

изменяются в процессе регулирования. Установившийся режим наступает тогда, когда они достигают требуемых значений одновременно с регулируруемыми токами. Контур стабилизации выходного напряжения преобразователей в качестве регулирующих органов используют те же силовые ключи  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , что и система распределения, в силу чего обе системы является друг для друга возмущающими факторами. По этой причине изменения структуры реализуются БУС с установленной задержкой во времени относительно моментов нарушения условий (6) для того, чтобы избежать наложения переходных процессов в обеих системах.

Для исследования и параметрической оптимизации описанной гибкой системы создана компьютерная модель. На рисунке 2 приведены графики изменения токов, потребляемых инверторами тока в системе из четырех объединенных по выходу трехфазных преобразователей. По оси абсцисс отложены номера интервалов, прошедших от начала работы преобразователя. Длительность интервала – одна шестая периода выходной частоты. Моделирование проводилось при следующих параметрах комплекса. Фильтр:  $L_f = L_d = 10 \text{ мГн}$ ,  $C_f = 3000 \text{ мкФ}$ , емкость коммутирующей батареи  $C = 900 \text{ мкФ}$ , индуктивность компенсатора  $L_k = 100 \text{ мкГн}$ , частота  $f = 200 \text{ Гц}$ .

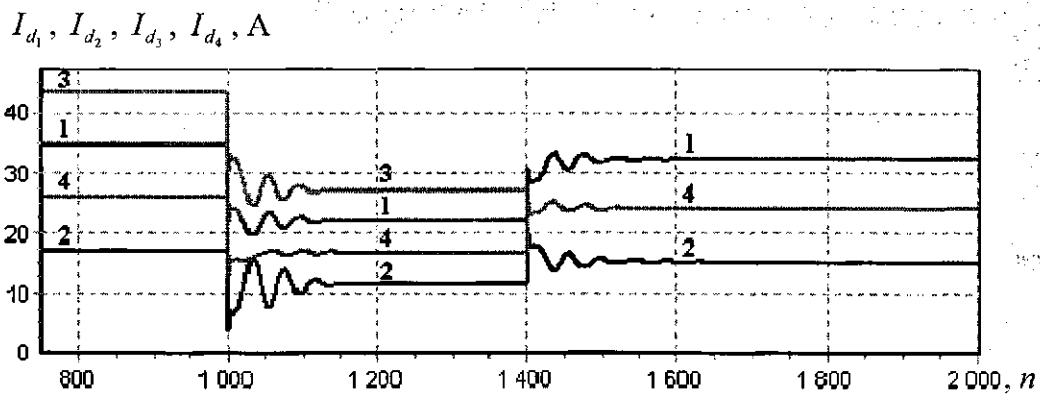


Рисунок 2 Переходные процессы в гибкой системе распределения.

Результаты моделирования отображают следующие процессы в системе: при  $n < 1000$  нагрузка номинальная и система распределяет потребляемые токи и, следовательно, мощность между преобразователями в соответствии с исходными значениями коэффициентов  $\gamma_1 = 0.3$ ,  $\gamma_2 = 0.1$ ,  $\gamma_3 = 0.4$ ,  $\gamma_4 = 0.2$ . В момент  $n_1 = 1000$  происходит резкое уменьшение нагрузки и возникает переходный процесс в системе стабилизации выходного напряжения, затухающий к моменту  $n_2 = 1120$ . Поскольку при  $n_1 = 1000$  произошло нарушение правого неравенства (6), БУС в момент  $n_3 = 1400$  отключает третий преобразователь и реализует новые значения коэффициентов  $\gamma_1 = 1/2$ ,  $\gamma_2 = 1/6$ ,  $\gamma_3 = 0$ ,  $\gamma_4 = 1/3$ . Возникающий переходный процесс в системе распределения нагрузки не накладывается на переходный процесс в системе стабилизации выходного напряжения благодаря задержке переключений преобразователей на установленные 400 интервалов.

### Выводы

Проведенные компьютерные исследования предлагаемой гибкой системы подтверждают ее работоспособность. При распределении нагрузки между объединенными по выходу преобразователями обеспечивается номинальная загрузка преобразователей, что способствует достижению высоких энергетических показателей преобразовательного комплекса.

## Литература

1. Митяшин Н.П. Гибкие преобразовательные комплексы/Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 128с.
2. Астапович Ю.М.. Автоматическое распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами/ Ю.М. Астапович, Н.П. Митяшин, Р.А. Билуков, Н.А. Калистратов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8571>

### The literature

1. Mityashin N.P. Flexible converting complexes. / N.P.Mityashin, J.B.Tomashevsky. Saratov: SSTU, 2002. 128p
2. Automatic load distribution between concurrent aggregates/Yu/ Astapovich, N. Mityashin, R. Bilyukov, N. Kalistratov//Contemporary problems of science and education. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8571>

Астапович Юрий Михайлович –  
аспирант кафедры «Системотехника»

Миргородская Екатерина Евгеньевна -  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника»  
Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Митяшин Никита Петрович -  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника»  
Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.  
Телефон: (845-2)-79-77-01; (845-2)-28-32-67,  
Электронная почта: mityashinnp@mail.ru

Astapovich Jury Michailovich –  
post-graduate student of the chair “System engineering”

Mirgorodskaya Ekaterina Evgenyevna -  
candidate of technical sciences, Associate Professor of the chair “System engineering”

Mityashin Nikita Petrovich -  
Dr.Sci.Tech., the professor, the professor of the chair «System engineering» of the Saratov state  
technical university,  
Tel. (845-2)-79-77-01; (845-2)-28-32-67, 8 951 889 5555,  
e-mail: yugol@sstu.ru