

УДК 621.314

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ АГРЕГАТАМИ

Астапович Ю. М., Митяшин Н. П., Билюков Р. В., Калистратов Н. А.

*ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.”, Саратов, Россия (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77), E-mail: mityashinnp@mail.ru*

В работе рассматривается проблема распределения нагрузки между параллельно работающими агрегатами. Предложена общая для систем из различных предметных областей методика автоматического управления потоками энергоресурсов, основанная на измерении текущего распределения нагрузки, расчета требуемого распределения и последующего вычисления в реальном масштабе времени уставок регулирования. Методика рассмотрена на примере полупроводникового преобразователя частоты, собираемого по схеме “управляемое звено постоянного тока – параллельно включенные автономные инверторы с различными номинальными мощностями”. Рассматривается также применение методики к распределению потоков в линиях цеха низко-температурной сепарации газоконденсатной смеси, включаемых параллельно между первичным источником и магистральным трубопроводом очищенного газа. Достоинства метода – возможность осуществлять заданное распределение потоков ресурса в реальном масштабе времени и применимость для систем разной физической природы.

Ключевые слова: ресурсы, автоматическое управление, регулятор, преобразователь частоты, заданное распределение, потоки, низкотемпературная сепарация газа.

## AUTOMATIC LOAD DISTRIBUTION BETWEEN PARALLEL WORKING UNITS

Astapovich Y. M., Mityashin N. P., Bilyukov R. V., Kalistratov N. A.

*Saratov state technical university named after Gagarin Y. A., Saratov, Russia (410054, Saratov, street Polytechnical, 77), e-mail: mityashinnp@mail.ru*

The problem of the distribution of load between units operating in parallel. The general systems of different domains technique of automatic flow control of energy resources. based on the measurement of the current load, calculate the required distribution and subsequent calculation of the real-time control settings. The method is considered as an example of semiconductor inverter collected in a "controlled DC link - stand-alone inverters connected in parallel with different nominal capacity." We also consider the application of the technique to the distribution of flows in the lines of the shop a low-temperature separation of condensate mixture connected in parallel between the primary source and main pipeline purified gas. Advantages of the method – the ability to perform a given distribution of the flow of resources in real-time systems and applicability in different physical nature.

Key words: resources, Automatic control, controller, inverter, given distribution flows, low-temperature gas separation.

### Введение

В ряде технических систем применяется параллельные включения агрегатов, работающих на общую нагрузку. Целью такого включения чаще всего является необходимость увеличения производительности оборудования. Наиболее известным примером такого рода является параллельная работа трансформаторов [1].

Основной проблемой, возникающей в подобных технических ситуациях, является неравномерная нагрузка параллельно включенных агрегатов. Это связано, как правило, с наличием так называемых “паразитных” параметров агрегатов, которые в обычном одиночном включении не проявляют себя. Обычно эти параметры в формально идентичных устройствах сильно отличаются и при параллельном включении вызывают разбаланс в работу агрегатов.

Для трансформаторов существуют правила их подбора для параллельного включения, соблюдения которых обеспечивает их равномерную нагрузку. Для других видов оборудования такие условия не сформулированы. Это связано со значительно более редкими, по сравнению с трансформаторами, параллельными подключениями другого рода агрегатов. Тем не менее, представляет интерес исследования параллельного включения агрегатов и выборка общих условий, обеспечивающих равномерную загрузку формально идентичных единиц оборудования. В настоящей работе обсуждается один из способов решения этой задачи.

### **Цель исследования**

Разработка методики получения заданного распределения потоков ресурса в реальном масштабе времени в системах разной физической природы.

### **Выбор и обоснование метода**

В настоящее время применяется способ обеспечения равномерного распределения нагрузки, который можно назвать статическим. Смысл этого способа состоит в соблюдении условий равновесия агрегатов, обеспечивающих равномерное распределение. Так, для параллельной работы трансформаторов необходимо и достаточно соблюсти следующие условия [5]. Параллельная работа трансформаторов допускается, если: группы соединения обмоток трансформаторов одинаковы; одинаковы напряжения как первичных, так и вторичных обмоток, т. е. коэффициенты трансформации равны или различаются не более чем на  $\pm 0,5 \%$ ; напряжения короткого замыкания (КЗ) отличаются не более чем на  $\pm 10 \%$ ; произведена фазировка трансформаторов.

