



Міжнародна науково-технічна конференція

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛІНГВІСТИЧНОГО  
АНАЛІЗУ

25 жовтня 2011 року

# Моделирование контентных сетей

ЛАНДЭ Д.В.,

д.т.н., профессор НТУУ «КПІ»,

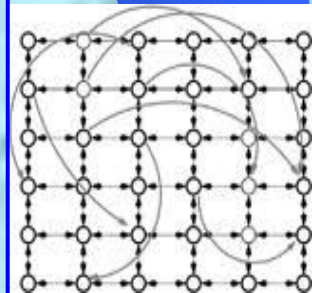
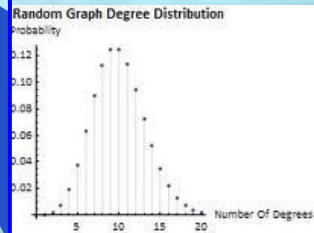
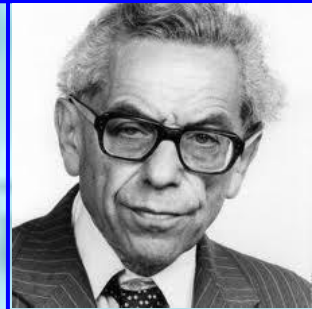
ведущий научный сотрудник ИТПРИ НАН Украины



# Complex Networks

В настоящее время наряду с традиционным теориями графов, систем и сетей массового обслуживания активно развивается теория сложных сетей (от англ. - Complex Networks), в рамках которой предлагаются подходы к решению вычислительно сложных задач, характерных для современных сетей.

Основной причиной актуальности теории сложных сетей являются результаты современных работ по описанию реальных компьютерных, биологических и социальных сетей. Свойства многих реальных сетей существенно отличаются от свойств классических случайных графов с равновероятной связностью узлов, а строятся на основе связанных структур, степенных распределений.

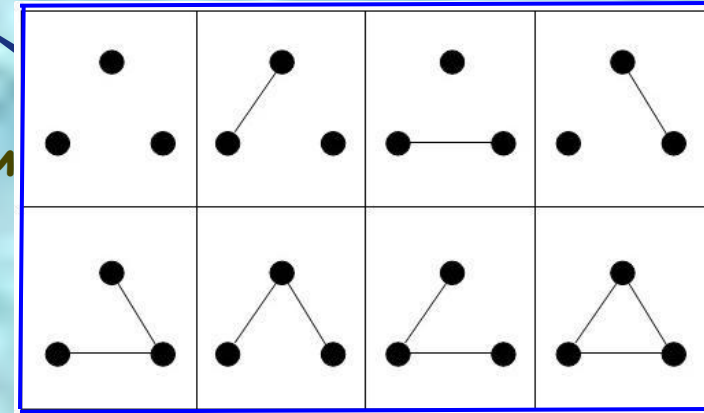






## ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ

Практически все современные сети можно считать сложными. Так, например, известная задача синтеза топологии сети допускает комбинаторный подход, опирающийся на представление сети в виде конечного графа, вершины которого соответствуют узлам сети, а ребра – линиям связи.



*Варианты размещения  
линий связи при  $n=3$*

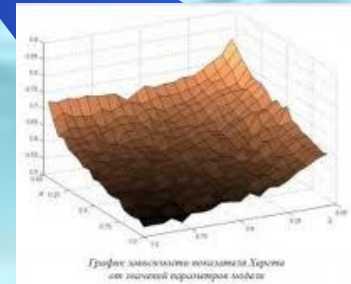
Например, в сети из 10 узлов существует  $2^{45}$  вариантов размещения линий связи (для 10 узлов теоретически возможно  $C_2^{10}$  линий соединений. Каждая из этих возможных линий связи может реально существовать – состояние «1», или не существовать – состояние «0», то есть всего возможностей ).



## Направления теории сложных сетей

В теории сложных сетей выделяют три основных направления:

- исследование статистических свойств, которые характеризуют поведение сетей;
- создание модели сетей;
- предсказание поведения сетей при изменении структурных свойств.



