

УДК 519.876

“Дорожные карты” с принятием решений на гибридных индикаторных сетях

Юдицкий С. А.

Актуальность. В настоящее время для принятия решений по достижению глобальных целей развития организационно-технических систем широкое распространение получили “дорожные карты”. Вместе с тем, в известных работах преобладает описательно-текстовый стиль изложения, следствием которого являются: неоднозначность модели, что вызывает трудности, в первую очередь, у предметных специалистов; ограничения при преобразованиях формальной составляющей дорожной карты. Указанные недостатки могут быть преодолены за счет применения сетевой дорожной карты на основе графо-логического описания – органического сочетания теории графов и математической логики (булевой алгебры). **Целью данной статьи** является разработка формальной сетевой графо-логической модели дорожной карты организационно-технической системы, отображающей динамику показателей (параметров) системы на заданном временном интервале. **Метод достижения цели**, предложенный в работе, заключается в разработке новой графо-логической модели организационно-технической системы, которую будем называть гибридной индикаторной сетью. **Новизна.** Отличительной особенностью гибридной индикаторной сети, по отношению к сети Петри, является измененный механизм срабатывания переходов, за счет введения дополнительного условия их срабатывания, определяемого введенными в модель индикаторными логическими функциями. **Результат.** Построение дорожной карты организационно-технической системы на основе предложенной гибридной индикаторной сети позволяет повысить ее выразительность и вариабельность (по сравнению со стандартными сетями Петри), за счет новой возможности изменения конфигурации графа путем применения индикаторных логических функций, определяющих условия срабатывания или блокировки переходов в сети. В статье дан пример построения гибридной индикаторной сети, и показано ее применение для анализа поведения организационно-технической системы.

Ключевые слова: дорожная карта, организационно-техническая система, сеть Петри, позиции и переходы, гибридная индикаторная сеть, графо-логическое описание, булева алгебра, индикаторная логическая функция.

Введение

Под дорожной картой применительно к организационно-техническим системам (ОТС) принято понимать комплект документации, определяющий последовательность работ по созданию новой ОТС и прогнозирование ее поведения. Эти работы частично выполняются по апробированным методикам, частично основываются на оригинальных решениях экспертов (экспертных семинаров). Масштабы и эффективность применения дорожных карт растут при увеличении степени формализации описания карт и совершенствования математического аппарата для моделирования функционирования ОТС в различных ситуациях. Вместе с тем, в известных автору работах по дорожным картам [1, 2, 3, 4] преобладает описательно-текстовый (неформальный) стиль изложения, следствием которого являются: неоднозначность в понимании модели; недостаточная наглядность и выразительность («непрозрачность») описания, что вызывает трудности, в первую очередь, у предметных специалистов; ограничения при преобразованиях формальной составляющей дорожной карты. Указанные недостатки могут быть преодолены (если не

полностью, то хотя бы частично) за счет применения сетевой дорожной карты на основе графо-логического описания – органического сочетания теории графов [5, 6] и математической логики (булевой алгебры [7, 8, 9]).

Целью данной статьи является разработка формальной сетевой графо-логической модели дорожной карты ОТС, отображающей динамику показателей (параметров) системы на заданном временном интервале.

Метод достижения цели, предложенный в статье, заключается во введении новой графо-логической модели ОТС, которую будем называть гибридной индикаторной сетью. Общим у такой сети и сети Петри [10, 11, 12], включая множество ее различных модификаций, является то, что в основе той и другой модели лежит двудольный граф. Вершины-позиции этого графа, изображаемые кружками, сопоставлены с переменными, принимающими численное или балльное значение. Вершины-переходы, изображаемые черточками или прямоугольниками, интерпретируются как события, изменяющие значения входных/выходных позиций перехода. Позиции соответствуют показателям ОТС (состояние системы и ее компонентов, ресурсы, внешние воздействия, реакции системы на протекающий в ней процесс, выпускаемая продукция и т.д.). Значения позиций могут сохраняться в течение нескольких тактов – промежутков между фиксированными моментами на временной шкале, переходы при возникновении соответствующих условий срабатывают мгновенно (в один и тот же момент).