Как видно, эти условия обеспечиваются подбором трансформаторов и способом их включения. Эти действия проводятся одновременно, вне времени работы агрегатов, а управление в реальном масштабе времени невозможно.

Другим примером может служить параллельное или последовательное включение полупроводниковых или вакуумных вентелей. Для этих приборов условием правильного распределения нагрузки является совпадение их статических и динамических характеристик с заданной точностью.

В некоторых случаях для балансировки используются буферные элементы, например, малые активные сопротивления в цепях постоянного тока или реактивные элементы (конденсаторы или индуктивности) в цепях переменного тока. Однако это сопряжено с потерями энергии в первом случае и с увеличением некомпенсированной реактивной мощности во втором.

Наиболее благоприятная ситуация для организации управления процессом распределения нагрузки возникает тогда, когда сами агрегаты содержат управляющие

элементы, основное предназначение которых не связано непосредственно с решаемой в данной работе проблемой. При этом возникает возможность использования этих элементов для решения выполняемой задачи – перераспределение потоков энергии или других ресурсов между каналами их передачи.

Таковыми агрегатами являются, в частности, полупроводниковые преобразователи частоты, собираемые по схеме “управляемое звено постоянного тока – автономный инвертор”. Другим примером является линии низко-температурной сепарации газоконденсатной смеси, включаемые параллельно между первичным источником и магистральным трубопроводом очищенного газа [2]. В каждом из этих случаев возможно предложить автоматическую систему распределения потоков передаваемых ресурсов (в первом случае – энергии, во втором – газа) между параллельными “нитками”. В каждом из этих примеров управление распределением может осуществляться в процессе функционирования оборудования в динамическом режиме.

Преимущество такого способа очевидно: возможность осуществить управление в реальном масштабе времени без остановки основного технологического процесса, отсутствие дополнительных затрат на исполнительные элементы управления, возможность адаптивной реакции системы на изменение условий функционирования оборудования.

Другое преимущество такого управления состоит в возможности реализации не только равномерного распределения, но и любого заданного распределения.

Рассмотрим простой алгоритм такого автоматического распределения. Пусть имеется  $n$  агрегатов, включенных параллельно на общую нагрузку. Удобно считать, что этими агрегатами являются источники электропитания, а распределяемым ресурсом является электрический ток. Пусть, кроме того, ток каждого источника является монотонной функцией некоторой управляющей величины, т.е.:

$$I_k = f(\alpha_k) \quad (1)$$

Здесь  $I_k$  – ток  $k$ -го агрегата,  $\alpha_k$  – соответствующая управляющая величина,  $f$  – монотонная функция.

Заданное распределение токов определим положительными параметрами  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ , так что:

$$\gamma_k > 0; \quad \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = 1 \quad (2)$$

При этом в установившемся режиме должно выполняться для любых других токов  $I_k$  и  $I_j$  условие:

$$\frac{I_k}{I_j} = \frac{\gamma_k}{\gamma_j} \quad (3)$$

Иными словами, мы определим пропорции между токами агрегатов, т.е. задали распределение нагрузки между ними.

Реализовать такое распределение теперь можно следующим образом. Снабдим каждый агрегат регулятором, который для определенности будем считать пропорциональным, т. е:

$$\alpha_j = K_{II} \cdot \varepsilon_j$$

где  $\alpha_j$  – управляющая переменная  $j$ -го регулятора,  $K_{II}$  – коэффициент усиления регулятора,  $\varepsilon_j$  – входящая величина регулятора.

Считая для определенности функцию  $f$  из (1) монотонно убывающей, положим:

$$\varepsilon_j = I_j - I_j^0 \quad (4)$$

Здесь установка  $j$ -го регулятора  $I_j^0$  высчитывается следующим образом:

$$I_j^0 = \gamma_j \cdot I \quad (5)$$

где:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k \quad (6)$$

Таким образом, установка регулятора изменяется с изменением общего тока нагрузки. Этот прием делает систему распределения гибкой, не зависящей от режима работы системы, во всем диапазоне от холостого хода до любых неаварийных перегрузок.