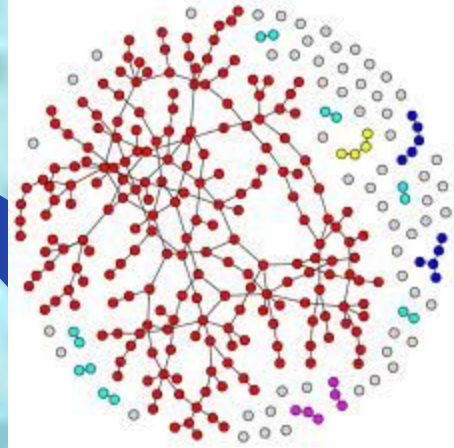




## Параметры сложных сетей

В прикладных исследованиях обычно применяют такие типичные для сетевого анализа характеристики, как размер сети, сетевая плотность, степень центральности и т.п.

При анализе сложных сетей как и в теории графов исследуются параметры отдельных узлов; параметры сети в целом; параметры сетевых подструктур.

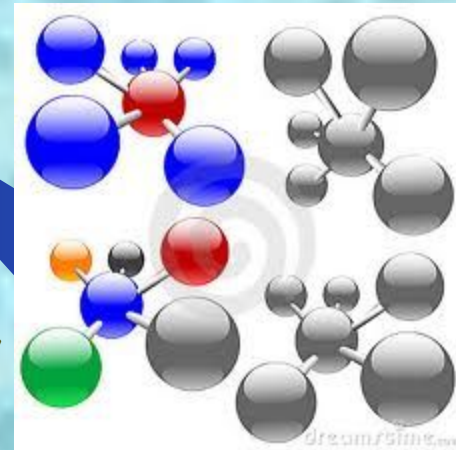




## Параметры узлов сети

Выделяют следующие параметры:

- входная степень связности узла - количество ребер, которые входят в узел;
- выходная степень связности узла - количество ребер, которые выходят из узла;
- расстояние от данного узла до каждого из других;
- среднее расстояние от данного узла до других;
- эксцентричность - наибольшее из геодезических расстояний от данного узла к другим;
- посредничество - показывающее, сколько кратчайших путей проходит через данный узел;
- центральность - общее количество связей данного узла по отношению к другим;
- уязвимость, рассматриваемая как уровень спада «проводимости» сети в случае удаления вершины и всех смежных ей ребер.

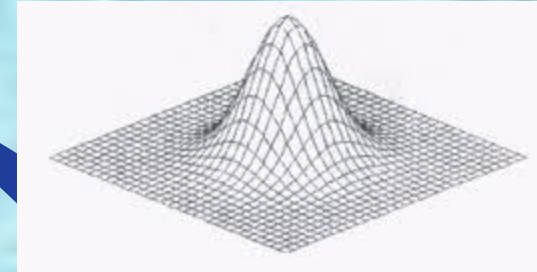






## Общие параметры сети

Наиболее часто используются такие параметры: количество узлов, число ребер, среднее расстояние от одного узла к другим, плотность – отношение количества ребер в сети к макс. возможному количеству, количество симметричных, транзитивных и циклических триад, диаметр – максимальная уязвимость всех вершин сети, ассортативность – мера зависимости между узлами с одинаковыми степенями...



Существует несколько задач исследования сложных сетей, среди которых можно выделить следующие основные: определение клик, кластеров, в которых узлы связаны между собой сильнее, чем с членами других подобных фрагментов; выделение компонент связности, которые связаны внутри и не связаны между собой; нахождение перемычек, т.е. узлов, при изъятии которых сеть распадается на несвязанные части.