Гибридная индикаторная сеть отличается от сети Петри как по форме описания, так и по механизму срабатывания переходов. Дуги графа, ведущие из входных позиций перехода в переход, помечаются так называемыми *индикаторными логическими функциями* [13, 14] (подробней будет разъяснено ниже). Если между переменными, соотнесенными вершинам графа, в данный момент имеют место заданные отношения (типа больше - меньше, равно и т.д.), то индикаторная функция, помечающая дугу, принимает единичное значение, и дуга активируется. В противном случае функция равна нулю, и дуга не активирована. Дуги графа, ведущие из перехода в выходные позиции, помечены логическими операторами, которые в момент срабатывания перехода присваивают выходным переменным заданные значения. Кроме того, переход нагружен булевой функцией, определенной на индикаторах всех входных дуг, и функцией, определяющей условия выбора выходных дуг при срабатывании перехода, если есть необходимость в таком выборе. Если переход «активирован по входу и детерминирован по выходу», и наступил какой-либо из фиксированных дискретных моментов на временной шкале, то переход срабатывает и изменяет значения переменных ОТС, находящихся под управлением логического оператора. Таким образом, происходит функционирование гибридной индикаторной сети, выполняющей роль дорожной карты ОТС. При этом в отличие от сетей Петри изменяются не только значения переменных, соотнесенных позициям сети, но может изменяться и конфигурация графа (при блокировании дуг). Гибридная

индикаторная сеть обладает большей выразительностью и вариабельностью, чем сеть Петри и ее модификации.

Построение гибридной индикаторной сети

Двудольный граф как статическая основа модели, задается в виде

$$G = \langle P, T, {}^*\alpha, \alpha^* \rangle,$$

где: $P = \{p_i, i=1, \dots, m\}$ – множество позиций графа, $T = \{t_i, i=1, \dots, n\}$ – множество переходов; ${}^*\alpha: T \rightarrow 2^P$, $\alpha^*: T \rightarrow 2^P$ – функции, задающие соответственно подмножества входных и выходных позиций перехода; 2^P – множество всех подмножеств P . Пример двудольного графа, заимствованный из [11], дан на рис 1, внешние переменные (имеют только выходные дуги) обозначены через x_1, x_2 , внутренние переменные (имеют входные и выходные дуги) – через p_1, \dots, p_4 .

Индикатором сравнения будем называть булеву переменную вида

$$z = (y_1 \# y_2),$$

где y_1, y_2 – переменные, одна из которых может быть константой, $\#$ – знак бинарного отношения, выражаемого множеством $\{=, \neq, >, \geq, <, \leq\}$. Индикатор принимает значение $z=1$, если выполняется отношение $\#$, и $z=0$, если не выполняется. Описание индикатора выделяется скобками. Формальное выражение, полученное путем применения конечное число раз к индикаторам сравнения логических операций конъюнкции (\wedge), дизъюнкции (\vee), отрицания (черта сверху), также является индикаторной формулой, принимающей значения 1 или 0.

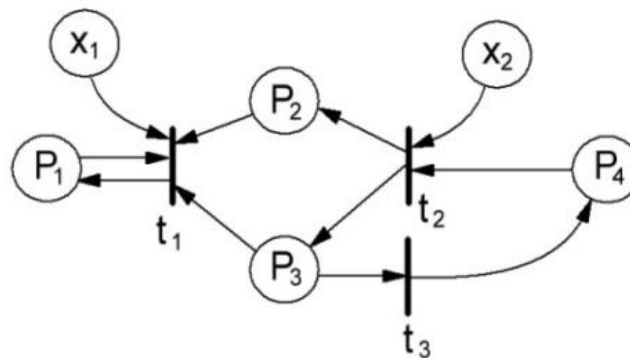


Рис 1. Пример двудольного графа

Сопоставление дугам двудольного графа индикаторных формул. Дуги графа будем выражать упорядоченной парой, состоящей из символа позиции и символа перехода, где левый символ соответствует началу дуги, а правый – ее концу. Индикаторные функции, помечающие дуги, обозначим через $\Phi_j(\bullet)$, $j=1, \dots, k$ – порядковый номер дуги графа.

Для графа на рис. 1 примем следующий набор индикаторных функций с аргументами-позициями, определенными на 10-балльной шкале:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1 t_1) &= (x_1 > 0) \wedge (x_1 \leq 10); \\ \Phi_2(p_1 t_1) &= ((p_1 > 1) \wedge (p_1 < 4)) \vee ((p_2 \geq 4) \wedge (p_3 \geq 4)); \\ \Phi_3(p_2 t_1) &= (p_2 \leq 3) \wedge (p_1 < 6); \\ \Phi_4(p_3 t_1) &= (p_3 < 4) \wedge (p_2 < 6); \\ \Phi_5(t_1 p_1) &= (p_1 > 2) \wedge ((p_2 > 5) \vee (p_3 > 5)); \\ \Phi_6(x_2 t_2) &= (x_2 > 0) \wedge (x_2 \leq 10); \\ \Phi_7(p_4 t_2) &= (p_4 < 8) \wedge (x_2 > 2); \\ \Phi_8(t_2 p_2) &= (p_2 < 5); \\ \Phi_9(t_2 p_3) &= (p_3 < 5); \\ \Phi_{10}(p_3 t_3) &= (p_3 \geq 3); \\ \Phi_{11}(t_3 p_4) &= (p_4 \geq 4).\end{aligned}$$

Индикаторные логические формулы переходов. Для каждого перехода t графа составляется индикаторная логическая формула, отображающая его динамику и результат срабатывания:

$$F(t) = L[\Phi(\tau)] \rightarrow O[P(\tau/\tau+1)],$$

в которой приняты следующие обозначения: F - продукция (нотация ЕСЛИ-ТО, изображенная горизонтальной стрелкой); $L[\Phi]$ - логическая функция над индикаторами из множества Φ (пометками дуг) в момент τ , $O[\bullet]$ - логический оператор изменения значений позиций из множества P при смене момента τ на момент $\tau+1$. В рассматриваемом примере имеем формулы:

$$\begin{aligned}F(t_1) &= ((\Phi_2 \wedge \Phi_3) \vee (\Phi_1 \wedge \Phi_4)) \rightarrow (p_1(\tau+1) = p_1(\tau) + 1); \\ F(t_2) &= (\Phi_6 \wedge \Phi_7) \rightarrow (p_2(\tau+1) = p_2(\tau) + 1) \wedge (p_3(\tau+1) = p_3(\tau) + 1); \\ F(t_3) &= \Phi_{10} \rightarrow (p_4(\tau+1) = p_4(\tau) + 2).\end{aligned}$$

Вышеприведенное формальное описание пометок дуг Φ и механизма срабатывания переходов F дает алгебраическое представление гибридной индикаторной сети.

Моделирование гибридных индикаторных сетей

Результатом моделирования гибридной индикаторной сети является последовательность упорядоченных наборов значений переменных, сопоставленных внутренним позициям сети, на дискретной временной шкале $\tau = 0, 1, \dots, N$. Считаются заданными начальные условия – значение внешних и внутренних позиций в момент $\tau=0$, набор целевых значений внутренних переменных и нормативная продолжительность эксперимента моделирования, выраженная числом тактов. Результат моделирования считается успешным, если за время, не превосходящее нормативное, достигнут целевой набор, причем в ходе процесса имитации ни одна внутренняя переменная не вышла за пределы 10-балльного интервала (0 – 10).

Рассмотрим алгоритм моделирования динамики гибридной индикаторной сети на примере, описанном приведенными в предыдущем разделе системами уравнений типа Φ и типа F . Описание будем иллюстрировать таблицей 1.

Таблица 1 - Моделирование гибридной индикаторной сети

τ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t		$t_1 t_2 t_3$	t_3	t_3	$t_1 t_2 t_3$	$t_1 t_2 t_3$	$t_1 t_3$	t_3	$t_1 t_3$	t_3	t_3
X_1	0	3	3	5	1	2	0	0	0	0	0
X_2	0	0	0	2	4	5	0	0	0	0	0
P_1	0	0	1	1	1	2	3	4	4	5	5
P_2	0	0	1	1	1	2	3	3	3	3	3
P_3	3	3	4	4	4	5	6	6	6	6	6
P_4	0	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Φ_1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Φ_2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Φ_3	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Φ_4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Φ_5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Φ_6	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Φ_7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Φ_8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Φ_9	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Φ_{10}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Φ_{11}	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

В верхней строке таблицы дана временная шкала, где столбцы соответствуют тактам, а вертикальная линия – левая граница столбца соотнесена дискретному моменту τ . Во 2-ю сверху строку вписываются определенные при моделировании переходы, инициирующие наступление данного такта. Далее (при движении сверху вниз) следует сектор X внешних переменных. Они, также как внутренние переменные, измеряются в 10-балльной системе счисления, но моменты их изменения не определены и носят случайный характер. Следующий сектор P соответствует внутренним переменным, а под ним располагается сектор Φ , в который вносятся логические значения 1 или 0, характеризующие пометки дуг. Заполнение таблицы производится по тактам, в направлении слева направо.

Алгоритм моделирования гибридной индикаторной сети работает следующим образом. В начальном такте $\tau=0$ система находится в равновесном состоянии, когда не активирован ни один переход (левая клетка строки t пуста). Вывести систему из равновесия может только изменение значения внешних переменных. В любом такте τ , где $(\tau > 0) \wedge (\tau \leq N)$, причем предыдущий такт $\tau-1$ характеризовался срабатыванием переходов (соответствующая клетка в столбце $\tau-1$ не пуста), выполняется последовательность действий:

- 1) Изменяются значения внешних переменных в секторе X согласно реальной ситуации;
- 2) Изменяются значения внутренних переменных из сектора P , инициированные логическими операторами вследствие срабатывания переходов в предыдущем такте $\tau-1$ (см. приведенную в предыдущем разделе статьи систему уравнений типа F , отображающих причинно-

- следственную связь между логическими условиями и логическими операторами в модели гибридной индикаторной сети);
- 3) Значения всех внешних и внутренних переменных, как измененных, так и неизмененных, переносим из столбца $\tau-1$ в столбец τ ;
 - 4) В столбце τ в секторе Φ вычисляем логические значения всех функций Φ_j по данным выше уравнениям на основе значений внешних и внутренних переменных в этом столбце;
 - 5) По результатам п. 4 на основе системы уравнений из предыдущего раздела статьи определяем переходы, активизированные в такте τ , и заносим их в клетку во 2-й строке столбца τ .

Примечание. Предложенная модель в отличие от сети Петри разрешает одновременное срабатывание нескольких переходов. Во избежание противоречий между значениями выходных позиций этих переходов, применяются условия корректности (ограничения на модель), которые здесь не рассматриваются.

Проиллюстрируем действия алгоритма на примере столбца $\tau=2$, для которого в предыдущем столбце были активированы все переходы. В секторе X значения внешних переменных x_1, x_2 были перенесены без изменения из предыдущего столбца. В секторе P под воздействием логических операторов значение внутренних переменных p_1, p_2, p_3 увеличено на 1, а переменной p_4 на 2. В секторе Φ значения функций Φ_j пересчитаны в соответствии с новыми значениями аргументов. Из переходов в соответствии с формулами «логическое условие – оператор» активирован только переход t_3 .

Результатом моделирования, отображенном в таблице 1, является динамика внутренних переменных p_1, \dots, p_4 на временном интервале (горизонте) $\tau = 0, 1, \dots, 10$. Переменные p_1, p_2, p_3 находятся в допустимом диапазоне, переменная p_4 в такте $\tau=7$ выходит за верхнюю границу значения внутренней переменной при моделировании и далее продолжает расти.

Заключение

В работе, в рамках методологии дорожных карт [13, 14], предложены гибридные индикаторные сети как формальный инструмент для предварительного имитационного моделирования и анализа поведения создаваемых сложных систем различного назначения, в том числе организационно-технических систем.

Все большее распространение в мире получает точка зрения, согласно которой разворачиванию больших, сложных и дорогостоящих проектов должно предшествовать создание группы моделей. Первичными в этой группе являются, несомненно, компьютерные модели, позволяющие лучше понять предложенную идею, принципы функционирования и управления задуманной системой, ее конкурентные преимущества. Это дает виртуальный базовый запас знаний, на основе которого уже можно приступить к созданию фрагментарных материальных, организационных и иных моделей, расширяющих и углубляющих упомянутый запас знаний. И, наконец, выйти на генеральную

комплексную (компьютерно-материально-организационную) модель как основу проекта системы. В такой комплексной стратегии гибридные индикаторные сети оказываются на одном из начальных мест в цепочке создания новых эффективных систем в различных предметных областях. Вместе с тем, как можно судить по литературе, теория дорожных карт только начинает формироваться (по крайней мере, в России). Автор предлагает читателю очень скромную работу на эту тему, надеясь вместе с тем на возможность ее дальнейшего полезного развития.

При имитационном моделировании на основе гибридных индикаторных сетей может быть выявлен ряд угроз [15], устранение которых на этапе рабочего проектирования, а тем более апробации и эксплуатации, обойдется значительно дороже, а при эксплуатации вообще чревато поломкой, аварией и даже катастрофой. Примеры угроз: помимо проиллюстрированного выше выхода параметров за допустимые пределы, «зависание» (блокирование) работы системы при недостаточности ресурсов, заикливание – повторение некоторой последовательности состояний системы неограниченное число раз, недопустимое превышение запланированных сроков создания системы, и т.д.

Литература

1. Кузык Ю. Что такое дорожная карта // Наука и технологии России - STRF.ru, 18.05.2009. URL: http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=223&d_no=20108#.VavbJrXQRW9 (дата обращения 12.07.2015).
2. Джемала М. Корпоративная «дорожная карта» // Российский журнал менеджмента. 2008. Т. 6. № 4.
3. Карасев О. И. Методология разработки технологических дорожных карт. – М.: ИСИЭЗ, 2009. URL: <http://www.slideshare.net/ssuser7c02b4/karasev> (дата обращения 12.07.2015).
4. Лидин К. Л. Многообразие построения дорожных карт, 2006. URL: <http://pandia.ru/text/77/396/40434.php> (дата обращения 12.07.2015).
5. Зыков А. А. Основы теории графов. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
6. Харари Ф. Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 301 с.
7. Гильберт Д., Аккерман В. Основы теоретической логики / пер. с нем. Ерофеева А. А. – М.: Государственное издательство Иностранной литературы, 1947. – 304 с.
8. Клини С. К. Математическая логика. – М.: Мир, 1973. – 480 с.
9. Кузнецов О. П. Дискретная математика для инженера. – СПб: Лань, 2007. – 400 с.
10. Котов В. Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
11. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
12. Юдицкий С. А., Магергут В. З. Логическое управление дискретными процессами. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
13. Юдицкий С. А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. – М.: Синтег, 2012. – 112 с.

14. Юдицкий С. А. Триадно-сетевые дорожные карты развития систем // Управление большими системами, 2013, № 42.
15. Дернер Д. Логика неудачи. – М.: Смысл, 1997. – 243 с.

References

1. Kuzyk Iu. What is road map. *Science and technologies of Russia STRF.ru*, 18.05.2009. Available at: http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=223&d_no=20108#.VavbJrXQRW9 (accessed 12 July 2015) (in Russian).
2. Jemala M. Corporate Roadmapping. The Innovative Tool of Corporate Knowledge Management. *Russian Management Journal*, 2008, vol. 6, no. 4 (in Russia).
3. Karasev O. I. *Metodologiya razrabotki tekhnologicheskikh dorozhnykh kart* [Methodology Development of Technology Roadmaps]. Moscow, Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, 2009. Available at: http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=223&d_no=20108#.VavbJrXQRW9 (accessed 12 July 2015) (in Russian).
4. Lidin K. L. *Mnogoobrazie postroeniia dorozhnykh kart* [The Diversity of the Construction of Roadmaps], 2006. Available at: <http://pandia.ru/text/77/396/40434.php> (accessed 12 July 2015) (in Russian).
5. Zykov A. A. *Osnovy teorii grafov* [The Basics of Graph Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 384 p. (in Russian).
6. Kharari F. *Teoriia grafov* [Graph Theory]. Moscow, Mir Publ., 1973. 301 p. (in Russian).
7. Hilbert D., Ackermann W. *Grundzuge Der Theoretischen Logik* [Principles of theoretical logic]. New York, 1946.
8. Klini S. K. *Matematicheskaya logika* [Mathematical Logic]. Moscow, Mir Publ., 1973. 480 p (in Russian).
9. Kuznetsov O. P. *Diskretnaya matematika dlia inzhenera* [Discrete Mathematics for Engineer]. St. Petersburg, Lan' Publ, 2007. 400 p. (in Russian).
10. Kotov V. E. *Seti Petri* [Petri Nets]. Moscow, Nauka Publ, 1984, pp. 11-58 (in Russian).
11. Peterson James L. *Petri net theory and the modeling of systems*. The University of Texas at Austin, 1981.
12. Iuditskii S. A., Magergut V. Z. *Logicheskoe upravlenie diskretnymi protsessami* [Logical Control of Discrete Processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987 (in Russian).
13. Iuditskii S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnykh triadnykh setei* [Modeling the Dynamics of Multi-Agent Triadic Nets]. Moscow, Sinteg Publ., 2012 (in Russian).
14. Iuditskii S. A. The triadic-networked roadmaps for systems development. *Large-scale Systems Control*, 2013, vol. 42 (in Russian).
15. Derner D. *Logika neudachi* [The logic of failure]. Moscow, Smysl Publ., 1997. 243 p. (in Russian).

Статья поступила 11 июля 2015 г.

Информация об авторе

Юдицкий Семен Абрамович - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. Область научных интересов: моделирование организационно-технических систем. Тел. +7 495 339 59 10. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Адрес: Россия, 117997, Москва ул. Профсоюзная, д. 65.

“Road Map” with Decision-Making by Hybrid Indicated Net

Iuditskii S. A.

Problem statement: Currently the “road map” has been widely disseminated for decision-making for achieving the global objectives of development of organizational and technical systems. However, the descriptive text style prevails in the majority of works. The consequences of this presentation are: the ambiguity models; constraints in the transformation of the formal component of the roadmap. These drawbacks can be overcome through the use of road network maps based on the graph of the logic description is an organic combination of graph theory and mathematical logic (Boolean algebra). **Purpose:** the development of a formal net graph-logic model roadmap of organizational-technical system that displays the dynamics of indicators (parameters) of the system at a given time interval. **Methods:** creation of new graph-logical models of organizational and technical systems, which we will call hybrid flat network. **Novelty.** Hybrid indicated net distinguish from Petri nets by mechanism of triggering of transitions, by introducing additional conditions for their operation, as defined entered in the model indicator logical functions. **Results** “road map” of organizational-technical system is built based on the hybrid indicated net more expressive and varied (compared to standard Petri nets). In a hybrid indicated net configuration of graph is changed by applying a logical indicator function, determining the conditions for triggering or blocking of transitions in the net. The author cites the example of construction and application of hybrid indicated net to analyze the behavior of organizational and technical systems.

Key words: road map, organizational-technical system, Petri nets, position and transition, Hybrid indicated net, graph-logic description, Boolean algebra, indicator-logical function.

Information about Author

Iuditskii Semen Abramovich - Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor, Senior Research Officer of Institute of Control Sciences RAS. Field of research: modeling of organizational and technical systems. Tel.: +7 495 339 59 10. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Address: Russia, 117997, Moscow, Profsoyuznaya str., 65.