По указанному принципу работает устройство [1], в котором группа преобразователей работает на общую нагрузку. Задача устройства – обеспечить равномерную загрузку преобразователей. В отличие от этого авторами проведены исследования системы заданного, в общем случае неравномерного, распределения токов между тремя инверторами тока, работающими на общую нагрузку и питающимися от общего источника постоянного тока (рис. 1).

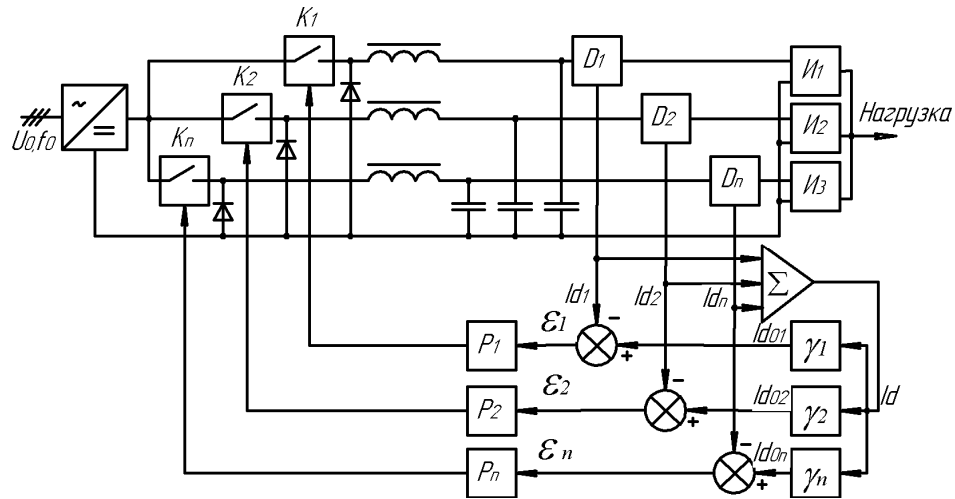


Рис. 1. Система заданного распределения нагрузки между преобразователями

Система работает следующим образом. Выпрямленное напряжение питающей сети через управляемые ключи  $K_1, K_2, K_n$ , осуществляющих широтно-импульсное регулирование (ШИР) средних значений напряжений подаваемых на входы инверторов  $I_1, I_2, I_n$  через Г-образные LC-фильтры. Токи  $I_{d1}, I_{d2}, I_{dn}$ , потребляемые инверторами, измеряются датчиками  $D_1, D_2, D_n$ , а также складываются на сумматоре и подаются на вход умножителей  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$ , которые вырабатывают уставки системы распределения токов в соответствии с формулой (5). Далее ошибки распределения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_n$  поступают на ПИД-регуляторы  $P_1, P_2, P_n$ , которые вырабатывают длительности замкнутого состояния ключей на периоде ШИР. Таким образом, осуществляется заданное соотношение между потребляемыми инверторами токами. В силу высокой чувствительности потребляемых инверторами токов к изменению напряжений на их входах средние значения этих напряжений близки по величине, что означает, что распределение мощности между инверторами практически осуществляется в той же пропорции, что и распределение токов.

Рассмотрим другой пример применения предлагаемого способа – линии низкотемпературной сепарации (НТС) газоконденсатной смеси. В данном случае предлагается регулировать распределение потоков между отдельными линиями сепарации установки НТС при помощи П-регулятора с задаваемыми коэффициентами распределения. Такое распределение нагрузок целесообразно, в частности, при необходимости достичь максимальной производительности процесса при различных параметрах ниток.