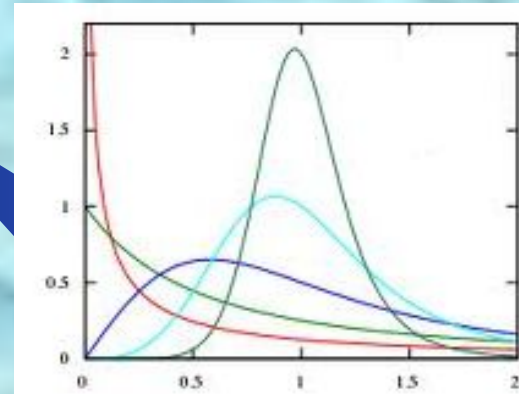


## Распределение степеней связности узлов

Важной характеристикой сети является функция распределения степеней узлов  $P(k)$ , которая определяется как вероятность того, что узел  $i$  имеет степень  $k_i = k$ . Распределение степеней  $P(k)$  отражает долю вершин со степенью  $k$ .

Для ориентированных сетей существует распределение выходящей полустепени  $P^{out}(k^{out})$ , и полустепени входной  $P^{in}(k^{in})$ , а также распределение общей степени  $P^{io}(k^{in}, k^{out})$ .

$P(k)$  в некоторых случаях может быть распределениями Пуассона ( $P(k) = e^{-m} m^k / k!$ , где  $m$  - математическое ожидание), экспоненциальным ( $P(k) = e^{-k/m}$ ) или степенным ( $P(k) = 1/k^\gamma$ ).







## Путь между узлами

Если два узла  $i$  и  $j$  можно соединить с помощью последовательности из  $m$  ребер, то такую последовательность называют маршрутом (walk) между узлами  $i$  и  $j$ , а  $m$  называю длиной маршрута. Расстояние между узлами определяется как длина маршрута от одного узла до другого. Естественно, узлы могут быть соединены прямо или опосредованно. Путем между узлами  $d_{ij}$  называется кратчайшее расстояние между ними. Для всей сети можно ввести понятие среднего пути, как среднее по всем парам узлов кратчайшего расстояния между ними:

$$l = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij},$$





## Глобальная эфффективность

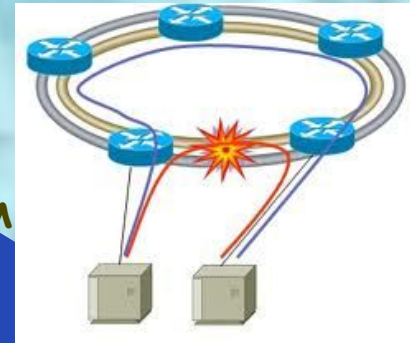
Некоторые сети могут оказаться несвязными. Соответственно, средний путь может оказаться также равным бесконечности. Для таких случаев вводится понятие глобальной эфффективности сети, рассчитываемое по формуле:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}},$$

где сумма учитывает все пары узлов. Эта характеристика отражает эфффективность сети при пересылке информации между узлами (предполагается, что эфффективность в пересылке информации между двумя узлами и обратно пропорциональна расстоянию между ними).

Обратная величина глобальной эфффективности – среднее гармоническое геодезических расстояний:

$$h = 1/E.$$







## Коэффициент кластеризации

Дункан Уаттс и Стив Строгатц определили коэффициент кластерности, который Данный Коэффициент характеризует тенденцию к образованию групп взаимосвязанных узлов, так называемых клик (clique). Пусть из узла выходит  $k$  ребер, которые соединяют его с  $k$  другими узлами, ближайшими соседями. Если предположить, что все ближайшие соседи соединены непосредственно друг с другом, то количество ребер между ними составляло бы  $k(k-1)/2$ . Т.е. это число, которое соответствует максимально возможному количеству ребер, которыми могли бы соединяться ближайшие соседи выбранного узла. Отношение реального количества ребер, которые соединяют ближайших соседей данного узла к максимально возможному (такому, при котором все ближайшие соседи данного узла были бы соединены непосредственно друг с другом) называется коэффициентом кластеризации узла.



Watts



Strogatz

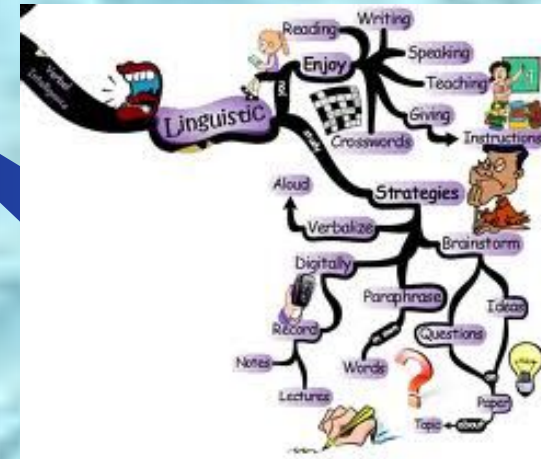


## Сложные сети и задачи компьютерной лингвистики

Первым шагом при применении теории сложных сетей к анализу текста является представление этого текста в виде совокупности узлов и связей, построение сети языка (language network).

Существуют различные способы интерпретации узлов и связей, что приводит, соответственно, к различным представлениям сети языка.

Узлы могут быть соединены между собой, если соответствующие им слова стоят рядом в тексте, принадлежат одному предложению, соединены синтаксически или семантически. Сохранение синтаксических связей между словами приводит к изображению текста в виде направленной сети (directed network), где направление связи соответствует подчинению слова.







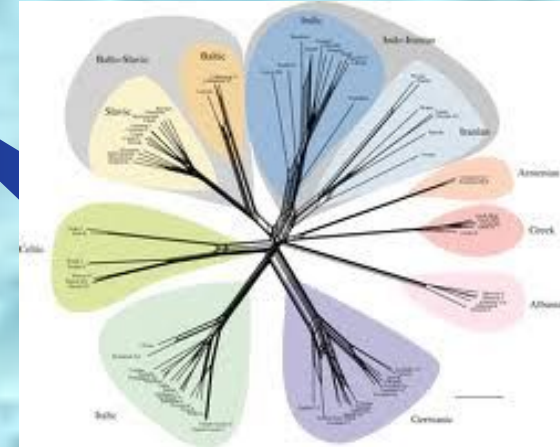
## Простейшие типы сетей в лингвистике

**L-пространство.** Связываются соседние слова, которые принадлежат одному предложению. Количество соседей для каждого слова (окно слова) определяется радиусом взаимодействия  $R$ , чаще всего рассматривается случай  $R = 1$ .

**V-пространство.** Рассматриваются узлы двух видов, соответствующие предложениям и словам, которые им принадлежат.

**P-пространство.** Все слова, которые принадлежат одному предложению, связываются между собой.

**S-пространство.** Предложения связываются между собой, если в них употреблены одинаковые слова.





## Экспериментальные данные

В случае рассмотрения  $L$ -пространства языка количество соседних слов, между которыми строятся связи, определяется параметром  $R$ : при  $R=1$  связаны между собой лишь ближайшие соседи, при  $R=2$  связи строятся между узлом-словом, его ближайшими и предшествующими близкими соседями и т. д.

Для сети, построенной на основании Британского национального корпуса, оказалось, что данная сеть английского языка безмасштабна, а поведение степени  $P(k)$  характеризуется двумя режимами степенного распределения со значением степенного показателя  $\gamma=1.5$  для  $k < 2000$  и  $\gamma=2.7$  для  $k > 2000$  соответственно.

Согласно определению, если средняя длина кратчайшего пути растет количеством узлов сети медленнее любой функции степени, то сеть является «малым миром». Данная сеть оказалась именно такой.

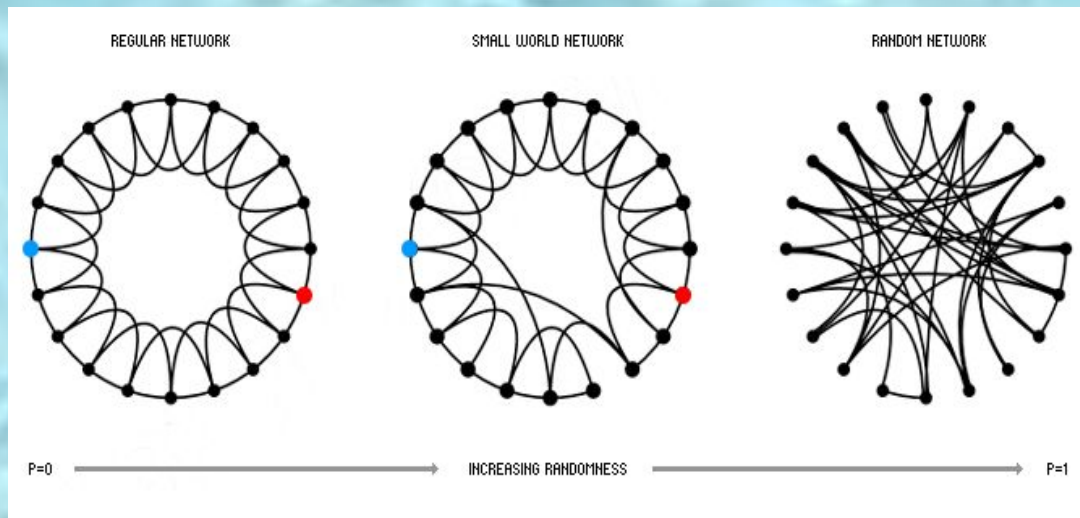
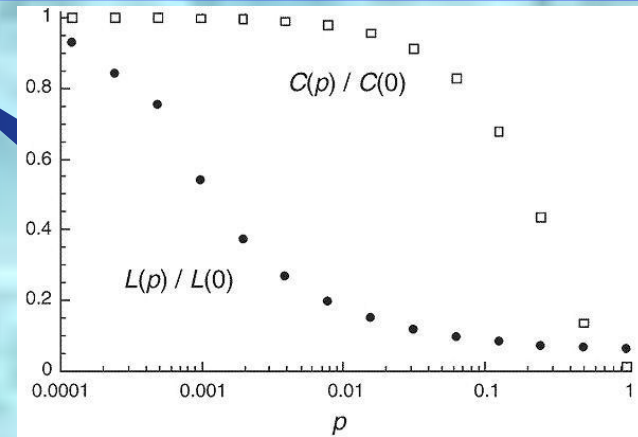






## Модель малых миров

Д. Уаттс и С. Строгатц обнаружили феномен, характерный для многих реальных сетей - эффект малых миров (Small Worlds). Сетевые структуры, соответствующие свойствам малых миров обладают следующими свойствами: малая средняя длина пути относительно диаметра сети и большой коэффициент кластеризации (что присуще сетям с регулярной структурой).



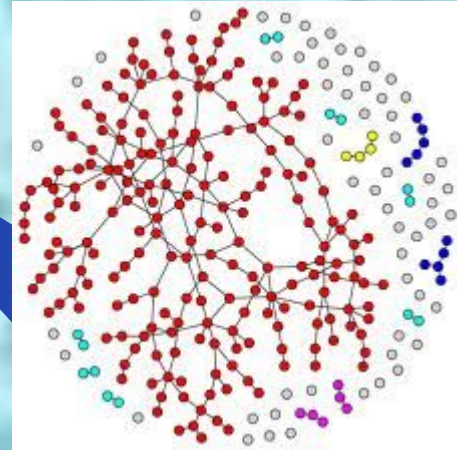


## Модель случайной сети Эрдоша-Рени

Существует две модели классического случайного графа: в первой считается, что  $M$  ребер распределены произвольно и независимо между парами из  $N$  вершин графа; во второй модели фиксируется вероятность  $m$ , с которой может объединяться каждая из пар вершин. При  $m \rightarrow \infty$  и  $N \rightarrow \infty$  для обоих вариантов распределение степеней узлов  $k$  определяется формулой Пуассона:

$$P(k) = e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle k \rangle^k}{k!},$$

где среднее значение степени узла:  $\langle k \rangle = 2M/N$  для первой модели и  $\langle k \rangle = mN$  для второй. При этом средняя длина кратчайшего пути для сети Эрдоша-Рени составляет  $\langle l \rangle = \ln(N)/\ln(\langle k \rangle)$ , а коэффициент кластерности:  $C \sim \langle k \rangle / N$ .



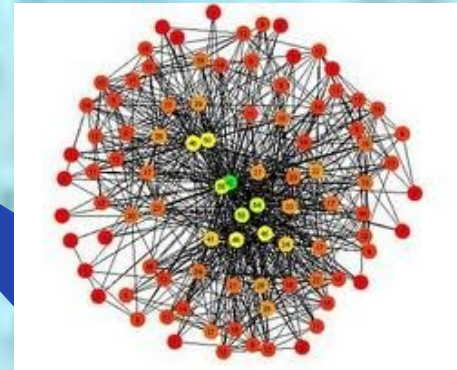




## Модель случайной сети Барабаша-Альберта

Сценарий базирується на двох механізмах – росте и преимущественном присоединении (preferential attachment). Модель использует алгоритм: рост сети происходит начиная с небольшого количества узлов  $n_0$ , к которым на каждом временном шагу добавляется новый узел с  $n < n_0$  связями, которые присоединяются к уже существующим узлам; преимущественное присоединение состоит в том, что вероятность присоединения  $P(k_i)$  нового узла к уже существующему узлу  $i$  зависит от степени  $k_i$  узла  $i$ :

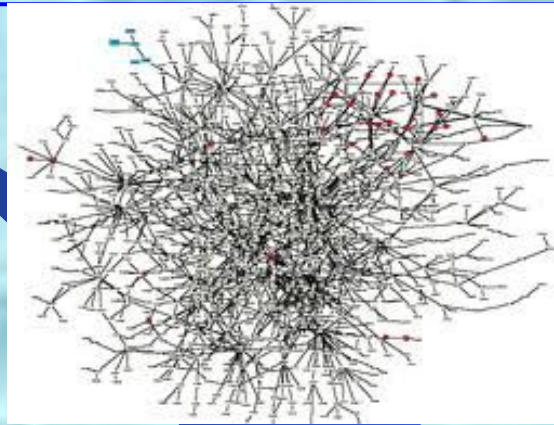
$$P(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}.$$





## Сложные сети с заданным распределением

- формируется степенная последовательность, выбирая  $N$  чисел  $k_i$ , согласно заданному распределению;
- каждой вершине  $i$  графа присваивается  $k_i$  «заготовок» (концов) для будущих ребер;
- из степенной последовательности случайно извлекаются пары «заготовок». Они соединяются ребром в том случае, если новое ребро не приведет к появлению ребер-циклов (петель) или мультиребер. Если ребро сгенерировано, то соответствующие индексы из степенной последовательности удаляются;
- предыдущий шаг повторяется до тех пор, пока степенная последовательность не пуста.





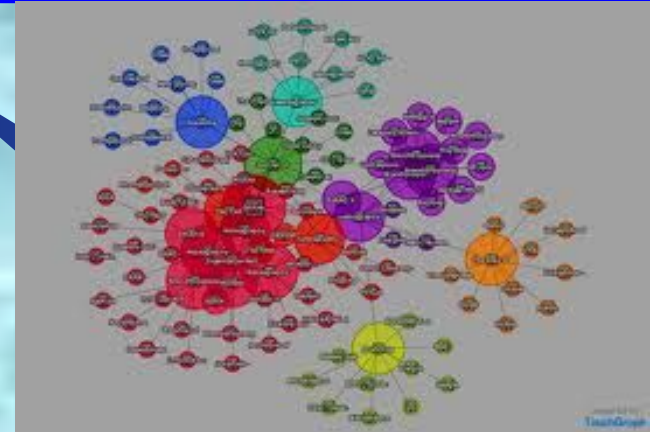


## Алгоритм построения контентной сети

Алгоритм Барабаши-Альберта позволяет генерировать сети со степенным распределением, однако эти сети слишком формальны, в них нет содержательной составляющей.

Для построения модели сети с параметрами, близкими к тем, которые наблюдаются в веб-пространстве, предлагается рассмотреть следующую архитектуру сети. Пусть сеть состоит из  $N$  узлов.

Пусть есть  $i$ -й узел (аналог веб-сайта). Пусть узел содержит документов (веб-страниц). Каждый документ имеет свой поисковый образ - вектор из весов термов (ключевых слов), входящих в него,  $m$  - объем тезауруса (словаря).





## Распределения в модели

Изначально предполагается, что распределение количества документов по узлам - степенное (аналог - распределение богатства - закон Парето). Распределение ключевых слов в документах - также степенное (аналог - распределение слов в текстах - закон Ципфа). В качестве направленных ребер сети рассматриваются гиперссылки между узлами. Предполагается, что количество входящих в узел ребер пропорционально количеству документов, принадлежащих ему. Также предполагается, что распределение степеней узлов сети - как и в случае веб-пространства степенное.







## Основные шаги алгоритма

1. Выбирается количество узлов сети  $N$ ;
2. Для каждого узла генерируется число, соответствующее количеству документов- его объем;
3. Для каждого документа генерируется вектор ключевых слов;
4. Для каждого узла генерируются его входная и выходная степени, приблизительно пропорциональные его объему. Степени узлов заранее распределяются по степенному закону;
5. Для каждого узла рассчитывается центроид;
6. Вычисляется матрица близости между документами на основании близости центроидов;
7. Циклично, начиная с узла с наибольшей входной степенью, случайным образом устанавливаются ребра от свободных выходных концов других узлов к свободным входным концам данного узла.





## Преимущества модели

1. Ориентация на контент документов при установлении связей (построении ребер);
2. При построении сети учитываются вполне реальные предпосылки (чем больше узел, тем больше ссылок устанавливается на него, преимущественно устанавливаются связи близкими по содержанию узлами, учитывается реалистическое распределение количества документов между узлами и ключевых слов в документах);
3. В построенной сети, оказалось, что такой показатель, как PageRank имеет решающее значение при организации содержательного поиска в сети.



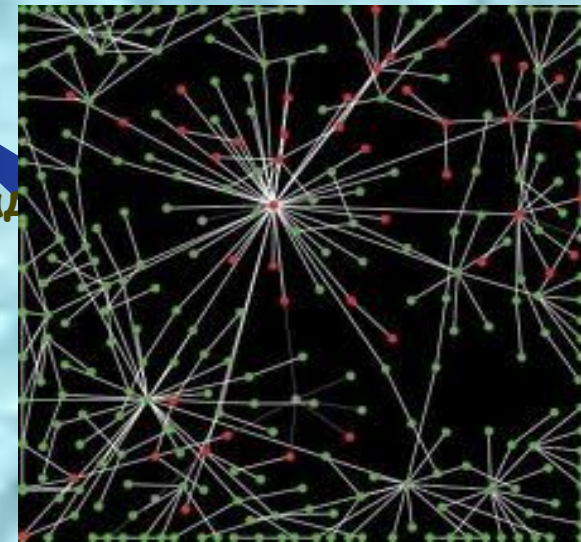




## Решаемые задачи

Полученная в результате моделирования сеть, обладающая многими параметрами, близкими к реальной сети, что по-видимому, позволит решать некоторые задачи, обуславливающие моделирование сетей близких к реальным, а именно:

- выявления новых закономерностей и феноменов;
- изучение природы формирования/развития отдельных сетей;
- моделирование процессов передачи информации в сетях;
- моделирование задач заражения/иммунизации;
- противодействия сетевым атакам;
- решения задач навигации (поиска) в сетевых структурах и т.п.





Міжнародна науково-технічна конференція

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛІНГВІСТИЧНОГО  
АНАЛІЗУ

25 жовтня 2011 року

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**

Ландэ Д.В.,  
[dwl@visti.net](mailto:dwl@visti.net)  
<http://dwl.kiev.ua>