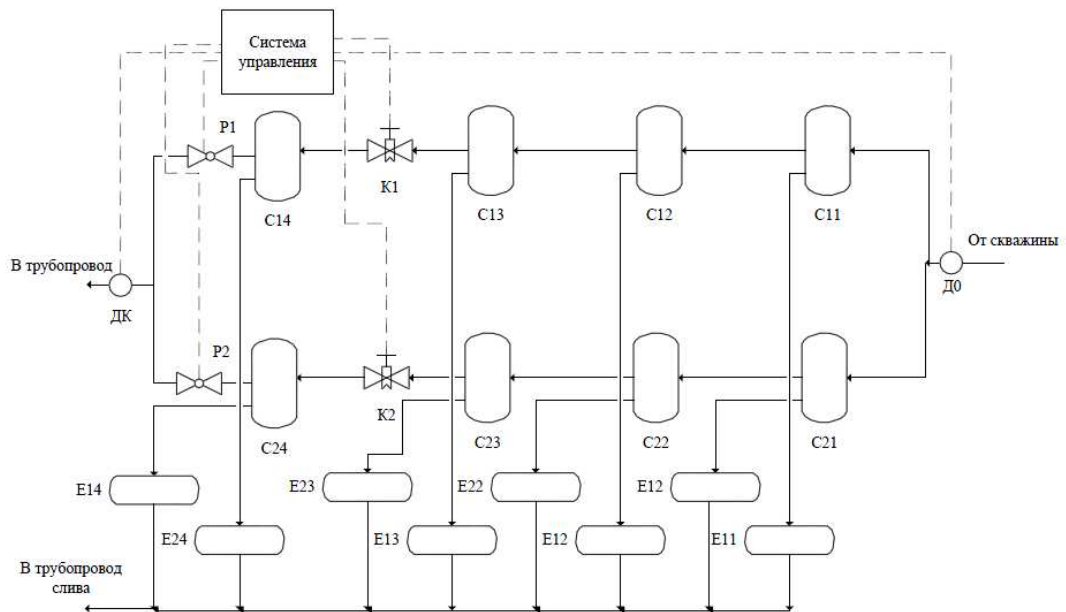


Рис.2. Система низко-температурной сепарации газоконденсатной смеси

Для примера рассмотрим установку с двумя линиями сепарации (рис. 2). Каждая линия состоит из четырех сепараторов (С11-С24), осуществляющих выделение жидкости из потока газа, емкостей, в которые эта жидкость поступает (Е11-Е24) и затем попадает далее в трубопровод, регулирующих клапанов (К1 и К2), расходомеров (Р1и Р2), датчиков входного (Д0) и выходного давления (ДК), а также соединительных труб.

На входе системы поддерживается давление в заданном диапазоне. Выходное давление также колеблется относительно известной величины. Параметры сепараторов и труб (гидравлическое сопротивление) считаются постоянными.

При работе системы газ проходит через три первых сепаратора, а затем через управляющий клапан. Регулированием положения клапана на каждой из линий достигается установление заданной пропорции распределения потока газа для каждой линии. Регулирование предлагается осуществлять системой управления, отслеживающей изменения входного и выходного давления и регулирующей состояния клапанов для достижения заданного соотношения потоков на линиях согласно описанному выше общему алгоритму.

Для проверки эффективности предлагаемого метода были проведены компьютерные исследования математических моделей рассмотренных систем. Моделирование распределения потоков в системе НТС проводилось с применением гидро-электрической аналогии [3,4]. Проведенные компьютерные исследования показали работоспособность предлагаемого метода, возможность получения требуемых точности распределения и качества переходных процессов.

## Заключение

Предложен общий метод организации системы автоматического распределения нагрузки между агрегатами, работающими на общую нагрузку. Рассмотрены примеры применения метода для заданного деления мощности между несколькими силовыми преобразователями и потоков газоконденсатной смеси между технологическими нитками. Научная и практическая новизна работы состоит в возможности осуществлять заданное распределение потоков ресурса в реальном масштабе времени и применимость для систем разной физической природы.

### Список литературы

1. А.с 896724 СССР, МКИ Н 02 М 5/27, Н 02 М5/515. Групповой преобразователь частоты / И. И. Кантер, Н. П. Митяшин, И. И. Артюхов и др. // Открытия. Изобретения. – 1982. – №12.
2. Гвоздев, Б. П. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата / Б. П. Гвоздев, А. П. Подкопаев, И. Т. Балыбердина. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
3. Коздоба, Д. А. Электрическое моделирование явлений тепло и массопереноса / Д. А. Коздоба. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
4. Костышин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Ивано-Франковск, 2000. – 163 с.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

### Рецензенты:

Байбурин Вил Бариевич доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А., г. Саратов.

Ивашенко Владимир Андреевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов.