

Mathematical Simulation of Modes and Characteristics of Asynchronous Motors under Asymmetrical Power Supply

Malyar V.S., Hamola O.Ye., Maday V.S, Vasylychshyn I.I.

Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine

Abstract. The purpose of this article is to develop a method and algorithm for the calculation of the steady-state mode and static characteristics of the squirrel-cage asynchronous motors that are supplied by a three-phase network with an asymmetrical voltage system. The aim is achieved by developing a method where the mathematical model of the motor takes into account the saturation of the magnetic core and the current displacement in the short-circuited rotor bars. Magnetization characteristics of the main magnetic flux and the leakage fluxes paths are used to account for the saturation. To account for the current displacement in the rotor winding the bars are divided into several layers throughout the height, resulting in a number of windings on the rotor with mutual inductive couplings. In the mathematical model, the processes in the asynchronous motor are described by a system of the nonlinear differential equations of electromagnetic equilibrium, composed in the fixed three-phase coordinate axes. The solution of this system in the steady-state mode is the periodic dependence of the currents, which are determined by solving the boundary problem. For this purpose, their algebraization is carried out by approximation of the periodic dependences at the nodes' grid of the period of repeatability of the process by the third order splines. The solution of the problem is to determine the nodal values of coordinates on the period from the obtained nonlinear system of algebraic equations. For this purpose, the continuation method and iterative refinement by the Newton method were used. Calculation of the static characteristics was performed by the differential method.

Keywords: asynchronous motor, three-phase coordinate system, magnetic saturation, current displacement, boundary problem, spline approximation, parameter continuation method.

DOI: 10.5281/zenodo.3239128

Modelarea matematică a regimurilor și caracteristicilor motoarelor asincrone cu alimentare asimetrică

Malyar V.S., Gamola O.E., Madai V.S., Vasylchishin I.I.

Universitatea Națională "Politehnica Lviv"
Lviv, Ucraina

Rezumat. Articolul este dedicat dezvoltării unei metode și a unui algoritim pentru calculul regimurilor staționare și a caracteristicilor statice ale motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit, care sunt alimentate de la o rețea trifazată cu un sistem de tensiune asimetric. Acest obiectiv este realizat prin dezvoltarea unei metode în care modelul matematic al motorului ia în considerare saturarea miezului magnetic și deplasarea curentului în tijele rotorului scurtcircuitat. Pentru a ține seama de saturație, se utilizează caracteristicile magnetizării prin fluxul magnetic principal și căile fluxurilor de dispersare ale bobinelor statorului și rotorului, calculate pe baza datelor geometrice ale motorului. Pentru a ține cont de fenomenul de deplasare a curentului în bobina rotorului, tijele, împreună cu inelele de scurtcircuit, sunt împărțite în mai multe straturi în înălțime, rezultând că există mai multe înfășurări pe rotor, între care există conexiuni inductive reciproce atât datorită fluxului principal, cât și fluxului de dispersare. Bobina reală scurtcircuitată este redusă la metoda echivalentă în trei faze. În modelul matematic dezvoltat, procesele într-un motor asincron sunt descrise de un sistem de ecuații diferențiale neliniare de echilibru electromagnetic, compilate în axe fixe trifazate de coordonate. Soluția acestui sistem în regim staționar este dependența periodică a curenților, care sunt determinate prin rezolvarea unei probleme de valoare a limitei. Pentru aceasta, algebrarea lor se realizează prin aproximarea dependențelor periodice pe grila de noduri a perioadei de recurență a procesului prin splinele celei de-a treia ordine, care permit rezolvarea problemei cu un număr relativ mic de noduri per perioadă.

Cuvinte-cheie: motor asincron, sistem trifazat de coordonate, saturație, deplasarea curentului, problemă de valoare limită, aproximație spline, metoda de continuare a parametrului.

Математическое моделирование режимов и характеристик асинхронных двигателей при несимметричном питании

Маляр В.С., Гамола О.Е., Мадай В.С., Васильчишин И.И.

Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов, Украина

Аннотация. Целью статьи является разработка метода и алгоритма расчета установившихся режимов и статических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, которые питаются от

трехфазной сети с несимметричной системой напряжений. Поставленная цель достигается за счет разработки метода, где в математической модели двигателя учитывается насыщение магнитопровода и вытеснение тока в стержнях короткозамкнутого ротора. Для учета насыщения используются рассчитанные на основе геометрических данных двигателя характеристики намагничивания основным магнитным потоком и путей потоков рассеяния обмоток статора и ротора. Для учета явления вытеснения тока в обмотке ротора стержни вместе с короткозамыкающими кольцами разбиваются по высоте на несколько слоев, в результате на роторе получаем несколько обмоток, между которыми существуют взаимоиндуктивные связи как за счет основного потока, так и потоков рассеяния. Реальная короткозамкнутая обмотка приводится к эквивалентной трехфазной по общепринятой методике. В разработанной математической модели процессы в асинхронном двигателе описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений электромагнитного равновесия, составленных в неподвижных трехфазных координатных осях. Решением этой системы в установившемся режиме являются периодические зависимости токов, которые определяются путем решения краевой задачи. Для этого осуществляется их алгебраизация путем аппроксимации периодических зависимостей на сетке узлов периода при сравнительно небольшом количестве узлов на периоде. Решение задачи как краевой дает возможность решить задачу во вневременной области и сводится к решению нелинейной системы алгебраических уравнений, неизвестными в которых являются узловые значения координат на периоде. Для решения нелинейной системы алгебраических уравнений используется метод продолжения по параметру и итерационное уточнение методом Ньютона. Расчет статических характеристик выполняется дифференциальным методом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, трехфазная система координат, насыщение, вытеснение тока, краевая задача, сплайн-аппроксимация, метод продолжения по параметру.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании асинхронных двигателей (АД) и электроприводов на их основе необходимо проверять их эксплуатационные свойства как в симметричных установившихся режимах работы, так и в динамических. При этом первоочередной задачей является расчет статических характеристик, на основании которых можно определить граничные механические и тепловые нагрузки двигателя с целью формулирования ограничений, которые являются основанием для разработки системы защиты и автоматики при их эксплуатации. Несмотря на то, что при проектировании расчет АД выполняют для работы в симметричном режиме, в практике их эксплуатации зачастую возникают несимметричные режимы. Отметим, что трехфазная система считается симметричной, когда напряжения и токи каждой из фаз имеют одинаковую амплитуду, а сдвиг амплитуды по фазе равен 120° . Если не выполняется хотя бы одно из этих условий, то система считается несимметричной. Электростанции обычно не являются источником дисбаланса, а напряжения синхронных генераторов, питающих линии электропередачи, обычно симметричны, однако в сетях низкого напряжения вследствие наличия различных однофазных потребителей обеспечить симметричность

трудно. Появлению несимметрии способствуют многие маломощные источники электрической энергии, например, солнечные батареи, которые присоединяются к распределительной сети низкого напряжения посредством однофазных электронных инверторов. Предельным видом несимметрии является аномальные состояния системы, типичными примерами которых являются повреждения цепей фаза-земля, фаза-фаза. Поскольку асимметрия напряжений относится к важным параметрам качества электроснабжения, в данной статье рассматриваются несимметричные режимы питания АД.

Несимметрия напряжений вызывает несимметрию токов, что может обусловить, перегрев как отдельных элементов, так и всего двигателя. Она оказывает негативное воздействие на работу всего оборудования, поэтому представляет собой проблему качества электроснабжения и приводит к дополнительным потерям [1,2]. Работа АД с несбалансированной системой напряжений приводит к отклонению рабочих характеристик от номинальных [5–9].

Проблема влияния асимметрии напряжений питания АД на механические, тепловые и им сопутствующие процессы является предметом многих исследований [1–11]. Методы исследований развивались и совершенствовались на протяжении многих

десятилетий вместе с развитием теории электрических машин, и в частности АД. Исторические аспекты решения этой проблемы достаточно полно изложены в [3], а основные экономические проблемы – в работе [1].

Большинство исследований режимов АД, работающих в несимметричных режимах питающего напряжения, выполнены с помощью программного комплекса Matlab/Simulink на основе метода симметричных составляющих [3, 10, 17]. Однако в его основе лежит принцип суперпозиции, который имеет теоретическое обоснование только для линейных систем. Поскольку вследствие насыщения магнитной системы АД является нелинейным объектом, полученные с применением линейной теории результаты расчета требуют экспериментальной проверки в каждом конкретном случае, поэтому до сих пор в литературе находят применение экспериментальные методы исследований [4, 5]. На основе метода симметричных составляющих можно объяснить качественную картину явлений рабочего процесса в несимметричном режиме питания АД, исходя из теории вращающихся в противоположные стороны магнитных полей. Несмотря на методологическое значение метода, результаты расчетов режимов и характеристик с его использованием можно рассматривать лишь как приближенные.

Основой большинства методов исследования процессов в АД являются адаптированные до конкретно решаемых задач классические [4, 10] либо модифицированные схемы замещения [10, 12, 13, 14], в основе которых лежат методы линейной теории электрических машин. При этом параметры схемы замещения либо принимают неизменными, либо такими, что изменяются за определенными наперед заданными законами [15, 16]. В динамических режимах АД переменными являются не только индуктивности обмоток, но вследствие вытеснения тока и активные сопротивления стержней обмотки ротора. Учет насыщения, равно как и вытеснения токов, с помощью различных коэффициентов, не решает проблемы, поскольку для каждого случая необходимо проверять достоверность полученных с их использованием результатов расчета.

Наиболее достоверные результаты расчета можно получить на основе использования теории электромагнитного поля, однако эти методы весьма сложны, требуют – и оперативной памяти компьютера, поэтому их можно использовать только для проверки упрощенных методик.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АД

Выбор математической модели АД зависит от тех задач, которые необходимо решать с ее использованием. В отечественной и зарубежной литературе известно большое количество различной сложности и адекватности математических моделей асинхронных машин, начиная от простейших в виде классических схем замещения, которые приводятся в каталогах и паспортных данных двигателей, до сложных математических моделей, разработанных с позиций уравнений Максвелла электромагнитного поля [18–21]. Первые из них весьма упрощенные и пригодные только для расчета симметричных номинальных установившихся режимов, поскольку не учитывают ряда важных факторов, влияющих на поведение АД в различных важных для практики эксплуатационных режимах. К таким относится изменение индуктивных параметров вследствие насыщения и изменение активных сопротивлений роторных контуров вследствие вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора. Известны многочисленные методы адаптации схем замещения к расчету различных режимов, но они требуют экспериментальной проверки на достоверность полученных результатов в каждом конкретном случае. Полевые математические модели лишены этих недостатков, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и, кроме того, время расчета с их использованием для решения большинства задач неприемлемо.

Так как в разработанной математической модели рассматриваются режимы работы при несимметричном питании обмотки статора, то преобразование к ортогональным осям неприемлемо, поэтому задачу необходимо решать в фазных координатах, которые дают возможность учесть несимметрию статорной цепи. В то же время нет необходимости использовать вращающиеся физические трехфазные координаты, которые

значительно усложняют трудоемкость решения задачи. Использование неподвижной трехфазной системы координат дает возможность значительно упростить решение задачи без уменьшения точности результатов расчета.

УРАВНЕНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

В стационарных несимметричных режимах АД потокосцепления и токи изменяются за периодическими законами. Период их изменения определяется периодом изменения приложенного напряжения.

В симметричном режиме путем преобразования координат дифференциальные уравнения можно свести к нелинейным системам алгебраических уравнений, однако в случае асимметрии уравнения стационарных режимов, которыми они описываются, не могут быть сведены к алгебраическим. Анализ таких режимов представляет более сложную задачу.

Рассмотрим установившийся режим работы АД при заданном скольжении s ротора. Уравнения электрического равновесия статорной цепи без нейтрального провода, составленные за первым и вторым законами Кирхгофа, в неподвижных трехфазных осях имеют вид

$$\begin{aligned} i_A + i_B + i_C &= 0; \\ \frac{d\psi_{AB}}{dt} &= u_{AB} - r_A i_A + r_B i_B; \\ \frac{d\psi_{BC}}{dt} &= u_{BC} - r_B i_B + r_C i_C, \end{aligned} \quad (1a)$$

где $u_{AB} = u_A(t) - u_B(t)$; $u_{BC} = u_B(t) - u_C(t)$; $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ – приложенные к фазам статора несинусоидальные напряжения; ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокосцепления контуров статора; $i_A, i_B, i_C, r_A, r_B, r_C$ – токи и активные сопротивления фаз; $\psi_{AB} = \psi_A - \psi_B$; $\psi_{BC} = \psi_B - \psi_C$.

Уравнения электрического равновесия роторных контуров в неподвижных трехфазных осях при условии разделения по высоте каждого стержня короткозамкнутого ротора на k элементарных имеют вид

$$i_{a1} + i_{b1} + i_{c1} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{a_1 b_1}}{dt} &= -\alpha(\psi_{b_1} - 2\psi_{c_1} + \psi_{a_1}) - r_{a_1} i_{a_1} + r_{b_1} i_{b_1}; \\ \frac{d\psi_{b_1 c_1}}{dt} &= -\alpha(\psi_{c_1} - 2\psi_{a_1} + \psi_{b_1}) - r_{b_1} i_{b_1} + r_{c_1} i_{c_1}; \\ &\vdots \\ i_{a_n} + i_{b_n} + i_{c_n} &= 0; \\ \frac{d\psi_{a_k b_k}}{dt} &= -\alpha(\psi_{b_k} - 2\psi_{c_k} + \psi_{a_k}) - r_{a_k} i_{a_k} + r_{b_k} i_{b_k}; \\ \frac{d\psi_{b_k c_k}}{dt} &= -\alpha(\psi_{c_k} - 2\psi_{a_k} + \psi_{b_k}) - r_{b_k} i_{b_k} + r_{c_k} i_{c_k}, \end{aligned} \quad (1b)$$

где $\psi_{\xi \eta}, i_{\xi \eta}, r_{\xi \eta}, (\xi = a, b, c; \eta = 1, \dots, k)$; – потокосцепления, токи и активные сопротивления эквивалентных контуров ротора; $\alpha = \omega / \sqrt{3}$; $\omega = \omega_0(1-s)$ – угловая скорость вращения ротора в эл. рад/с; ω_0 – циклическая частота первой гармоники напряжения питания обмотки статора; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – скольжение ротора; $\psi_{a_\xi b_\xi} = \psi_{a_\xi} - \psi_{b_\xi}$; $\psi_{b_\xi c_\xi} = \psi_{b_\xi} - \psi_{c_\xi}$.

С целью сокращения изложения материала перейдем к матричной форме записи уравнений. Для этого сформируем векторы потокосцеплений, токов контуров и приложенных напряжений

$$\begin{aligned} \vec{\psi} &= (\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_{a1}, \psi_{b1}, \psi_{c1}, \dots, \psi_{ak}, \psi_{bk}, \psi_{ck})^*; \\ \vec{i} &= (i_A, i_B, i_C, i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}, \dots, i_{ak}, i_{bk}, i_{ck})^*; \\ \vec{u} &= (u_{AB}, u_{BC}, 0, \dots, 0)^*. \end{aligned}$$

Систему уравнений (1a), (1b) в матрично-векторной форме можно представить в виде одного векторного

$$M_1 \frac{d\vec{\psi}}{dt} = \vec{u} - M_2 \vec{\psi} - R \vec{i}; \quad \vec{\Gamma} \vec{i} = 0, \quad (3a, b)$$

где

$$\begin{aligned} M_1 &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ & 1 & -1 & \\ & & & \dots \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ & 1 & -1 & \end{bmatrix} \right); \\ M_2 &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \alpha & \alpha & -2\alpha & & \alpha & \alpha & -2\alpha \\ -2\alpha & \alpha & \alpha & & -2\alpha & \alpha & \alpha \end{bmatrix}, \dots \right); \\ R &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} -r_A & r_B & & \\ & -r_B & r_C & \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -r_{a_1} & r_{b_1} & & \\ & -r_{b_1} & r_{c_1} & \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} -r_{a_k} & r_{b_k} & & \\ & -r_{b_k} & r_{c_k} & \end{bmatrix} \right); \\ \vec{\Gamma} &= \text{diag} \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right) \text{ – блочно-диагональные матрицы.} \end{aligned}$$

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Процессы в АД при питании несимметричной системой напряжений изменяются с периодом T , который определяется периодом изменения напряжения питания, то есть установившийся режим является динамическим. Задача его расчета состоит в определении не совокупности координат, а их временных зависимостей в течение периода, то есть результатом расчета являются функциональные периодические изменения координат [28–30]. Задача расчета этих зависимостей намного сложнее, однако, располагая ими можно с высокой достоверностью анализировать как последствия несимметричного режима работы, так и его допустимые пределы.

Обычно краевые задачи рассматривают для дифференциальных уравнений второго порядка и выше [27], но учитывая, что краевые условия в данном случае определяются не численными значениями на краях периода, а их периодическими зависимостями $\vec{\psi}(t) = \vec{\psi}(t + T)$; $\vec{i}(t) = \vec{i}(t + T)$; $\vec{u}(t) = \vec{u}(t + T)$.

Задачу определения периодических изменений координат можно рассматривать как краевую для дифференциальных уравнений первого порядка.

Для решения краевой задачи необходимо осуществить переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим путем аппроксимации временных зависимостей координат на периоде. Среди многих способов аппроксимации наиболее эффективными являются проекционные методы, сущность которых состоит в аппроксимации координат на сетке узлов базисными функциями: полиномами [27], тригонометрические функции [28] и др. Как показано в [29], наиболее эффективно аппроксимацию можно осуществить с использованием сплайн-аппроксимаций, которые дают возможность получить зависимости с минимальной кривизной.

Построение сплайна – это численно устойчивый процесс, поскольку матрица коэффициентов при этом симметричная и имеет диагональное преобладание. Для его построения разделим период T изменения координат на n участков $h_j = t_j - t_{j-1}$ ($j = \overline{1, n}$)

и каждую компоненту векторов \vec{u} ($\vec{u} = \vec{\psi}, \vec{i}, \vec{u}$) представим сплайном третьего порядка вида

$$y(t) = a_j + b_j(t_j - t) + c_j(t_j - t)^2 + d_j(t_j - t)^3,$$

где $j = (\overline{1, n})$ – номер участка; a_j, b_j, c_j, d_j – коэффициенты сплайна, соотношения между которыми определяются свойствами сплайн-функций [30]. Исходя из условий непрерывности сплайна и его первых двух производных, и учитывая, что

$$a_j = \psi_j; \quad b_j = -d\psi(t)/dt|_{t=t_j},$$

вытекающие из этого [29] соотношения между коэффициентами a_j, b_j, c_j, d_j , а также периодические краевые условия, получим алгебраический аналог уравнения (3а) в виде системы алгебраических уравнений

$$(H_c M_{1c} - M_{2c}) \vec{\Psi}_c = \vec{U}_c - R_c \vec{I}_c, \quad (4a)$$

где H_c – матрица перехода от континуального изменения координат на периоде к их узловым значениям, элементы которой определяются исключительно расстояниями между узловыми точками периода [29]; $M_{1c} = \text{diag}(M_1, \dots, M_1)$, $M_{2c} = \text{diag}(M_2, \dots, M_2)$ – диагональные матрицы, образованные из n матриц M_1 та M_2 соответственно; $\vec{\Psi}_c = (\vec{\psi}_1, \dots, \vec{\psi}_n)^*$, $\vec{I}_c = (\vec{i}_1, \dots, \vec{i}_n)^*$, $\vec{U}_c = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)^*$ – составные векторы, образованные из узловых значений потокосцеплений, токов контуров и приложенных напряжений; $R_c = \text{diag}(R_1, \dots, R_n)$ – диагональная матрица, образованная из матриц R .

Уравнения (3b), записанные для всех n узлов периода, дополняет систему (4а) до замкнутой

$$\vec{\Gamma}_c \vec{I}_c = 0, \quad (4b)$$

где $\vec{\Gamma}_c = \text{diag}(\Gamma, \dots, \Gamma)$ – диагональная матрица, состоящая из n матриц Γ .

Вследствие нелинейной зависимости потокосцеплений контуров от токов система алгебраических уравнений (4) нелинейная. Для ее решения используется метод Ньютона,

а нулевое приближение, которое обеспечивает сходимость итерационного процесса, можно получить методом продолжения по параметру [31].

Параметр введем путем умножения возмущающего воздействия – вектора \vec{U}_c приложенных напряжений – на ε , то есть приняв для каждой узловой точки

$$\vec{u}_j = \varepsilon \vec{u}_{jz},$$

где \vec{u}_{jz} – заданное значение напряжений в j -ом узле периода.

В результате получим нелинейную систему алгебраических уравнений, состоящую из уравнения

$$(H_c M_{1c} - M_{2c}) \vec{\Psi}_c + R_c \vec{I}_c = \varepsilon \vec{U}_{cz}; \quad \vec{\Gamma}_c \vec{I}_c = 0. \quad (5)$$

Изменение параметра ε от нуля до единицы эквивалентно наращиванию вектора приложенных напряжений от нуля до заданных значений, соответственно будут изменяться в функции ε узловые значения токов. Поскольку при $\varepsilon = 0$ векторы $\varepsilon \vec{u}_j$ в каждой узловой точке равны нулю, начальные условия (значения вектора \vec{I}_c) – нулевые.

В результате дифференцирования уравнений (5) по ε получим

$$G_c \frac{d\vec{I}_c}{d\varepsilon} = \vec{U}_{cz}, \quad (6)$$

где $G_c = \left(\frac{(H_c M_{1c} - M_{2c}) L_c - R_c}{\Gamma_c} \right)$ – матрица

Якоби системы (5).

Учитывая, нелинейную зависимость потокосцеплений от токов

$$\vec{\Psi}_c = \vec{\Psi}_c(\vec{I}_c), \quad (7)$$

в результате дифференцирования по ε получим

$$\frac{d\vec{\Psi}_c}{d\varepsilon} = \frac{\partial \vec{\Psi}_c}{\partial \vec{I}_c} \frac{d\vec{I}_c}{d\varepsilon} = L_c \frac{d\vec{I}_c}{d\varepsilon}.$$

Потокосцепление каждого контура в j -м узле зависит только от значения вектора \vec{i}_j токов в этом же узле, поэтому матрица L_c блочно-диагональная, а каждый блок

определяется значениями дифференциальных индуктивностей АД в j -м узле периода [31]

$$L_c = \text{diag}(L_1, \dots, L_n),$$

где

$$L_j = \begin{bmatrix} L_{SS_j} & L_{SR_{1j}} & \dots & L_{SR_{nj}} \\ L_{R_1S_j} & L_{R_1R_{1j}} & & L_{R_1R_{nj}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ L_{R_nS_j} & L_{R_nR_{1j}} & \dots & L_{R_nR_{nj}} \end{bmatrix}$$

– матрица, в которой:

$$L_{SS_j} = \begin{bmatrix} L_{AAj} - L_{BAj} & L_{ABj} - L_{BBj} & L_{ACj} - L_{BCj} \\ L_{BAj} - L_{CAj} & L_{BBj} - L_{CBj} & L_{BCj} - L_{CCj} \end{bmatrix}$$

$$L_{R_kS_j} = \begin{bmatrix} L_{a_kA_j} - L_{b_kA_j} & L_{a_kB_j} - L_{b_kB_j} & L_{a_kC_j} - L_{b_kC_j} \\ L_{b_kA_j} - L_{c_kA_j} & L_{b_kB_j} - L_{c_kB_j} & L_{b_kC_j} - L_{c_kC_j} \end{bmatrix}$$

$$L_{SR_{kj}} = \begin{bmatrix} L_{Aa_{kj}} - L_{Ba_{kj}} & L_{Ab_{kj}} - L_{Bb_{kj}} & L_{Aa_{kj}} - L_{Bc_{kj}} \\ L_{Ba_{kj}} - L_{Ca_{kj}} & L_{Bb_{kj}} - L_{Cb_{kj}} & L_{Bc_{kj}} - L_{Cc_{kj}} \end{bmatrix}$$

Интегрируя систему ДР (6) одним из численных методов, (это можно выполнить методом Эйлера за несколько шагов), что дает возможность получить периодические зависимости токов (и потокосцеплений) с некоторым приближением, обусловленным применением метода Эйлера, однако они достаточные для обеспечения сходимости итерационного процесса. Полученное значение вектора \vec{I}_c уточняем итерационным методом Ньютона, в котором поправка $\Delta \vec{I}_c^{(l)}$ определяется из системы линейных уравнений

$$W_c^{(l)} \Delta \vec{I}_c^{(l)} = Q^{(l)}, \quad (8)$$

где $Q^{(l)}$ – вектор невязок системы (5) при $\vec{I}_c = \vec{I}_c^{(l)}$.

Электромагнитный момент в трехфазной системе координат вычисляются в каждой узловой точке периода за формулой [31]

$$M_e = p_0 L_\mu \times \left((i_{\mu B} - i_{\mu C}) i_A + (i_{\mu C} - i_{\mu A}) i_B + (i_{\mu A} - i_{\mu B}) i_C \right) / \sqrt{3},$$

где p_0 – количество пар полюсов двигателя; $L_\mu = d\psi_\mu / di_\mu$ – индуктивность, которая определяется из основной кривой намагничивания; $i_{\mu A}$, $i_{\mu B}$, $i_{\mu C}$ – проекции изображающего вектора тока \vec{i}_μ на соответствующие оси координат, которые определяются по формулам: $i_{\mu A} = i_A + (i_{1a} + \dots + i_{ka})$; $i_{\mu B} = i_B + (i_{1b} + \dots + i_{kb})$; $i_{\mu C} = i_C + (i_{1c} + \dots + i_{kc})$.

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Изложенный выше алгоритм дает возможность рассчитать установившийся режим при заданном скольжении. Его можно использовать и для расчета статических характеристик как совокупности установившихся режимов. Однако более универсальным, и вместе с тем более эффективным, является дифференциальный метод расчета характеристик, сущность которого состоит в следующем. Полагая вектор приложенных напряжений неизменным и учитывая (7), запишем нелинейную систему (5) в виде одного векторного уравнения

$$D(\vec{I}) = 0. \quad (9)$$

Дифференцируем уравнение (9) по переменной η как параметру, в функции которого необходимо рассчитать многомерную характеристику. В результате получим новое дифференциальное уравнение, аргументом в котором является независимая переменная η

$$G_c \frac{d\vec{I}_c}{d\eta} = \frac{\partial D}{\partial \eta}. \quad (10)$$

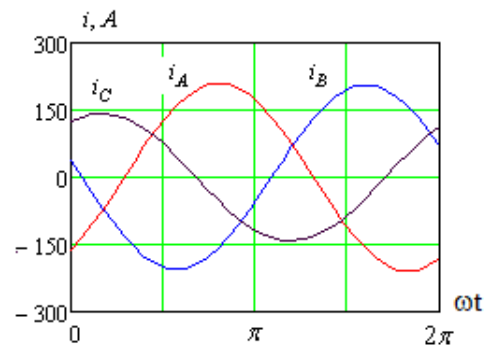
Статическую характеристику получим в результате интегрирования уравнения (10) численным методом. Таким образом, расчет характеристики состоит из двух этапов: на первом из них необходимо рассчитать установившийся режим при заданном скольжении (например, $s = 1.0$), а на втором заменив в уравнении (10) параметр η на s , проинтегрировать полученную систему вида (10) по s в требуемом диапазоне изменения.

В результате интегрирования получим многомерную статическую характеристику в виде зависимости узловых значений, координат от некоторой независимой переменной. В процессе интегрирования на каждом шагу или через несколько шагов можно выполнять итерационное уточнение методом Ньютона. Отметим, что матрица Якоби при вычислении поправок и при интегрировании одна и та же, что дает возможность объединить эти два этапа расчета в одном алгоритме.

В качестве примера, на рис.1–2 приведены выполненные по разработанному алгоритму расчеты установившихся режимов и статических характеристик двигателя 4A160S4Y3 ($P_n = 15 \text{ кВт}$; $U_n = 380/220 \text{ В}$). На рис. 1а показаны кривые токов фаз в установившемся режиме при скольжении $s = 0.5$ и приложенном к фазе C напряжении, равном половине номинального, а на рис 1б и 1в – главного потокосцепления ψ_μ и относительного значения электромагнитного момента M_e^* , соответственно.

На рис. 2 приведены статические характеристики электромагнитного момента при симметричной системе номинальных напряжений и в условиях указанной выше асимметрии.

Таким образом, разработан метод и алгоритм расчета установившихся режимов и статических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при несимметричном питании, которые отличаются от известных учетом насыщения магнитопровода и вытеснения токов в стержнях ротора, а также использованием сплайн-аппроксимации для приведения задачи к краевой и дифференциальной методе расчета характеристик.



а)

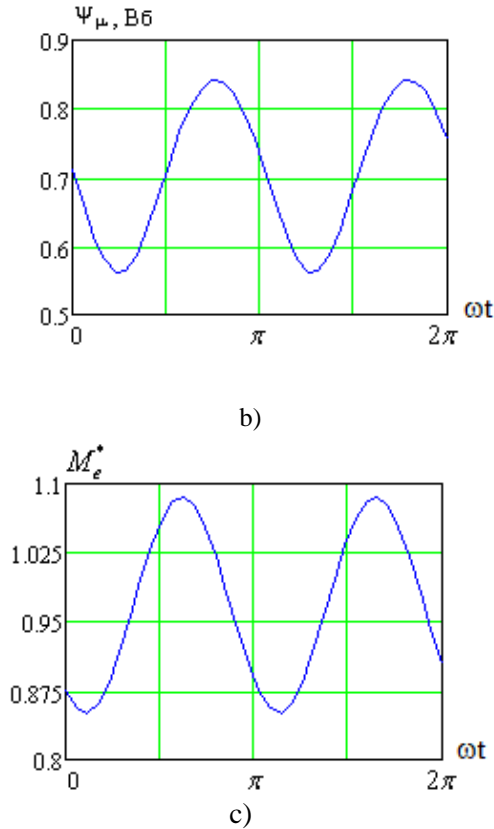


Рис. 1. Периодические зависимости токов фаз i_A, i_B, i_C , модуля вектора главного потокосцепления ψ_μ (b) и электромагнитного момента M_e^* (c) при скольжении $s = 0.5$ и напряжении в фазе C, равном половине номинального. **Fig. 1.** Periodic dependences of phase currents i_A, i_B, i_C , main flux linkage vector module ψ_μ (b) and electromagnetic moment M_e^* (c) on slip $s = 0.5$ and voltage in phase C, which is equal to half the nominal value.

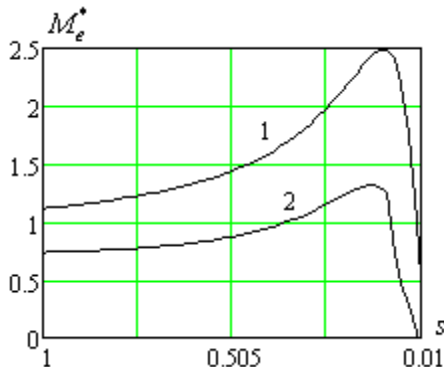


Рис. 2. Механические характеристики двигателя при симметричном питании (1) и при напряжении в фазе C, равном половине номинального (2). **Fig. 2.** Mechanical characteristics of the motor for symmetrical supply (1) and for phase C voltage, which is equal to half of the nominal (2).

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель и алгоритм расчета установившихся режимов и статических характеристик асинхронного электродвигателя при питании несимметричной системой напряжений. Задача решается в трехфазной системе координат, которая позволяет учитывать пофазную несимметрию питающих напряжений. Расчет выполняется во вневременной области путем решения краевой задачи, что значительно сокращает объем вычислений и может служить основой для выполнения оптимизационных расчетов. В результате расчета определяются кривые зависимости токов, электромагнитного момента, и других величин. Это дает возможность определять их гармонический состав, нагревание различных элементов двигателя и другие величины. При этом используется математическая модель АД, в которой учитывается насыщение магнитопровода и вытеснение токов в стержнях ротора.

Литература (References)

- [1] Faiz J., Ebrahimpour H, Pillay P. Influence of unbalanced voltage on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis. *IEEE Trans EC*, 2006, vol.47, pp.289-302.
- [2] Sandhu K.S., Chaudhary V. Steady State Modelling of Induction Motor Operating with Unbalanced Supply System. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2009, vol.8, no. 2, pp. 197-206.
- [3] Sandhu K.S., Chaudhary V. [Simulations of Three-Phase Induction Motor Operating with Voltage Unbalance]. [Proc. of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08)]. Venice, Italy, November 21-23, 2008, pp. 273-279.
- [4] Quisque, E.C., Lopez-Fernandez X.M., Mendes A.M.S, Marques A.J., Palacios J.A. [Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance]. [Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference]. IEEE Xplore Press, Niagara Falls, Canada, May 2011, 15-18, pp. 908-912.
- [5] Temiz I., Akuner C., Calik H. Analysis of Balanced Three-Phase Induction Motor Performance under Unbalanced Supply using Simulation and Experimental Results, *Electronics*

- and *Electrical Engineering*, 2011, no. 3(109), pp. 31-45.
- [6] Wang Y.J. Analytical study of study state performance three-phase induction motor. *IEEE Power Engineering Society*, 2000, Singapore, pp. 23-27.
- [7] Wang Y.J. Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor, *IEEE Trans. On EC*, 2001, vol. 16, no.3, pp.270-275.
- [8] Faiz J., Ebrahimpour H, Pillay P. Influence of unbalanced voltage on the study state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor, *IEEE Trans EC*, 2004, vol.19, no.4, pp. 657-662.
- [9] Faiz J., Ebrahimpour H. Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages, *IEEE Trans IAS*, 2005, vol.6, no.5, pp.485- 491.
- [10] Romanova V., Khromov S. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes. E3S Web of Conferences vol.58, 03013 Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2018). Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803013>
- [11] Peter A., Okakwu I.K., Oluwasogo E.S. , Alayande A.S., Airoboman A.E. // Influence of Power Quality Problem on the Performance of an Induction Motor, *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol.4, no. 4, 2015, pp.39-44.
- [12] Hrisanov V. I., Brzhezinskiy R. Voprosy adekvatnosti matematicheskikh modeley asinhronnyih dvigateley pri analize perehodnyih protsessov puska [Adequacy of mathematical models of asynchronous motors in the analysis of transient starting processes]. *Elektrotehnika*, 2004, no.10, pp. 20-25. (in Russian).
- [13] Petrushin V.S. Asinhronnyie dvigateli v reguliruemom elektroprivode [Asynchronous motors in a variable speed drive]. Odessa: Nauka i tehnika, 2006, 320 p. (in Russian).
- [14] Beshta A.S., Semin A.A. Opredelenie parametrov ekvivalentnoy tsepi asinhronnoy mashinyi s asimmetrichnyim odnofaznyim pitaniem [Determination parameters of equivalent circuit of asynchronous machine with asymmetrical single-phase power supply]. *Elektromechanicheskie i energosberigayushchie sistemyi*, 2014, no.2, pp.10–16. (in Russian).
- [15] Sivokobyilenko V.F., Pavlyukov V.A., Hennidi Halid. Metod rascheta shem zamescheniya i puskovyih karakteristik glubokopaznyih sinhronnyih dvigateley [Method for calculation of substitution schemes and starting characteristics of deep-groove synchronous motors]. *Elektrotehnika*, 1996, no. 1, pp. 38-41. (In Russian).
- [16] Tsukanov V.I., Geogiadi V.H. Raschet na EVM koeffitsientov vyitesneniya toka v sterzhnyah rotora elektricheskikh mashin [Computer-based calculation of current displacement coefficients in rotor rods of electric machines]. *Elektrotehnika*, 1982, no.12, pp. 52–55.
- [17] Moshchinskiy Yu.A., Petrov A.P. Matematicheskaya model asinhronnogo kondensatornogo dvigatelya s ispolzovaniem simmetrichnogo komponentnogo metoda v standartnom programmnom obespechenii [Mathematical model of asynchronous capacitor motor using symmetrical component method in standard software]. *Elektrichestvo*, 2001, no. 7, pp. 43-48. (in Russian).
- [18] Milykh I.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no. 2, pp. 40-46. doi: 10.2098/2074–272X.2016.05.
- [19] Lorenz R.D., Novotny D.W. Saturation effects in field-oriented induction machines. *IEEE Trans. Ind. Applicat*, 1990, vol. 26, no 2, pp. 283-289.
- [20] Gaydenko Yu.A., Tsvinskiy S.S. Opredelenie integralnyih karakteristik elektricheskikh mashin metodami teorii elektromagnitnogo polya [Determination of integrated characteristics of electric machines by methods of electromagnetic field theory]. *Elektrotehnika i elektromehanika*, 2006, no. 1, pp. 28–32. (in Russian).
- [21] Levi E., Vuckovic V., Vukosavic S. [Study of main flux saturation effects in field-oriented induction motor drives]. [Proc. 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society IECON’89]. Philadelphia, PA, USA, 6-10 November 1989, vol. 1, pp. 219-224.
- [22] Rogers G., Beraraghana D. An induction motor model with deep-bar effect and leakage inductance saturation. *Arhiv fur Electrotechnik*, 1978, vol. 60, no. 4, pp. 193-201.
- [23] Peter A.A., Okakwu I.K., Oluwasogo E.S., Alayande A.S., Airoboman A.E. Influence of Power Quality Problem on the Performance of an Induction Motor. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015 vol.4, no. 4, pp. 39-44.
- [24] Ching–Yin Lee. Effect of unbalanced voltage on Operation Performance of a three-phase Induction Motor. *IEEE trans. on Energy Conservation*, 1999, vol.14, no 2.
- [25] Benamiral N., Rachedi M.F., Bouras S., Kerfali S., Bouraiou A. Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnose precisely the stator unbalanced voltage anomaly. *Rev. Sci. Technol.*, 2017, no. 34, pp.134-150.

- [26] Levi E. A unified approach to main flux saturation modeling in D-Q axis models of induction machines. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 455-461.
- [27] Samarskiy A. Vvedenie v chislennyye metody [Introduction to numerical methods]. Moscow, Russia: Nauka, 1987. (in Russian).
- [28] Hlukhivskiy L. Periodic nonlinear processes in Electrical Engineering (differential harmonic method and its software) – Kyiv, Ukraine: Alpha PC, 2005. 159 p. (in Russian).
- [29] Malyar V.S, Malyar A.V. Matematicheskoe modelirovanie periodicheskikh rezhimov raboty elektrotehnicheskikh ustroystv [Mathematical simulation of periodic modes of electrotechnical appliances]. *Electronnoe modelirovanie*, 2005, vol.27, no. 3, pp. 39–53. (in Russian).
- [30] Laurent P-J. Approximation et optimisation, Hermann, Paris, 1972, 531 p. (in French).
- [31] Filts R.V. Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovateley [Mathematical fundamentals of theory of electrical mechanical converters]. 'Naukova Dumka' Publishing House, Kyiv, 1979, 208 p. (in Russian).

Сведения об авторах.



Маляр Василий Сафронович – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и общей электротехники национального университета “Львовская политехника”. Тематика научных исследований – математическое моделирование динамических режимов электрических цепей и систем.
vasyl.s.malyar@lpnu.ua



Гамола Орест Евгеньевич – к.т.н., доцент кафедры теоретической и общей электротехники национального университета “Львовская политехника”. Научное направление – математическое моделирование электромеханических преобразователей.
orest.y.hamola@lpnu.ua



Мадай Владимир Степанович – к.т.н., доцент кафедры теоретической и общей электротехники национального университета “Львовская политехника”. Научное направление – измерение электрических и магнитных величин аналого-цифровыми устройствами.
volodymyr.s.madai@lpnu.ua



Васильчишин Иванна Ивановна – к.т.н., ассистент кафедры теоретической и общей электротехники национального университета “Львовская политехника”. Научное направление – макро моделирование компонент электромеханических систем.
ivanna.i.vasylychshyn@lpnu.ua

Active Shielding of Power Frequency Magnetic Field in Buildings in the Vicinity of the Electric Airlines

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V.

State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine»
Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is the development of the method for the synthesis of a robust feed-forward active shielding system of the magnetic field, generated by high voltage power lines for reducing the initial magnetic field induction to the sanitary standards level and decreasing the system sensitivity to the plant parameters' variations. This work is devoted to the solution of a multicriterion stochastic game, in which the vector payoff is calculated based on the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The multicriterion game solution depends on the multiswarm particles optimization algorithms. The initial parameters for the synthesis of the active shielding system are the location of the high voltage power lines with respect to the protected from transmission line space, geometry and number of buses, operating currents, as well as the size of the protected space and magnetic field induction normative value. The aim is achieved by determination of the number, configuration, spatial arrangement, and currents in compensation coils, setting algorithm of the robust feed-forward active shielding system of the magnetic field, as well as the resulting value of the induction magnetic field at the points of the protected space. New scientific results of the theoretical and field experimental researches of the effectiveness of a single circuit active shielding system with a single compensation coil are carried out. The possibility of reduction of the initial magnetic field induction level is obtained. It is shown that the experimental and calculated magnetic field induction values differ up to 20 %.

Keywords: high voltage power lines, magnetic field, robust active screening system, theoretical and field experimental research.

DOI: 10.5281/zenodo.3239130

Ecranare activă a câmpului magnetic de frecvență industrială în spațiile rezidențiale situate în apropierea liniilor electrice aeriene

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovduy I.V.

Institutul de Stat "Institutul de Probleme Tehnice de Magnetism al Academiei Naționale de Științe a Ucrainei"
Kharkov, Ucraina

Rezumat. Scopul este de a dezvolta o metodă de sinteză a sistemului combinat robust de ecranare activă a câmpului magnetic generat de linii electrice de înaltă tensiune pentru a reduce sursa de inducție câmpului magnetic în spațiile locative la standarde sanitare și pentru a reduce sensibilitatea sistemului la modificări ale parametrilor de sistem. Lucrarea este dedicată rezolvării unui joc stochastic multicriterial, în care câștigul vectorial se calculează pe baza soluțiilor ecuațiilor Maxwell în aproximarea cvasiistă. Soluția unui joc cu mai multe criterii se bazează pe algoritmi de optimizare pentru soluții optice Pareto cu mai multe particule, cu posibilitate pentru relații de preferință binare. Parametrii de intrare pentru sinteza sistemului de ecranare activă sunt amplasarea liniilor electrice de înaltă tensiune în ceea ce privește spațiul protejat, dimensiunile geometrice, numărul de fire și curenții de funcționare a liniei, precum și dimensiunile spațiului protejat și valoarea standard a câmpului magnetic, care ar trebui realizată ca rezultat al ecranării. Scopul este atins prin determinarea cantității, configurația și dispunerea spațială a curenților înfășurării compensării, algoritmul de funcționare a sistemului combinat robust de ecranare activă a câmpului magnetic precum și prin calculul valorilor inducției rezultante a câmpului magnetic în spațiul ecranat. Noile rezultate științifice sunt studii teoretice și experimentale ale unui sistem sintetizat cu un singur circuit pentru ecranarea activă a câmpului magnetic creat de un grup de linii electrice de înaltă tensiune în zona de ecranare. Recomandări practice sunt date în selectarea rezonabilă a numărului și dispunerea spațială a înfășurării compensatoare a sistemului robust de ecranare activă a câmpului magnetic.

Cuvinte-cheie: linii electrice de înaltă tensiune, câmp magnetic, sistem robust de ecranare activă, studii experimentale și teoretice.

**Активное экранирование магнитного поля промышленной частоты в жилых помещениях,
расположенных вблизи воздушных линий электропередачи
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В.**

Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины»
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является разработка метода синтеза робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи для снижения индукции исходного магнитного поля в жилых помещениях до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Работа посвящена решению многокритериальной стохастической игры, в которой векторный выигрыш вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Исходными параметрами для синтеза системы активного экранирования являются расположение высоковольтных линий электропередачи по отношению к защищаемому пространству, геометрические размеры, количество проводов и рабочие токи линии электропередачи, а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования. Поставленная цель достигается определением количества, конфигурации, пространственного расположения и токов компенсационных обмоток, алгоритма работы робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, а также расчетом значений индукции результирующего магнитного поля в точках пространства экранирования. Новыми научными результатами являются теоретические и полевые экспериментальные исследования синтезированной одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линиями электропередач в зоне экранирования. Приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору количества и пространственного расположения компенсирующих обмоток робастных систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи, с учетом пространственно временной характеристики магнитного поля. Показана возможность существенного снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм. Установлено, что экспериментальные и расчетные значения индукции магнитного поля в зоне экранирования различаются не более чем на 20 %.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередачи, магнитное поле, робастная система активного экранирования, теоретические и полевые экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасным для населения источником магнитного поля (МП) промышленной частоты (50–60 Гц) являются высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в рамках международного проекта по электромагнитному полю [1] подтверждает высокий риск развития раковых заболеваний у населения, проживающего вблизи ЛЭП. Это исследование ВОЗ обуславливает современную мировую тенденцию по ужесточению санитарных норм уровня индукции МП промышленной частоты. В настоящее время в нормативные документы Министерства энергетики Украины введены санитарные нормы по индукции МП промышленной частоты на уровне 0.5 мкТл для жилых помещений [2], что соответствует современным мировым стандартам. Однако, в Украине эти нормы повсеместно нарушаются, что создает угрозу для здоровья миллионов людей, проживающих на расстоянии менее 100 метров от высоковольтных ЛЭП. Государственное учреждение «Инсти-

тут технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины» провело экспериментальные исследования МП, генерируемого ЛЭП с напряжением 10–330 кВ [3]. В результатах экспериментальных исследований показано, что на границе ранее сформированных санитарных зон по уровню электрического поля, МП превышает нормативный уровень в 3–5 раз. Поэтому в городах Украины требуются срочные меры по снижению уровня МП от существующих ЛЭП в 3–5 раз.

Аналогичная ситуация характерна и для большинства промышленно развитых стран мира, однако в этих странах технологии нормализации МП для существующих ЛЭП уже созданы и широко используются [4–14].

Наиболее эффективной технологией является реконструкция линий электропередачи путем ее удаления на безопасное расстояние от жилых зданий или замена воздушной ЛЭП кабельной линией. Однако, такая реконструкция требует огромных материальных ресурсов. Поэтому для Украины более приемлемыми и экономически обоснованным

является экранирование МП существующих ЛЭП методами активного контурного экранирования МП, которые обеспечивают необходимую эффективность.

Технология активного контурного экранирования МП существующих ЛЭП разрабатывается и применяется в развитых странах мира более 10 лет, например, в США и Израиле [4, 7]. Однако, в Украине данная технология и научная основа для ее создания в настоящее время отсутствуют. Поэтому создание науч-

ных основ отечественной технологии активного экранирования МП промышленной частоты в жилых помещениях является актуальной научно-технической проблемой.

Целью данной работы является разработка метода синтеза систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, генерируемого воздушными линиями электропередачи, позволяющего снизить уровень магнитного поля до санитарных норм.

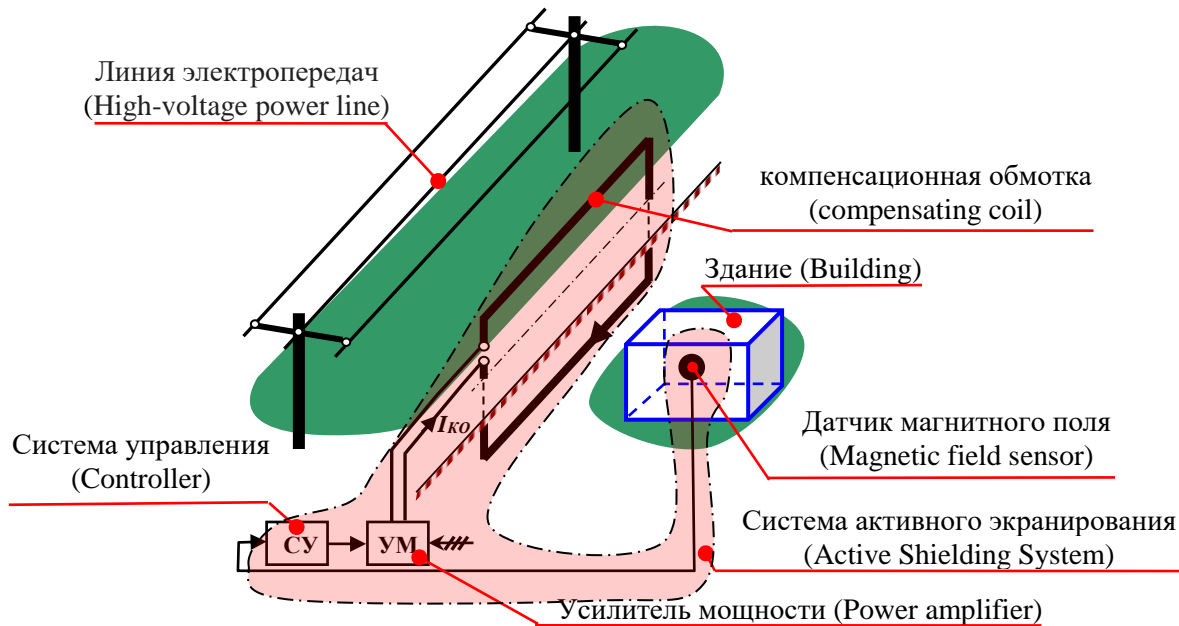


Рис. 1. Система активного экранирования.¹

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Суть метода активного экранирования МП ЛЭП состоит в том, чтобы сформировать компенсирующее МП с такой пространственно-временной характеристикой (ПВХ) МП, суперпозиция которого с исходным МП в защищаемой зоне позволяет уменьшить МП до уровня санитарных норм. Метод реализуется с использованием системы активного экранирования (САЭ), схема которой показана на рис. 1. САЭ состоит из компенсирующих обмоток (КО), с помощью которых формируется компенсирующее МП. Токи в КО автоматически формируются по определенному алгоритму как функция сигналов от датчиков МП, установленных в зоне экранирования. Для питания САЭ используется внешний источник.

В настоящее время наиболее широко используются одноконтурные САЭ с одной

КО [4]. Для повышения эффективности САЭ используются две, три, шесть, двадцать четыре и более КО [11]. Для управления этими КО используется различное количество датчиков МП – один, два, три, шесть, двадцать четыре или более. Количество датчиков МП обычно равно количеству КО или количеству пар КО. В частности, при шести КО типа колец Гельмгольца можно использовать три датчика МП, расположенных в центре области экранирования МП, ориентированных ортогонально относительно управляемых КО [12]. Для обоснования количества и пространственного расположения КО, необходимо знать ПВХ исходного МП, генерируемого ЛЭП, в зоне экранирования. Кроме того, исходными параметрами для синтеза САЭ являются также расположение ЛЭП относительно зоны экранирования, геометрия и количество проводов ЛЭП, рабочие токи, а также размер зоны экранирования и норматив-

¹ Appendix 1

ное значение уровня индукция МП, который должен быть достигнут в результате экранирования.

Целью синтеза САЭ является определение количества, конфигурации и пространственного расположения КО, схем подключения и токов КО, алгоритма управления САЭ, а также результирующее значение индукции МП в зоне экранирования.

II. МЕТОД СИНТЕЗА

Математическая модель МП, генерируемого группой ЛЭП на основании квазистационарного решения уравнения Максвелла [15–20], может быть представлена [21–23] в следующем виде

$$\vec{B}_o(P_i, t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t)), \quad (1)$$

где: $\vec{B}_o(P_i, t)$, $\vec{B}_{lk}(P_i, I_{lk}(t))$ – мгновенные значения векторов индукции результирующего МП, генерируемого группой ЛЭП в рассматриваемой точке P_i , и магнитного поля, создаваемого в той же P_i рассматриваемой точке k -тым проводом lk -той ЛЭП.

Где K – количество ЛЭП в группе, L_k количество проводов в lk -той ЛЭП, $I_{lk}(t)$ – мгновенное значение тока в k -том проводе lk -той ЛЭП.

Рассмотрим постановку задачи синтеза САЭ.

Введем векторы искомых геометрических параметров координат пространственного расположения КО

$$\vec{X} = \{x_i\} \vec{Y} = \{y_i\} \quad (2)$$

Рассмотрим синтез комбинированной САЭ, в которой одновременно используются разомкнутые и замкнутые контуры управления.

Введем вектор искомых параметров регуляторов

$$\Theta = \{A_c, B_c, C_c, D_c, \vec{A}, \vec{\phi}\} \quad (3)$$

компонентами которого являются A_c, B_c, C_c и D_c – матрицы состояния, управления, выхода и выхода по управлению замкнутого контура

управления, и $\vec{A}, \vec{\phi}$ векторы коэффициентов усиления и сдвигов фаз разомкнутого контура управления.

Тогда модель результирующего МП, генерируемого M КО с током $I_{ym}(t)$ в точке P_i рассматриваемого пространства экранирования на основании квазистационарного решения уравнения Максвелла [21], может быть представлена в следующем виде

$$\vec{B}_y(P_i, \vec{X}, \vec{Y}, \Theta, t) = \sum_{m=1}^M \vec{B}_{ym}(P_i, \vec{X}, \vec{Y}, \Theta, I_{ym}(t)) \quad (4)$$

Введем вектор X искомых параметров САЭ, включающий векторы (2)–(3) в следующей форме

$$X = \{A_c, B_c, C_c, D_c, \vec{A}, \vec{\phi}, \vec{X}, \vec{Y}\} \quad (5)$$

Тогда результирующее МП, генерируемое группой ЛЭП (1) и M КО (4), может быть представлено в следующем виде

$$\vec{B}(X, P_i, t) = \vec{B}_o(P_i, t) + \vec{B}_y(X, P_i, t) \quad (6)$$

Тогда задача синтеза САЭ МП, генерируемой группой ЛЭП в зоне экранирования, может быть сформулирована [24–25] в виде следующей многокритериальной задачи оптимизации с векторным критерием

$$B(X) = [B(X, P_1), B(X, P_2), \dots, B(X, P_m)]^T, \quad (7)$$

в котором компонентами $B(X, P_i)$ являются эффективные значения модуля вектора индукции МП (4) в m точках P_i рассматриваемого пространства экранирования.

При синтезе САЭ математическая модель (1) исходного МП известна неточно [10]. В частности, токи в проводах $I_{lk}(t)$ известны приблизительно и имеют ежедневные, еженедельные, сезонные колебания Геометрические размеры КО (2) и параметры регуляторов (3) реализуются приближенно. Поэтому, введем вектор параметров неопределенностей объекта управления (1) САЭ δ , компонентами которого являются отклонения реальных параметров объекта управления (1) САЭ от их номинальных значений, используемых при синтезе.

Тогда задача синтеза такой робастной САЭ сводится к определению такого вектора пространственного расположения и геометрических размеров КО, а также параметров регулятора X и вектора параметров неопределенностей объекта управления δ , при которых максимальное значение индукции магнитного поля в рассматриваемых m точках P_i пространства экранирования P принимает минимальное значение по вектору параметров регулятора X , но максимальное значение по вектору параметров неопределенностей объекта управления системы δ так, что

$$X^* = \arg \min_{X \in X} \max_{\delta \in \Delta} \max_{P_i \in P} B(X, \delta, P_i) \quad (8)$$

Такой подход соответствует стандартному подходу к синтезу робастных систем для наихудшего случая (worst-case) [10], при котором изменение вектора параметров неопределенностей объекта управления системы δ приводит к наибольшему ухудшению компенсации исходного МП, генерируемого группой ЛЭП. Задача (8) может быть сформулирована в виде следующей многокритериальной игры [26–27] с векторным выигрышем

$$B(X, \delta) = [B(X, \delta, P_1), B(X, \delta, P_2), \dots, \dots B(X, \delta, P_m)]^T, \quad (9)$$

компонентами которого $B(X, \delta, P_i)$ являются модули вектора индукции МП в m точках P_i рассматриваемого пространства экранирования.

В многокритериальной игре (9) первым игроком является вектор параметров регулятора X , и его стратегией является минимизация вектора выигрыша (9), а вторым игроком является вектор параметров неопределенностей объекта управления системы δ и стратегией этого игрока является максимизация того же вектора выигрыша (9) [27].

Естественно, что при этом необходимо учитывать ограничения на вектора стратегии первого X и второго δ игроков в виде векторного неравенства

$$G(X, \delta) \leq G_{\max} \quad (10)$$

Заметим, что компонентами векторного выигрыша (9) и ограничений (10) являются нелинейные функции векторов стратегий первого X и второго δ игроков, которые рассчитываются на основе решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении [21–22].

III. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим нахождение решения многокритериальной игры (9) с ограничениями (10) из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений [27] на основе алгоритма оптимизации мультироем частиц (PSO) [28–31], в котором количество роев m равно числу компонент векторного выигрыша (9). В стандартном алгоритме оптимизации роем частиц изменение скоростей частиц обычно осуществляется по линейным законам [32–42]. Для повышения скорости нахождения глобального решения используется нелинейный алгоритм оптимизации мультироем частиц, предложенный в [43], в котором движение i -той частицы j -того роя описывается следующими выражениями

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = & w_{1j}v_{ij}(t) + c_{1j}r_{1j}(t) * \dots \\ & \dots * H(p_{1ij}(t) - \varepsilon_{1ij}(t)) [y_{ij}(t) - \dots \\ & \dots - x_{ij}(t)] + c_{2j}r_{2j}(t) H(p_{2ij}(t) - \dots \\ & \dots - \varepsilon_{2ij}(t)) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} u_{ij}(t+1) = & w_{2j}u_{ij}(t) + c_{3j}r_{3j}(t) H * \dots \\ & \dots * (p_{3ij}(t) - \varepsilon_{3ij}(t)) [z_{ij}(t) - \delta_{ij}(t)] + \dots \\ & \dots + c_{4j}r_{4j}(t) H(p_{4ij}(t) - \varepsilon_{4ij}(t)) * \dots \\ & \dots * [z_j^*(t) - \delta_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}(t+1) = & x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \\ \delta_{ij}(t+1) = & \delta_{ij}(t) + u_{ij}(t+1), \end{aligned} \quad (13)$$

где $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ положение и $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$ скорость i -той частицы j -того роя.

Заметим, что в связи с тем, что решением многокритериальной игры (9) являются два вектора стратегий X первого и δ второго игроков, каждая i -тая частица j -того роя имеет две составляющие положения $x_{ij}(t)$,

$\delta_{ij}(t)$ и две составляющие скорости $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$, для нахождения двух векторов стратегий первого и второго игроков.

В (11)–(13) $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и y_j^* , z_j^* – наилучшие локальное и глобальное положения i -той частицы, найденные соответственно только одной i -той частицей и всеми i -тыми частицами j -того роя. Причем, лучшие компоненты локального $y_{ij}(t)$ и глобального $y_j^*(t)$ положения i -той частицы j -того роя понимаются в смысле стратегии первого игрока $x_{ij}(t)$ по минимизации компонент $B(X, \delta, P_j)$ векторного выигрыша (9). Однако при этом лучшие компоненты локального $z_{ij}(t)$ и глобального z_j^* положения этой же i -той частицы j -того роя понимаются в смысле стратегии второго игрока $\delta_{ij}(t)$ по максимизации тех же компонент $B(X, \delta, P_j)$ векторного выигрыша (9).

Такой подход соответствует движению частиц вдоль градиента и антиградиента при использовании детерминированных алгоритмов решения игр [24].

Четыре независимых случайных числа $r_{1j}(t)$, $r_{2j}(t)$, $r_{3j}(t)$, $r_{4j}(t)$ находятся в диапазоне $[0,1.0]$ и определяют стохастические составляющие компонент скоростей движения частиц.

Положительные константы c_{1j} , c_{2j} и c_{3j} , c_{4j} определяют когнитивные и социальные веса компонент скоростей частиц. Заметим, что особенностью решения этой игры является то, что компонентами вектора стратегии первого игрока $x_{ij}(t)$ являются геометрические размеры КО, которые измеряются в метрах, параметры регуляторов разомкнутых (без обратных связей) контуров управления – \bar{A} , $\bar{\varphi}$ – векторы коэффициентов усиления \bar{A} , которые измеряются в ампер-витках КО, и векторы фазовых сдвигов $\bar{\varphi}$, которые измеряются в радианах, параметры регуляторов замкнутых (с обратной связью) контуров управления – A_c , B_c , C_c и D_c – коэффициенты матриц состояния, управления, выхода и выхода по управлению, которые измеряются в безразмерных величинах. Поэтому, значения

этих констант константы c_{1j} , c_{2j} и c_{3j} , c_{4j} выбираются с учетом диапазона возможных изменений стратегий игроков X и δ .

Особенностью решения этой многокритериальной игры (9) с ограничениями (10) является наличие «оврагов» и «гребней» в векторном выигрыше (9). Это связано, во-первых, с тем, что значения компонент стратегий игроков X и δ отличаются более чем на порядок. Во-вторых, изменение некоторых составляющих стратегий игроков, в частности, коэффициентов усиления регуляторов замкнутых контуров управления, приводит к незначительным изменениям векторного выигрыша игры (9). Поэтому, для улучшения скорости нахождения глобального решения при небольших приращениях векторного выигрыша (9) для определения стратегий игроков $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ в (11)–(12) используется нелинейный алгоритм поиска (Cuckoo Search) [43] стохастической оптимизации мультироем частиц. В качестве нелинейной функции переключения H движения частицы соответственно к локальному $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и глобальному $y_j^*(t)$, z_j^* оптимумам используется функция Хевисайда [43]. Параметры переключения p_{1ij} , p_{3ij} когнитивной и p_{2ij} , p_{4ij} социальной составляющих компонент скоростей движения частиц к локальному $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ и к глобальному $y_j^*(t)$, z_j^* оптимумам принимались в виде приращений изменений компонент векторного выигрыша (9) для стратегий игроков $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ при движении, соответственно, к локальному и глобальному оптимумам.

Случайные числа $\varepsilon_{1ij}(t)$, $\varepsilon_{2ij}(t)$, $\varepsilon_{3ij}(t)$ и $\varepsilon_{4ij}(t)$ определяют параметры переключения движения частиц, соответственно, к локальному и глобальному оптимумам. Если $p_{1ij} < \varepsilon_{1ij}(t)$ и $p_{2ij} < \varepsilon_{2ij}(t)$, то компонента $v_{ij}(t)$ скорости движения i -той частицы j -того роя на шаге t не изменяется, и эта частица движется в том же направлении, что и на предыдущем шаге оптимизации. Аналогично, если $p_{3ij} < \varepsilon_{3ij}(t)$ и $p_{4ij} < \varepsilon_{4ij}(t)$, то компонента $u_{ij}(t)$ скорости движения i -той

частицы j -го роя на шаге t также не изменяется.

Для повышения качества процесса поиска решения используются коэффициенты инерции w_{1j}, w_{2j} в диапазоне (0,5–0,9).

В качестве ограничений (10) в этой задаче, прежде всего, учитывались ограничения на пространственное расположение КО, которые являются компонентами вектора стратегии $x_{ij}(t)$ первого игрока. Эти ограничения обусловлены техническими возможностями реализации КО. Кроме того, ограничивались коэффициенты усиления замкнутых контуров управления, которые также являются компонентами вектора стратегии $x_{ij}(t)$ первого игрока. Ограничивались также максимальные скорости движения частиц $v_{ij}(t), u_{ij}(t)$ исходя из желаемой точности получения решений соответствующих компонент векторов стратегий X и δ , а также для улучшения сходимости решения игры (9).

Для нахождения глобального оптимума решения многокритериальной игры (9) в ходе поиска локальных оптимальных решений этой игры, отдельные частицы и рои обмениваются информацией между собой. При этом, для расчета скорости частицы одного роя используется информация о глобальном оптимуме, полученном частицами другого роя, что позволяет выделить все возможные Парето-оптимальные решения. Для этого на каждом шаге t движения i -той частицы j -того роя используются функции бинарных отношений предпочтения локальных решений, полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное в ходе решения игры $B(X(t), \delta(t), P_j)$ с помощью j -того роя, является более предпочтительным, чем решение $X_k^*(t)$ игры $B(X(t), P_k)$, полученное с помощью k -того роя, если выполняется условие

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t), \delta(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, \dots, X_k^*(t), \delta(t)) \quad (14)$$

В этом случае в качестве глобального оптимального решения $X_k^*(t)$, полученного k -тым роем используется глобальное решение $X_j^*(t)$, полученное j роем, которое является

более предпочтительным по сравнению с глобальным решением $X_k^*(t)$, полученным k -тым роем на основании бинарного отношения предпочтения (14).

Фактически при таком подходе реализуется основная идея метода последовательного сужения области компромиссных решений – Парето-оптимальных решений из исходного множества возможных решений, основанного на информации об относительной важности локальных решений, которые не могут быть выбранным в соответствии с информацией о бинарных отношениях предпочтения (14). Удаление решений осуществляется до тех пор, пока не будет найдено глобальнооптимальное решение. В результате применения этого подхода потенциально оптимальное решение не будет удалено на каждом этапе сужения.

Заметим, что искусство применения алгоритма оптимизации мультироем частиц (PSO) заключается в обоснованном выборе констант его настроек.

В заключение заметим, что исходная многокритериальная игра (9)–(10), с учетом алгоритма ее решения (11)–(13), является многокритериальной стохастической динамической игрой, поскольку в ней явно есть время и случайный поиск [26].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим результаты синтеза САЭ МП, генерируемого группой ЛЭП. Электрические сети Украины характеризуются высокой плотностью, особенно вблизи высоковольтных подстанций.

Часто ЛЭП проходит в непосредственной близости от жилой застройки.

В этом случае уровень индукции МП, генерируемого группой ЛЭП в зоне жилой застройки, может превышать санитарные нормы [2], что создает угрозу для здоровья населения [1] и требует принятия соответствующих мер для нормализации МП.

На рис. 2 показано расположение группы ЛЭП, генерирующих МП, уровень индукции которых в зоне жилой застройки должен быть уменьшен до санитарных норм.

В непосредственной близости от зоны экранирования находятся две двухцепные ЛЭП 110 кВ, двухцепная ЛЭП 330 кВ и одноцепная ЛЭП 330 кВ.



Рис. 2. Группа высоковольтных линий электропередач.²

Для синтеза САЭ, кроме геометрических размеров и зоны экранирования, необходимы значения токов в проводах ЛЭП. Для определения значений токов в проводах ЛЭП вначале были проведены экспериментальные исследования уровня индукции МП как в зоне экранирования, так и вблизи линий электропередачи. На основании полученных экспериментальных данных решена задача идентификации тока в проводах ЛЭП, при которой сумма квадратов погрешностей измеренных и модельных значений индукции МП в заданных точках зоны экранирования сводится к минимуму.

На рис. 3 (а) показаны изолинии модуля вектора индукции исходного МП, генерируемого группой ЛЭП. Как видно из этого рисунка, уровень индукции исходного МП в рассматриваемом пространстве экранирования составляет 0,9 мкТл, что в 1,8 раза выше санитарных норм для МП в Украине [2].

На основе экспериментальных исследований было установлено, что в зоне экранирования МП, генерируемая группой ЛЭП, имеет ПВХ в виде сильно вытянутого эллипса и, следовательно, исходное МП имеет незначительную поляризацию. Активное экранирование такого МП возможно с использованием одной КО. Заметим, что такие системы одной КО получили наибольшее распространение в мировой практике [4].

На основе модели МП, генерируемого группой ЛЭП, была решена задача синтеза робастной одноконтурной САЭ, содержащей одну КО. Координаты КО в соответствии с обозначениями, показанными на рис. 3 (б), имеют значения (1,0; 3,0) и (4,0; 1,5). Верхняя

ветвь КО расположена на высоте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя ветвь расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта. Расчетное значение ампер-витков КО составляет $17,2 A \cdot \text{витка}$, а фазовый сдвиг тока КО относительно опорного напряжения составляет $1,4 \text{ рад}$.

На рис. 3 (б) показаны изолинии модуля вектора индукции магнитного поля с включенной синтезированной робастной САЭ. Как видно из рис. 3 (б), при включенной САЭ уровень индукции МП в рассматриваемой зоне экранирования не превышает 0,5 мкТл. На рис. 4 показана ПВХ МП, создаваемого: группой ЛЭП (1); КО (2) и результирующее МП с включенной САЭ (3).

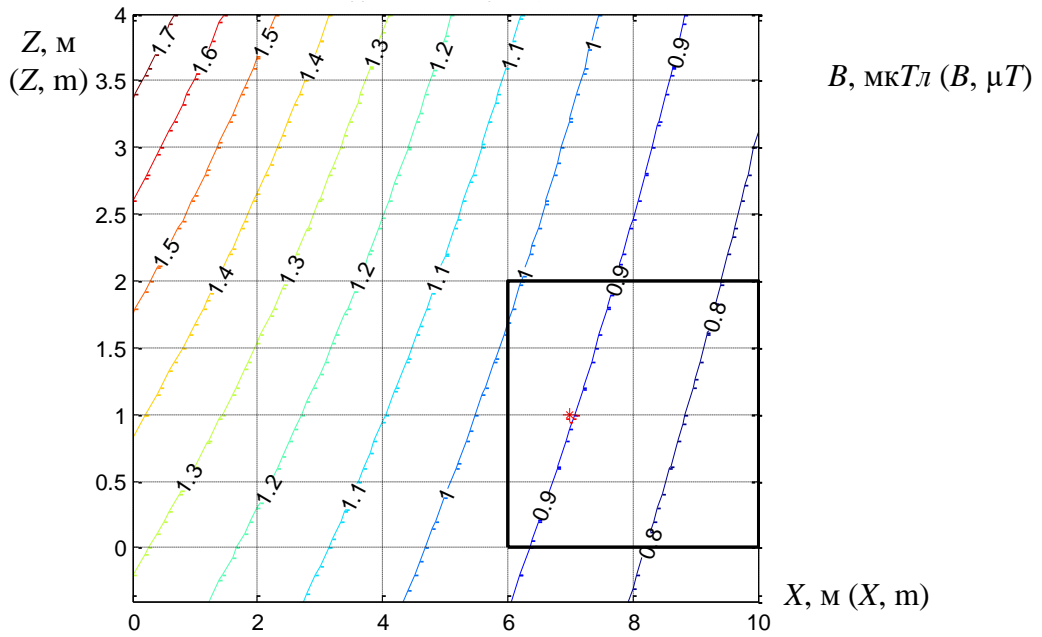
Естественно, что такое исходное МП может быть эффективно компенсировано с использованием одноконтурной САЭ, содержащей одну КО. При одной КО компенсируется большая ось эллипса ПВХ исходного МП, так что ПВХ результирующего МП с включенной САЭ является эллипсом с коэффициентом эллипса 0,8.

В робастной САЭ максимальное значение индукции МП в зоне экранирования не превышает 0,5 мкТл, что соответствует санитарным нормам Украины [2].

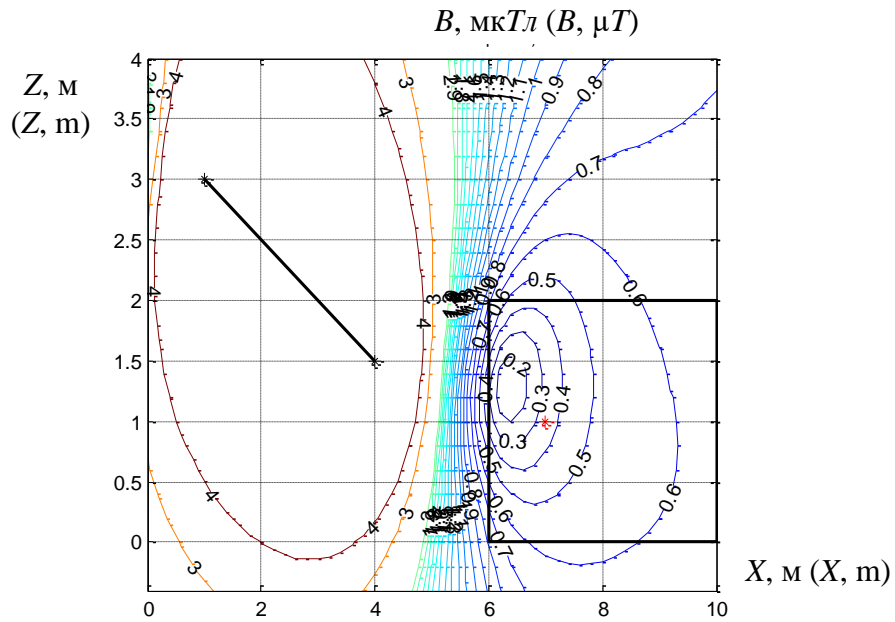
Для наихудшего случая (worst-case) [10], когда вариации вектора параметров неопределенности объекта управления δ приводят к наибольшему ухудшению компенсации исходного МП робастной САЭ, максимальное значение уровня индукции МП в зоне экранирования увеличивается на 10 % по сравнению с робастной САЭ при номинальных значениях параметров неопределенности объекта управления $\delta = 0$.

В исходной оптимальной САЭ с номинальными значениями параметров максимальное значение уровня индукции МП в зоне экранирования составляет 0,4 мкТл, что примерно на 10 % меньше, чем в робастной САЭ.

Однако при изменении вектора параметров неопределенности объекта управления δ для наихудшего случая (worst-case), максимальное значение уровня индукции МП в исходной оптимальной системе увеличивается до 0,6 мкТл.



а)



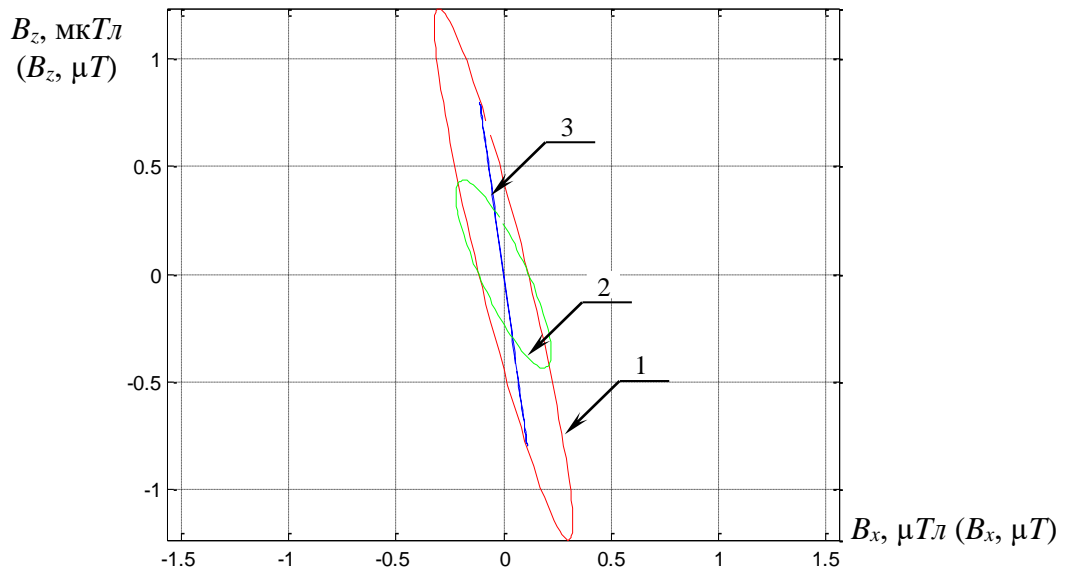
б)

Рис. 3. Изолинии магнитного поля: (а) исходного и (б) с включенной системой активного экранирования.³

Заметим, что положение КО робастной системы, показанной на рис. б, несколько отличается от положения КО оптимальной системы. Кроме того, параметры регуляторов робастной и исходной оптимальной САЭ также существенно не различаются, в результате чего и обеспечивается робастность синтезированной САЭ по сравнению с оптимальной

САЭ. Таким образом, синтезированная робастная САЭ позволяет снизить чувствительность системы к изменениям параметров объекта управления по сравнению с исходной оптимальной САЭ.

³ Appendix 1



(1) начальное магнитное поле, (2) катушка компенсации магнитного поля, (3) результирующее магнитное поле с включенной надежной системой активного экранирования

Рис. 4. Пространственно-временные характеристики магнитного поля.⁴

В заключение заметим, что с помощью одной КО можно компенсировать МП, у которого ПВХ имеет форму сильно вытянутого эллипса. В этом случае с помощью одной КО компенсируется большая полуось эллипса ПВХ МП, за счет чего обеспечивается достаточно высокая эффективность экранирования слабо поляризованного МП. Такие системы могут использоваться для экранирования МП, генерируемого одноконтурным ЛЭП с горизонтальным и вертикальным подвесом проводов, а также для двухконтурных ЛЭП с подвесом проводов типа «бочка», «ёлка» или «перевернутая ёлка». Однако, если ПВХ МП близка к форме окружности, то для компенсации такого МП необходимы по меньшей мере две, три или более КО. В частности, МП с такой ПВХ генерируют одноцепные ЛЭП с подвесом проводов типа «треугольным».

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Как следует из рис. 3(б), КО САЭ представляет собой квадратную обмотку, верхняя ветвь которой расположена на высоте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя ветвь расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта.

Компенсационная обмотка САЭ содержит 20 витков и питается от усилителя типа TDA7294. На рис. 5 показана фотография КО САЭ. Верхняя левая КО расположена на вы-

соте 3,0 м от уровня грунта, а нижняя правая ветвь КО расположена на высоте 1,5 м от уровня грунта.



Рис. 5. Компенсационная обмотка системы активного экранирования магнитного поля.⁵

На рис. 6 показана фотография САЭ.



Рис. 6. Система активного экранирования магнитного поля.⁶

САЭ содержит внешний регулятор индукции МП и внутренний регулятор тока КО. В качестве датчика индукции МП в САЭ используется индуктивный датчик. Для контроля уровня индукции МП используется магнитометр типа EMF-828 фирмы Lutron.

Рассмотрим результаты полевых экспериментальных исследований САЭ. На рис. 7(а) показано экспериментально измеренное распределение индукции МП, генерируемого группой ЛЭП, и на рис. 7(б) – результирующее распределение индукции МП при включенной САЭ.

Минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной САЭ составляет 0,2 мкТл. Исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 0,95 мкТл, а при включенной САЭ уровень МП во всей зоне экранирования не превышает 0,4 мкТл.

Активное сопротивление КО равно 124 Ом. Ток в КО равен 1,5 А. Потеря мощности в КО составляет 279 Вт.

Сравнение результатов распределения индукции МП с включенной САЭ, показанных на рис. 3 (б), с экспериментальными распределениями индукции МП с включенной САЭ, показанными на рис. 7 (б), показало, что они отличаются не более чем на 20 %.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработан метод синтеза робастной комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, генерируемого линиями электропередач, для снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм, а также для снижения чувствительности системы к параметрам объекта управления.

2. Синтез робастной комбинированной системы активного экранирования основан на решении многокритериальной стохастической игры с векторным выигрышем, компонентами которого являются значения индукции магнитного поля в точках зоны экранирования.

3. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритма оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Компоненты векторного выигрыша многокритериальной игры вычисляются на основе решений уравнений

Максвелла в квазистационарном приближении.

4. В результате синтеза одноконтурной системы активного экранирования определено пространственное расположение компенсационной обмотки и параметры регуляторов комбинированной системы, включающей контуры разомкнутого и замкнутого управлений. С помощью синтезированной системы удалось уменьшить индукцию исходного магнитного поля во всей зоне экранирования до уровня санитарных норм Украины и снизить чувствительность системы к изменениям параметров объекта управления по сравнению с известными системами.

5. Проведены полевые экспериментальные исследования эффективности одноконтурной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой воздушных линий электропередачи. Эффективность системы активного экранирования составляет более 4 единиц. Сравнение результатов экспериментальных и расчетных значений индукции магнитного поля в зоне экранирования показывает, что их отклонения не превышают 20 %.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Active shielding system.

²Fig. 2. Group of high voltage power lines.

Fig. 3. The isolines of the magnetic field: (a) initial and (b) with the robust active screening system is on.

Fig. 4. Space-time characteristics of magnetic field. ((1) initial magnetic field, (2) magnetic field compensation coil, (3) resultant magnetic field with the robust active screening system is on).

⁵Fig. 5. Compensation coil of active screening system of magnetic field.

⁶Fig. 6. Active screening system of magnetic field.

⁷Fig. 7. Experimental research of equal level lines of the: (a) initial magnetic field and (b) resultant magnetic field with the active screening system is on.

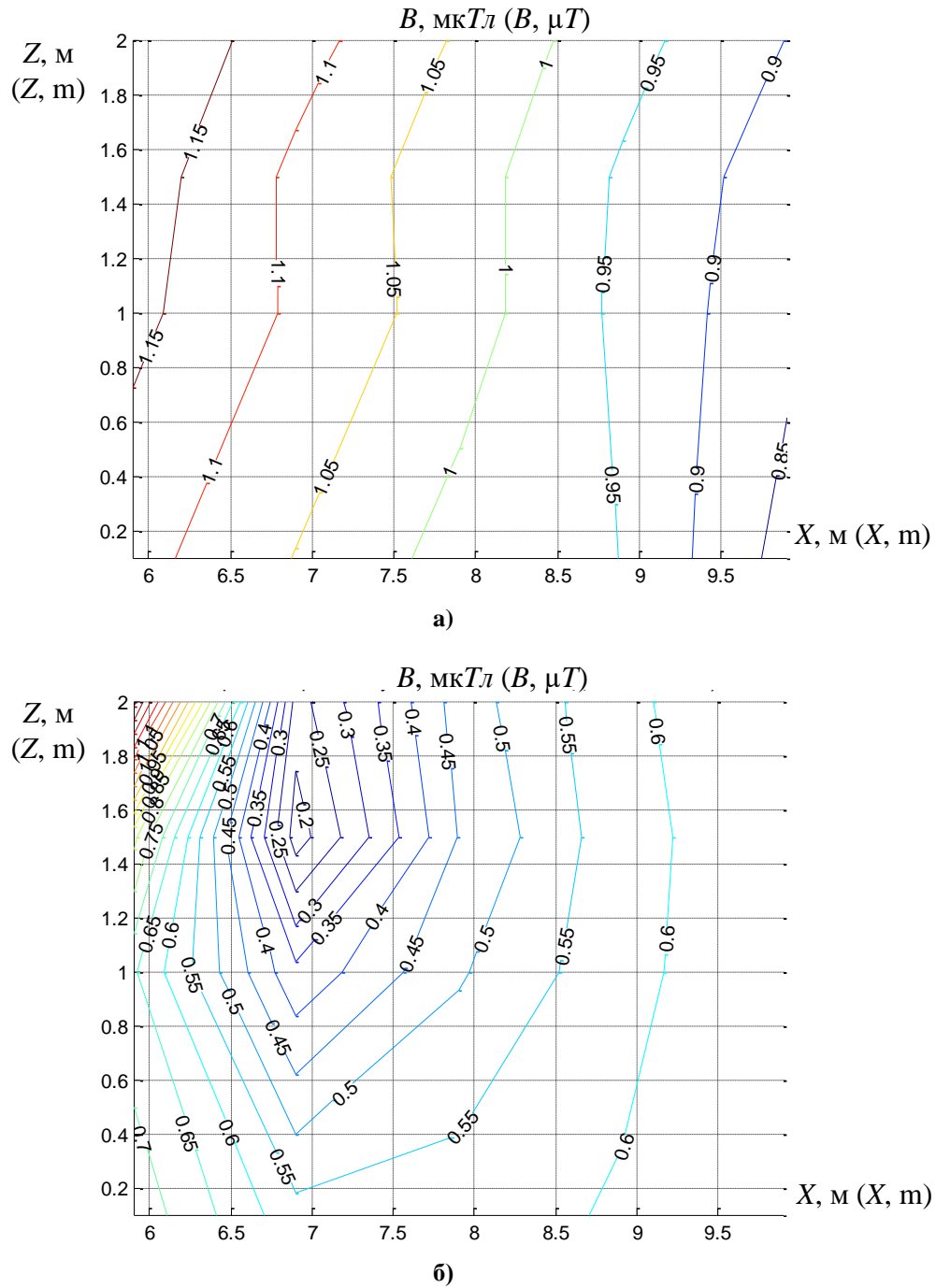


Рис. 7. Экспериментальные исследования уровней индукции: (а) исходного магнитного поля и (б) результирующего магнитного поля с включенной системой активного экранирования магнитного поля.⁷

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

[1] The World Health Organization, “The International EMF Project”. Available at: <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>. (accessed 02.04.2019).
 [2] Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. – 5-te vid., pererobl. y dopovn. (stanom na 22.08.2014) [Electrical installation regulations, 5th ed., The

Ministry of Energy and Coal Mining of Ukraine] – Kharkiv: Fort, 2014. 800 p. (In Ukrainian).
 [3] Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pylugina O.Yu. Magnitnoe pole liniy elektroperedachi i metodyi ego snizheniya do bezopasnogo urovnya [The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level]. *Tekhnicheskaya elektrodynamika*, 2013. №2. pp. 3–9. (In Russian).

- [4] Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html>. (accessed 02.04.2019)
- [5] Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Meas. Sci. Technol.* 1993, no. 4, pp. 1370–1375.
- [6] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* Rome, Italy, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7.
- [7] Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering.* 2005, vol. 2, no. 2, pp. 254–265.
- [8] Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9CHLIE)*, Marbella (Málaga). 2005, pp. 84–99.
- [9] Yamazaki K. Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. *Neurology and Clinical Neurophysiology.* 2004, v. 40, pp. 1–4.
- [10] Schnabel A., Voigt J. Burghoff M., Knappe-Gruneberg S. Magnetic Shielding State of art, new magnetic shielding and active magnetic shielding for low noise applications. Rome, Italy, 2003, v. 51, №5, pp. 137–142.
- [11] Kato, Kazuo, Yamazaki, Keita, Sato, Tomoya, Haga, Akira, Okitsu, Takashi, Muramatsu, Kazuhiro, Ueda, Tomoaki, Yoshizawa, Masahito. Shielding Effect of Panel Type Active Magnetic Compensation. *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials.* 2005, v. 125, pp. 99–106.
- [12] Canova L. Giaccone Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop *Electricity Distribution / CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on Date of Conference. – Part 12009. – Pp. 1–4.*
- [13] Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction' / S. Celozzi // *Proc. IEEE Int. Symp. On Electromagnetic Compatibility, Minneapolis, USA, 2002. – pp. 222–226.*
- [14] Celozzi S. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques / S. Celozzi, F. Garzia // *Environmental Risk 2003, WIT Press, Southampton (UK). – 2003. – pp. 64–73.*
- [15] El Dein A.Z. Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases / Adel Z. El Dein // *IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24. – № 4. – pp. 2214–2222.*
- [16] Electromagnetic field tester, with separate probe. Model: EMF-827. Available at: http://www.lutron.com.tw/ugCShowroomItem_Detail.aspx?KindID=1&hidTypeID. (accessed 02.04.2019)
- [17] Fard M.S. Measurement of the magnetic fields of high-voltage substations (230 kV) in Tehran (Iran) and comparison with the ACGIH threshold limit values / M.S. Fard, P. Nasiri, M.R. Monazzam // *Radiation Protection Dosimetry.* 2011. vol. 145. № 4. pp. 421–425.
- [18] Hamza A-S.H. Environmental pollution by magnetic field associated with power transmission lines / A-S.H. Hamza, S.A. Mohmoud, S.M. Ghania // *Energy Conversion and Management.* 2002. vol. 43. pp. 2443–2452.
- [19] Hamza A-S.H. Evaluation and measurement of magnetic field exposure over human body near EHV transmission lines / A-S.H. Hamza // *Electric Power Systems Research.* 2005. vol. 74. pp. 105–118.
- [20] Hasselgren L. Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies / L. Hasselgren, J. Luomi // *IEEE Transaction on EMC.* 1995. vol. 37. No 3. pp. 409–420.
- [21] Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3.* Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012, 96 p.
- [22] Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Modelirovanie elektromagnitnogo polya v pomescheniyah zhilyih domov, raspolozhennyih vblizi liniy elektroperedachi [Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines]. *Tehnicheskaya elektrodynamika,* 2016, vol. 3, pp. 6–9. (In Russian).
- [23] Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu. Pylugina O.Yu. Metod rascheta magnitnogo polya trehfaznyih liniy elektroperedachi [The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines]. *Tehnicheskaya elektrodynamika,* 2014, vol. 5, pp. 11–13. (In Russian).
- [24] Liu G.P., Yang J.B., Whidborne J.F. *Multiobjective optimisation and control. – Research Studies Press Ltd, 2003. 320 p.*
- [25] Ren Z., Pham M.-T., Koh C. S. Robust Global Optimization of Electromagnetic Devices with Uncertain Design Parameters: Comparison of the Worst Case Optimization Methods and Multiobjective Optimization Approach Using Gradient Index Magnetics *IEEE Transactions.* 2013. №49. pp. 851–859.
- [26] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms / Amsterdam University Press – Amsterdam., 2010. – 174 p.*
- [27] Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and*

- Logical Foundations / Cambridge University Press, 2009. 504 p.
- [28] Clerc. M. Particle Swarm Optimization. London, ISTE Ltd, 2006. 244 p.
- [29] Gazi V. Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. Springer, 2011. 318 p.
- [30] Coello Coello, C.A. and Lechuga, M.S. MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. 2002. vol. 2. pp. 1051–1056.
- [31] Coello Coello, C.A., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization, In IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004. 8(3). pp. 256–279.
- [32] Coello Coello. C. A. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques // Knowledge and Information Systems. – vol.1. № 3. 1999. pp. 269–308.
- [33] Hu, X. and Eberhart, R. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2002. pp. 1677–1681.
- [34] Hu, X. and Eberhart, R. (2002) Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. 2002. pp. 17–27.
- [35] Hu, X., Eberhart, R.C. and Shi, Y. Particle Swarm with Extended Memory for Multiobjective Optimization, In Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium. 2003. pp. 193–197.
- [36] Michalewicz Z., Schoenauer M. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems. – Evolutionary Computation. 1996. vol.4(1). pp. 1–32.
- [37] Parsopoulos, K.E., and Vrahatis, M.N., Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems, In Proceedings of the Euro-International Symposium on Computational Intelligence. 2002. pp. 174–181.
- [38] Pulido, G.T., and Coello Coello, C.A., A Constraint-Handling Mechanism for Particle Swarm Optimization, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. 2004. pp. 137–143.
- [39] Ray, T., Liew, K.M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization // Engineering Optimization. 2002. vol. 34. № 2. pp. 141–153.
- [40] Reyes-Sierra, M. and Coello Coello, C.A Multi-Objective Particle Swarm Optimizers a Survey of the State-of-the-Art, In International Journal of Computational Intelligence Research, 2006. vol. 2(3) pp. 287–308.
- [41] Vaz A. I. F., and Fernandes E. M. G. P. Optimization of Nonlinear Constrained Particle Swarm in Technological and economic development of economy Baltic Journal on Sustainability. Vilnius: Technika, 2006. vol. 12(1). pp. 30–36.
- [42] Zilzter Eckart. Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications. – Ph. D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. 114 p.
- [43] Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu., Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications, Elsevier Inc., 2013. 450 p.

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
Государственное учреждение
«Институт технических
проблем магнетизма НАН
Украины, д.т.н., синтез систем
управления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-1100-095X
E-mail:
kuznetsov.boris.i@gmail.com



**Бовдуй Игорь
Валентинович. К.т.н.**
Государственное учреждение
«Институт технических
проблем магнетизма НАН
Украины», синтез систем
управления высокой
точности.
ORCID: 0000-0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



**Никитина Татьяна
Борисовна**
Харьковский национальный
автодорожный университет,
д.т.н., синтез систем управ-
ления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-0185-3078
E-mail: tatjana55555@gmail.com

Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply

Boyko A.A., Besarab A.N., Sokolov Y.A., Shapa L.N.

Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine

Abstract. The article considers the problem of development of power loss minimization system in asynchronous motors with asymmetric voltage supply. The subject of the research is a continuous run of asynchronous motor based on artificial adjusting of characteristics in the area of nominal slipping with better energy indicators than at a operational segment of natural mechanical characteristics. The artificial control characteristic of a drive corresponding to power loss minimization mode is calculated in advance using the solution of extreme control concern. The paper demonstrates that under conditions of electric drive supplied by an asymmetric voltage source the one should apply a phase-by-phase control. The feedback action logic is as follows: reduction of the output voltage of thyristor converter and motor currents as a reducing of the load on the asynchronous motor shaft occurs. As a result, there appears the possibility to maintain the load angle equality of all the phases of asynchronous motor to an optimal value. This allows to solve the problem of power loss minimization in an asynchronous motor due to the load angle equality to the optimal value, and the problem of symmetrization due to the load angle equality in motor phases. The most significant result of the research is the developed automated scheme of symmetrization which is not only efficient with power source voltage asymmetry, but also with asymmetry of asynchronous motor parameters themselves. The proposed functional scheme of microprocessor control and the algorithm of control increase the possibilities of automated loss minimization system.

Keywords: electric drive, asynchronous motor, thyristor converter, system of control, power losses, voltage asymmetry, symmetrization.

DOI: 10.5281/zenodo.3239133

Îmbunătățirea performanței energetice a motoarelor asincrone la alimentarea cu tensiune asimetrică

Boyko A.A., Besarab A.N., Sokolov Ya.A., Shapa L.N.

Universitatea Politehnică Națională din Odessa
Odessa, Ucraina

Rezumat. Scopul articolului constă în elaborarea unui sistem de minimizare a pierderilor de putere ale motoarelor asincrone la alimentarea cu tensiune nesimetrică. Obiectul cercetării este funcționarea continuă a unui motor asincron cu caracteristici de reglare artificială în domeniul alunecării nominale cu indicatori de energie mai buni decât în secțiunea de lucru a caracteristicilor mecanice naturale. Reglarea artificială a tracțiunii electrice, corespunzătoare modului de minimizare a pierderilor de putere, se calculează în avans, pe baza soluției problemei de control extrem. În cadrul studiului a fost realizată o descriere matematică a modurilor de operare a acționării electrice „convertizor de tensiune pe bază de tiristori - motor asincron”, în care este posibilă reducerea pierderilor de energie, se realizează o diagramă funcțională a sistemului pentru minimizarea automată a pierderilor de putere. Scopul stabilit în lucrare, în condițiile alimentării cu energie electrică de la o sursă cu tensiune asimetrică, este realizat prin utilizarea a trei canale de control și trei canale de feedback. Logica acțiunii de reacție este de a reduce tensiunea de ieșire a convertizorului pe tiristori și a curenților motorului reducând în același timp sarcina pe axul motorului asincron. Ca o consecință, este posibil să se mențină egalitatea unghiurilor de sarcină ale tuturor fazelor motorului asincron la valoarea optimă. Acest lucru ne permite să rezolvăm problema minimizării pierderilor de putere ale unui motor asincron datorită egalității unghiurilor de încărcare la valoarea optimă și problemei echilibrării datorită egalității unghiurilor de sarcină pe fazele motorului. În acest caz, unghiurile de comutare ale tiristorilor convertizorului de tensiune nu sunt în principiu simetrice.

Cuvinte-cheie: acționare electrică, motor asincron, convertizor pe tiristori, sistem de control, pierdere de putere, asimetrie de tensiune, echilibrare.

Улучшение энергетических показателей асинхронных двигателей в условиях питания несимметричным напряжением

Бойко А.А., Бесараб А.Н., Соколов Я.А., Шапа Л.Н.

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

Аннотация. Целью статьи является разработки системы минимизации потерь мощности асинхронных двигателей при их питании несимметричным напряжением. Предметом исследования является

продолжительная работа асинхронного двигателя на искусственных регулировочных характеристиках в области номинального скольжения с энергетическими показателями лучшими, чем на рабочем участке естественной механической характеристики. Искусственная регулировочная характеристика электропривода, соответствующая режиму минимизации потерь мощности, рассчитывается заранее, исходя из решения задачи экстремального управления. В рамках исследования выполнено математическое описание режимов работы электропривода «Тиристорный преобразователь напряжения–асинхронный двигатель», в которых возможно уменьшение потерь мощности, выполнена разработка функциональной схемы системы автоматической минимизации потерь мощности. Поставленная в работе цель, в условиях питания электропривода от источника с несимметричным напряжением, достигается применением трех каналов управления и трех каналов обратной связи. Логика действия обратной связи заключается в уменьшении выходного напряжения тиристорного преобразователя и токов двигателя при уменьшении нагрузки на валу асинхронного двигателя. Вследствие этого появляется возможность поддерживать равенство углов нагрузки всех фаз асинхронного двигателя оптимальному значению. Это позволяет решать проблему минимизации потерь мощности асинхронного двигателя за счет равенства углов нагрузки оптимальному значению и проблеме симметрирования за счет равенства углов нагрузки по фазам двигателя. При этом углы включения вентилей тиристорного преобразователя напряжения принципиально не симметричны. Применение тиристорного преобразователя напряжения дает возможность реализации управляемых переходных пуско–тормозных режимов. Наиболее существенным результатом работы является разработанная автоматизированная система симметрирования, которая эффективна не только при несимметрии напряжений источника питания, но и при несимметрии параметров самого асинхронного двигателя. Предложенная функциональная схема микропроцессорного управления и алгоритм управления расширяют возможности системы автоматической минимизации потерь. Структура и сложность алгоритма управления могут претерпевать изменения в зависимости от функциональных возможностей элементов электропривода.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, система управления, потери мощности, несимметрия напряжений, симметрирование.

Introduction

An asynchronous motor (AM) demonstrates high energy indicators in running at the rated operation. The deviations from the rated operation of the AM running as a result of decreasing the load on the shaft leads to the efficient degradation of their (indicators) energy characteristics [1, 2]. The solution of this problem leads to the interest to automated electromechanical systems, which allow to decrease the AM power losses in their underloading [1-3]. It is also known that the standardized indicators of electric energy quality do not correspond to the required ones, which determines possibilities of AM run e.g. under conditions of power supply voltages asymmetry [4-5]. The asymmetric operation modes affect negatively on the work indicators of electrical machines [6, 7]. Magnetic fields arising rotate at synchronous speed not only in the direction of rotor turning but also in the opposite direction. This leads to “parasitic” oscillations at frequency 100 hz. The extra stator heating occurs due to exceeding one or two phase AM currents of rated value [8, 9].

Theoretical and practical problems of AMs energy indicators improvement in their (ADs) incomplete loading by means of electrical drive are given a lot of attention in scientific and engineering literature [1, 10-14]. The problem mentioned above is recommended to be solved by

using a thyristor voltage converters (TVCs), which permit to provide the continuous AM running based on adjusting characteristics in the area of rated slipping with less losses than at the operational segment of natural characteristic [13, 14]. Wherein the necessary adjusting characteristic is calculated on the basis of the solution of extreme control problem according to the minimal power losses criterion [1]. The researches in [10-15] solve a problem of loss decrease justification in asynchronous motors and synthesis of energy-saving control systems. However, the offered variants were developed and recommended for usage with the standardized indicators of power supply voltage quality and were completely invariant to their changes [4, 16]. The run of the automated systems of such kind under the conditions of power supply voltage asymmetry is not efficient and does not lead to the loss reduction in asynchronous motors [9, 12].

There is much less information about compensation of negative effects in AM, being supplied by an asymmetric voltage source, by means of electric drive control systems [17-19]. Most researches are limited with the development of power supply symmetrization means or with a propose to solve the mentioned problem by means of frequency converters with the AM operational moment limitation [20-24]. Along with this the synthesis and usage of the electromechanical

automated system, which would permit to solve problems on losses reduction in a motor in its underloading and under the conditions of power supply asymmetry appearance – to combine this function with one of AM currents symmetrization is of greatest interest as well.

Problem statement

The goal of research is as follows – to develop a system of AM power loss minimization in supply with asymmetric voltage.

In order to achieve the goal the following tasks have to be done:

- to justify the method of loss reduction in AM by means of TVC;
- to develop a structure of losses minimization system in AM based on its element synthesis;
- to develop a circuit and algorithm of microprocessor control by the loss minimization system.

Research methods

The problem of loss minimization in reducing the load at AM shaft can be solved by a drive with a thyristor voltage converter. The continuous work based on adjusting characteristics in the area of rated slipping with less losses in AM than at the operational segment of natural characteristics is planned. The main influence is an output converter voltage, but asynchronous motor running occurs according to the appropriate mechanical adjusting characteristic.

Voltage control is performed down the rated. Adjusting characteristic is calculated beforehand on the basis of the solution of the problem of extreme control in accordance with minimal power losses. In analytical description of energy transformation processes a number of assumptions is taken into account: linearity of AM magnetic circuit; linearity of operational segment of AM's artificial mechanical characteristic; considering the first harmonic constituents of currents and voltages of the motor's stator.

This allows to obtain an analytical dependence of the control law, which corresponds to the optimal mechanical characteristic for any of known types of asynchronous motors. Four main constituents of AM losses are taken into account [26]. For the further analysis it is suitable to divide them into two groups – load loss and magnetization one.

It is known that load loss, existing in AM under the rated operation conditions, is described by two constituents [1]

$$\Delta P_{ln} = \Delta P_{1cl} + \Delta P_{2cl}, \quad (1)$$

where ΔP_{1cl} – losses in the stator's copper due to the load current at the operational moment of load, W; ΔP_{2cl} – losses in the rotor's copper due to the load current at the operational moment of load, W.

Total magnetization losses in a motor at the operational running mode are indicated as follows

$$\Delta P_{0m} = \Delta P_{1c0m} + \Delta P_{sm}, \quad (2)$$

where ΔP_{1c0m} – losses in the stator's copper due to magnetization current, W; ΔP_{sm} – losses in AM's steel, W.

In adjusting the AM coordinates by means of converter voltage change, load losses and magnetization losses are indicated by the relations [25]

$$\Delta P_l = \frac{M_c}{M_n} \frac{s}{s_n} \Delta P_{ln}, \quad (3)$$

$$\Delta P_0 = \frac{M_c}{M_e} \Delta P_{0m},$$

where M_e – a moment based on the natural characteristic in slipping, which is equal to the slipping in the artificial characteristic in reduced voltage $U_1 < U_{1n}$.

If we take into account the accepted assumptions, the equality $M_e / s = M_n / s_n$, which gives the possibility to express the moment M_c value through the slipping, is right.

Then the losses are determined according to the equation

$$\Delta P = \Delta P_l + \Delta P_0 = \frac{\Delta P_{ln}}{M_n s_n} M_c s + \frac{\Delta P_{0m} s_n}{M_n} M_c \frac{1}{s}. \quad (4)$$

There is some slipping, during which total losses in the motor are minimal. The problem concerning the obtaining of this optimal slipping can be solved by extremum researching of the function (4) and indicating the value s , with which the value ΔP possesses a minimal value. For analytical solution it is necessary to make a partial derivative with observance of slipping ΔP equal zero. This equation solutions characterize the extrumum of researched function. The condition of power loss minimum requires AM in the first

(third) quadrant to run according to the adjusting characteristic with slipping

$$s_{opt} = s_n \sqrt{\frac{\Delta P_{0m}}{\Delta P_{ln}}}, \quad (5)$$

The power loss minimum condition is observed in performance in the area of operational moments from zero to some boundary moment M_b

$$M_b = M_n \sqrt{\frac{\Delta P_{0m}}{\Delta P_{ln}}}, \quad (6)$$

The boundary moment value corresponds to intersection of the adjusting mechanical characteristic and natural one and does not depend on the present moments of load and AM speed. Fig. 1 represents the idea about mechanical characteristics of the asynchronous motor run on.

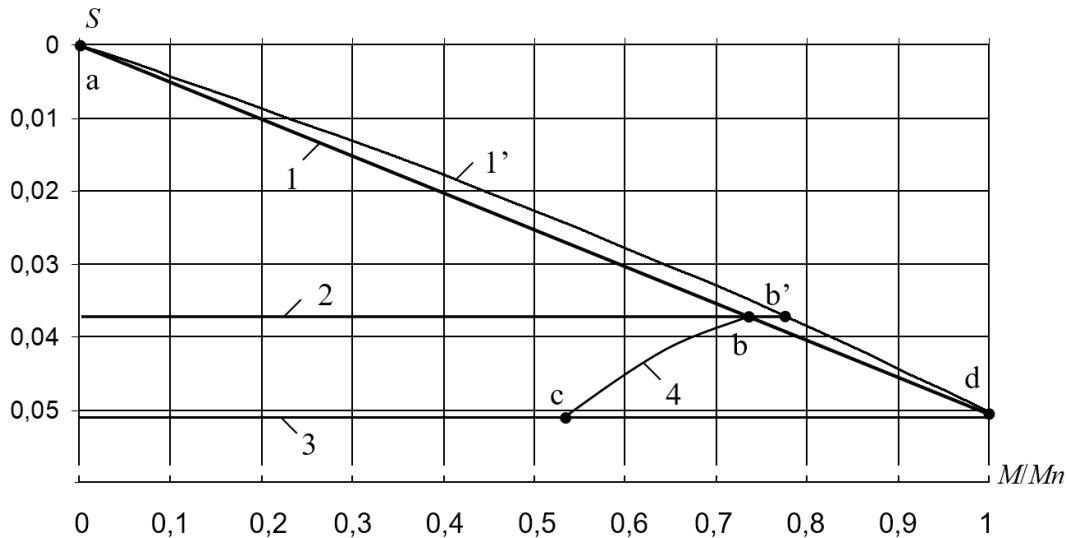


Fig. 1. Mechanical characteristics of motor 4A90L4.

Curve 1 is a linearized segment of the natural mechanical characteristic. Here is a segment of a real natural mechanical characteristic of AM 4A90L4 (characteristic 1') presented for comparison, which allows to estimate the linearization influence. Straight line 2 is an adjusting characteristic corresponding to the optimal control law as a regard to the minimal loss criterion. Characteristic 3 corresponds to the AM adjustment with rated slipping. All of the operational points of characteristic 2 correspond to the optimal mode. With the increase of moment this characteristic intersects the natural one in point b (b') corresponding to the boundary moment M_b . With the further load moment increase the mode stops being optimal. This point position and operational segment width of the optimal adjusting characteristic depends on the correlation among the losses used for magnetization and on the load at the rated mode. As follows from (6) a boundary moment for each of the asynchronous motors is only determined by own parameters of AM. In both cases in increasing or decreasing the slipping as a regard

to characteristic 2, the losses in AM are enhanced. In decreasing the slipping loss increase is limited by the natural characteristic. In increasing the slipping in the lower part a conditional boundary can be formed, in which the losses are equal to the ones on the natural characteristic. This boundary corresponds to the line 4 and is called "equal losses line" [14]. An area limited with a segment a – b of the natural characteristic, axe of slipping and equal losses line 4 is an area, in which the modes with less losses than the ones (losses) with the natural characteristic in AM, can be formed. This area is used during optimal control according to the minimal loss criterion. Other characteristics embrace the less width of this area, and as to characteristic 3 it has a segment c – d, which is beyond the mentioned area. In this segment the motor runs not only in the suboptimal mode, but with the power losses exceeding the ones on the natural characteristic [25].

Technical implementation of the loss minimization mode in steady state is possible only in closed electrical drive systems. Wherein it is impractical to use the feedback proportionally to slipping (speed) since the electrical drive

operation occurs in the area close to the rated slipping [26]. This imposes strict requirements to a measured value accuracy and is not always justified. The most perspective one is a method based on power factor constancy at the minimization mode. The feedback signals in this case are load angles – δ . For each of AMs in analogy with the optimal slipping there is some angle δ_{opt} , at which the power losses are minimal, it is indicated by [3].

$$\delta_{opt} = \arctg \frac{Q_{1n}}{P_{1l}},$$

$$P_{1l} = \omega_0 M_b + \Delta P_{c1l} \frac{\Delta P_{0m}}{\Delta P_{1cl}} + \Delta P_{0m}, \quad (7)$$

where Q_{1n} , – rated reactive power AM, VAR; ΔP_{1l} – active power consumed by AM on the natural characteristic with load $M_c = M_b$, W; ΔP_{1cl} – losses in AM stator’s copper with the rated load, W.

Results of research

Research of possibility to minimize the losses in AM under the conditions of power supply (PS) voltage asymmetry is of great interest. It is obvious that minimization mode of losses in AM does not lead to asymmetry. But at the same time the stator’s currents symmetrization lead to efficient improvement of AM power indicators. However, the automated symmetrization systems are not invariant to load change [25]. Popular automated loss minimization systems (LMS) are suggested to be used in the power supply and AM, which parameters are symmetrical in phases. In these LMSes a single controller is used, and symmetrical control and TVC’s thyristor adjustment are utilized. Under the PS voltage asymmetry conditions, it is necessary to use a separate phase-by-phase control, which requires a usage of three control channels and three feedback channels. This allows to solve the problem of power loss minimization in AM due to the load angle equality to an optimal angle δ_{opt} and to obtain the symmetrization effect due to the angle δ equality in AM phases. The functional scheme of automated system of power loss minimization in AM with the symmetrization functions is demonstrated in Fig. 2.

It includes: TVC, AM, a device forming a control signal (DFCS) in the angle δ_{opt} function; channels of control of AM phases (CCPA, CCPB,

CCPC); channels of feedback of each phase (CFPA, CFPB, CFPC). The composition of each control channel contains a PI-regulator of angle δ (R δ) and pulse-phase control system – PPCS (Fig.3, a).

Each feedback channel includes (Fig.3, b): a detector of angle δ (D δ) measuring the current lag angle for every half of TVC voltage period and converting the angle value into the present voltage of feedback $U_{fA}(U_{fB}, U_{fC})$; a storage element (SE) keeping a feedback voltage value, a magnitude of which is renewed in a time interval $t = 0,01$ s. The minimization system operation begins with finishing the transient process of motor starting.

The principle of power supply operation with symmetrical voltage is as follows: in load reduction at AM shaft (angle δ increase) the action of feedback leads to decrease of output voltage of the thyristor converter, which in turn leads to AM’s stator currents decrease.

As a result it is possible to keep the angles δ equality to the required value δ_{opt} .

This allows to solve the problem of loss minimization. In supply from a power source with asymmetric voltage both losses minimization in AM and currents symmetrization are accomplished due to the equality of angles δ in each of the AM phases.

Wherein the valve switching-on angles of the thyristor converter are asymmetric in principle [14].

The calculation of automated system parameters is performed on the example of asynchronous motor 4A90L4. Optimal angle δ value can be obtained from equations (6) and (7)

$$M_b = 14,8 \sqrt{\frac{187,3}{364,7}} = 10,6 \text{ Nm}; \quad (8)$$

$$P_{1l} = 157 \cdot 10,6 + 304,7 \frac{187,3}{364,7} + 187,3 = 2007,9 \text{ W}; \quad (9)$$

$$\delta_{opt} = \arctg \frac{1680,1}{2007,1} = 39,9 \text{ el. deg.} \quad (10)$$

The system of pulse-phase control is described according to the equation

$$\alpha = 0 - K_{PPCS \alpha} U_{out r}, \quad (11)$$

where $K_{PPCS \alpha}$ – coefficient of PPCS transferring, relative units.

Wherein the PPCS transferring coefficients are indicated as follows

$$K_{PPCS \alpha} = \alpha_{\max} / U_{out r \max} = 120/10 = 12 \text{ rad/V.} \quad (12)$$

It is possible to describe the feedback channel by means of an amplifying link with the transfer coefficient

$$K_{fb} = U_{fb \max} / \delta_{\max}, \quad (13)$$

where $U_{fb \max} = 10 \text{ V}$ – maximal feedback voltage.

Angle δ_{\max} under typical conditions in the first quadrant does not exceed 90 el. degrees, however with the presence of sufficient voltage asymmetry of power supply its value can achieve 120 el. degrees in some phases [27]. The input signal detector voltage is indicated in accordance with condition of the set voltage equality and feedback voltage with the angle δ value, which is equal to the δ_{opt} one.

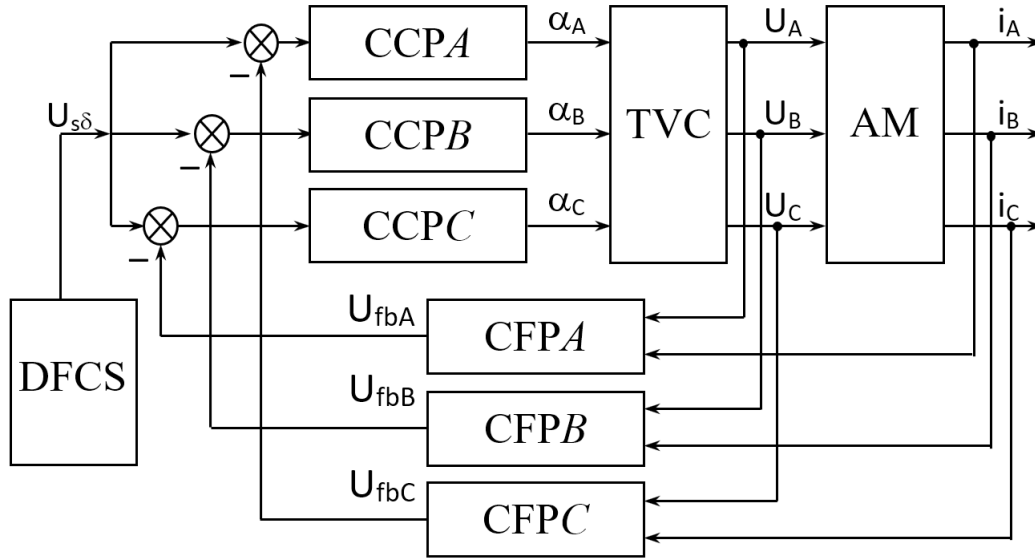


Fig.2. Functional scheme of the automated loss minimization system in AM.

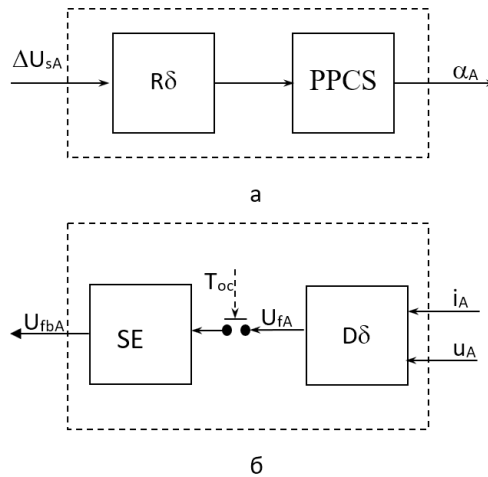


Fig.3. Functional schemes: a – control channel and b – phase A feedback channel of the loss minimization system.

$$U_{s\delta} = \delta_{opt} K_{fb}, \quad (14)$$

Each angle δ regulator is a PI-regulator, which is described by transmission function [28]

$$H_{p\delta}(p) = \frac{1}{K_M K_{TVC}} J_{\Sigma} + \frac{1}{K_M K_{TVC}} \frac{J_{\Sigma}}{4T_E p K_{fb} 2T_E K_{\delta}} = K_p + \frac{K_i}{p}, \quad (15)$$

where K_p and K_i – coefficients of proportional and integral constituents, respectively.

For the considered motor 4A90L4 calculated values of the angles δ controllers coefficients are

as follows: $K_p = 0.46$ and $K_i = 16.2$, respectively.

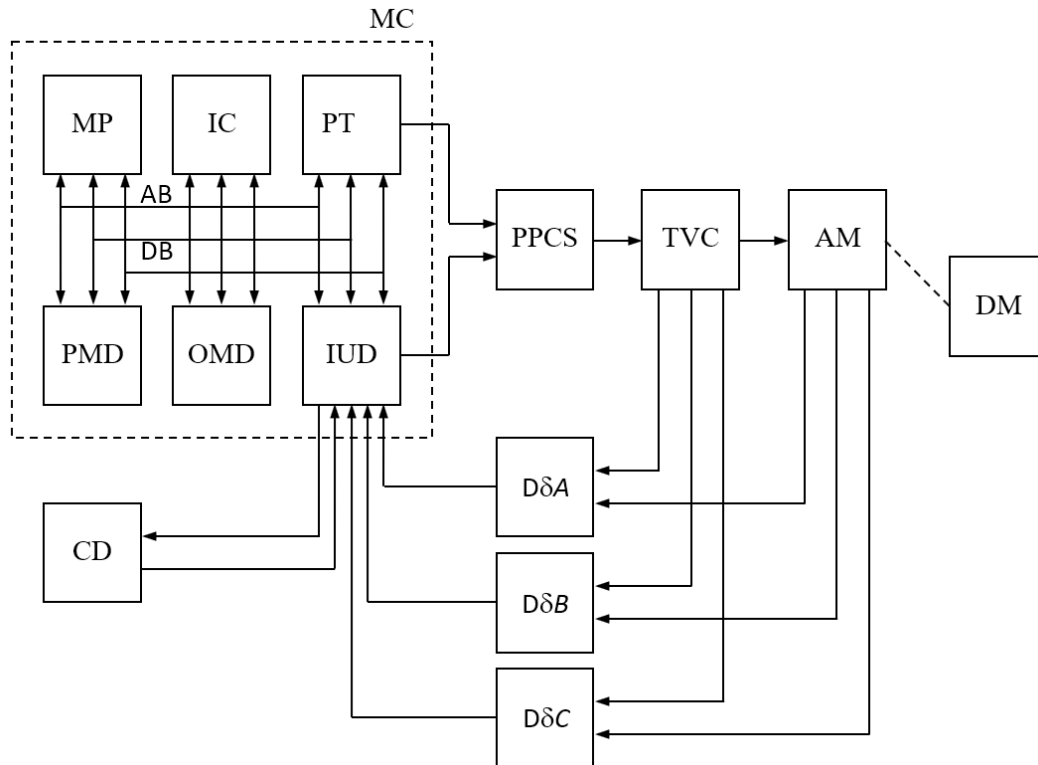


Fig. 4. Functional scheme of microprocessor control.

The functional scheme of microprocessor control of the loss minimization system is presented in Fig. 4 for general case.

The scheme demonstrates: MC – microcontroller, which includes MP – microprocessor; IC – interruption controller; PT – programmable timer; PMD – permanent memory device; OMD – operational memory device; IUD – input-output device; AB, DB, CB – address bus, data bus, control bus. In the scheme one can also see the following: PPCS – pulse-phase control system; TVC – thyristor voltage converter; AM – asynchronous motor; DM – drive mechanism; DδA, DδB, DδC – angle δ detectors of phases A, B, C, respectively; CD – control desk of the loss minimization system.

The microprocessor control system of LMS performs the base functions: calculation of the

required angle δ depending on parameters of motor used, and forming the driving signal U_s based on δ_{opt} calculation; calculation of regulators parameters and performing the angle δ regulators functions, forming control signals; updating the feedback signals and keeping their values during the power supply voltage half-period; controlling the voltage of every TVC phase in the function of calculated angle δ_{opt} and the present feedback signals; control of running the loss minimization system by means of information exchange between a system and a control desk.

Algorithm of control system operation is based on the LMS run principles and demonstrated in Fig. 5.

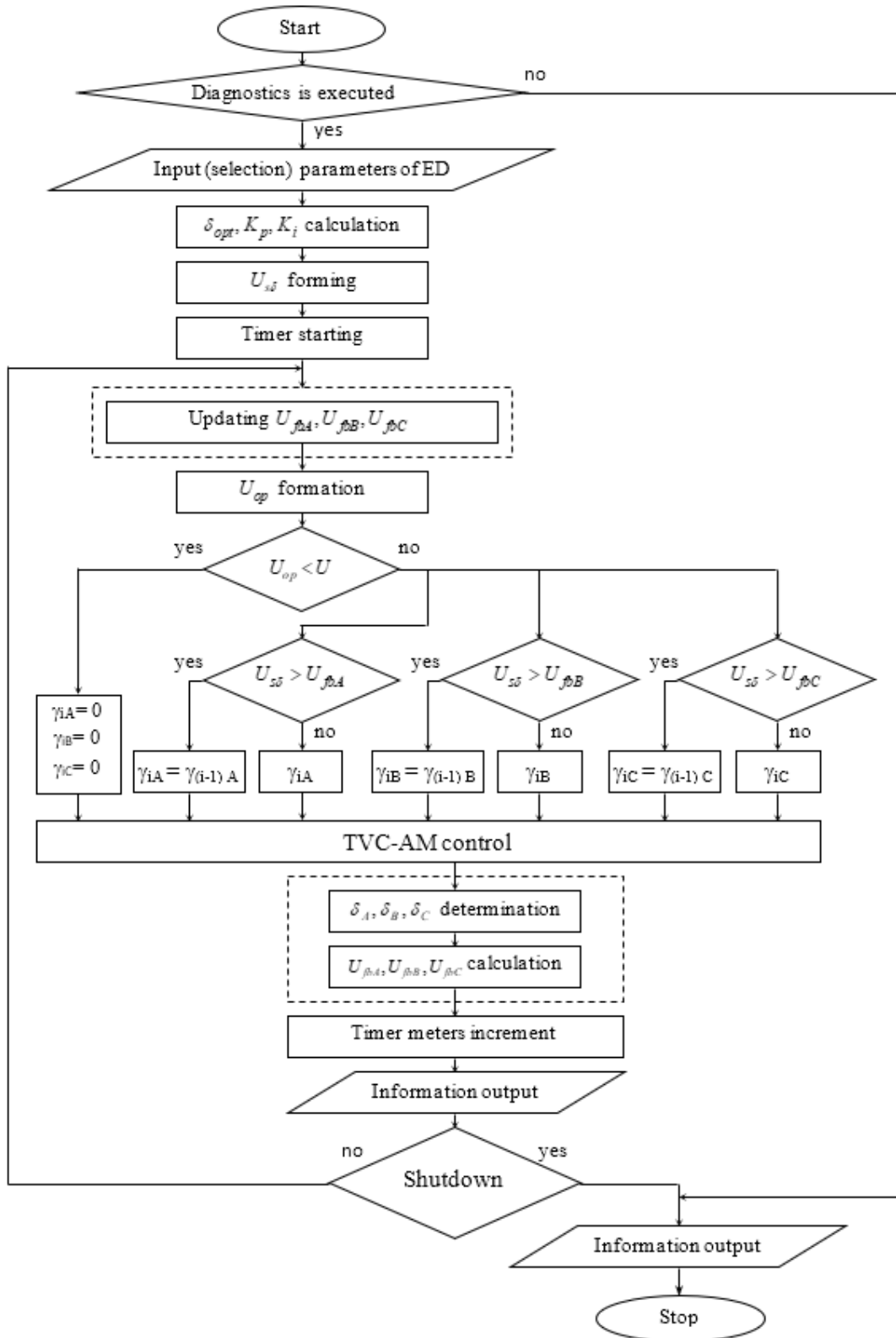


Fig. 5. LMS control algorithm.

Operation of system starts from a signal from the control desk or in automatic way on completing the transient process connected with AM speed change. After signaling about the beginning of a run the MP performs LMS control, diagnosing all its elements. If a kind of

malfunction is detected, the information is sent to the control desk, and the system is automatically switched out. A control desk operator permits a repeated switching-on after detecting the reasons of malfunction and troubleshooting. If the control is successfully performed the operator should

enter from the control desk the drive parameters (or select them from database) necessary for calculation of the angle δ_{opt} and angles δ regulator parameters by microprocessor. Generally, this operation is required and carried out during the first start of control system. In the course of the next system start and under the condition of invariability of power unit of drive elements this is executed in automatic way without operator's action. On calculating the optimal control angle the forming of the preset signal $U_{s\delta}$ voltage is carried out. The start of timer counters, which are necessary for counting time intervals, occurs. The feedback signals, which are formed by the angle δ detectors, are updated for a time equal to power supply voltage half-period. This implies a pause equal $t = 0.01$ s. in the beginning of a voltage regulation process. After this time interval finished detectors determine the information of the present angle δ values, according to which the feedback U_{fbA} , U_{fbB} , U_{fbC} voltages are formed. These values are memorized in the storage elements and kept during the next time interval $t = 0,01$ s. The necessity to transit to the main run characteristic (in PS voltage asymmetry and the load moments, which are more than a boundary ones) was justified before. To do this the forming of reference voltage was implemented in the operation algorithm. The reference voltage U_{op} value is compared with a set voltage $U_{s\delta}$. If the condition $U_{op} < U_{s\delta}$ is observed, the dead pause values of TVC phases in synchronizing with the load current equal zero. After this the banning on volt-age adjustment and AM transition to the main characteristic continues. If the condition is not observed, the LMS running limitation is not required.

The subsequent algorithm procedure of control system operation is the verification of the following conditions: $U_{s\delta} > U_{fbA}$, $U_{s\delta} > U_{fbB}$ and $U_{s\delta} > U_{fbC}$. If the set voltage $U_{s\delta}$ exceeds the present feedback voltage, the control voltage is zero. This corresponds to the fact that the PPCS dead pause γ_i value does not change and corresponds to the previous step $\gamma_{(i-1)}$ value, which is right for each phase. If the condition $U_{s\delta} > U_{fb}$ in any phase is not observed, then the control signals, which determine the present values of PPCS dead pause γ_i , are formed. After forming the PPCS control pulses, corresponding to the

dead pauses γ in each phase, the voltage adjustment of TVC, AM and drive mechanism is performed. Timer counters increment and presentation of information about the present values of LMS parameters to the control desk is carried out.

Time countdown is performed by timers before LMS run completion. LMS run interruption can be performed by an operator, diagnostic of system or one of drive protection devices [27]. On completing the drive running the information of the system parameters is presented to CD. If the system run is not completed, the cycle is repeated wherein the feedback voltages in the storage elements are updated not after each timer counter increment, but in $t = 0.01$ s.

The structure and control algorithm complexity can be changed depending on the functional capabilities of TVC-AM drive elements [8, 9]. For example, ensuring the electric drive parameter control in each time moment corresponding to the timer counter increment, the adaptive angles δ controllers should be used. In this case the controller parameters are not fixed, but calculated by the microprocessor after each timer counter increment. As mentioned above, this allows to increase the LMS operation speed. Depending on the offered microprocessor system run algorithm, one can choose the necessary control system hardware, which is not difficult, if the modern level of development and variety of the microprocessor means are taken into account [10-14]. Basic requirements, which MC loss minimization system should meet, are the presence of necessary integrated peripheral devices and principal possibility to perform an algorithm of the mentioned complexity. In addition the electrical drive TVC-AM along with the modes of symmetrization and power loss minimization is to provide commonly accepted functions of AM smooth descent and braking [9, 10].

Conclusions

1. Artificial adjusting characteristic of a drive corresponding to the power loss minimization mode is calculated in advance based on the solution of an extreme controlling problem.

2. Engineering implementation of the loss minimization mode in steady state is possible only in closed electrical drive circuits. It is not reasonable to use a slipping feedback since the electrical drive operation occurs in the area close to a rated slipping.

3. The structure of automated loss minimization system with the simultaneous symmetrization functions in supply from an asymmetrical voltage source is offered. Separated phase-by-phase control that implies the usage of three channels of control and three channels of feedback is implemented in the system.

4. The problem of AM power loss minimization is solved due to preservation of the load angles δ equality to the optimal value. In supply from the asymmetric voltage source both the simultaneous AM power loss minimization and simultaneous current symmetrization are achieved due to the angles equality in each phase of asynchronous motor. Wherein the valves switching-on angles of the thyristor voltage converter are asymmetrical basically.

5. The developed automated symmetrization system is efficient due to design peculiarities not only in power supply voltages asymmetry, but also with the asymmetry of asynchronous motor parameters themselves.

6. The offered functional scheme of microprocessor control and control algorithm increases the capabilities of automated loss minimization system. The structure and control algorithm complexity can be changed depending on the functional drive element capabilities.

References

- [1] Andriushchenko O. A., Bojko A. A. Uluchshenie pokazatelej asinhronnogo jelektroprivoda s avtomaticheskim simmetrirovaniem tokov pri pitanii ot istochnika s nesimmetrichnym naprjazheniem [Improving the performance of an asynchronous electric drive with automatic balancing of currents when powered from a source with an unbalanced voltage]. *Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «KhPI» – Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2002, no. 1 (12), pp. 147-148. (In Russian).
- [2] Lim S., Nam K. Loss-minimising control scheme for induction motors. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2014, vol. 151, issue 4, pp. 385 - 397.
- [3] Kaoru I., Keito K., Toshiji K. Optimal motion trajectories minimizing loss of induction motor under amplitude limits. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 2576-2581.
- [4] Zhezhenko I. V., Saenko Ju. L., Gorpnich A. V., Shvecova I. A. Nadezhnost' raboty jelektrooborudovaniya pri ponizhenom kachestve jelektrojenergii [Reliability of work of electrical equipment at reduced quality of electric energy]. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2005, 15, part 2, pp. 25–29. (In Russian).
- [5] Pinchuk O. G. Jenergeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelja pri razlichnyh parametrah nessimetrii pitajushhego naprjazhenija [Energy performance of asynchronous motor with different parameters of asymmetry of the supply voltage]. *Elektrotehnika i energetika. Naukovi praci DonNTU – Electrical Engineering and Energy. Scientific works of DonNTU*, 2008, vol. 8 (140), pp. 201–205. (In Russian).
- [6] Bajec P., Fiser R., Ambrozic V., Nastran J. Detection of induction motor squirrel cage asymmetry using dynamic torque spectrum analysis. *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2013, pp. 110 – 114.
- [7] Rinkeviciene R., Petrovas A. Dynamic Models of Asymmetric Induction Drive, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, vol. 1, pp. 683-687.
- [8] Shan Bai, Shenglei Shi, Peng Du. Analysis of the Performance of the Asynchronous Motor in the High Temperature, *Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, 2013, pp. 333-335.
- [9] Saqib M.A., Kashif A.R. Soft starter of an induction motor using neural network based feedback estimator. Tehzeeb-ul-Hassan. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 1- 5.
- [10] Arafa S. Mansour. Three-phase induction motor drive with reactive power injection to supply. *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2017, pp. 421-429.
- [11] Tuton Chandra Mallick, Sharith Dhar, Jubaer Khan. Artificial neural network based soft-starter for induction motor. *2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*, 2015, pp. 228-233.
- [12] Gui-xi J., Hong-jun S. Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous Electromotor, *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*, 2009. doi: 10.1109/gcis.2009.104.
- [13] Juxing Yang, Shoudong Shi, Shibin Ren, Enfeng Cai, Jingbo Zhou. A study of fuzzy control algorithm applying to induction motor soft-starter. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*, 2012, pp. 347-350.
- [14] Boyko A. A. Analiz vozmozhnosti ekonomyi energyi potrebyaemoy liftovymi lebedkami pri primenenii tiristornyh preobrazovateley napryazheniya [Analysis of the possibility of saving energy consumed by lifting winches when using thyristor voltage converters]. *Pidiomno-transportna tekhnika – Lifting-transport technique*, 2014, no. 3 (43), pp. 54–63. (In Russian).

- [15] Liang X., Ilochonwu O. Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, no. 47 (1), pp. 271-280. doi: 10.1109/icps.2010.5489897
- [16] Pinchuk O. G. Energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh parametroh nessimetrii pitayushchego napryazheniya [Energy performance of asynchronous motor with different parameters of asymmetry of the supply voltage]. *Elektrotehnika i enerhetyka. Naukovi pratsi DonNTU – Electrical Engineering and Energy. Scientific works of DonNTU*, 2008, vol. 8 (140), pp. 201–205.
- [17] Tremlin R. Soft–Start drives. *Wire Ind*, 2006, no. 626, pp. 92–96.
- [18] Yao Lu, Jun Tong, Qian Zhang, Lei Sun. Research and design of a multifunctional soft starter. *32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, 2017, pp. 1069-1073.
- [19] Boyko A.A, Budashko V.V, Yushkov E.A, Boyko N.A. Synthesis and research of automatic balancing system of voltage converter fed induction motor currents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 1, issue 2 (79), pp. 22-34.
- [20] Atef S. Al-Mashakbeh, M. Zagirnyak, D. Mamchur, A. Kalinov. Analysis of the mutual influence of supply mains and electrical consumer in tasks of induction motors diagnostics. *IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, 2015.
- [21] Lyutarevich A. G., Goryunov V. N., Dolinger S. Yu., Hasevskiy K. V. Voprosy modelirovaniya ustroystv obespecheniya kachestva elektricheskoy energyi. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, no. 1 (117), pp. 168–173.
- [22] Thanh Hai Phung, Jean Christophe Crebier, Yves Lembeye. Voltage balancing converter network for series-connected battery stack. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 3007-3013.
- [23] Amin Ashraf Gandomi, Saeid Saeidabadi, Seyed Hossein Hosseini. A high step up flying capacitor inverter with the voltage balancing control method. *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 2017, pp. 55-60.
- [24] Filippov A. O. Jeksperimental'noe issledovanie transformatornogo simmetrirujushhego ustrojstva. *Izvestija SPbGAU*, 2010, no. 19, pp. 22-30.
- [25] Boyko A., Volyanskaya Ya. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 4/5 (88), pp. 50-59.
- [26] Yeh C.C., Demerdash N. A. O. Fault-Tolerant Soft Starter Control of Induction Motors with Reduced Transient Torque Pulsations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, no. 24 (4), pp. 848-859. doi: 10.1109/tec.2009.2025340.
- [27] Said D.M., Ahmad N., A.A.M. Zin. Power supply quality improvement: harmonic measurement and simulation. *National Power Engineering Conference. PECon 2013*, 2013, pp. 352-358.

About authors



Boyko Andrey,
Ph.D., Professor, Director of the Institute of electromechanics and energy management, Odessa National Polytechnic University.
E-mail: a.o.boyko@opu.ua



Sokolov Yaroslav,
senior lecturer of the Department of the power supplying and energy management, Odessa National Polytechnic University.
E-mail: sokolov@opu.ua



Besarab Aleksandr,
Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of the power supplying and energy management, Odessa National Polytechnic University.
E-mail: besarab@opu.ua



Shapa Ludmila,
Ph.D., Associate Professor, Department of Foreign Languages, Odessa National Polytechnic University
E-mail: shapa.od@gmail.com

The Information System of Mass Notification in Emergency Situations with an Algorithm of Optimization of Evacuation Plans Based on the Client — Server Architecture

Arutiunian V.E.

Zaporizhzhya Institute of Economics and Information Technologies
Zaporizhzhya, Ukraine

Abstract. The purpose of this article is to develop a modern information system for mass notification. The system must take into account the disadvantages of all existing systems. The aim has been achieved by the development and implementation of the program complex of an algorithm for construction the effective evacuation plans based on the client-server architecture. The complex, in addition to the server and client parts, also uses the Google Maps services. Today, a lot of information systems for the mass notification of the population have been developed. An analytical review of some of them revealed a number of disadvantages related to the efficiency of the systems, the ability to effectively distribute the population to evacuation points or shelters. A feature of the program is an innovative approach for calculation of an effective evacuation plan for each victim, which has not been presented previously. To find an effective path, three parameters are important, i.e., distance; the available spaciousness of the emergency shelter; and speed. Thanks to the algorithm, it is possible to calculate the optimal path for each victim individually, adjusting the distance depending on the speed and fullness of the shelter. The path found will not always be the shortest, but it will be effective for the uniform filling in of the shelters. The effectiveness of the algorithm is presented in the models we programmed in the AnyLogic program. The use of the evacuation model was analyzed using both a short path and the developed algorithm to calculate the most efficient path. The simulated situations show the possibility of saving more people.

Keywords: information systems, client-server architecture, interactive maps, mobile applications, mass notification, emergency situations, and AnyLogic program.

DOI: 10.5281/zenodo.3239138

Sistem informatic de notificare în masă a populației cu un algoritm de optimizare a planurilor de evacuare pe baza arhitecturii „client-server”

Arutyunyan V.E.

Institutul de Economie și Tehnologie Informației din Zaporije
Zaporije, Ucraina

Rezumat. Scopul acestui articol este de a elabora un sistem informatic modern de informare în masă a populației. Pentru ca sistemul dezvoltat să fie cât mai eficient posibil, este necesar să se ia în considerare deficiențele tuturor soluțiilor existente. Scopul a fost realizat prin dezvoltarea și implementarea în pachetul software a unui algoritm de calcul și construire a planurilor de evacuare eficiente pentru situații de urgență pe baza arhitecturii client-server. Complexul, pe lângă componentele serverului și clientului, utilizează de asemenea serviciile Google Maps pentru a lucra cu o hartă interactivă. La moment, a fost elaborat și implementat un număr suficient de sisteme informatice pentru informarea în masă a publicului în situații de urgență. O estimare analitică a unora dintre ele, prezentată în acest articol, a evidențiat o serie de deficiențe legate de eficiența sistemelor, capacitatea de a distribui efectiv populația în punctele de evacuare sau în adăposturi. Particularitatea acestei soluții software este o abordare inovatoare a calculului celui mai eficient plan de evacuare pentru fiecare victimă, care nu a fost prezentat mai devreme. Atunci când găsim cea mai eficientă modalitate pentru fiecare victimă, trei parametri sunt cei mai importanți: distanța până la adăpost; gradul de umplere a adăpostului; viteza de mișcare a victimei. Datorită acestui algoritm, devine posibilă calcularea modului optim în ceea ce privește evacuarea fiecărei victime în mod individual, ajustarea distanței în funcție de viteza de mișcare și de plenitudinea punctelor de colectare. Călea găsită în acest fel nu va fi întotdeauna scurtă, dar va fi eficientă pentru distribuirea și umplerea uniformă a adăposturilor.

Cuvinte-cheie: sisteme informatice, arhitectura client-server, hărți interactive, aplicații mobile, alertă publică, urgență, program AnyLogic.

Информационная система массового оповещения населения с алгоритмом оптимизации планов эвакуации на базе архитектуры “клиент — сервер”

Арутюнян В.Э.

Запорожский институт экономики и информационных технологий

Запорожье, Украина

Аннотация. Целью данной статьи является разработка современной информационной системы для массового оповещения населения. Чтобы разработанная система была максимально эффективная, необходимо учесть недостатки всех существующих решений. Поставленная цель реализована путем разработки и внедрения в программный комплекс алгоритма расчета и построения эффективных планов эвакуации при чрезвычайных ситуациях на базе архитектуры “клиент — сервер”. Комплекс, помимо серверной и клиентской части, также использует сервисы Google Maps для работы с интерактивной картой. Сегодня разработано и внедрено достаточное количество информационных систем массового оповещения населения при чрезвычайных ситуациях. Аналитический обзор некоторых из них, который представлен в данной статье, выявил ряд недостатков, связанных с эффективностью работы систем, возможностью эффективного распределения населения по точкам эвакуации или убежищам. Особенностью данного программного решения является инновационный подход к вопросу расчета самого эффективного плана эвакуации для каждого потерпевшего, чего не было представлено ранее. При нахождении самого эффективного пути для каждого потерпевшего важными являются три параметра: расстояние до убежища; наполняемость убежища; скорость движения потерпевшего. Благодаря данному алгоритму становится возможным рассчитывать оптимальный путь в плане эвакуации для каждого потерпевшего индивидуально, корректируя расстояние в зависимости от скорости движения и наполненности точек сбора. Найденный таким образом путь не всегда будет минимально коротким, однако будет эффективным для равномерного распределения и заполнения убежищ. Эффективность работы алгоритма распределения потерпевших по убежищам и точкам эвакуации представлена в запрограммированных нами моделях в программе AnyLogic. Проанализировано использование модели эвакуации при помощи короткого пути и с помощью разработанного алгоритма расчета максимально эффективного пути. Смоделированные ситуации показывают возможности спасения значительно большего количества людей. Разработанная нами информационная система эффективно работает в моделях, которые построены в среде программы AnyLogic.

Ключевые слова: информационные системы, архитектура клиент-сервер, интерактивные карты, мобильные приложения, оповещение населения, чрезвычайная ситуация, программа AnyLogic.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие информационных технологий затрагивает сетевые технологии, коммуникативные и вычислительные устройства. Как результат — связь жизнедеятельности человека и информационных технологий становится все теснее, они все чаще внедряются в разные сферы жизни. Одной из актуальных областей научных исследований является сфера безопасности человечества, своевременного предупреждения об опасности разного характера и разработка наиболее эффективных планов эвакуации с использованием технологических возможностей мобильных устройств.

В современных условиях требования к данным системам значительно возросли из-за усложненной развитой инфраструктуры, роста плотности населения, повышения рисков техногенных и природных катастроф. Помимо этого, массовое использование смартфонов облегчает сегодня возможности применения мобильных приложений

массового оповещения, следовательно, возникает необходимость эффективно использовать возможности современных мобильных устройств в системах массового оповещения. Выберем для анализа такие системы массового оповещения: J-ALERT — спутниковая система, работающая в Японии; IPAWS — интегрированная система массового предупреждения и оповещения в США и RSO — региональная система оповещения, которая работает в Польше. Нами были выбраны для анализа именно эти системы, поскольку они являются самыми современными, масштабными и функциональными, используют интересные нам методы оповещения. Преимуществом системы оповещения J-ALERT является использование всех современных каналов связи; она также охватывает практически полностью территорию Японии, использует мобильные аксессуары и передачу данных с помощью сети Интернет. Ограничением использования данной системы является отсутствие обратной связи от пострадавших

через мобильные устройства, поскольку становятся невозможными гибкие и динамичные изменения в оповещении населения при изменении различных факторов угрозы или перемещения пострадавших в процессе эвакуации [1].

Анализ имеющихся результатов работы RSO системы показал, что основным преимуществом данной системы является использование мобильного приложения в системе оповещения, которое позволяет отслеживать состояние различных видов опасности в режиме онлайн. Ограничением, в свою очередь, является отсутствие обратной связи от мобильных устройств через мобильное приложение для более гибкой и точной работы системы оповещения [2].

Основными преимуществами системы массового оповещения в США является ее масштабность, обработка всех распространенных видов опасности, покрытие всей территории США, использование протокола Интернета IP для передачи данных. Однако, в данном программном комплексе отсутствуют приложения для мобильных устройств, смартфоны используются только для получения push-сообщений и sms, что в целом, ограничивает эффективность работы системы [3-8].

Все проанализированные современные системы оповещения, которые уже применяют в своей структуре архитектуру клиент — сервер, используют мобильные устройства только для передачи информации в статическом режиме без корректировок в режиме реального времени или вообще не предлагают никаких планов эвакуации.

Также задача массового оповещения посредством мобильных устройств активно рассматривается как одно из решений множеством зарубежных ученых. Muhammet S. Gulum со своими соавторами рассматривали эффективность всех существующих систем оповещения на примере Университета науки и технологий Миссури и пришли к выводу максимальной эффективности при использовании смартфонов или телефонов в структуре систем оповещения [9].

Исследование Alessio Malizia также подтверждает эффективность использования мобильных устройств при массовом оповещении людей с физическими или возрастными особенностями [10].

Sih-Ting Zeng и Ching-Min Lee в своей работе предлагают использовать мобильное приложение на смартфон для оповещения населения, но смартфон в данном случае будет использоваться лишь для получения информации об эвакуации, а сервер только для рассылки. Никаких расчетов для определения эффективного плана эвакуации или для его изменения в процессе работы системы авторы не предложили [11].

Ученые Ryan Scott Rodkey, Guy Miasnik и Kimberly Zeitz со своими коллегами также используют в своих разработках клиент — серверную архитектуру и предлагают группировать клиентов (потенциальных потерпевших) по различным признакам: местоположение, зона поражения при чрезвычайной ситуации, место работы или учебы, и другие социальные признаки групп или объединений людей. После группировки существует возможность уже дифференцировано подходить к оповещению населения, но нерешенной остается проблема определения оптимального плана эвакуации, который был бы более эффективным и учитывал не только группировку потерпевших по различным признакам, но также скорость их движения, количество свободных мест в убежищах или точках сбора [12-14].

Корейские ученые во главе с профессором Tae Hyung Kim предложили использование системы «умный город» и технологий IoT для массового оповещения населения. В данной информационной системе предполагается использование различных датчиков для мгновенного определения чрезвычайной ситуации и мгновенного оповещения, вопрос расчетов и изменения планов эвакуации в данной работе не рассматривается [15].

Mohammed Ghazal совместно со своими коллегами описал разработку веб-портала, который также использует архитектуру клиент-сервер, для правительственных учреждений, чтобы уведомлять пользователей в пределах диапазона опасности в случае аварии посредством SMS или push-уведомлений в мобильное приложение. Кроме того, посредством технологии WiFi в мобильном приложении предусмотрена система навигации внутри помещений, для указания пользователю пути к ближайшему выходу на планах общественных мест зданий, к которым можно получить доступ в автономном режиме без

подключения к Интернету. Данная система обеспечивает потенциальных потерпевших уведомлениями и статическими планами эвакуации, которые не являются наиболее эффективными. Серверная часть используется лишь для определения чрезвычайной ситуации и отправки сообщений клиентам, обратная связь отсутствует, как и отсутствует расчет оптимального пути эвакуации [16].

Asad Ali, H.C. Gabler и Shadman Sakib со своими коллегами предложили системы оповещения для локальных катастроф или аварий на транспорте. Алгоритмы работы данных систем основаны на автоматическом определении аварии при помощи специальных датчиков и автоматическом оповещении локального круга потерпевших и экстренных служб [17-19]. Никаких планов эвакуации или обработки данных от клиентов системы не учитывается, что делает данные системы неполными.

Ricardo Lent со своими соавторами посвятили свою работу определению максимально быстрой передачи данных абонентам информационной системы посредством сети Интернет. Предлагаемая архитектура использует многоадресную передачу на уровне приложений для быстрой доставки «аварийного» трафика без поддержки выделенной сетевой инфраструктуры; в данной системе внедрен механизм, который создает согласованные, безконтурные и самонастраивающиеся деревья каналов связи, с возможностью динамически изменяться во времени для эффективной работы с изменяющимися условиями [20]. Данное решение хорошо применимо как дополнение в существующих системах оповещения, так как оно не затрагивает вообще самого процесса эвакуации, формирования плана эвакуации, определения оптимального пути.

Prakhar Bhatt со своими коллегами разработал информационную систему с клиент – серверной архитектурой для оповещения об аварийных ситуациях на дорогах. Для решения этой задачи используется мобильное приложение, сервер и сервисы Google Maps. При создании аварийной ситуации клиенты получают уведомление на интерактивной карте с отметкой места происшествия, но никаких расчетов для обхода данного места или альтернативного маршрута предложено

клиенту не будет [21]. Данная система оповещения носит лишь информативный характер и малоэффективна.

Практически все авторы предлагают использование архитектуры клиент — сервер для решения задач оповещения и эвакуации населения, некоторые предлагают использование интерактивных карт типа Google Maps для определения местонахождения потерпевших или их пути. Но ни одна работа не затрагивает проблему оптимизации плана эвакуации: нахождение максимально эффективного алгоритма эвакуации населения, с анализом на сервере данных полученных от мобильных устройств клиента и от интерактивных карт. Ни один из представленных авторов не предлагает определять индивидуальный план эвакуации для каждого потерпевшего и динамически его изменять в процессе работы системы, беря в расчет данные от клиентов (скорость, местоположение) всех потерпевших в определенном квадрате и наполняемость точек для эвакуации или убежищ.

В дальнейшем нами планируется дополнить алгоритм получения плана эвакуации при отсутствии соединения с интернетом и использовать карты оффлайн на клиентской части. Также планируется анализировать самые популярные маршруты потенциальных потерпевших и разработать алгоритм расчета нескольких эффективных планов эвакуации при возникновении чрезвычайных ситуаций и передачи их потенциальным потерпевшим, чтобы они могли быть у них готовы в случае отсутствия соединения с сетью интернет. Такие шаги улучшат надежность разработанной интерактивной системы оповещения.

Цель нашего исследования — разработать современную информационную систему оповещения населения при чрезвычайных ситуациях, используя архитектуру клиент — сервер, учитывая недостатки всех рассмотренных систем. Для достижения цели разработанная нами система использует алгоритм для расчета максимально эффективных планов эвакуации. Исследование также предполагало разработку математической модели алгоритма и ее апробацию на моделях в программе AnyLogic.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Для решения задачи построения алгоритма эффективных планов эвакуации населения

была разработана математическая модель нахождения кратчайшего пути. Представленная модель была положена в основу разработки системы массового оповещения населения.

В реальной жизни, при возникновении чрезвычайной ситуации в экстремальных условиях, люди будут считать оптимальным путем к убежищам самый короткий. Однако такой выбор не будет оптимальным с точки зрения сохранения большего количества потенциальных потерпевших и общей эффективности информационной системы массового оповещения. При нахождении эффективного пути для каждого потерпевшего важными являются три параметра: расстояние до убежища; время прохождения данного расстояния; скорость движения [22]. Эффективным является путь для каждого потерпевшего, при котором распределение потерпевших по убежищам будет максимально равномерным за одинаковое время.

Пусть Π — множество всех возможных путей от точки x до хранилищ, таким образом когда выбираем путь $P \in \Pi$ постараемся минимизировать величину:

$$\alpha \int ds + \beta \int dt \quad (1)$$

Где α — расстояние; β — время; ds — интеграл по длине пути; dt — интеграл по времени. Учитывая, что $ds = f \cdot dt$, где f — скорость, запишем (1) в виде:

$$\varphi(x) = \alpha \int ds + \beta \int \frac{1}{f} ds$$

$$\varphi(x) = \int C ds, C = \frac{\alpha \cdot f + \beta}{f}$$

Предложенный критерий будем использовать для расчета оптимального пути.

Пусть существует функция $\varphi \in R$, которая на всей своей области равна значению критерия оптимальности.

Для одновременного достижения точки назначения и минимизации критерия оптимальности пострадавший должен двигаться в сторону, противоположной градиенту функции $\varphi(x)$.

Заданная потенциальная функция в точке назначения равна нулю, а на всем остальном

участке пути удовлетворяет уравнению эйконала:

$$\|\nabla \varphi(x)\| = C$$

Где $\nabla \varphi(x)$ — градиент функции $\varphi(x)$. Таким образом вектор движения потерпевшего записывается в виде:

$$\vec{x} = -f(x, \theta) \frac{\nabla \varphi(x)}{\|\nabla \varphi(x)\|}$$

Где $f(x, \theta)$ — скорость движения потерпевшего, находящегося в точке x и движущегося в направлении θ [23]. Для решения данного уравнения используется метод Fast Marching Method, данный метод базируется на принципе Huyghen's, который представляет собой конструкцию, включающую расширяющиеся волновые фронты, и методом Dijkstra, который является алгоритмом для вычисления маршрутов с наименьшей стоимостью в сети.

Оптимальный план эвакуации предполагает, что девайс потерпевшего передает его местонахождение и скорость передвижения, при этом, с помощью сервиса Google Maps (с помощью математических расчетов) определяется расстояние до убежищ, что и является оптимальным путем движения к укрытию.

Благодаря данному алгоритму становится возможным рассчитывать оптимальный путь эвакуации для каждого потерпевшего отдельно, корректируя расстояние в зависимости от скорости движения. Найденный таким образом путь не всегда будет минимально коротким, однако будет эффективным для равномерного распределения и заполнения убежищ [24]. Рассчитанный критерий оптимальности будет использоваться для проверки правильности выбранного пути серверной частью программного комплекса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами был разработан программный комплекс для массового оповещения населения при чрезвычайных ситуациях. Комплекс, помимо серверной и клиентской части, использует еще сервисы Google Maps для работы с интерактивной картой [25]. Особенностью данного программного

решения является инновационный подход для решения вопроса расчета и передачи потерпевшему плана эвакуации. Сервер на базе полученных от клиента данных, используя сервис Google Maps, рассчитывает оптимальный и эффективный план эвакуации, который поможет сохранить жизни большего количества людей. При критическом изменении некоторых входных параметров сервер разрабатывает новый план и передает его клиенту, что позволяет динамично изменять планы эвакуации на наиболее эффективные.

Кратчайший путь не может быть эффективным, так как при планировании точек эвакуации или временных убежищ они

вмещают только определенное количество людей, а остальные будут обречены [26].

Разработанный программный комплекс включает в себя алгоритм, позволяющий регулировать равномерную заполняемость мест укрытия или точек эвакуации. Планы эвакуации рассчитываются для каждого потерпевшего и могут динамически изменяться в зависимости от изменения скорости движения потерпевшего, его удаленности от нужной точки, наполненности данной точки или вмешательства оператора информационной системы [27].

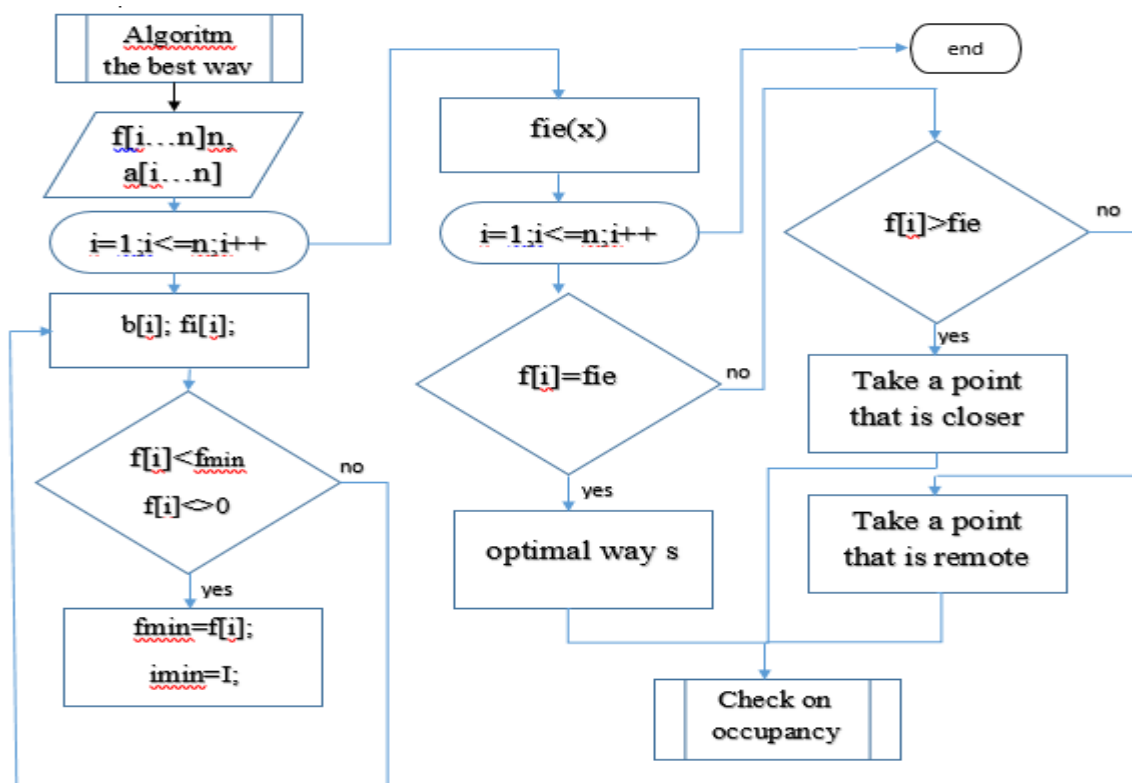


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нахождения оптимального пути. ¹

На рисунке 1 представлена блок-схема одного из этапов алгоритма нахождения оптимального пути, в котором определяется короткий путь к убежищу и происходит подбор маршрута для каждого потерпевшего.

Эффективность работы разработанного нами алгоритма распределения потерпевших по убежищам и точкам эвакуации можно увидеть в запрограммированных нами моделях в программе AnyLogic.

Модель предусматривает следующие условия: генерируется толпа потерпевших в

отдельной области на условной карте, но у каждого потерпевшего своя скорость движения, смоделированы три условных убежища, которые удалены от толпы на разное расстояние. Одинаковые модели были запрограммированы по-разному для исследования того, какой из методов будет эффективнее.

Показанная ниже модель использует примитивный алгоритм нахождения кратчайшего пути. Видно, что толпа потенциальных потерпевших собралась у

ближайшей точки сбора и лишь незначительная часть двинулась ко второй точке сбора, в то время, когда третья точка сбора осталась неиспользованной, при этом каждый потенциальный потерпевший двигается с разной скоростью и все равно попадает в очередь на входе в первую точку сбора.

Такой план эвакуации является неэффективным и приведет к большому количеству человеческих жертв (рис. 2).

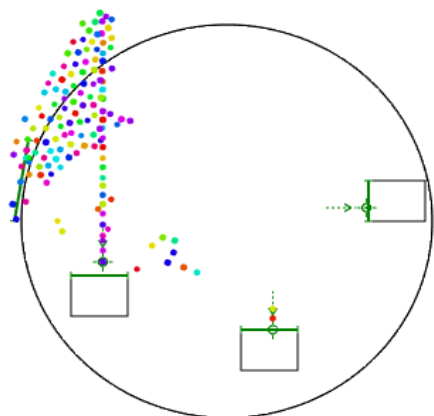


Рис. 2. Модель эвакуации при использовании алгоритма короткого пути.²

Запрограммированный в следующей модели алгоритм для расчета оптимального плана эвакуации, который был просчитан и разработан нами, показывает более эффективную работу.

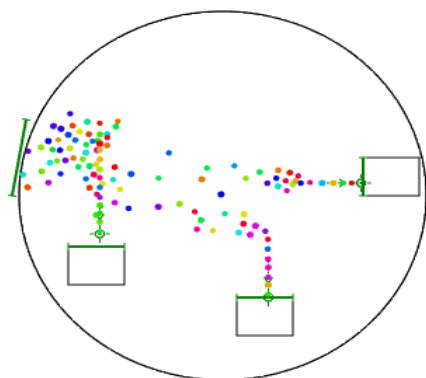


Рис. 3. Модель эвакуации при использовании разработанного алгоритма расчета пути.³

Учитывая параметры, получаемые от клиентских программ потенциальных потерпевших и от сервисов интерактивных карт, каждый потерпевший получает данный тип архитектуры использует инновационный подход к системам оповещения и эффективен благодаря использованию мобильных устройств в

оптимальных маршрут следования до точек эвакуации.

Как следствие, мы видим равномерное распределение очереди потерпевших, которые движутся с разной скоростью, за одинаковый промежуток времени (рис.3).

Таким образом, представленный алгоритм оптимизации планов эвакуации на базе архитектуры клиент – сервер, который был использован для разработанной нами информационной системы массового оповещения населения при чрезвычайных ситуациях, принципиально отличается от существующих сегодня систем, представленных, например, в работах М.В. Носова [27], М.Г. Ghazel et al. [16], Т.Н. Kim et al. [15] и др. авторов, поскольку позволяет использовать возможности современных приложений для мобильных девайсов, иметь обратную связь от потерпевших, оптимально рассчитывать возможности убежища и равномерно распределять за единицу времени потерпевших, находящихся в зоне эвакуации – этот процесс с помощью представленного алгоритма индивидуализирован для каждого потерпевшего в отдельности. Одно из важных отличий – планы эвакуации могут изменяться динамически в зависимости от наполняемости убежища, расстояния до него и скорости движения потерпевшего.

ВЫВОДЫ

В данной статье для решения задач эвакуации населения впервые применяется разработанный автором алгоритм нахождения оптимального плана эвакуации, который предполагает за единицу времени равномерно разместить максимально большое количество потерпевших в убежищах что делает его максимально эффективным. Каждому потерпевшему будет рассчитан отдельный маршрут, который зависит от скорости, расстояния и наполненности убежища.

Разработанная нами информационная система массового оповещения населения при чрезвычайных ситуациях построена на архитектуре клиент – сервер, которую используют некоторые существующие системы массового оповещения. Многие авторы исследований данной проблематики настаивают на ее использовании, поскольку в современном мобильном мире. Проведенный аналитический обзор показывает, что метод решения задачи массового оповещения населения предложенный автором предлагает

более эффективное использования данной архитектуры и не имеет аналогов.

Клиент оперативно собирает и передаёт необходимые данные, а сервер в свою очередь принимает и анализирует данные от клиента и от сервиса Google Maps, далее сервер рассчитывать наиболее эффективный план эвакуации при чрезвычайных ситуациях для каждого потерпевшего индивидуально и передает их потерпевшим с помощью смартфонов. Расчеты проводятся, используя описанный выше алгоритм, который был построен при помощи математической модели нахождения оптимального пути.

Смоделировав ситуации в среде программы AnyLogic мы заложили в одну модель разработанный алгоритм, а во вторую обычный алгоритм нахождения кратчайшего

пути к точкам сбора или убежищам. Смоделированные ситуации показали эффективность работы нашего алгоритма, что дает возможность спасения значительно большего количества людей.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Block diagram of the algorithm for finding the optimal path.

²**Fig. 2.** Evacuation model using the short path algorithm.

³**Fig. 3.** Evacuation model using the developed algorithm for calculating the path.

Литература (References)

- [1] Civil Protection Portal Site of Japan // Available at: http://www.kokuminhogo.go.jp/en/pc-index_e.html (accessed 23.02.2019)
- [2] Alert-IMGW oraz RSO. Available at: <http://antyapps.pl/alert-imgw/> (accessed 23.02.2019)
- [3] Alert origination software providers // Available at: https://www.fema.gov/media-library-data/1513184978922-e4ac90300d4255f54d213b469cc64c24/Alert_Origination_Software_Providers_12072017.pdf (accessed 23.02.2019)
- [4] Jones, E. Organization for the Advancement of Structured Information Standards // Available at: https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1725-25045-4129/090415dm_sig_cap.pdf (accessed 23.02.2019)
- [5] Memorandum of Agreement (MOA) with the Federal Emergency Management Agency (FEMA) // Available at: https://www.fema.gov/media-library-data/1438269192616-64f850f94ddc59227fe0c8612fb5900b/OpenDev_eloopers_07162015.pdf (accessed 23.02.2019)
- [6] Regional Warning System [e-services] // Available at: <https://www.premier.gov.pl/mobile/en/news/news/regional-warning-system-e-services.html> (accessed 23.02.2019)
- [7] Integrated Public Alert & Warning System // Available at: <https://www.fema.gov/integrated-public-alert-warning-system>
- [8] National IPAWS EAS Test Final Report (2017) // Available at: https://www.fema.gov/media-library-data/1523303270960-0ddf8c45ca3eac68c4a4256c39da431c/2017_IPA
- [9] Muhammet S. Gulum, Susan L. Murray, Ph.D. P.E. Evaluation of the Effectiveness of a Mass Emergency Notification System. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2009, doi: 10.1177/154193120905301863
- [10] Alessio Malizia, Teresa Onorati, Andrea Bellucci, Paloma Diaz, Ignacio Aedo. Interactive Accessible Notifications for Emergency Notification Systems. Universal Access in Human-Computer Interaction — Applications and Services. Proceedings of the 5th International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, 2009, Part III, pp.385, doi:10.1007/978-3-642-02713-0_41
- [11] Sih-Ting Zeng, Ching-Min Lee. Personal emergency notification application design for mobile devices. 2014 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE), 2014, doi: 10.1109/ISNE.2014.6839378
- [12] Ryan Scott Rodkey, John Frank Rodkey, David Lynn Hickey, Darren Lynn Ross, Ronald Frank Ramsey, Digital notification and response system. Patent RF, no: US7685245B1, 2010
- [13] Guy Miasnik, Aviv Siegel, Predictive alert targeting for mass notification systems. Patent RF, no: US8542117B1, 2013
- [14] Kimberly Zeitz, Randy Marchany, Joseph Tront, "Speed isn't Enough: Usability and Adoption of an Optimized Alert Notification System", Technology and Society Magazine IEEE, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 47-55.
- [15] Tae Hyung Kim, Ji In Chae, Do Nyun Kim, Next generation architecture examination for Mass Notification System(MNS) collaborating with CCTV for Smart & Safe City. Journal of Engineering Research and Applications

WS EAS National Test Final Report FINAL.pdf (accessed 23.02.2019)

- www.ijera.com ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 3, Part -3 March 2015, pp.39-45
- [16] Mohammed Ghazal, Samr Ali, Marah Al Halabi, Nada Ali, Yasmina Al Khalil. Smart Mobile-Based Emergency Management and Notification System. IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), 2016, doi: 10.1109/W-FiCloud.2016.64
- [17] Asad Ali, Mohamad Eid. An automated system for Accident Detection, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) 2015 IEEE International, 2015, pp. 1608-1612.
- [18] H.C. Gabler, R.R. Krchnavek, J.L. Schmalzel. Development of an automated crash notification system: an undergraduate research experience. 30th Annual Frontiers in Education Conference. Building on A Century of Progress in Engineering Education. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.00CH37135), 2000, doi: 10.1109/FIE.2000.896632
- [19] Shadman Sakib, Mohammad Sayem Bin Abdullah. GPS-GSM based inland vessel tracking system for automatic emergency detection and position notification. 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016, doi: 10.1109/ISCO.2016.7727018
- [20] Ricardo Lent, Omer H. Abdelrahman, Gokce Gorbil, Erol Gelenbe, Fast message dissemination for emergency communications, Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops) 2010 8th IEEE International Conference on, 2010, pp. 370-375.
- [21] Prakhar Bhatt, Saransh Gupta, Prateek Singh, Preeti Dhiman, "Accident and road quality assessment using android google maps API", Computing Communication and Automation (ICCCA) 2017 International Conference on, 2017, pp. 1061-1064.
- [22] Katalevskiy, D.Yu. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii: uchebnoe posobie. [Fundamentals of simulation and system analysis in management: a training manual]. Moskva, 2015. 496 p.
- [23] Akopov A.S., Beklaryan L.A. Agentnaya model povedeniya tolpy pri chrezvyichaynykh situatsiyah [Agent model of crowd behavior in emergency situations] *Avtomatika i telemehanika – Automation and Remote Control*, 2015. no. 10. pp. 131-143. (In Russian).
- [24] Arutiunian V. Kliyent-serverna model' informatsiynoyi systemy masovoho opovishchennya naseleण्या [Client-server model of the information system of mass alert of the population] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical sciences and technologies*, 2018 no.4(14). pp149-158. (In Ukrainian)
- [25] Distance Matrix API: developer's guide. — Available at: <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/start?hl=ru> (accessed 23.02.2019)
- [26] Arutiunian V.E. Suchasna kliyent- serverna model' proqramnoho kompleksu masovoho opovishchennya naseleण्या u nadzvyichaynykh sytuatsiyakh [Modern client-server model of a software package for mass alerting the population in emergencies]. *Komp'yuterni ta informatsiyni systemy ta tekhnolohiyi – Computer and information systems and technologies*, 2018. no.2. pp.69-71
- [27] Nosov M.V. Osnovnye harakteristiki i pokazateli kachestva funkcionirovaniya sistem opoveshcheniya naseleण्या [Main characteristics and quality indicators of public alert systems]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity. — Scientific and educational issues of civil protection*, 2014.no.2. pp. 14-18

Сведения об авторе.



Арутюнян Владимир Эдуардович

Аспирант кафедры информационных технологий Запорожского института экономики и информационных технологий. Сфера научных интересов: информационные технологии, системы автоматизации процессов, математическое и программное моделирование.

E-mail: vova.ara@gmail.com

Estimation of the Effect of External Information on Participants of Web-Communities by IT-Tools under Conditions of Behavioral Economy

¹Kravchenko Olga V., ²Danchenko Elena B., ³Bedrii D. I., ⁴Marunych V. S.

¹Cherkasy State Technological University, ²«KROK» University, ³State Enterprise “Ukrainian Scientific Research Institute of Radio and Television”, ⁴National Transport University

¹Cherkassy, ²Kyiv, ³Odessa, ⁴Kyiv, Ukraine

Abstract. The issues concerning the decision making by a person under the effect of the external information are considered. The authors classify the directions of the existing research. The aim of the study is to analyze the degree of the effect of the external information on a participant of the web-community when making a decision. The aim was achieved with the help of the developed system for collecting and analyzing information in accordance with the rules of the behavioral economics. For the collection and throwing of the necessary information the bot is responsible. The authors expanded and introduced such concepts as: "participant of the web-community", "price of opportunity", "HindSight bias", "expected utility", "utility graph" for the IT sphere. A mathematical model based on the method of analogies of interphase interaction problems is constructed. The structure of the data analysis system of the participants of the web-societies is described with the help of which the collection and processing of data takes place. A useful utility graph is constructed. The most important result in assessing the influence of the external information on the formation of the member's own decision of the web community is that the average value of interest support under the influence of the negative information, from the viewpoint of the subject, increased insignificantly, whereas under the influence of the positive information it has grown substantially. The significance of the results was that the approach developed by the authors can be the basis for construction of new models and methods for forecasting the result of the effect of the external information.

Keywords: web community, information, effect of information, rules of behavioral economics, analogy method, IT data analysis system, bot interlocutor.

DOI:10.5281/zenodo.3239144

Evaluarea impactului informațiilor externe asupra participanților la comunitățile web folosind instrumente IT în economia comportamentală

¹Kravchenko O.V., ²Danchenko E.B., ³Bedrii D.I., ⁴Marunich V.S.

¹Universitatea Tehnologică de Stat din Cerkask, ²Universitatea KROK, ³Întreprindere de stat „Institutul de Cercetări Ucrainene de Radio și Televiziune”, ⁴Universitatea Națională de Comunicații

¹or.Cerkask, ²or.Kiev, ³or.Odessa, ⁴or.Kiev, Ucraina

Rezumat. Se studiază problemele dedicate persoanei decizionale sub influența informațiilor externe. Autorii au realizat o clasificare a domeniilor de cercetare existente: analiza informațiilor diseminate; protecția informațiilor pe internet; validarea datelor; analiza comunităților web; analiza impactului informațiilor asupra personalității decizionale. Scopul principal al cercetării este de a analiza gradul de influență al informațiilor externe asupra unui membru al comunității web atunci când ia o decizie. Scopul a fost realizat cu ajutorul unui sistem dezvoltat de colectare și analiză a informațiilor, ținând seama de regulile economiei comportamentale. Botul este responsabil pentru colectarea și aruncarea informațiilor necesare. Autorii au extins și au introdus astfel de concepte precum: "membru al comunității web", "prețul oportunității", "eroarea Hindsayte", "utilitatea așteptată" și "graficul utilitar" pentru sfera IT. La construirea unui model matematic, a fost trasată o analogie în descrierea grafică a limitelor tranziției interacțiunii grupurilor comunitare și utilizarea aparatului matematic pentru rezolvarea problemelor, luând în considerare interacțiunea interfazică. Modelul matematic a ținut cont de caracteristicile personale ale unei persoane bazate pe regulile introduse de economia comportamentală pentru sfera IT. Cel mai important rezultat în evaluarea influenței informațiilor externe asupra formării unei decizii proprii a membrilor comunității web este că valoarea medie a procentului de sprijin sub influența informațiilor negative a crescut ușor din punctul de vedere al subiectului testului, în timp ce sub influența informațiilor pozitive a crescut semnificativ. Semnificația rezultatelor constă în faptul că abordarea dezvoltată de autori poate deveni baza pentru construirea de noi modele și metode de predicție a impactului informațiilor externe asupra unui membru al comunității web, pe baza analizei datelor.

Cuvinte-cheie: web-comunitate, informații, influența informației, reguli de economie comportamentală, metoda analogiilor, sistem de analiză a datelor IT, interlocutor bot.

Оценка влияния внешней информации на участников веб-сообществ IT-средствами в условиях поведенческой экономики

¹Кравченко О.В., ²Данченко Е.Б., ³Бедрий Д.И., ⁴Марунич В.С.

¹Черкасский государственный технологический университет, ² Университет «КРОК», ³ Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт радио и телевидения», ⁴ Национальный университет путей сообщения

¹г.Черкассы, ² г.Киев, ³г.Одесса, ⁴г.Киев, Украина

Аннотация. Рассматриваются вопросы, посвященные принятию решений личностью под влиянием внешней информации. Авторами проведена классификация направлений существующих исследований: анализ распространяемой информации; защита информации в Интернет; проверка данных на достоверность; анализ web-сообществ; анализ влияния информации на принятие решений личностью. Основной целью исследования является анализ степени влияния внешней информации на участника web-сообщества при принятии решения. Поставленная цель достигнута с помощью разработанной системы сбора и анализа информации с учетом правил поведенческой экономики. За сбор и вбрасывание нужной информации отвечает бот собеседник. Авторами расширены и введены такие понятия, как: «участник web-сообщества», «цена возможности», «ошибка Хиндсайта», «ожидаемая полезность», «график полезности» для IT сферы. При построении математической модели проведена аналогия в графическом описании границ перехода взаимодействия групп сообществ и использовании математического аппарата решения задач с учетом межфазового взаимодействия. В математической модели учитывались личностные характеристики человека на основе введенных правил поведенческой экономики для IT-сферы. Наиболее важным результатом при оценке влияния внешней информации на формирование собственного решения члена web-сообщества является то, что среднее значение процентной поддержки под влиянием негативной информации, с точки зрения испытуемого, выросло незначительно, тогда как под влиянием позитивной информации выросло существенно. Значимость результатов состоит в том, что разработанный авторами подход может стать основой для построения новых моделей и методов прогнозирования влияния внешней информации на члена web-сообщества, опираясь на анализ данных. Описана структура системы анализа данных участников web-сообществ с помощью которой происходит сбор и обработка данных. Приведен алгоритм работы бота-собеседника, который программно реализован как отдельный модуль системы анализа данных.

Ключевые слова: web-сообщество, информация, влияние информации, правила поведенческой экономики, метод аналогий, IT система анализа данных, бот собеседник.

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий мир – это сочетание одухотворенных и неодухотворенных объектов. Сочетание отдельных объектов – это информационный набор идентификации. Если мы говорим о мире Людей, то каждый обладает определенным набором информации, или приобретает информацию, или является источником информации. Информационный мир – это мир современности. У. Черчилль [1] говорил словами Н. Ротшильда [2]: «Кто владеет информацией - тот владеет миром». Это выражение отражает отношения современного мира. Максимальное накопление информации быстрого доступа – это Интернет. Влияние сети на личность является доказанным фактом как отечественными, так и зарубежными авторами. Проведем классификацию направлений существующих исследований в информационной IT сфере. Задачи исследования делятся на:

1) Анализ распространяемой информации;

- 2) Защита информации в сети Интернет;
- 3) Проверка данных на достоверность;
- 4) Анализ социальных и web-сообществ;
- 5) Анализ информации в процессе принятие решений личностью.

Рассмотрим существующие научные исследования в соответствии с классификацией направлений исследования.

В статье [3] предлагают новый каркас экспериментальной платформы на основе модели SPA (Spreading Activation) и социального центрирования, для проверки скорости распространения информации в социальной сети для помощи отдела администрирования более эффективно управлять социальной сетью. Исследованию средств распространяемой информации посвящена работа [4]. На основе моделирования процесса распространения информации средствами информации (в том числе смс, микроблоги, мобильные телефоны, телевидение и устный связь) предлагаются оптимизированные планы по повышению эффективности распространения информации

о чрезвычайных состояниях [4]. В работе [5] рассматривается влияние информации об ошибках в протоколах передачи данных на сеть интернет. В работах [6-7] изучают вопрос оптимизации производительности в типах информационных сетей, что влияет на поиск информации. Скорость поиска информации является составной воздействия на участника web-сообщества.

Следовательно, влияние внешней информации зависит от IT-средств (платформа общения, микроблог, месседжер, веб-сообщество), используемых для распространения информации. Скорость связи сети интернет зависит от протоколов передачи данных. Чем лучше связь и доступный IT-сервис, тем он интереснее для пользователя веб-сообщества.

Одним из направлений исследований изучения информации является о вопрос конфиденциальности и безопасности данных. Особенно это важно для электронной коммерции [8] и управления в технологии интернет вещей (ИВТ) [9].

В соответствии с [8-9] будем говорить, что задачи защиты информации имеют непосредственное влияние на пользователя веб-сообщества и поддерживают уверенность в его «защищенности». «Защищенность» является личностной характеристикой пользователя, влияет на функцию полезности. Подробно это будет рассмотрено в данной статье и последующих исследований.

Государственным службам необходимо выполнять проверку данных аккаунтов пользователей веб-сообществ, что позволит уменьшить процент не полезных интернет-ботов. В рамках проведения теста по поискам подтверждения данных лица группа Verify оценила использования данных социальных сетей в качестве дополнительного источника информации. Пользователи должны были предоставить доступ к личным данным. Тесты показали, что способность адекватно идентифицировать взрослые слои населения вырастает на 9%, а для детей в возрасте от 16 до 25 лет – до 38% [10].

Проблематика исследования личных данных пользователей веб-сообществ отечественных ученых приведена в работах [11-13]. Личность автора, распределение по гендерному равенству, влияет на восприятие информации и выбор тем по интересам. Исследование лингвистической составляющей написания сообщений в

социальных сетях посвящено анализу гендерных и возрастных различий в языке [14]. Гендерные особенности восприятия информации и влияние ее на личность проводились учеными еще в начале XX века. Работы Европейских и американских ученых доказывают, что возраст и гендерные особенности влияют на восприятие информации. Пользователи в возрасте от 18 до 25 лет читают и обрабатывают на 1/3 сетевой информации больше, чем пользователи постарше, но «полезность» информации на 20% меньше [15-19].

Итак, в соответствии с работами [10-19] будем говорить о важности поставленной задачи исследования оценки влияния внешней информации на пользователей веб-сообществ: сбор личных данных с помощью бота-собеседника, формирование мнения участника веб-сообщества с помощью бота собеседника как части система анализа данных в соответствии с собранной информацией.

Анализ существующих типов интернет-сообществ дает возможность решать следующие задачи:

- задача определения деятельности интернет-сообщества по роду деятельности;
- задача определения плотности отношений в сообществе, что позволяет оценить взаимное влияние членов сообщества;
- задача выявления «угроз» со стороны сообщества.

Социальные сети и веб-сообщества являются основой веб-сообществ. В центре любого сообщества стоит Человек-пользователь, который с помощью имеющейся у него информации принимает те или иные решения. Исследованием процесса принятия решения посвящены работы [20-21]. Особое внимание привлекает работа [21]. Процессы принятия решений в социальном контексте стимулируют исследования в направлении социологии. Человек-пользователь принимает решение как в повседневной жизни, так и в жизненно необходимых выборах.

Пользователь интернета является Человеком, который должен сделать оптимальный выбор. Исследование выбора является основной задачей наших исследований. Выбор, в соответствии с теорией поведенческой экономики [23], происходит благодаря «подталкиванию»

[Kehnneman 2003 Camerer & Loewenstein 2004, Shafir 2013]. Выбор зависит от влияния внешней информации, анализ которой выполняется постоянно. Опираясь на определение поведенческой экономики, теории принятия решений, социологии, структуры интернет, рассмотрим вопросы влияния социальных сетей и web-сообществ на принятие решений на примере вопросов политического выбора.

Выборы президента или парламента влияют на жизнь людей в стране и на ее стран-соседей. Оценка воздействия информации, влияющей на пользователей социальных сетей и web-сообществ является важной проблемой. Информация по своей сути делится по знаку «+» и «-». Знак «+» – это знания, позитив, открытия. Знак «-» – дезинформация и пропаганда.

Обмен информацией в социальных сетях и получения ее через интернет-сообщества приводит к формированию общественного мнения. Применение IT-средств позволяет построить математическую модель и программно реализовать (выполнить процесс моделирования) процесс формирования общественного мнения. Установлено, что при наличии 10% единомышленников в группе по определенному вопросу, в процессе общения формируется устойчивое большинство с одинаковыми взглядами [22].

Итак, 10% единомышленников является предельным значением для количества участников web-сообщества для убеждения их в принятии того или иного решения. Данное значение будет эталонным при выполнении проверки работы разработанного собственного IT-средства.

В мировой паутине существуют многомиллионные социальные сети: Twitter, Facebook, LinkedIn и др., А также messengers и YouTube каналы, позволяющие формировать собственные интернет-сообщества.

Основным распределением участников является распределение по интересам. Это приводит как к удовлетворению потребностей человека, так и к существованию инструмента влияния на него.

Целью исследования является анализ степени влияния внешней информации на участника web-сообщества в процессе принятия решения. Поставленная цель будет достигаться с помощью:

- описания действия пользователей web-сообществ на основе поведенческой экономики;
- построения математической модели влияния внешней информации на пользователей web-сообщества;
- описания алгоритма работы бота-собеседника как IT-средства, используемого для практических исследований.
- описания результатов эксперимента применения модели влияния внешней информации на пользователей web-сообществ на примере сообщества YouTube-канала.

Полученные результаты отличаются от работ [11-19] тем, что нами рассматривались личностные характеристики Человека на основе введенных правил поведенческой экономики для IT-сферы. В этих работах анализируется информация по гендерным признакам на основе лингвистического анализа.

В математической модели введены правила перехода в области графической интерпретации процесса обсуждения информации членом web-сообщества. Данная интерпретация к исследованию влияния информации применяется впервые.

Сравнительно с работой [21] сбор информации происходит с помощью бота-собеседника, а не групп для опроса. Обработка информации происходит с помощью впервые разработанной системы анализа данных. Проверка системы дала соответствие результатов исследования 10%-правилу единомышленников в web-сообществе, описаному в работе [22].

Анализ данных позволяет сформировать группы поддержки однотипных мнений из участников web-сообщества.

Полученные результаты разрешают продолжить исследования в сторону прогнозирования влияния внешней информации на участника web-сообщества.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Терминология исследования в условиях поведенческой экономики

Исходя из позиций поведенческой экономики, будем рассматривать участника web-сообщества с собственным набором личностных характеристик, который принимает оптимальное решение (по его мнению) с учетом спроса и предложения.

Введем несколько определений, опираясь на определение поведенческой экономики [23].

Участник web-сообщества – это лицо, которое общается в web-сообществе с помощью IT-средств для удовлетворения собственных интересов и имеет личностные характеристики.

По терминологии поведенческой экономики [23] мы имеем деление на:

«Человек рациональный (Рационал)» – теория, слишком ограниченная модель, чтоб объяснить наши решения и поступки;

«Человек практический», не безупречный. Задача оптимизации для обычных людей слишком сложная потому, что человек совершает выбор вовсе НЕ беспристрастно.

«Цена возможности» – определяется категориями платного или бесплатного доступа к информации.

По [23] «цена возможности» для какого-либо действия определяется тем, чего лишается человек, выполняя это действие.

«Ошибка хиндсайта» – будет определяться при получении экспериментальных данных по определению влияния внешней информации, в условиях совпадения мнения члена web-сообщества с мнением большинства.

В соответствии с [23] «ошибка хиндсайта» (суждения задним числом).

Данные, получаемые в ходе опроса людей в том, собираются ли они голосовать и за кого, дают удивительно точный прогноз, если с ними аккуратно обращается профессионал в области статистики.

«Ожидаемая полезность» – уверенность в своей правоте, что растет при совпадении позиции принятого решения участника web-сообщества с мнением общественности.

По [23] «Ожидаемая полезность» – это то, что нужно для принятия решений.

На рисунке 1 изображен график функции полезности в соответствии с теорией перспектив для участника web-сообщества.

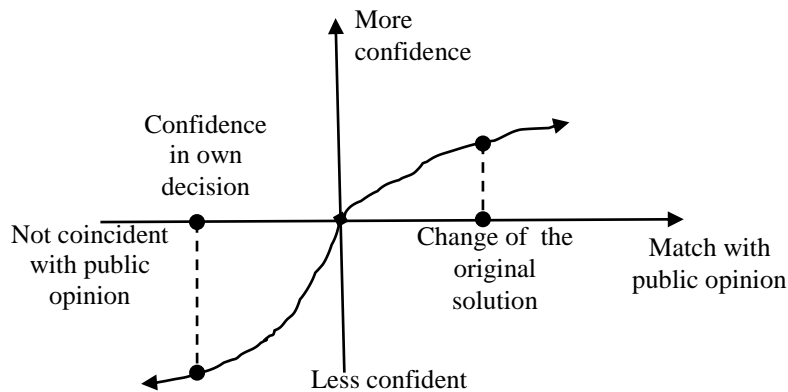


Рис. 1. График функции полезности для участника web-сообщества.
Fig. 1. Graph of utility function for a member of the web community.

В соответствии с законом Вебера-Фехнера участник web-сообщества пытается не получить максимум бесплатной информации для подтверждения собственной позиции (уверенности), но и будет идти на риск финансовых потерь в случае получения противоречивой информации.

«Транзакционная полезность» – это разница между эмоциональным состоянием участника web-сообщества в момент дискуссии и характерным эмоциональным состоянием человека. По графику 1 смена первоначального решения в пользу общественности приносит больше

уверенности в соотношении 1:2, чем уверенность в собственном решении при не совпадении с мнением общественности.

1.2 Математическая модель оценки влияния внешней информации на пользователей web-сообществ

Построение математической модели оценки влияния внешней информации на пользователей web-сообществ по методу аналогий выполним на основе теории межфазового взаимодействия [24].

Модель краевых задач для композитной системы в соответствии с теорией

межфазного взаимодействия учитывает взаимодействие контактирующих сред (участников веб-сообщества со своими позициями и личностными характеристиками). Учитывая неоднородность области материала (общественного мнения участников веб-сообщества), точное решение смоделированной краевой задачи отыскать невозможно. С помощью вариационно-разностных методов мы сможем отыскать только приближенное решение задачи о принятии решения участниками веб-сообщества под влиянием внешней информации в формате усредненных значений функции ожидаемой полезности $w_n(x, y)$.

Это решение мы найдем как решение уже исследованной третьей краевой задачи методом аналогий [24].

Для построения математической модели построим графическую модель принятия решения участником веб-сообществ под влиянием внешней информации. На рисунке 2 внешний контур является изображением внешней информации, который изменяется во времени (от t_0 до t_n (минут)).

Во время общения участников веб-сообщества происходит процесс обсуждения. В процессе обсуждения принимают участие другие участники веб-сообщества (вкрапления на рис. 2) и под влиянием внешней информации формирует окончательную позицию. В момент обсуждения t_i происходит формирование окончательной позиции с учетом «полезности».

Применение физических моделей к веб-сообществу с помощью метода аналогий возможно, за счет сходства объектов исследования (движение физических частиц во время технологического процесса изготовления композита с движением мыслей участника веб-сообществ).

Теория фазовых переходов в модели Изинга-Вайдлица [25] при теоретическом расчете дает результаты с 10% корреляцией относительно результатов экспериментов по данной тематике. Принятое решение по окончательной позиции участника веб-сообщества содержит элементы влияния как других участников веб-сообществ, так и внешние информационные воздействия (рис.2).

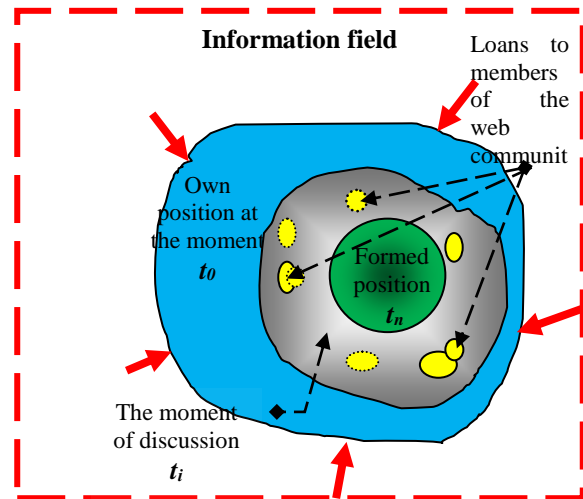


Рис. 2. Графическая модель принятия решения участником веб-сообщества под влиянием внешней информации.

Fig. 2. Graphic model of decision making for a member of web communities under the influence of external information.

Общее решение задачи исследования оценки влияния внешней информации на пользователей веб-сообществ будем искать в виде решения уравнения (1) для функции ожидаемой полезности W [количественная величина].

$$W = f(w, p, U, T), \quad (1)$$

где w – значение позиции участника веб-сообщества (2) (количественная величина от (-1 до 1)) в момент времени t_0 ;

p – позиция участников веб-сообщества (3), влияющая на исследуемого (количественная величина от (-1 до 1));

U – объем внешней информации, влияющей на участника веб-сообщества (безразмерная величина);

T – время общения [мин].

$$w = (-1)^k \frac{n}{N}, \quad (2)$$

где n – количество комментариев члена сообщества в период времени T , N – количество записей всех членов сообщества в период времени T , $k = \overline{1, 2}$.

$$p = (-1)^k \frac{m_k}{N}, \quad (3)$$

где m_k – количество комментариев членов сообщества в период времени T в соответствии с совпадением/не совпадением с общим мнением;

$$k = \begin{cases} 1, \text{если мнение члена сообщества} \\ \text{не совпадает с большинством} \\ 2, \text{если мнение члена сообщества} \\ \text{совпадает с большинством} \end{cases}$$

Объем внешней информации определяется на промежутке от 0 до 100 с шагом 1 и зависит от процентного соотношения просмотренной информации членом сообщества по одному направлению.

Данные параметры являются нечеткими. Поэтому собранные данные обрабатываются на основе теории размножения выборок [26]. Приближенное численное решение ищем с помощью вариационно-разностного метода, который используется в теории межфазового взаимодействия [27]. Для этого строим представительский элемент в виде области Ω в соответствии с моделью на рис.2. Эта область содержит U_p – область внешней информации влияния в момент времени $T = [0; a]$, U_{wp} – область информационного пространства при обсуждении проблемы в момент времени $T = [a; a + \delta]$; U_w – область принятых решений участника web-сообщества на основе полученной информации в момент времени $T = [a + \delta; a + \delta + b]$. Эти области отвечают трем процессам формирования принятого решения во время общения в web-сообществе: сбор информации, дискуссия, формирование решения.

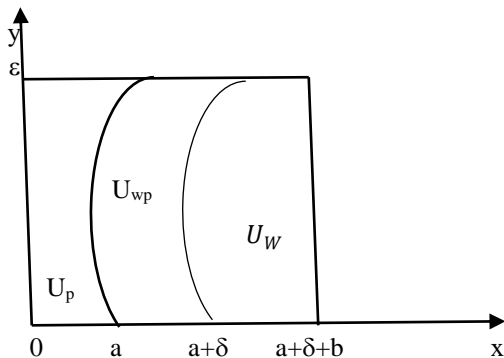


Рис.3. Представительский элемент Ω .
Fig.3. Representative element Ω .

Оси x соответствует шкала времени T для процессов формирования решения членом web-сообщества, а оси y значения функции ожидаемой полезности. Значения функции полезности зависят от однородности области Ω . Под однородностью области мы понимаем область, отвечающую за один из процессов формирования принятого решения во время общения в web-сообществе.

В соответствии с рисунком 3 при построении математической модели будем описывать правила перехода: горизонтальный переход (вдоль оси x) и вертикальный переход (вдоль оси y).

Поэтому, при переходе из области U_p к формированию позиции участника web-сообщества U_w необходимо учесть краевые условия на границе. Горизонтальный переход через составляющую U_{wp} области Ω функцию-решение представим в виде:

$$w(x, y) = C_i + \Phi_i(y), \quad i = \overline{1,2} \quad (4)$$

Для вертикального перехода U_{wp} области Ω граничные условия будут иметь вид:

$$w(x, y) = C_j + \Phi_j(y), \quad j = \overline{1,2} \quad (5)$$

Значения i и j зависят от движения влево, вправо, вверх и вниз, соответственно, при двух типах краевых условий. Граничные условия для верхней и нижней границы получим в виде (6)

$$\begin{aligned} w|_{y=0} &= f(x) \\ w|_{y=\epsilon} &= f(x) + C_0(x) \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая неоднородность области точное решение смоделированной задачи отыскать невозможно.

Приближенное решение задачи будем искать в виде разложения по базисным функциям $\varphi_i(x, y)$.

$$w_n(x, y) = \sum_i a_i \varphi_i(x, y), \quad (7)$$

где коэффициенты a_i находятся из системы уравнений вида

$$[w_n, \phi_i] = (f, \phi_i) + \int_{\partial\Omega} g \phi_i d\omega, \quad i = \overline{1, N'}. \quad (8)$$

Интеграл в уравнении (8) является интегралом по области Ω и зависит от функции $w(x, y)$.

Здесь число N' является количеством

вершин треугольников триангуляции для вариационно-разностного метода, $\partial\Omega$ - граница области Ω , g, ω - функции из пространства решения задачи $W_2^2(\Omega)$. Базисные функции $\phi_i(x, y)$ мы строим в соответствии с рисунком 4. Соблюдается условие $\phi_i(x, y) = \phi_{ij}(x)$, где $x = (x_{1i}, x_{2j})$ [24].

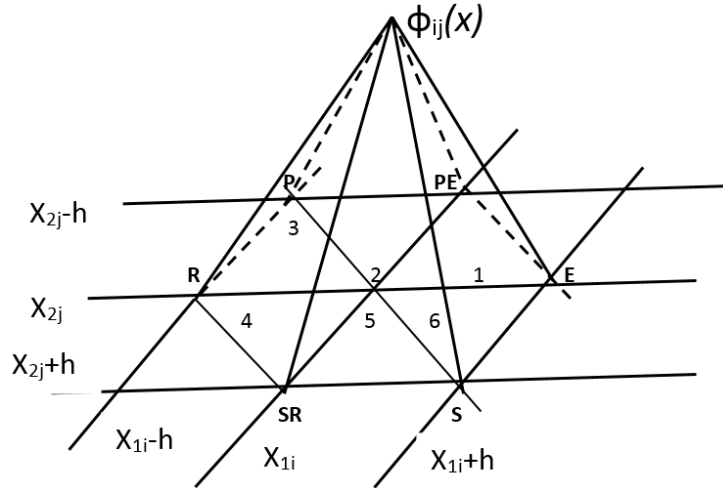


Рис. 4. Треугольники триангуляции для области Ω .
Fig. 4. Triangles of the triangulation for the area.

Каждая функция $\phi_{ij}(x)$ не равна нулю в узлах сетки (x_{1i}, x_{2j}) области Ω . Тогда $\phi_{ij}(x)$ имеют вид:

$$\phi_{ij}(x) = \begin{cases} 1 - (x_1 - x_{1i}) / h, & x \in \Delta_1, \\ 1 - (x_2 - x_{2i}) / h, & x \in \Delta_2, \\ 1 + (x_1 - x_{1i}) / h - (x_2 - x_{2i}) / h, & x \in \Delta_3, \\ 1 + (x_1 - x_{1i}) / h, & x \in \Delta_4, \\ 1 + (x_2 - x_{2i}) / h, & x \in \Delta_5, \\ 1 - (x_1 - x_{1i}) / h + (x_2 - x_{2i}) / h, & x \in \Delta_6. \end{cases} \quad (9)$$

Граничные условия для функции формирования позиции участника web-сообщества U_{wp} при переходе границы формирования позиции участника web-сообщества в направлении с U_w к U_p имеют вид:

$$\begin{aligned} w|_{x=a+\delta+b} &= C_3 \text{ на } W, \\ w|_{x=a+b} &= C_4 + \psi_3(x) \text{ на } U_{wp}, \\ w|_{x=a} &= \psi_4 \text{ на } U_p, \end{aligned} \quad (10)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 - численные значения, которые зависят от личностных характеристик участника web-сообщества на однородных подобластях области Ω ;

$\Phi_i(y), \Phi_j(y), f(x), \psi_k(x)$ - значения функций формирования позиции участника web-сообщества на однородных частях области $\Omega, k \in \overline{1, 2}$.

В соответствии с (9) приближенное решение задачи имеет вид (11).

$$w_n(x) = \begin{cases} u_{ij} + u_{x_1}(x_1 - x_{1i}) + (u_{x_2})_E(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_1, \\ u_{ij} + (u_{x_1})_P(x_1 - x_{1i}) + u_{x_2}(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_2, \\ w_{ij} + w_{x_1}^-(x_1 - x_{1i}) + w_{x_2}^-(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_3, \\ w_{ij} + w_{x_1}^-(x_1 - x_{1i}) + (w_{x_2}^-)_R(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_4, \\ w_{ij} + (w_{x_1}^-)_S(x_1 - x_{1i}) + w_{x_2}^-(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_5, \\ w_{ij} + w_{x_1}(x_1 - x_{1i}) + w_{x_2}^-(x_2 - x_{2i}), & x \in \Delta_6. \end{cases} \quad (11)$$

где через $(u_{x_\alpha})_\Theta, (u_{x_\alpha}^-)_\Theta, u_{x_\alpha}, u_{x_\alpha}^-$ обозначены соответствующие разностные аппроксимации производных от функции $w(x)$ в точках Θ

(рис. 4) и $x = (x_{1,i}, x_{2,j})$, используя метод аналогий [24].

Таким образом, алгоритм вычисления функции ожидаемой полезности W состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Определяем значение позиции участника web-сообщества из полученных данных ботом собеседником w .

Шаг 2. Определяем позицию большинства участников web-сообщества из полученных данных ботом-собеседником p .

Шаг 3. Разделяем участников web-сообщества на группы поддержки обсуждаемой информации.

Шаг 4. Определяем знак внешней информации для каждой группы поддержки k .

Шаг 5. Разгачиваем участников web-сообщества на группы поддержки.

Шаг 6. Определяем принадлежность групп поддержки к областям в соответствии с процессами формирования решений.

Шаг 7. Задаем граничные значения области представительского элемента.

Шаг 8. Определяем значения функции ожидаемой полезности на границах области (4)-(6), (10).

Шаг 9. Проводим триангуляцию области и вычисляем с помощью формул (7)–(9), (11).

Шаг 10. Проводим усреднение полученных результатов в соответствии со знаком внешней информации.

Шаг 11. Обработка статистических данных с помощью системы анализа данных.

Для получения значений функции формирования позиции участника web-сообщества необходимо получить значение функции объема внешней информации

участником web-сообщества U . Процесс сбора данных происходит с помощью бота-собеседника.

1.3 Оценки влияния внешней информации на пользователей канала YouTube.com на основе теоретической модели

В качестве примера проведем эксперимент для группы испытуемых на протяжении 180 минут. Усредненные результаты будем брать за 120 минут эксперимента.

Применяем математическую модель к представителям сообщества YouTube - канала, который вещает о определенной политической силе. Среди участников web-сообщества проведен опрос для выяснения начальной позиции по поддержке данной политической силы.

Опросы проводим средствами бота собеседника, как части той системы анализа данных социальных сетей, которая разрабатывается.

Для разработки используется программное обеспечение, облегчающее разработку «Ruby on Rails».

Задача бота-собеседника состоит в получении данных из социальных сетей: постов, комментариев, данных профилей пользователей в Facebook.

Данные обрабатываются средствами «агента», созданного с помощью системы обработки натурального языка Dialog Flow (Fig. 5). Данные хранятся в базе данных и отображаются в виде графиков.

На рисунке 6 приводится описание алгоритма работы бота-собеседника как IT-средства, используемого для практических исследований.

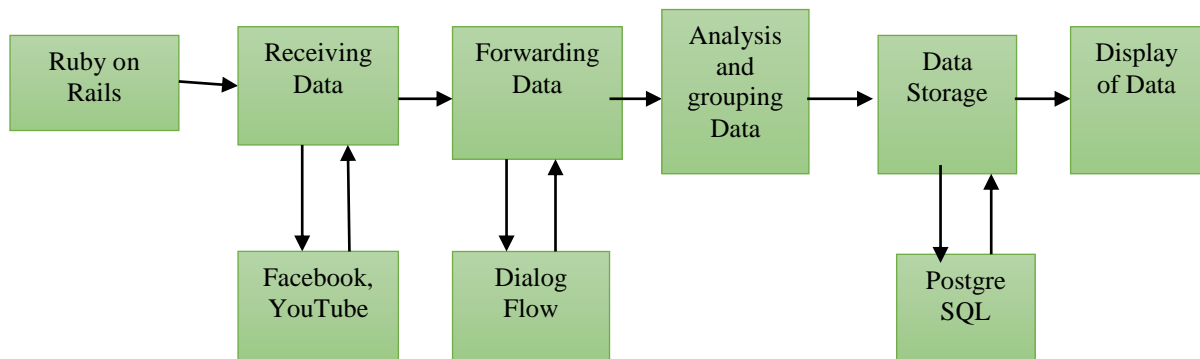


Рис. 5. Структура системы анализа данных пользователей web-сообществ.
 Fig. 5. The structure of the data analysis system for the users of web community.

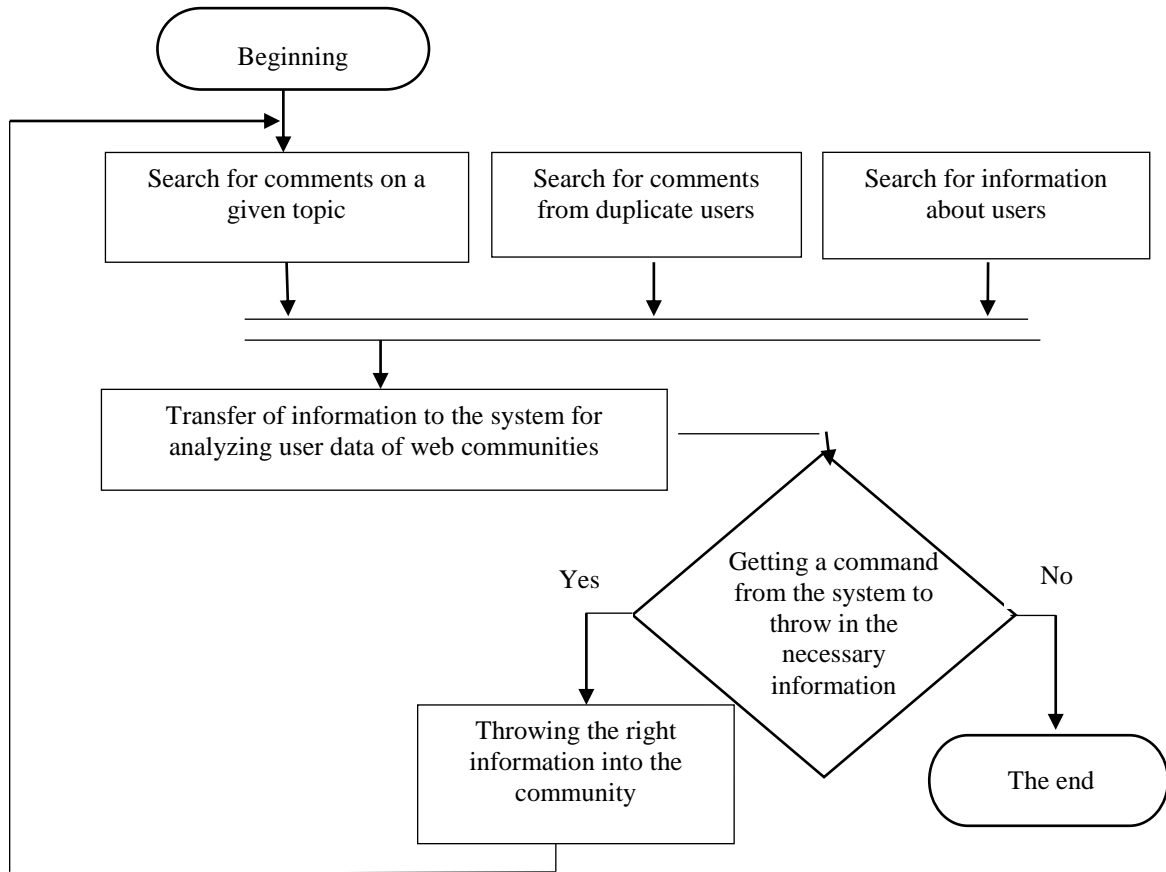


Рис. 6. Алгоритм работы бота-собеседника.
 Fig. 6. The algorithm of the bot companion.

Таблица 1 Начальные значения функции поддержки политической силы группами участников web-сообщества

Table 1 Initial values of the political power support function of groups of participants in the web community

№	Номер группы опрашиваемых The number of the interviewed group	Среднее значение процентной поддержки The average percentage of interest support
1	Группа поддержки 1 Support team 1	23,5%
2	Группа поддержки 2 Support team 2	45,6%
3	Группа поддержки 3 Support team 3	5%
4	Группа поддержки 4 Support team 4	75,6%
5	Группа поддержки 5 Support team 5	36,8%

В таблице 1 приведена выборка значений функции U_p процентной поддержки политической силы от 0 до 100.

Средним значением процентной поддержки будем считать отношение количества однотипных высказываний членов группы опрашиваемых к общему количеству принимающих участие в обсуждении.

Будем исследовать влияние внешней информации поддержки и участников группы поддержки 3 (явных противников) и группы поддержки 4 (явная поддержки) на группы поддержки 1, 2 и 5.

В момент времени t_0 значение функции поддержки приведены в таблице 1. Дискуссия продолжалась 180 мин.

Во время дискуссии велось общение участников web-сообщества и проводились интервью как за, так и против, которые будем считать внешней информацией.

Период общения разобьем по шкале 30 мин., 1 ч., 2 ч., 3 часа.

Таблица 2 Значение функции поддержки политической силы групп участников web-сообщества в период общения.

Table 2 Values of the function of maintaining the political power of groups of participants in the web-community during the period of communication.

№	Номер группы опрашиваемых The number of the interviewed group	Среднее значение процентной поддержки в период времени, мин The average percentage of interest support over a period of time, min			
		30	60	120	180
1	Группа поддержки 1 Support team 1	25,1	36,8	32,6	34,1
2	Группа поддержки 2 Support team 2	47,6	49,3	51,2	49,8
3	Группа поддержки 3 Support team 3	6,5	7	5,8	5,1
4	Группа поддержки 4 Support team 4	85	89	89	88,5
5	Группа поддержки 5 Support team 5	38,9	42,6	45,6	41,3

В таблице 2 приведены результаты изменения позиции участников web-сообщества.

Согласно рисунку 7 позиция участников web-сообщества группы 1, 2 и 5 в течение 60 минут под влиянием групп 3 и 4 увеличивали

свою приверженность в сторону поддержки политической силы. Объем U внешней информации, влияет на участника web-сообщества со знаком «+». На рисунке 8 приведен график изменения позиции участников YouTube-канала в период времени 180 минут с «-» объемом информации.

На рисунке 8 приведена смена принятого решения участника web-сообщества за период 180 мин.

Группа поддержки с минимальной начальной поддержкой обсуждаемого решения дала минимальную динамику роста среднего значения процентной поддержки негативной, по их мнению, информации в начале эксперимента.

Группа поддержки с высокой начальной поддержкой обсуждаемого решения дала значительную динамику роста среднего значения процентной поддержки позитивной, по их мнению, информации в начале эксперимента.

Значение функции ожидаемой полезности зависит от значений начальной позиции и совпадения (не совпадения) позиции участника web-сообщества в конце процесса обсуждения.

На рисунке 9 приведено сравнение результатов изменения позиции участников YouTube-канала в период времени с 0 до 180 мин. с «+» и «-» объемом информации.

На рисунке 10 получен график полезности для участников YouTube-канала в период времени 120 минут для группы участников 2 под влиянием позитивной «+» (левая часть) и отрицательной "-" (правая часть) внешней информации. Группа участников 2 имела первоначальное положительное значение процентной поддержки на уровне 45%. Под влиянием позитивной внешней информации прирост составил в среднем 7%. Под влиянием негативной внешней информации рост составил в среднем 2%. Расчеты проводились на основе предложенной математической модели, полученной вследствие применения теории межфазного взаимодействия [27] методом аналогий на

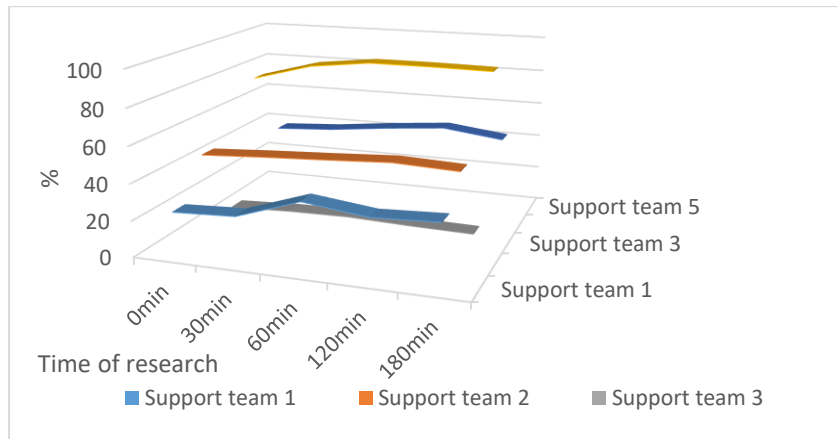


Рис. 7. График изменения позиции участников YouTube-канала в период времени с 0 до 180 минут с «+» объемом информации.

Fig. 7. Chart of the position of participants in the YouTube channel in the period from 0 to 3 hours with a "+" volume of information.

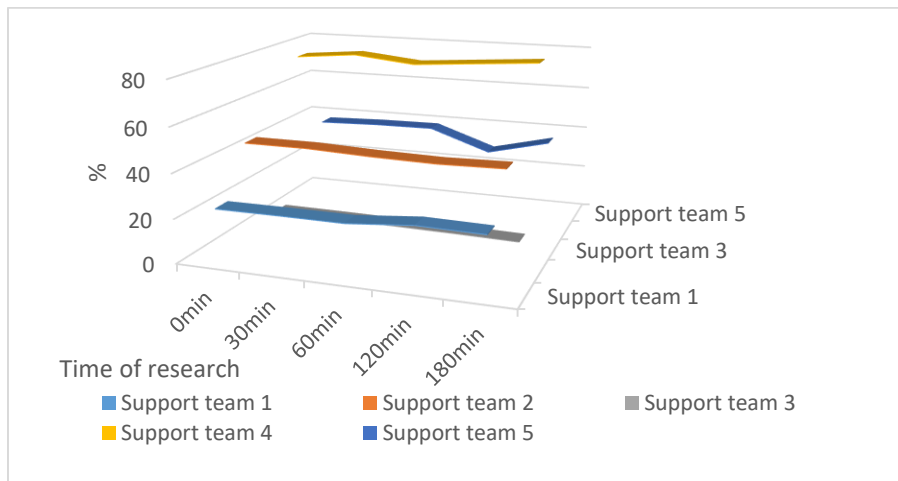


Рис. 8 График изменения позиции участников YouTube-канала в период времени с 0 до 180 минут с «-» объемом информации.

Fig. 8 Chart of position change for YouTube Channel members in the period from 0 to 3 hours with "+" and "-" volumes of information.

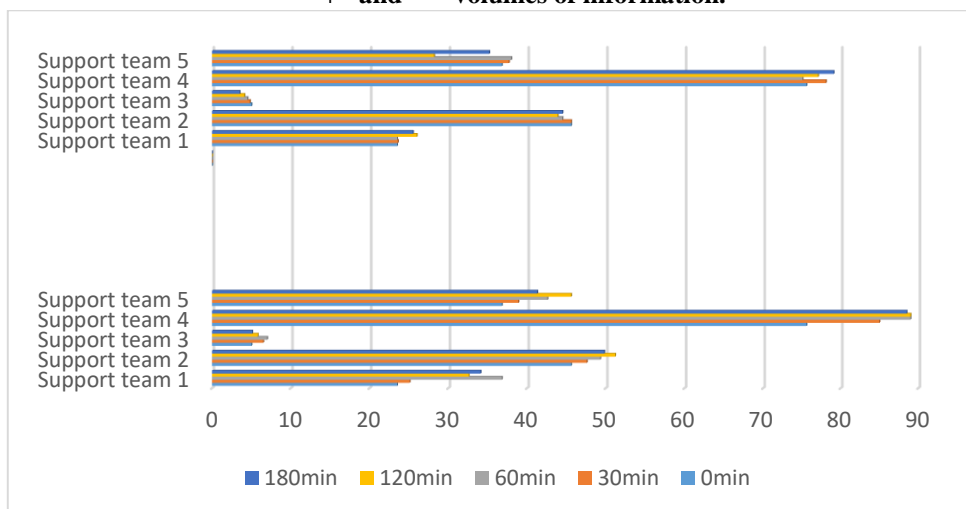


Рис. 9. Диаграмма изменения позиции участников YouTube-канала в период времени с 0 до 180 минут с «+» и «-» объемом информации.

Fig. 9. Chart of position change for YouTube Channel members in the period from 0 to 180 min with "+" and "-" volumes of information.

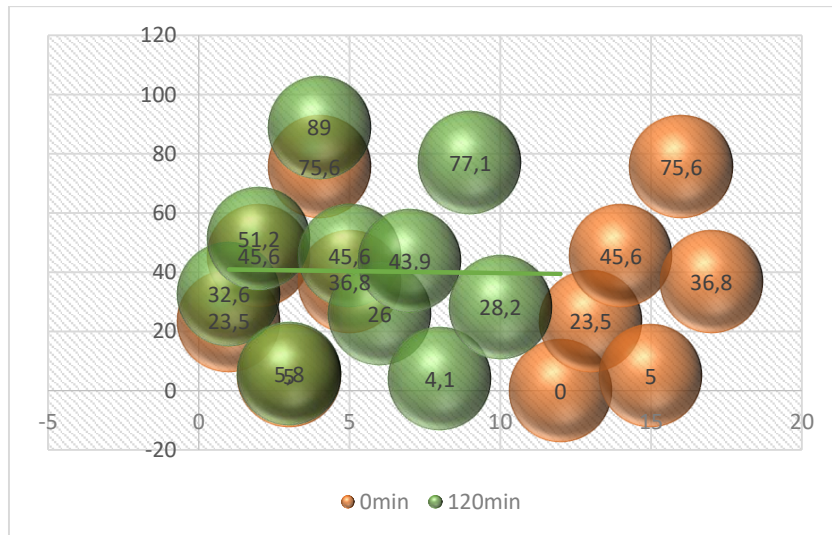


Рис. 10 График функции полезности для участников YouTube-канала в период времени 120 минут.

Fig. 10. Charts for the YouTube Channel participants in the period 120 min.

область информационного поля для эксперимента при описанных выше условиях.

Статистические данные обрабатывались на основе теории размножения выборок [26]. Следовательно, влияние внешней информации на позицию участников web-сообщества является существенным фактором.

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования авторами расширены и введены такие понятия, как: «участник веб-сообщества», «цена возможности», «ошибка хиндсайта», «ожидаемая полезность», а также приведен график функции ожидаемой полезности для участника web-сообщества в соответствии с принципами поведенческой экономики; впервые построена математическая модель влияния внешней информации на пользователей web-сообщества, основанная на теории межфазного взаимодействия и трансформированная с помощью метода аналогий на информационное поле; проведен эксперимент применения модели влияния внешней информации на пользователей web-сообщества на примере сообщества YouTube-канала.

Программным средством сбора информации для экспериментальной части есть бот-собеседник, который реализован средствами Ruby on Rails. Данный программный продукт является частью системы анализа и прогнозирования

влияния внешней информации на пользователей web-сообществ, которая разрабатывается авторами. В статье приведена структура системы анализа данных пользователей web-сообществ и алгоритм работы бота-собеседника.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что под влиянием позитивной внешней информации увеличение (рост) процентной поддержки под влиянием внешней информации за 120 минут составил в среднем 7%, под влиянием негативной внешней информации рост составил – 2%. То есть Человек, сформировавший свое мнение и получающий отрицательную, по его мнению информацию, практически свою позицию не меняет и при этом значения функции ожидаемой полезности отвечают начальным. Человек, у которого собственная позиция сформирована нечетко и получающий положительную по знаку (подтверждающую его мнение) информацию, меняет свою позицию и значения функции ожидаемой полезности увеличиваются.

Таким образом, разработанная математическая модель влияния внешней информации на пользователей web-сообщества может стать основой для разработки новых моделей и методов оценки влияния внешней информации с помощью ИТ-средств. Полученные результаты эксперимента совпадают с экспериментальными данными, приведенными в обзоре литературных

источников.

В дальнейшем авторы планируют усовершенствовать существующие блоки системы, применяя описанную математическую модель, и продолжить работу по прогнозированию поведения участников web-сообщества под влиянием внешней информации.

Литература (References)

- [1] Nathan Mayer Rothschild and 'Waterloo' Available at: https://www.rothschildarchive.org/contact/faqs/nathan_mayer_rothschild_and_waterloo. (accessed 01.02.2019).
- [2] Never Give In. Available at: <https://winstonchurchill.org/resources/speeches/1941-1945-war-leader/never-give-in/> (accessed 01.02.2019).
- [3] Jiachen Hou, Gang Xiong, Dong Fan, Timo R. Nyberg. Modeling and analysis of information dissemination mechanism of social media 2012, pp. 377-382. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6273566> doi: 10.1109/SOLI.2012.6273566 (accessed 09.02.2019).
- [4] Nan Zhang, Hong Huang, Boni Su, Jinlong Zhao, Bo Zhang. Information Dissemination Analysis of Different Media towards the Application for Disaster Pre-Warning Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098649> doi: 10.371/journal.pone.0098649. (accessed 10.02.2019).
- [5] Yixin Zhao, Xia Yin, JianPing Wu. Problems in the information dissemination of the Internet routing. Journal of Computer Science and Technology, 2003, Volume 18, Issue 2, pp 139-152. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02948879> (accessed 10.02.2019).
- [6] F. Baccelli, A. Chaintreau, Z. Liu, and A. Riabov. Achieving scalable and reliable multicast via back-pressured overlay networks. Submitted to SIGCOMM 2004, 2004 Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:837097/FULLTEXT01.pdf> (accessed 11.02.2019).
- [7] F. Baccelli, A. Chaintreau, Z. Liu, A. Riabov, and S. Sahu. Scalability of reliable group communication using overlays. In Proc. of IEEE Infocom 2004, 2004 (In English) Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1.5587&rep=rep1&type=pdf>. (accessed 11.02.2019).
- [8] W. Chung, J. Paynter, View Privacy issues on the Internet. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/994191> doi: 10.1109/HICSS.2002.994191 (accessed 11.02.2019).
- [9] Nishant Kumar, J. Madhuri, Manjunath Channe Gowda. Review on security and privacy concerns in Internet of Things. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8073640>. doi: 10.1109/ICIOTA.2017.8073640 (accessed 11.02.2019).
- [10] Verification of data on social networks Available at: <https://www.computerweekly.com/> (accessed 11.02.2019).
- [11] Peleshchyshyn A, Fedushko S. Komp'uterno-lingvisticni metodi perevirki dostovirnosti personalnih danih koristuvaciv veb-spilnothttps [Computer-linguistic methods for verifying the authenticity of personal data of users of web communities] Visnik nats. Universitetu «Lvivska Politehnika»: Infimasijnii systemy, 2010, no. 673, pp 349-363 (in Ukrainian).
- [12] Fedushko S. Kompyuterno-linhvistychnyy metod validatsiyi sotsial'no-demohrafichnoho portretu uchasnyka virtual'noyi spil'noty [Computer-linguistic method validation of socio-demographic a portrait of a member of the virtual community]. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository, 2010. <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/20747/1/39-92-93.pdf> (accessed 01.02.2019) (in Ukrainian).
- [13] Fedushko S. Osoblyvosti vyznachennya ta opysu sotsial'no-demohrafichnykh kharakterystyk v sotsial'nykh komunikatsiyakh. [Features of the definition and description of socio-demographic Characteristics in Social Communications. Bulletin of the NU "LP": Computer Science and Information Technology., 2011, no. 694, pp.75-85. (in Ukrainian).
- [14] Mulac A., D.R. Seibold, J.L.Farris. Femail and male managers and professionals criticism giving. Differences in Language use and effects Journal of Language and Social Psychology, 2000, no. 1, pp. 389-415.
- [15] Thompson R., Murachver T. Predicting Gender from Electronic Discourse. British Journal of social Psychology, 2001, no.2, pp. 193-208.
- [16] Show less, Ann Colley, Zazie Todd, Matthew Bland, Michael Holmes, Nuzibun Khanom, Hannah Pike. Style and Content in E-Mails and Letters to Male and Female Friends, 2014 Available at: <https://doi.org/10.1177/0261927X04266812> (accessed 12.02.2019).
- [17] Guiller J., Durndell A. Students' linguistic behaviour in online discussion groups: Does gender matter? Computers in Human Behavior, 2007. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.506.8535&rep=rep1&type=pdf> doi:10.1016/j.chb.2006.03.004 (accessed 11.02.2019).

- [18] Sabine C. Koch, Barbara Mueller, Lenelis Kruse, Joerg Zumbach. Constructing Gender in Chat Groups, 2014 Available at: <http://nl.ijs.si/janes/wp-content/uploads/2014/09/kochothers05.pdf> (accessed 02.02.2019).
- [19] Nicholas A. Palomares, Eun-Ju Lee. Virtual Gender Identity: The Linguistic Assimilation to Gendered Avatars in Computer-Mediated Communication. Journal of Language and Social Psychology, 2009. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0261927X09351675> (accessed 02.02.2019).
- [20] How to Use the Psychology of Decision-Making to Optimize Web Content Available, © Caphyon 2002-2019 at: <https://www.advancedwebranking.com/blog/how-to-optimize-web-content> (accessed 02.02.2019).
- [21] Steven T. Smith, Edward K. Kao, Danelle C. Shah, Olga Simek, Donald B. Rubin. Influence Estimation on Social Media Networks Using Causal Inference. IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8450823> (accessed 15.02.2019).
- [22] Xie, J.; Sreenivasan, S.; Korniss, G.; Zhang, W.; Lim, C.; Szymanski, B. K. Social consensus through the influence of committed minorities. Physical Review E, vol. 84, Issue 1, 2011. doi:10.1103/PhysRevE.84.011130. Available at: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.84.011130> (accessed 16.02.2019).
- [23] Richard Teller. Novaya povedencheskaya ekonomika. Pochemu lyudi narushayut pravila traditsionnoy ekonomiki i kak na etom zarabotat'. [New behavioral economics. Why do people break the rules of the traditional economy and how to make money on it]. Top Economics, 2017 ISBN 978-5-699-90980-3. P.480 (In Russian).
- [24] Kravchenko O.V. Matematychna model' mizhfazovoyi vzayemodiyi v kompozytakh ta utochnennya modeli metodamy obchyslyval'noyi matematyky [Mathematical model of interfacial interactions in composites and refine the model methods of computational mathematics] Journal of East Ukrainian National University. V. Dahl - Lugansk, 2003. - No. 7 (65). - p.84-88. (in Ukrainian).
- [25] Peleschak R.M., Skotna N.V. Kolektyvni efekty pry formuvanni hromads'koyi dumky v mezhakh modeli Izinha-Vaydlikha. [Collective effects in formation of public opinion in the interior of the Isinaga-Vaydelix model], 2014. Available at: http://science.lp.edu.ua/sites/default/files/Papers/37_89.pdf (accessed 12.01.2019) (in Ukrainian).
- [26] James MacKinnon. Bootstrap Methods in Econometrics Queen's Economics Department Working Paper No. 1028, 2006 Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/6494253.pdf> (accessed 20.04.2019)
- [27] Gavrilyuk I.P., Makarov V.L. Metodi obchislen' [Method of counting], 1995 Available at: https://www.imath.kiev.ua/~golub/ref1/gavrilyuk_i_p_makarov_v_l_metodi_obchislen_chastina_1.pdf (accessed 12.05.2019) (in Ukrainian).

Сведения об авторах



Кравченко Ольга Витальевна (Черкассы, Украина).

Кандидат технических наук,
Научные интересы: проектирование систем мониторинга и прогнозирования с учетом правил искусственного интеллекта на основе поведенческой экономики.

E-mail: kravchenko_ov@ukr.net



Данченко Елена Борисовна (Киев, Украина).

Доктор технических наук, заведующая кафедрой управления проектами и бизнес администрирования, профессор. Университет «КРОК».

Научные интересы:

управление проектами.

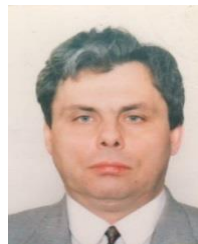
E-mail: elenadan@krok.edu.ua



Бедрий Дмитрий Иванович (Одесса, Украина).

Кандидат технических наук
Научные интересы: бизнес-администрирование, программная реализация информационных систем.

E-mail: dimi7928@gmail.com



Марунич Валерий Степанович (Киев, Украина).

Кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного права и логистики, Национальный транспортный университет.

Научные интересы:

разработка логистических систем.

E-mail: marunych51@ukr.net

Separate Analysis of Informational Signs in Multi-Parametric Combined Patterns Recognition Systems

¹Zakhozhay O.I., ²Menyaylenko A.S., ¹Lyfar V.A.

¹Volodymyr Dahl East Ukrainian University,
Severodonetsk, Ukraine

²Luhansk Taras Shevchenko National University,
Starobelsk, Ukraine

Abstract. The objects for analysis in multi-parametric combined patterns recognition systems are represented by several patterns with different nature of origin. This allows to increase the number of informative signs and the classification reliability. However, there is a negative aspect – increasing the time complexity of the data analyze. The aim of the study is reducing the time complexity of data analysis and decision making in multi-parametric combined pattern recognition systems. Well known solutions to this problem: data processing algorithms complication, boosting algorithms using and install more productive computing systems. However, more promising is use an approach that takes into account signs informativity level and decision-made occur does not across the entire data set. For achieve the aim of the study is being solved important scientific problem – developing the new method separate analysis of information signs in multi-parametric combined patterns recognition systems. This method is based on the fact, that in the multi-parametric combined patterns recognition systems the object is represented by a set of patterns which have a different nature of origin. Therefore, in the case of correct classification, all patterns from the totality allow to relate the object to the same class. The patterns of recognition object are compared until one or several of them is made a decision on the classification. In such an approach a full analysis of all signs is not carried out, which reduces the time complexity of the recognition process and, as a result, the classification decision-making process speed up.

Keywords: recognition, classification, patterns, decision-making support, time complexity.

DOI: 10.5281/zenodo.3239140

Analiza separată a semnelor informaționale în sistemele combinate cu multipli parametri de recunoaștere imaginilor

¹Zahozhay O.I., ²Menyaylenko A.S., ¹Lyfar V.A.

¹Universitatea Națională din Ucraina de est „Volodymyr Dahl”,
Severodonețk, Ucraina

²Universitatea Națională „Taras Shevchenko” din Lugansk,
Starobelsk, Ucraina

Rezumat. În sistemele combinate cu multipli parametri de recunoaștere, obiectele ce urmează a fi analizate sunt reprezentate de mai multe imagini cu origine de proveniență diferită. Aceasta permite de mărit în mod semnificativ numărul de caracteristici informative pentru obiectul de recunoaștere și de crescut fiabilitatea clasificării. Totuși, apare și un aspect negativ - creșterea complexității în timp a analizei datelor. Creșterea constantă a complexității sistemelor informatice, precum și numărul de parametri controlați și dirijați, exacerbează această problemă, în special pentru sistemele în care nu este importantă numai precizia rezultatului, ci și actualitatea sa. Astfel, obiectivul principal al studiului: reducerea complexității timpului de analiză a datelor, asigurând în același timp nivelul necesar de fiabilitate a procesului de luare a deciziilor în sistemele combinate cu multipli parametri de recunoaștere a imaginilor. Modurile cunoscute de a rezolva această problemă în știința și tehnologia modernă sunt: complicația algoritmilor de prelucrare a datelor, utilizarea algoritmilor de amplificare, precum și utilizarea forțată a sistemelor de calcul mai productive. Cu toate acestea, o abordare mai promițătoare pare a fi aplicarea unei abordări care ia în considerare gradul de informare a caracteristicilor atunci când procesul de luare a deciziilor nu se realizează pe întregul set de date. Noutatea lucrării constă în elaborarea unei noi metode de analiză separată a semnalelor informaționale în sistemele combinate cu multipli parametri de recunoaștere a imaginilor. Metoda se bazează pe faptul că în sistemele combinate cu multipli parametri de recunoaștere obiectul recunoașterii este reprezentat de un set de imagini ale căror semne au o natură diferită de origine.

Cuvinte-cheie: recunoașterea modelului, clasificarea, suportul decizional, complexitatea temporală, precizia recunoașterii.

Раздельный анализ информационных признаков в многопараметрических комбинированных системах распознавания образов

¹Захожай О.И., ²Меняйленко А.С., ¹Лыфарь В.А.

¹Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля,
Северодонецк, Украина

²Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко,
Старобельск, Украина

Аннотация. В многопараметрических комбинированных системах распознавания объекты, подлежащие анализу, представлены несколькими образами различной природы происхождения. Это позволяет значительно увеличить количество информативных признаков для объекта распознавания и повысить достоверность классификации. Однако, также возникает негативный аспект – увеличение временной сложности обработки и анализа данных. Постоянное увеличение сложности информационных систем, а также количества контролируемых и управляемых параметров, только обостряет эту проблему, в особенности для систем, где важна не только точность получаемого результата, но и его своевременность. Таким образом, основная цель работы: снижение временной сложности анализа данных при обеспечении требуемого уровня достоверности принятия решений в многопараметрических комбинированных системах распознавания образов. Известными путями решения этой задачи в современной науке и технике являются: усложнение алгоритмов обработки данных, применение алгоритмов бустинга, а также вынужденное применение более производительных вычислительных систем. Однако, более перспективным видится применение подхода, учитывающего степень информативности признаков, когда принятие решения осуществляется не по всей совокупности данных. В связи с этим, для решения поставленной задачи разработан новый метод раздельного анализа информационных признаков в многопараметрических комбинированных системах распознавания. Он основан на том, что в многопараметрических комбинированных системах распознавания объект распознавания представляется совокупностью образов, признаки которых имеют различную природу происхождения. Следовательно, любой образ из совокупности позволяет отнести объект к одному и тому же классу. Образы объекта распознавания сравниваются до тех пор, пока по одному или нескольким не будет принято решение о классификации. Таким образом, полный анализ всех признаков не проводится, что уменьшает временную сложность процесса распознавания. Достоверность нового метода подтверждена экспериментально на трех различных информационных системах промышленных предприятий Украины.

Ключевые слова: распознавание образов, классификация, поддержка принятия решений, временная сложность, достоверность распознавания.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время аппарат распознавания образов находит все более широкое применение в различных сферах науки и техники. В первую очередь, это связано с тем, что применение интеллектуальных алгоритмов позволяет решать слабоструктурированные задачи, для которых процесс формализации и разработки математической модели либо очень сложен, либо вообще невозможен [1, 2]. Следует отметить, что с постоянным совершенствованием техники и технологии объекты информатизации также постоянно усложняются и задача построения полных математических моделей, описывающих их поведение становится сложно реализуемой. В связи с этим, все большее применение находят методы управления сложными объектами [3, 4], которые основываются на контроле не их параметров, а состояний. Для решения подобного рода задач широкое

распространение получило применение методов распознавания образов [5-16].

Усложнение объектов информатизации, увеличение количества регистрируемых и контролируемых параметров, как правило, приводит к усложнению аппаратно-программных средств автоматизированных систем обработки информации и управления [5, 10, 12, 14]. Современные, все более усложняющиеся технические комплексы и системы имеют все большее разнообразие информационных характеристик, требующих контроля.

Кроме этого, динамика изменения характеристик таких систем и наличие большого разнообразия помех и искажений при их регистрации негативно влияет на степень достоверности результата анализа и обработки данных [5, 12].

Такая ситуация усложняет решение задач автоматизированной обработки информации и управления [14].

Решение указанных проблем, как правило, связано с применением более сложной

алгоритмической базы обработки данных, применения алгоритмов бустинга и, как следствие, увеличения требуемых вычислительных мощностей [5, 12-14]. Однако, и в этом случае, получение достоверного результата анализа данных при условии наличия большого количества внешних воздействий, не всегда гарантировано.

Таким образом, можно выделить достаточно важную научно-техническую проблему, которая заключается в наличии противоречия, определяющегося следующими аспектами.

– Постоянное усложнение объектов информатизации для получения достоверных результатов обработки и анализа данных приводит к постоянному усложнению алгоритмической базы решения задач и, как следствие, к необходимости применения более производительного аппаратного обеспечения.

– Усложнение алгоритмов решения задач автоматизированной обработки информации и управления приводит к росту временной сложности получения результата.

– Увеличение временной сложности, в свою очередь, приводит к снижению оперативности получения результата.

При этом следует отметить, что для значительного количества устройств, несвоевременное получение результата обработки снижает его достоверность для принятия корректных, оперативных решений.

Таким образом, повышение достоверности результата обработки данных приводит к увеличению временных задержек и снижению его актуальности для принятия корректных решений.

Исследования, направленные на решение указанной проблемы, являются актуальными, так как достоверность и оперативность обработки данных являются одними из основных характеристик качества функционирования большинства информационных систем, вне зависимости от их сферы применения.

Таким образом, цель работы заключается в снижении временной сложности анализа данных при обеспечении требуемого уровня достоверности принятия решений в многопараметрических комбинированных системах распознавания образов.

АНАЛИЗ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Методы распознавания образов широко применяются в автоматизированных системах обработки информации и управления, в особенности, когда объект информатизации является сложной системой [3, 5, 14]. В таких случаях, идентификация состояния системы производится на основе обработки его характеристик – признаков. Совокупность признаков представляет собой образ объекта распознавания, который в общем виде описывается как

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

где P – образ объекта информатизации, который характеризуется совокупностью признаков x_1-x_n ,

Следует отметить, что достоверность принятия решения при распознавании напрямую зависит от количества информационных признаков объекта распознавания. Этот факт вытекает из асимптотического обоснования методов распознавания, согласно которому при увеличении количества признаков, описывающих объект распознавания, вероятность получения достоверного результата стремится к единице (при доверительном интервале, стремящемся к нулю). Такое обоснование нашло подтверждение в рамках глубокой статистической теории распознавания образов Вапника-Червоненкиса [17].

С целью увеличения количества признаков при классификации, Журавлевым Ю.И. был разработан алгебраический подход [18], который положил начало развитию комбинированных систем распознавания для различных применений [8, 19-23]. Такой подход основан на вычислении оценок по признакам, которые подразделяются по характеру информации на детерминированные, вероятностные, логические, структурные [8]. Анализ [5, 7, 10-12] показал, что несмотря на возможность увеличения количества признаков объекта распознавания, все они имеют одинаковую природу возникновения, и существует вероятность того, что появление ошибки регистрации признаков или проявление помехи одинаково отразится на совокупности обрабатываемых данных и снизит

достоверность принятия решения. Для исключения этого недостатка известно решение, связанное с применением многопараметрических систем распознавания образов, в которых объект распознавания представляется совокупностью образов, признаки которых имеют разную природу возникновения. Такой подход предполагает применение различного оборудования и принципов регистрации входных характеристик, что повышает независимость данных, по которым принимается решение. В этом случае, математическая модель объекта распознавания будет иметь вид:

$$\begin{cases} P_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}), \\ P_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}), \\ \dots \\ P_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kl}), \end{cases} \quad (2)$$

где $P_1 - P_k$ – образы объекта распознавания, имеющие различную природу происхождения;

$x_{11} - x_{kl}$ – признаки объекта распознавания.

Такое описание объекта позволяет значительно повысить количество информационных признаков. Для решения классификационной задачи возможно применение классических методов распознавания, которые подробно изложены в [3-5, 8, 15, 16, 18]. При таком совместном анализе, выражение (2) может быть представлено в виде (1), с дальнейшей селекцией и распознаванием методами вычисления оценок или коллективами решающих правил. Однако, учитывая тот факт, что анализ большого количества информационных признаков позволяет повысить достоверность распознавания, но приводит к увеличению временной сложности анализа и принятия решения, задача создания эффективных систем автоматизированной обработки информации и управления решается преимущественно в аспекте повышения точности получения результата. Такой подход может быть успешно применен только в системах, где нет особых требований к времени обработки данных и принятия решений. Для систем реального времени, большинства автоматизированных систем управления такой вариант неприемлем.

На основании вышеизложенного, цель работы может быть достигнута путем решения важной научно-прикладной задачи – разработки нового метода анализа информационных признаков в многопараметрических системах распознавания, который позволил бы обеспечить высокую достоверность принятия решения с одновременным снижением временной сложности такого анализа.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи разработан новый метод отдельного анализа информационных признаков, который в большей степени, нежели совместный анализ, использует преимущества многопараметрических комбинированных систем распознавания. В основе принципа отдельного анализа информационных признаков в многопараметрических комбинированных системах распознавания образов положена парадигма соответствия всех образов одному объекту распознавания. При этом, в отличие от совместного анализа, не осуществляется преобразование пространства признаков в соответствии с выражениями (1) и (2).

При отдельном анализе информационных признаков решение о классификации объекта распознавания принимается по каждому из имеющихся k образов. Структурная организация многопараметрической комбинированной системы распознавания образов с отдельным анализом информационных признаков проиллюстрирована на рис. 1.

В соответствии с предложенной структурой, сведения об объекте распознавания по n -информационным каналам регистрируются совокупностью блоков регистрации характеристик БРХ₁-БРХ_{*n*}. Эти блоки представляют собой совокупность технических средств измерения детерминированных признаков объекта распознавания или регистрации признаков вероятностного, логического или структурного характера. По результатам регистрации признаков, блоками формирования БФ (P_1) - БФ (P_n) формируется совокупность образов P_1-P_n разной природы возникновения, характеризующих объект распознавания. Как уже отмечалось, априорно известно, что каждый из этих образов с различными совокупностями признаков характеризуют

один и тот же объект распознавания. Соответственно, в любой момент времени, по каждому из этих образов можно осуществить классификацию объекта распознавания и его отнесение к одному из предварительно определенных классов.

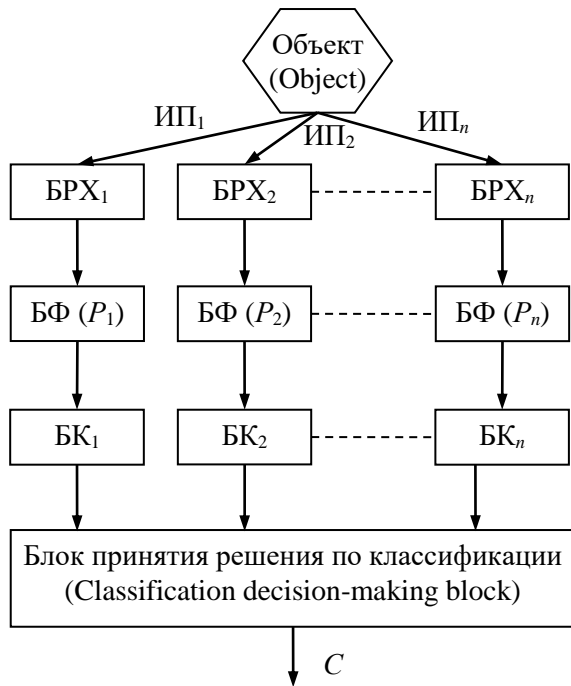


Рис. 1. Раздельный анализ признаков.¹

Использование раздельного анализа позволяет эффективно решать задачи таксономии и осуществлять распознавание объекта по принципу кластеризации.

Логическая последовательность действий, которые реализовывают предложенный метод, проиллюстрирована на рис. 2.

На этапе Э₁ осуществляется регистрация характеристик объекта распознавания с использованием различных технических средств. Следует отметить, что в большинстве технических систем, для осуществления задачи формирования управленческих решений и, непосредственно, управления объектом, подлежат регистрации не только характеристики объекта распознавания, а и необходимые параметры, окружающей объект, среды. Эти параметры несут дополнительную информационную нагрузку в плане определения возможных проявлений помех и позволяют из всей совокупности признаков выделить наиболее информативные, а остальные исключить из анализа. На этом этапе также осуществляется

нормирование полученных характеристик с целью упрощения дальнейшей обработки.

На следующем этапе Э₂, на основе характеристик объекта распознавания и окружающей среды, осуществляется формирование совокупности k образов объекта распознавания (элементы P_1-P_k), на основе информации различной природы возникновения. Таким образом, информация об объекте информационного процесса представляется в традиционном, для многопараметрической комбинированной системы распознавания, виде (2).

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_m$ иллюстрируют области распределения признаков эталонных образов, априорно определенных m классов к которым может быть отнесен объект распознавания. Обозначениями Э₂, Э₃, Э₄, ..., Э_i, Э_{i+1} проиллюстрированы этапы сравнения информационных признаков образов P_1-P_k с признаками репрезентативных образов и определение характеристик расстояния. Если на текущем этапе определенные расстояния превышают наперед заданное максимально допустимое значение, то осуществляется следующий этап анализа и сравнения с другими признаками имеющейся совокупности образов объекта распознавания.

На рис. 2 представлен пример распределения образов объекта распознавания по предварительно определенным классам. Так, в соответствии с примером, на этапе Э₃ анализ признаков по всем k образам не дает необходимой сходимости классификации, так как полученные расстояния, включая отмеченные цифрами 1-3, не дают однозначного результата классификации. Поэтому, далее осуществляется этап Э₄, на котором дальнейшая обработка признаков образа P_k приводит к определению расстояния 4, которое однозначно соответствует классу C_m . Кроме этого, результат сравнения признаков образа P_2 позволяет определить расстояние 4, которое также указывает на отнесение объекта распознавания к классу C_m .

Таким образом, на этапе Э₄ Э₄, дальнейшую обработку информационных признаков необходимо прекратить и достоверным результатом будет считаться соответствие объекта распознавания классу C_m .

¹ Appendix 1

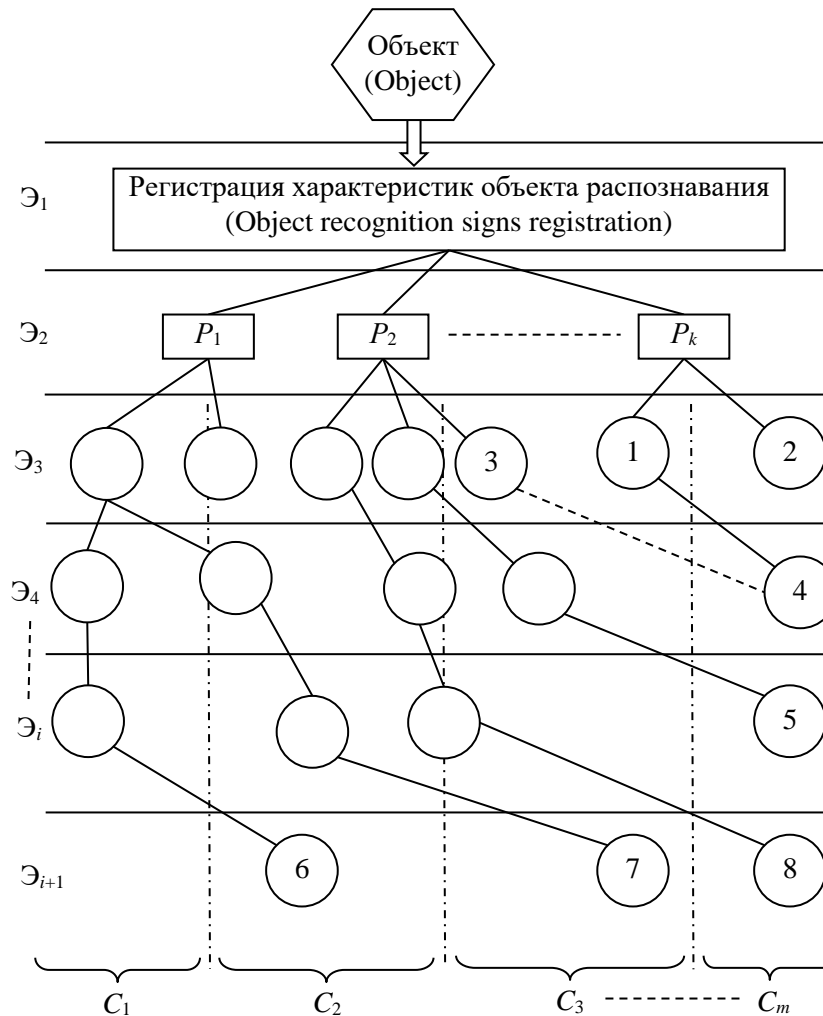


Рис. 2. Иллюстрация логической последовательности действий при раздельном анализе.²

Дальнейший анализ признаков (на рис. 2 этапы $E_i - E_{i+1}$) и получение расстояний, таких как 5, 6, 7 или 8, не является рациональным и связан только с дополнительными потерями машинного времени и увеличением временной сложности анализа признаков объекта распознавания. Дальнейший анализ информационных признаков может только подтвердить выполненную классификацию (например, определение расстояния 5, которое также указывает на соответствие классу C_m), или указать на наличие искажения информационного пространства признаков и ошибочному отнесению объекта распознавания к классам C_2 и C_3 по определенным расстояниям 6 и 7, соответственно.

На каждом этапе анализа может быть принято окончательное решение по следующим решающим правилам:

1) объект распознавания относится к тому классу (из имеющейся совокупности определенных априорно), к которому по одному из k образов получается минимальное расстояние;

2) объект распознавания относится к определенному классу, если по одному или нескольким образам из совокупности k будет достигнуто значение расстояния, которое не превышает заранее заданного значения;

3) объект распознавания относится к тому классу, из совокупности заранее определенных, к которому указывает классификация по большинству образов из совокупности k .

В результате сравнения признаков образов объекта распознавания с репрезентативными признаками каждого из классов получается матрица расстояний L , вида

² Appendix 1

$$L = \begin{bmatrix} I(P_1, C_1) & I(P_1, C_2) & \dots & I(P_1, C_m) \\ I(P_2, C_1) & I(P_2, C_2) & \dots & I(P_2, C_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I(P_k, C_1) & I(P_k, C_2) & \dots & I(P_k, C_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

где $I(P_k, C_m)$ – расстояние k -го образа объекта распознавания до m -го класса.

Тогда, для первого решающего правила, классификация объекта распознавания осуществляется при условии выполнения критерия

$$\exists P_k \in C_m, I(P_k, C_m) = \min L. \quad (4)$$

То есть, решение по классификации объекта распознавания получается путем поиска минимального значения элемента матрицы L который однозначно указывает на минимальное расстояние одного из образов до соответствующего класса.

Для второго решающего правила, когда решение по классификации принимается на основе достижения по одному или нескольким образам значения расстояния, которое не превышает априорно заданного значения, сначала необходимо выделить из множества $\{P\}$ подмножества образов $\{P'\}$, которые соответствуют критерию

$$P_k \in \{P'\} \mid \{P'\} \subset \{P\}, I(P_k, C_m) \leq l^*, \quad (5)$$

где l^* – априорно заданное минимальное значение расстояния; $I(P_k, C_m)$ – расстояние образа P_k до класса C_m .

В этом случае, необходимо проведение дополнительного анализа информативности образов. Так, в соответствии с текущими условиями наблюдения за объектом распознавания для каждого образа из $\{P'\}$ может быть определена характеристика информативности w_n и исключены те образы, которые имеют малую информативность. Исключение этих образов уменьшит вероятность ошибки и снизит время принятия решения на основе меньшего количества, но более информативных данных.

С учетом весовых коэффициентов w_n решение по классификации принимается по принципу максимума характеристики

$$P_n \in C_g, \max \frac{w_n I(P_n, C_g)}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m w_i I(P_i, C_j) - w_n I(P_n, C_g)}, \quad (6)$$

где w_n – весовой коэффициент n -го класса P_n ($n \in i = 1, 2, \dots, k$); C_g – класс, для которого определяется оценка ($g \in j = 1, 2, \dots, m$).

То есть, объект распознавания относится к тому классу, для которого получается максимальное значение отношения произведения весового коэффициента и соответствующего расстояния до определенного класса, деленное на сумму всех других произведений.

Для третьего решающего правила, предлагается использование взвешенного голосования, когда объект распознавания относится к определенному классу в том случае, когда такая классификация подтверждается по большинству образов. То есть, для каждого из m априорно определенных классов определяется характеристика $N(C_m)$, которая соответствует количеству образов, которые указывают на отношение объекта распознавания именно к этому классу. Окончательно объект распознавания относится к тому классу, для которого характеристика $N(C_m)$ имеет максимальное значение.

Третий вариант решающего правила может быть успешно использован в случае применения кластеризации, когда априорная совокупность классов не задана или допустим вариант дополнения алфавита классов, в случае использования механизмов самообучения. Этот аспект требует детальной проработки в плане дальнейших исследований и разработки алгоритма поиска групп идентичных классификаций, на основе которых может быть сформирован новый класс, а также метода ранжирования образов объекта распознавания по уровню информативности, что позволит осуществлять наиболее эффективную стратегию обработки образов: для минимизации временной сложности анализа в первую очередь должны обрабатываться наиболее информативные образы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна представленных в работе исследований заключается в разработке нового метода раздельного анализа

информационных признаков в многопараметрических комбинированных системах распознавания. Этот метод за счет обработки меньшего набора, но более информативных характеристик позволяет достичь заданного уровня достоверности принятия решения при меньших временных затратах. Этот эффект достигается благодаря сопоставлению результатов классификации по каждому образу объекта распознавания. Таким образом, цель исследований – снижение временной сложности анализа данных была достигнута.

Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментально. В качестве объектов проведения эксперимента, на различных предприятиях Украины были определены несколько абсолютно разных систем автоматизированной обработки информации и управления, которые имеют различное назначения, а также структурную и алгоритмическую организацию. Такими объектами стали:

- автоматизированная система контроля пространственного распределения температуры в коксовых печах;
- подсистема ультразвукового измерения линейных расстояний для систем автоматизации;
- система проверки текстовой информации на уникальность.

Для всех трех объектов, применение предложенных технических решений показал одинаковый тренд – повышение статистической достоверности принятия решения и снижение временной сложности.

В плане перспективного направления дальнейших исследований можно выделить разработку метода и алгоритма поиска идентичных классификаций, а также ранжирования образов по уровню информативности, что позволит определять наиболее эффективную стратегию обработки информации с целью получения достоверного результата при минимальных затратах времени. Повышение достоверности и снижение задержек в получении результата позволит повысить качество и эффективность применения систем автоматизированной обработки информации и управления для различных прикладных областей.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig.1** Separate signs analysis.

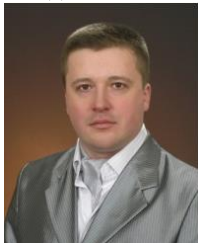
²**Fig. 2** The logical actions sequence illustration in separate analysis

Литература (References)

- [1] Leigh W., Purvis R., Ragusa J.M. Forecasting the NYSE composite index with technical analysis, pattern recognizer, neural network, and genetic algorithm: a case study in romantic decision support. *Decision Support Systems*, 2002, vol. 32, pp. 361-377.
- [2] Wen Q., Yang Z., Song Y., Jia P. Automatic stock decision support system based on box theory and SVM algorithm. *Expert systems with Applications*, 2010, vol. 37, pp. 1015-1022.
- [3] Yang-Yu Liu, Albert-Laszlo Barabasi. Control principles of complex systems. *Review of modern physics*, 2016, vol. 88, iss. 3., 58 p. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035006.
- [4] Kyriakos G. Vamvoudakis, Sarangapani Jagannathan. Control of complex systems. *Elsevier Inc.*, 2016, 762 p. doi: 10.1016/C2015-0-02422-4
- [5] Simankov V. S., Lutsenko. E. V. *Adaptivnoe upravlenie slozhnyimi sistemami na osnove teorii raspoznavaniya obrazov* [Adaptive control of complex systems by patterns recognition theory]. Krasnodar, 1999. 318 p.
- [6] Shingo, M. Hirasawa, K. Enhanced Rule Extraction and Classification Mechanism of Genetic Network Programming for Stock Trading Signal Generation. *Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO '11)*. ACM, Dublin, Ireland, 2011, pp. 1659-1666.
- [7] N. Garcia-Pedrajas, D. Ortiz-Boyer. Improving multicast pattern recognition by the combination of two strategies. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, vol. 28, pp. 1001-1006.
- [8] Eduard C. Popovici, Liviu A. Stancu, Ovidiu G. Guta, Stefan C. Arseni, Octavian Fratu. Combined use of pattern recognition algorithms for keystroke-based continues authentication system. *10th International Conference on Communications (COMM)*, 2014, pp. 91-109. DOI: 10.1109/ICComm.2014.6866686
- [9] J.C. Platt, N. Christiani, J. Shawe-Taylor, Large Margin DAGs for Multiclass Classification, *Proc. Neural Information Processing Systems (NIPS '99)*, 1999, pp. 547-553.
- [10] Anand R., Mehrotra K.G., Mohan C.K., Ranka S. Efficient Classification for Multiclass Problems Using Modular Neural Networks, *IEEE Trans. Neural Networks*, 1995, vol. 6, pp. 117-124.

- [11]Dietterich T.G., Bakiri G., Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes, *J. Artificial Intelligence Research*, 1995, vol. 2, pp. 263-286.
- [12]Rifkin R., Klautau A. In Defense of One-vs-All Classification, *J. Machine Learning Research*, 2004, vol. 5, pp. 101-141.
- [13]Allwein E.L., Schapire R.E., Singer Y., Reducing Multiclass to Binary: A Unifying Approach for Margin Classifiers, *J. Machine Learning Research*, 2000, vol. 1, pp. 113-141.
- [14]Bezdek J.C. A review of probabilistic, fuzzy, and neural models for pattern recognition. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 1993, vol. I (1), pp. 1-25. Available at: https://www.researchgate.net/publication/243776331_A_Review_of_Probabilistic_Fuzzy_and_Neural_Models_for_Pattern_Recognition. (accessed 12.01.2019)
- [15]Ryazanov V.V. Recognition Algorithms Based on Local Optimality Criteria. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 1994, vol. 4, no. 2, pp. 98-109.
- [16]Sen'ko O.V. A Prediction Algorithm Based on the Procedure of Weighted Voting Using a System of Hyper parallelepipeds in a Multi-dimensional Feature Space. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 1993, vol.3, no. 3, pp.283-284.
- [17]Devroye L., Györfi L., Lugosi G. Vapnik-Chervonenkis Theory. *A Probabilistic Theory of Pattern Recognition. Stochastic Modelling and Applied Probability*, 1996, vol. 31, pp. 187-213. doi: 10.1007/978-1-4612-0711-5_12
- [18]Zhuravlev, Yu.I. Ob algebraicheskom podkhode k resheniyu zadach raspoznavaniya ili klassificatsii [About the Algebraic approach to solving problems of recognition or classification]. *Problemy kibernetiki – Problems of cybernetics*, 1978, no. 33, pp. 5-68. (In Russian).
- [19]Kittler J., Hatef M., Robert D., Matas J. On Combining Classifiers. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20 (3), pp. 226-239.
- [20]Lam L. Suen C. Optimal combination of patterns classifiers. *Pattern recognition Letters*, 1995, vol. 16, pp. 945-954.
- [21]Ho T., Hull J., Srihari S. Decision Combination in Multiple Classifier Systems. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, vol. 16 (1), pp. 66-75.
- [22]Kittler, J., M. Hatef, R. P. W. Duin and J. Matas. On Combining Classifiers. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, no. 3, pp. 226-240.
- [23]Kittler, J. Combining Classifiers: A Theoretical Framework. *Pattern Analysis and Applications*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 18-28.

Сведения об авторах.



Захожай Олег Игоревич, к.т.н., доцент, доцент кафедры программирования и математики Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (Украина).

Область научных интересов: компьютерные системы и информационные технологии.

E-mail: zakhzhay.oleg@gmail.com



Меняйленко Александр Сергеевич,

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, проректор по научно-педагогической работе Луганского национального университета имени Тараса Шевченко (Украина).

Область научных интересов: интеллектуальные информационные системы.

E-mail: menyaylenko2@gmail.com



Лыфар Владимир Алексеевич,

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой программирования и математики Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (Украина).

Область научных интересов: экспертные системы и информационные технологии.

E-mail: lyfarva61@ukr.net

Formal Model for Checking the Interoperability Between the Components of the IoT system

Timenko A.V.¹, Shkarupilo V.V.², Oliinyk A.O.¹, Hrushko S.S.¹

¹Zaporizhzhia National Technical University
Zaporizhzhia, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Abstract. Today, the significant volumes of network traffic circulate through the Internet. The sources of such traffic are, in particular, the diverse territory distributed “smart” devices. The number of named devices is about billions. As a consequence, the relevance of bringing to practice the core concepts of the Internet of Things paradigm is constantly becoming more and more topical. It’s bound with the problem of granting the interoperability between the components of distributed software systems, built over the aforementioned devices. The web services are typically considered as the components of the system. To this end, to establish the interoperability between the components, despite the standardization, the need for the development of effective tools and techniques, granting the interoperability between the web services, arises. The goal of the work is to increase the effectiveness of the Internet of Things system engineering process by way of checking the interoperability between the components during the designing. The goal is achieved through the development of formal model for checking the interoperability between the components of the Internet of Things system by way of model checking in an automated manner. The novelty of proposed solution is grounded on the usage of Temporal Logic of Actions, corresponding formalism and the concept of action as the basis for compact and easily reconfigurable formal specifications synthesis. The adequacy of proposed model has been proved through the case study. The verification-related time costs have been estimated.

Keywords: Internet of Things, web service, formal model, specification, verification, composition, interoperability, consistency, model checking, big data.

DOI: 10.5281/zenodo.3239196

Model formal pentru verificarea compatibilității componentelor sistemului IoT

Timenko A.V.¹, Shkarupilo V.V.², Oleinik A.A.¹, Grushko S.C.¹

¹Universitatea Tehnică Națională din Zaporozje
Zaporozje, Ucraina

²Universitatea Națională de resurse bio și Științele Mediului din Ucraina,
Kiev, Ucraina

Rezumat. În prezent, Internetul generează sume importante de trafic, ale căror surse sunt adesea diferite tipuri de dispozitive "inteligente". Numărul de astfel de dispozitive se cifrează la miliarde. Ca urmare, implementarea paradigmei Internet of Things (IoT) devine din ce în ce mai importantă. Aceasta implică asigurarea compatibilității între componentele sistemelor software distribuite, construite pe dispozitivele care interacționează. În acest sens, rolul componentelor sistemului este adesea serviciile web. În acest sens, pentru a asigura compatibilitatea între componente, pe lângă standardizare, este necesară dezvoltarea unor instrumente și mecanisme eficiente pentru a asigura și verifica coerența interacțiunii dintre serviciile web. Scopul lucrării este creșterea eficienței procesului de dezvoltare a internetului obiectelor. Acest obiectiv este realizat prin dezvoltarea unui model formal de verificare a compatibilității componentelor sistemului Internet of Things, care este destinat să servească drept bază pentru efectuarea unei verificări automate utilizând metoda de verificare a modelului la etapa de proiectare a sistemului. Cel mai important rezultat al lucrării este acela că a fost propus un model formal al specificației sistemului IoT, care se bazează pe logica temporală a acțiunilor (Temporal Logic Actions) și pe formalismul corespunzător. Noutatea științifică a lucrării constă în utilizarea conceptului de "acțiune" al logicii temporale menționate mai sus, care a făcut posibilă obținerea unor specificații formale compacte reconfigurabile care reflectă specificul sistemului în cauză - modificarea cerințelor privind caracteristicile sistemului în funcție de schimbările condițiilor externe. Adecvarea modelului propus este confirmată de exemplul unui scenariu de domeniu. Se măsoară costurile de timp asociate verificării automate a specificațiilor, sintetizate conform modelului propus.

Cuvinte-cheie: Internet de lucruri, serviciu web, model formal, specificație, verificare, compoziție, compatibilitate, consistență, verificare model, date mari.

Формальная модель проверки совместимости компонентов IoT-системыТименко А.В.¹, Шкарупило В.В.², Олейник А.А.¹, Грушко С.С.¹¹ Запорожский национальный технический университет

Запорожье, Украина

² Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

Киев, Украина

Аннотация. В настоящее время в сети Интернет генерируются значительные объемы трафика, источниками которого, зачастую, являются различного рода «умные» устройства. Количество подобных устройств исчисляется миллиардами. В результате этого все большую актуальность приобретает реализации парадигмы Интернета вещей. Это сопряжено с обеспечением совместимости между компонентами распределенных программных систем, построенных поверх взаимодействующих устройств. В роли компонентов системы при этом, зачастую, выступают веб-сервисы. В связи с этим, для обеспечения совместимости между компонентами, помимо стандартизации, возникает потребность разработки эффективных средств и механизмов обеспечения и проверки согласованности взаимодействия между веб-сервисами. Цель работы – повышение эффективности процесса разработки системы Интернета вещей. Поставленная цель достигается за счет разработки формальной модели проверки совместимости компонентов системы Интернета вещей, предназначенной служить базисом для проведения автоматизированной верификации методом проверки на модели на этапе проектирования системы. Наиболее существенный результат работы состоит в том, что была предложена формальная модель спецификации системы Интернета вещей, которая основывается на темпоральной логике действий (Temporal Logic of Actions) и соответствующем формализме. Научная новизна работы состоит в использовании концепции «действия» названной темпоральной логики, что позволило получать компактные реконфигурируемые формальные спецификации, отражающие специфику рассматриваемой системы – изменение требований к характеристикам системы в зависимости от изменения внешних условий. Адекватность предложенной модели подтверждена на примере сценария предметной области. Измерены временные затраты, сопутствующие автоматизированной верификации спецификации, синтезированной согласно предложенной модели. Эти затраты охарактеризованы как приемлемые – с учетом вычислительной сложности решаемой задачи и относительно низких вычислительных возможностей использованной аппаратной платформы. Отмечено, что названные затраты в дальнейшем могут быть снижены.

Ключевые слова: Интернет вещей, веб-сервис, формальная модель, спецификация, верификация, композиция, совместимость, согласованность, проверка на модели, большие данные.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время число различных «умных» устройств (например, смартфоны, планшеты и др.) стремительно возрастает. В данном ключе, с точки зрения автоматизации, с целью интегрирования подобных устройств в рамках различного рода вычислительных процессов, потребность в освоении технологии, реализующей указанную концепцию, приобретает все большую актуальность.

В данном случае подразумевается концепция Интернета вещей (Internet of Things, IoT), которая может быть охарактеризована следующим образом: множество физических объектов, подключенных к сети Интернет, взаимодействуют, обмениваются информацией и координируют свои действия [1].

Озвученная концепция подразумевает взаимодействие миллиардов подобных объектов [2].

Существует множество различных сценариев реализации Интернета вещей: «умный дом» [3], «умный город» [4] и др. Чтоб уникальным образом идентифицировать подобные устройства в составе системы, используется технология RFID (Radio Frequency Identification) [5].

Разнообразие используемых коммуникационных протоколов и взаимодействующих устройств обуславливает возникновение проблемы интероперабельности (совместимости), т.е. способности устройств различной корпоративной принадлежности, поддерживающих, в общем случае, различные коммуникационные протоколы, взаимодействовать между собой. В данной работе такая совокупность взаимодействующих разнородных «умных» устройств рассматривается как система, синтезируемая согласно некоторому заданному (предусмотренному) сценарию использования.

Для рассуждения на тему совместимости IoT-система рассматривается с точки зрения основополагающей архитектуры. Выделяются четыре уровня архитектуры (снизу-вверх): уровень сенсоров и соединений, сетевой уровень, уровень сервисов управления и обеспечения безопасности, уровень «умных» приложений [6]. Верхний иерархический уровень можно рассматривать как предметно-зависимый – с точки зрения области применения соответствующих приложений: умный дом, умный город, умная система электроснабжения и т.д. С точки зрения масштаба и сложности (комплексности), подобные предметно-ориентированные программные решения варьируются существенным образом, однако механизм их функционирования подобен – базируется на вызовах веб-сервисов. Это означает, что реализация некоторого заданного сценария функционирования системы состоит в координировании соответствующим образом компонентов системы – веб-сервисов.

С целью обобщения, для абстрагирования от предметно-зависимых сценариев, рассмотрение названной системы в рамках работы выполняется на третьем (предпоследнем) уровне – уровне сервисов. В данном ключе IoT-система рассматривается как композиция взаимодействующих веб-сервисов [7]. Такой подход характеризуется преимуществами в следующих позициях: автоматизация, повторное использование, гибкость реконфигурирования.

Каждый отдельно взятый веб-сервис, включенный в состав композиции, рассматривается как компонент системы. Такой компонент, в свою очередь, также может являться системой, реализующей некоторую функционально завершенную часть вычислительного процесса.

Названные компоненты взаимодействуют между собой путем обмена сообщениями. В связи с этим, концепция совместимости рассматривается с позиции протоколов взаимодействия. В общем случае, проблема обеспечения совместимости может быть решена путем стандартизации [8], однако, в действительности имеет место практическое использование различных альтернативных протоколов, в том числе прикладных: MQTT (Message Queue Telemetry Transport), XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), CoAP (Constrained Application Protocol) и т.д.

[9]. Вместе с тем, существует множество различных подходов, ориентированных на достижение совместимости. Некоторые из них рассматриваются ниже.

Один из подходов состоит в создании и использовании механизма трансляции протоколов, предназначенного для использования в промышленных сценариях (Industrial IoT, IIoT) [10]. Альтернативное решение заключается в использовании инструментария межплатформенного взаимодействия, где под платформой подразумевается программная система [11]. При этом оперируют понятием вертикальной совместимости. Возможное решение – система-шлюз, развернутая на мобильном устройстве и выполняющая функции интерфейса между IoT-устройством и средой взаимодействия (Интернет) [12]. Еще одно решение для обеспечения вертикальной совместимости – инструментарий HyperCat и соответствующий IoT-концентратор [13].

Для автоматизации взаимодействия типа M2M (Machine-to-Machine) предложен M2M-шлюз, предназначенный к развертыванию и использованию на мобильных устройствах [14]. В данном случае подразумевается концепция горизонтальной совместимости, когда различные приложения взаимодействуют и обмениваются данными в автоматическом режиме. Она может быть реализована путем разработки соответствующего протокола взаимодействия, охватывающего также вопросы обеспечения надлежащего уровня QoS-характеристик (Quality of Services) [15].

Компромиссный подход состоит в стандартизации наряду с использованием формальных языков описания поведения IoT-устройств. Соответствующая реализация – система EUDroid [16]. Более того, задачу проверки совместимости предлагается решать уже на этапе проектирования – оперируя моделями архитектуры IoT-системы [17].

Отдельную область исследований составляет вопрос обеспечения совместимости данных – достижения защищенного и управляемого обмена данными между программными системами [18]. Также отмечается важность проверки временной согласованности передаваемых сообщений, которая имеет место при устранении ошибок передачи [19].

Альтернативный подход – достижение совместимости на семантическом уровне –

путем обеспечения целостности семантических описаний веб-сервисов [20].

С позиции пространственной удаленности IoT-устройств, обосновывается важность проверки результирующей согласованности взаимодействия компонентов системы [21]. При этом важность поддержания временной согласованности при обмене данными между устройствами возрастает [22]. Пример соответствующей задачи – проверка согласованности применительно к «большим данным» (big data) IoT [23].

В данной работе предлагается модель, которая основывается на подходах, принятых в работах [16] и [17], а именно – на решении задачи проверки совместимости компонентов системы на этапе проектирования, с использованием формальных методов.

Цель работы – повышение эффективности процесса разработки IoT-систем. Поставленная цель достигается за счет разработки формальной модели проверки совместимости компонентов системы, предназначенной служить базисом для проведения автоматизированной верификации методом проверки на модели на этапе проектирования системы.

Научная новизна работы состоит в использовании концепции «действия» темпоральной логики действий (TLA, Temporal Logic of Actions) [24], что позволило получать компактные реконфигурируемые формальные спецификации, отражающие специфику рассматриваемой системы – изменение требований к характеристикам системы в зависимости от изменения внешних условий.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе концепции совместимости и согласованности рассматриваются совместно. Вводится допущение, что компоненты системы совместимы, если они оперируют одинаковыми протоколами, а их взаимодействия согласованы по времени.

Рассматривая взаимодействие между некоторыми веб-сервисами путем обмена сообщениями, подразумевается горизонтальная совместимость.

Согласованность взаимодействий компонентов системы проверяется в автоматизированном режиме – с использованием формального метода проверки на модели (Model Checking).

При описании формальной модели IoT-системы используются концепции «действия» и «динамики».

Под «действием» подразумевается вызов веб-сервиса – компонента IoT-системы, под «динамикой» – последовательность таких вызовов, уникальным образом идентифицирующих некоторый вычислительный процесс – сценарий функционирования системы.

Чтобы формализовать озвученные концепции, используется темпоральная логика TLA и соответствующий формализм TLA+ [24]. Данный формализм широко используется в различных предметных областях, например, при проверке проектных решений для веб-сервисов Amazon (Amazon Web Services, AWS) [25], при разработке надежных и отказоустойчивых модулей программной платформы системы управления железнодорожным движением уровня SIL 4 (Safety Integrity Level) [26].

Математическая строгость формализма TLA+ позволяет создавать компактные и реконфигурируемые формальные описания (модели) системы.

I. МЕТОДЫ

Для формализации «действия» воспользуемся структурой Крипке [27]. Структурой Крипке M на множестве атомарных высказываний AP является структура следующего вида:

$$M = \langle S, \{s_0\}, R, L \rangle, \quad (1)$$

где S – конечное множество состояний, $s_0 \in S$ – начальное состояние, $R \subseteq S^2$ – множество переходов между состояниями, $L: S \rightarrow 2^{AP}$ – функция разметки состояний.

Пусть $s \in S$ – некоторое текущее состояние, а $s' = R(s) \in S$ – последующее состояние как результат перехода $(s, s') \in R$.

«Действие» в данном ключе – это булева функция перехода, принимающая истинное значение при переходе $(s, s') \in R$.

Для формирования множества атомарных высказываний AP введем следующие два множества:

$$V = \{v_i\}_{i=1}^{m \in N}, \quad (2)$$

$$D = \{d_1, d_2\}, \quad (3)$$

где V – множество переменных состояний, D – множество значений переменных состояний: $d_1 = 0, d_2 = 1$.

Каждая $v_i \in V$ представляет некоторый веб-сервис в составе композиции, который либо подлежит вызову, либо уже был вызван – в зависимости от значения из множества D .

Множество AP представим декартовым произведением:

$$AP = V \times D. \quad (4)$$

Элементы множества AP следует интерпретировать следующим образом: $(v_i, 0) \in AP$ – i -й веб-сервис еще не был вызван; $(v_i, 1) \in AP$ – i -й веб-сервис уже был вызван. Для акцентирования внимания на действиях, представим множество AP в виде объединения:

$$AP = AP' \cup AP'', \quad (5)$$

где $AP' = \{ap'_i\}$ – множество предусловий для действий: $ap'_i = (v_i, 0) \in AP' \subset AP$ – предусловие для i -го действия; $AP'' = \{ap''_i\}$ – множество постусловий: $ap''_i = (v_i, 1) \in AP'' \subset AP$ – постусловие (результат) для i -го действия.

Для представления в формальной модели совместимости двух сервисов за основу берется действие, обуславливающее переход $(s, s') \in R$. В данном ключе вводится концепция «события» – e , которое представляется в формальной модели как импликация, модифицированная темпоральным оператором Next (X) [28]:

$$e_i \equiv (ap'_i \rightarrow X ap''_i) \equiv (-ap'_i \vee X ap''_i), \quad (6)$$

что означает, что, если условие $ap'_i \in AP'$ истинно, тогда соответствующее условие $ap''_i \in AP''$ должно быть истинным в последующий момент модельного времени.

Аналогичным образом формализуется концепция «пустого события» – ee_i (empty event), которая означает, что некоторая переменная состояний $v_i \in V$ не меняет своего значения в последующий момент модельного времени:

$$ee_i \equiv (ap'_i \rightarrow X ap'_i) \equiv (-ap'_i \vee X ap'_i). \quad (7)$$

Предложенную формализацию событий (6) и (7) положим в основу спецификации перехода $(s, s') \in R$. Для этой цели рассмотрим следующий сценарий.

Сервис, представленный переменной $v_i \in V$, будем рассматривать как совместимый с сервисом, представленным переменной $v_j \in V (i \neq j)$, при условии, что имеет место соответствующее событие e_i (6). Иными словами, если сервис, представленный переменной $v_i \in V$, является инициатором взаимодействия с сервисом, представленным переменной $v_j \in V$, то соответствующее отношение можно представить оператором предшествования \prec : $e_i \prec e_j$, где e_i рассматривается как предусловие совместимости i -го и j -го сервисов. В таком случае будем утверждать в формальной модели, что i -й сервис совместим с j -м сервисом именно в заданном порядке вызовов.

Для создания «событийного» каркаса спецификации перехода воспользуемся тернарным оператором «?:» языка программирования Си:

$$(e_i)?e_j:ee_j, \quad (8)$$

Спецификация на основе (8) призвана служить механизмом формирования цепочек вызовов: в случае, если условие e_i (6) истинно, проверке выполнения подлежит условие e_j , в противном случае – ee_j (7).

Формализации цепочек вызовов на основе (8) будем называть «динамиками»:

$$b_k = e_1, e_2, \dots, e_m. \quad (9)$$

Нижний индекс элементов цепочки событий указывает на относительный порядок возникновения событий, т.е. $e_1 \prec e_2 \prec \dots \prec e_m$. События, для которых выполняется отношение $e_i \prec e_j$, будем называть «совместными» событиями.

Темпоральную спецификацию на основе выражений (6) и (9) – шаблон спецификации динамики – представим конъюнкцией:

$$f(b_k) \equiv e_1 \wedge e_2 \wedge \dots \wedge e_m. \quad (10)$$

Поскольку система в общем случае может функционировать согласно различным сценариям, то с каждой динамикой целесообразно отождествлять соответствующее подмножество состояний системы переходов:

$$S = \bigcup_{k=1}^{n \in N} S_k, \quad (11)$$

где $S_k \subseteq S$ – подмножество состояний системы переходов, ассоциированное с k -й динамикой. Понятие совместимости при этом предлагается рассматривать в узком смысле и широком смысле.

Если подразумевается проверка совместимости компонентов системы в ключе отдельно взятой динамики, имеет место постановка задачи проверки совместимости в узком смысле:

$$M, s^* \models f(b_k), \quad (12)$$

где $s^* \in S_k$ и $s^* \notin S \setminus S_k$. Выражение (12) означает, что для структуры (1) темпоральная формула (10) должна выполняться $\forall s^* \in S_k$.

Чтобы сформулировать постановку задачи проверки совместимости в широком смысле, сформируем как дизъюнкцию темпоральную формулу, охватывающую альтернативные динамики:

$$\xi \equiv f(b_1) \vee f(b_2) \vee \dots \vee f(b_k) \vee \dots \vee f(b_n). \quad (13)$$

Соответствующую задачу проверки формализуем следующим образом:

$$M, s \models \xi. \quad (14)$$

При этом стоит отметить, что, если поведение IoT-системы характеризуется лишь одной динамикой, постановка задачи в узком смысле также является и постановкой задачи в широком смысле.

На основе введенных концепций и формализаций сформируем основополагающие блоки формальной модели: спецификацию начального состояния, спецификации переходов между состояниями, спецификации динамик и результирующую темпоральную формулу,

подлежащую автоматизированной проверке – верификации методом проверки на модели согласно сформулированной постановке задачи проверки – (12) или (14).

Спецификацию начального состояния зададим конъюнкцией:

$$Init \equiv (v_1 = 0) \wedge \dots \wedge (v_i = 0) \wedge \dots \wedge (v_m = 0). \quad (15)$$

Переход $(s, s') \in R$ формализуем на основе выражения (8) и конструкции IF-THEN-ELSE. При этом выделим два случая – переход из начального состояния и переход из одного из последующих состояний. В первом случае в качестве предусловия выступает спецификация начального состояния (15):

$$Act_i \equiv (v'_i = IF(Init) THEN \neg v_i ELSE v_i), \quad (16)$$

где v'_i представляет переменную состояния в последующий момент модельного времени.

Во втором случае предусловием является спецификация предыдущего перехода:

$$Act_j \equiv (v'_j = IF(Act_i) THEN \neg v_j ELSE v_j). \quad (17)$$

Предложенный подход к специфицированию переходов между состояниями как действий представлен на рис. 1.

Предложенный подход к специфицированию динамики состоит в следующем:

- Основываясь на (10), сформировать спецификацию динамики, где в качестве конъюнктов будут фигурировать единственное выражение (16) – инициатор цепочки переходов, и $m-1$ выражение (17).
- Сформировать результирующую темпоральную формулу, подлежащую автоматизированной проверке согласно постановке задачи (12) методом проверки на модели:

$$Spec_k \equiv Init \wedge G[Act_1 \wedge \dots \wedge Act_m], \quad (18)$$

где G – темпоральный оператор «Globally»; в качестве конъюнктов в квадратных скобках фигурируют спецификации переходов на основе выражений (17) и (18).

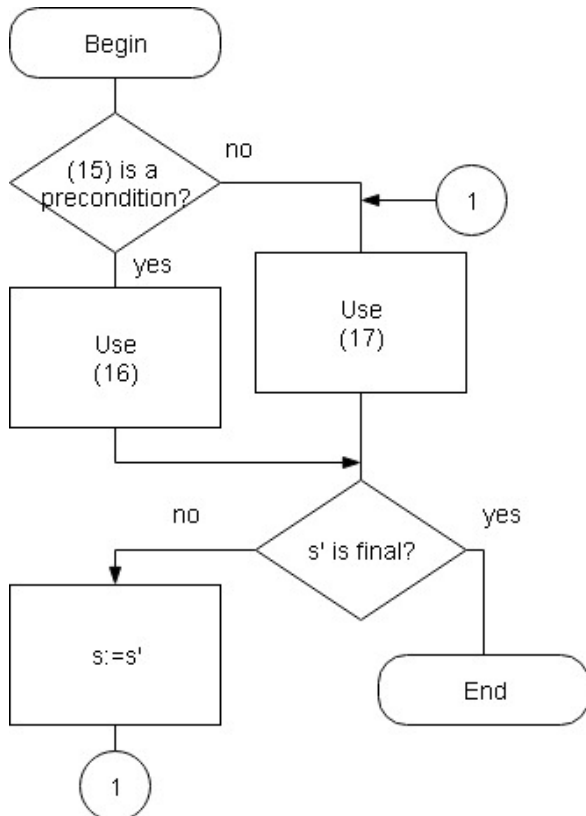


Рис. 1. Алгоритм формирования спецификаций переходов.¹

Таким образом, постановка задачи (12) приобретает следующий вид:

$$M, s^* \models Spec_k. \quad (19)$$

В соответствии с выражением (13), в случае постановки задачи в широком смысле (14), получим результирующую темпоральную формулу следующего вида:

$$RSpec \equiv Init \wedge G[Spec'_1 \vee \dots \vee Spec'_n], \quad (20)$$

где $Spec'_k \equiv Act_1 \wedge \dots \wedge Act_m$ – спецификация динамики без учета спецификации начального состояния.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки предложенной модели рассмотрен следующий сценарий [29]:

- Некоторый пользователь IoT-системы взаимодействует с системой посредством веб-интерфейса с целью исследования ее работы.
- Допустимы следующие варианты действий пользователя: подготовка и запуск эксперимента; получение данных (результата) проведения эксперимента и визуализация полученных данных (рис. 2).

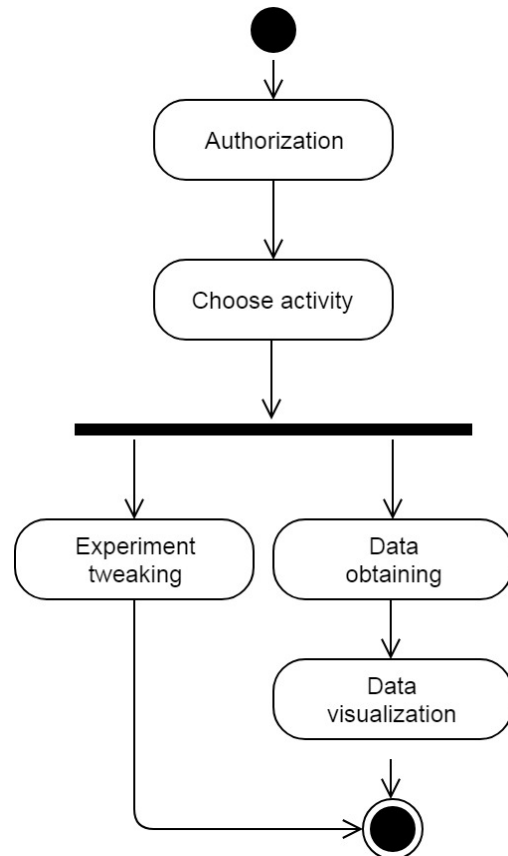


Рис. 2. Диаграмма действий для рассматриваемого сценария.²

На рис. 2 представлены два альтернативных сценария работы с системой, т.е. имеем две динамики.

Каждое действие реализуется соответствующим веб-сервисом. Тогда имеем следующее множество переменных состояний: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$.

Формальная TLA+ спецификация, синтезированная согласно предложенной модели, приведена в табл. 1.

В табл. 1 в строке 6 символом [] обозначен темпоральный оператор G .

Эксперименты проведены на платформе следующей конфигурации: операционная система – MS Windows 7; процессор – Intel Celeron B815, 1.6 ГГц; оперативная память – 2 Гб; среда исполнения Java – JRE 1.8.0_191; среда моделирования – TLA Toolbox v. 1.5.6; метод проверки на модели, реализованный в составе среды TLA Toolbox, – TLC (TLA Checker) v. 2.12. Количество достижимых состояний (в которых выполняется результирующая темпоральная формула), обнаруженных в процессе автоматизированной верификации, составило

6, а сопутствующие проверке временные затраты – 2.735 с. (усредненное значение)

Таблица 1³.

Формальная TLA+ спецификация ⁴.

No.	Specification
1	VARIABLES v1, v2, v3, v4, v5 * list of variables
2	Invariant == $\wedge v1 \in \text{BOOLEAN} \dots \wedge v5 \in \text{BOOLEAN}$ * variables invariants
3	* initial state specification as conjunction Init == v1=FALSE \wedge v2=FALSE \wedge v3=FALSE \wedge v4=FALSE \wedge v5=FALSE
4	Act_0 == v1' = IF Init THEN ~v1 ELSE v1 * specification Act_1 == v2' = IF Act_0 THEN ~v2 ELSE v2 * of Act_2 == v3' = IF Act_1 THEN ~v3 ELSE v3 * transitions Act_3 == v4' = IF Act_1 THEN ~v4 ELSE v4 * between Act_4 == v5' = IF Act_3 THEN ~v5 ELSE v5 * the states
5	Next == $\vee \wedge (\text{Act}_0 \wedge \text{Act}_1 \wedge \text{Act}_2) \wedge \text{UNCHANGED}\langle\langle v4, v5 \rangle\rangle$ * alternative $\vee \wedge (\text{Act}_0 \wedge \text{Act}_1 \wedge \text{Act}_3 \wedge \text{Act}_4) \wedge \text{UNCHANGED}\langle\langle v3 \rangle\rangle$ * behaviors
6	RSpec == Init/ \wedge [Next]_<<v1,v2,v3,v4,v5>> * resulting temporal formula

III. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты следует рассматривать как упреждающий шаг, направленный на снижение результирующих временных затрат на разработку за счет проведения формальной верификации на основе предложенной модели уже на этапе проектирования.

Полученное значение достижимых состояний системы переходов, обнаруженных в процессе автоматизированной верификации спецификации, синтезированной согласно предложенной модели, согласуется с содержимым рис. 2. Это свидетельствует в пользу адекватности предложенной модели.

Предложенная модель позволяет синтезировать компактные и реконфигурируемые спецификации IoT-системы с требуемым уровнем детализации.

Сопутствующие процессу автоматизированной верификации временные затраты можно охарактеризовать как приемлемые, учитывая относительно низкие вычислительные возможности аппаратной составляющей тестовой платформы и ресурсоемкость решения задач формальной верификации. Они могут быть дополнительно снижены, если выполнять при верификации обход состояний системы переходов не методом обхода в ширину (используется по умолчанию), а методом обхода в глубину.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе предложена формальная модель проверки совместимости

компонентов IoT-системы. При этом были получены следующие результаты:

- Формализована концептуальная составляющая предложенной модели – на основе структуры Крипке и выразительных возможностей формализма TLA+.
- Проверена адекватность предложенной модели – на основе сценария предметной области – вариаций сценариев взаимодействия пользователя с системой.
- Измерены временные затраты на верификацию спецификации, синтезированной согласно предложенной модели. Среднее значение составило 2.735 с. Такие затраты охарактеризованы как приемлемые.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта Erasmus+ Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications ALIOT Project (reference number 573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-SBHE-JP), при участии кафедры компьютерных систем и сетей и кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

Работа проведена в рамках исследовательской работы «Методы и средства принятия решений для обработки данных в интеллектуальных системах распознавания образов» (номер ДБ 04927), проводимой кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Algorithm of synthesis the specifications of transitions.

²**Fig. 2.** Activity diagram for the case study.

^{3,4}**Table 1.** Formal TLA+ specification.

Литература (References)

- [1] Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of things: a survey on enabling technologies protocols and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376. doi: 10.1109/COMST.2015.2444095
- [2] Bera S., Misra S., Vasilakos A.V. Software-Defined Networking for Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1994-2008. doi: 10.1109/JIOT.2017.2746186
- [3] Stojkoska B.L.R., Trivodaliev K.V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 140, pp. 1454-1464. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.006
- [4] Sotres P., Santana J.R., Sanchez L., Lanza J., Munoz L. Practical lessons from the deployment and management of a smart city Internet-of-Things infrastructure: the SmartSantander testbed case. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 14309-14322. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2723659
- [5] Li R., Song T., Capurso N., Yu J., Couture J., Cheng X. IoT applications on Secure Smart Shopping System. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1945-1954. doi: 10.1109/JIOT.2017.2706698
- [6] Yaqoob I., Ahmed E., Hashem I.A.T., Ahmed A.I.A., Gani A., Imran M., Guizani M. Internet of Things architecture: Recent advances taxonomy requirements and open challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 10-16. doi: 10.1109/MWC.2017.1600421
- [7] Lemos A.L., Daniel F., Benatallah B. Web Service Composition: A Survey of Techniques and Tools. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2016, vol. 48, no. 3, pp. 1-41. doi: 10.1145/2831270
- [8] Mahmood K., Li X., Chaudhry S.A., Naqvi H., Kumari S., Sangaiah A.K., Rodrigues J.J.P.C. Pairing based anonymous and secure key agreement protocol for smart grid edge computing infrastructure. *Future Generation Computer Systems*, 2018, vol. 88, pp. 491-500. doi: 10.1016/j.future.2018.06.004
- [9] Desai P., Sheth A., Anantharam P. Semantic Gateway as a Service Architecture for IoT Interoperability. *Proc. 2015 IEEE International Conference on Mobile Services*. New York, NY, USA, 2015, pp. 313-319. doi: 10.1109/MobServ.2015.51
- [10] Derhamy H., Eliasson J., Delsing J. IoT interoperability: on-demand and low latency transparent multiprotocol translator. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, vol. 4, no. 5, pp. 1754-1763. doi: 10.1109/JIOT.2017.2697718
- [11] Soursos S., Podnar-Zarko I., Zwickl P., Gojmerac I., Bianchi G., Carrozzo G. Towards the Cross-Domain Interoperability of IoT Platforms. *Proc. 2016 European Conference on Networks and Communication (EUCNC 2016)*. Athens, Greece, 2016, pp. 398-402. doi: 10.1109/EuCNC.2016.7561070
- [12] Aloï G., Caliciuri G., Fortino G., Gravina R., Pace P., Russo W., Savaglio C. Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, vol. 81, pp. 74-84. doi: 10.1016/j.jnca.2016.10.013
- [13] Blackstock M., Lea R. IoT interoperability: A hub-based approach. *Proc. 2014 International Conference on Internet of Things (IOT)*. Cambridge, MA, USA, 2014, pp. 79-84. doi: 10.1109/IOT.2014.7030119
- [14] Pereira C., Pinto A., Aguiar A., Rocha P., Santiago F., Sousa J. IoT interoperability for actuating applications through standardised m2m communications. *Proc. 2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Coimbra, Portugal, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/WoWMoM.2016.7523564
- [15] Ferrari P., Flammini A., Sisinni E., Rinaldi S., Brandao D., Rocha M.S. Delay estimation of Industrial IoT applications based on messaging protocols. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, vol. 67, no. 9, pp. 2188-2199. doi: 10.1109/TIM.2018.2813798
- [16] Buono P., Cassano F., Legretto A., Piccinno A. EUDroid: A formal language specifying the behaviour of IoT devices. *IET Software*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 425-429. doi: 10.1049/iet-sen.2017.0347
- [17] Sosa-Reyna C.M., Tello-Leal E., Lara-Alabazares D. Methodology for the model-driven development of service oriented IoT applications. *Journal of Systems Architecture*, 2018, vol. 90, pp. 15-22. doi: 10.1016/j.sysarc.2018.08.008
- [18] Nawaratne R., Alahakoon D., De Silva D., Chhetri P., Chilamkurti N. Self-evolving intelligent algorithms for facilitating data interoperability in IoT environments. *Future Generation Computer Systems*, 2018, vol. 86, pp. 421-432. doi: 10.1016/j.future.2018.02.049
- [19] Zhou Q., Simmhan Y., Prasanna V. Knowledge-infused and consistent Complex Event Processing over real-time and persistent streams. *Future*

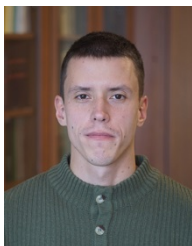
- Generation Computer Systems*, 2017, vol. 76, pp. 391-406. doi: 10.1016/j.future.2016.10.030
- [20] Hur K., Chun S., Jin X., Lee K.-H. Towards a semantic model for automated deployment of IoT services across platforms. *Proc. 2015 IEEE World Congress on Services*. New York, NY, USA, 2015. pp. 17-20. doi: 10.1109/SERVICES.2015.11
- [21] Beal J., Viroli M., Pianini D., Damiani F. Self-adaptation to device distribution in the Internet of Things. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 1-29. . doi: 10.1145/3105758
- [22] Shi X., Fan L., Ling Y., He J., Xiong D. Dynamic and quantitative method of analyzing clock inconsistency factors among distributed nodes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 519-530. doi: 10.1007/s13369-014-1545-1
- [23] Liu F., Yang Y. A two-tier replication framework and its consensus protocol for big data storage of internet of things. *Journal of Internet Technology*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 1453-1460.
- [24] Lamport L. *Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers*. Boston, Addison-Wesley, 2002. 382 p.
- [25] Newcombe C., Rath T., Zhang F., Munteanu B., Brooker M., Deardeuff M. How Amazon web services uses formal methods. *Communications of the ACM*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 66-73. doi: 10.1145/2699417
- [26] Resch S., Paulitsch M. Using TLA+ in the development of a safety-critical fault-tolerant middleware. *Proc. of 2017 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, Toulouse, France, 2017, pp. 1-7. doi: 10.1109/ISSREW.2017.43
- [27] Clarke E.M., Grumberg O., Peled D.A. *Model checking*. Massachusetts, MIT Press, 2001. 314 p.
- [28] Shkarupylo V.V., Tomicic I., Kasian K.M., Alsayaydeh J.A.J. An Approach to increase the Effectiveness of TLC Verification with Respect to the Concurrent Structure of TLA+ Specification. *International Journal of Software Engineering and Computer Systems*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 48–60. doi: 10.15282/ijsecs.4.1.2018.4.0037
- [29] Sanchez L., Munoz L., Galache J. A., Sotres P., Santana J. R., Gutierrez V., Ramdhany R., Gluhak A., Krco S., Theodoridis E., Pfisterer D. SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed. *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 217-238. doi: 10.1016/j.bjp.2013.12.020

Сведения об авторах.



Тименко Артур Валентинович. Ассистент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета. Область научных интересов – Интернет вещей; компьютерные сети.

E-mail: timenko.artur@gmail.com



Шкарупило Вадим Викторович. К.т.н., доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Область научных интересов – Интернет вещей; формальные методы.

E-mail: shkarupylo.vadym@gmail.com



Олейник Андрей Александрович. К.т.н., доцент, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета. Область научных интересов – искусственный интеллект, нейронные сети, анализ данных.

E-mail: olejnikaa@gmail.com



Грушко Светлана Сергеевна. К.т.н., старший преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета. Область научных интересов – проектирование устройств управления на ПЛИС; интерфейсы компьютерных систем.

E-mail: grushko_ss@i.ua

The Method for Determining the Internal Complex Resistance of a Source to Obtain Maximum Power from an Active Multi-Pole

¹Bușer V. V., ²Glazeva O. V.

¹Odessa National Polytechnic University, ²National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine

Abstract. The study of the active multipoles, whose individual circuits are connected in the form of a star, was conducted. The aim of the research is to determine the conditions for obtaining maximum power under the load. The solution is found using the principle of a superposition and an analytical search for an extremum in an active DC three-pole. It is ensured that the necessary condition is the equivalence of the active resistance of the source and the load in each branch, regardless of the electromotive force of the source. It is based on a special symmetry of partial differential equations – in each equation the resistance of the branch of the sources is summed up with the resistance of the same branch of the load. The scientific novelty of this work consists in the analytically accurate substantiation of the condition for achieving the maximum power for an n-phase AC network with the isolated neutrals – full resistances in each branch of the load must be equivalent to conjugate complex resistances of a source. A new method for the experimental determination of internal resistances of both of a three-phase and n-phase source of electrical energy is proposed. It is based on the selection of conjugated complex resistances of the load and the source. The procedure consists of two stages: ensuring the voltage resonance in each phase of a multipole and iterative selection of the resistance of the load in each phase to obtain the maximum power. The MULTISIM model can be used in virtual laboratory works for the study of the electrical engineers.

Keywords: maximum of active power in load, active three-pole DC, active multi-pole AC, partial differential.

DOI: 10.5281/zenodo.3239194

Metoda de determinare a rezistenței complexe interne a sursei pentru obținerea puterii maxime de la multipolul activ

¹Bușer V.V., ²Glazeva O.V.

¹Universitatea Politehnică Națională din Odessa

²Universitatea Națională "Academia Maritimă Odessa", Odessa, Ucraina

Rezumat. A fost efectuat un studiu al multipolilor activi cu conexiunea circuitelor în stea. Scopul lucrării este de a determina condițiile de obținere a puterii maxime în sarcină și de a dezvolta o metodă pentru determinarea rezistenței interne totale a unei surse multifazice. Scopul a fost realizat folosind metodele de suprapunere și căutarea analitică a unui extremum pentru un tripol activ de curent continuu. Se demonstrează că condiția necesară pentru obținerea puterii maxime în sarcină dintr-un astfel de tripol este egalitatea rezistențelor active ale sursei și a sarcinii din fiecare ramură, astfel încât în acest caz ecuațiile diferențiale parțiale, pe baza cărora se găsește extremumul, devin identice egale cu zero, indiferent de forța electromotoare a sursei. Noutatea științifică a lucrării constă în fundamentarea analitică exactă a condiției de obținere a puterii maxime și pentru o rețea de curent alternativ cu n-faze cu neutre izolate - rezistența totală a fiecărei ramuri de sarcină trebuie cuplată în mod complex cu rezistența aceleiași ramuri a sursei. Pe baza acestei soluții a fost propusă o nouă metodă de determinare experimentală a rezistențelor interne ale unei surse de energie electrică cu n-faze, pe baza selecției complexelor de sarcină conjugată și rezistențelor sursei. Procedura constă în asigurarea rezonanței a tensiunilor în fiecare fază a multipolului de curent alternativ, utilizând un stocaj de inductanță și capacitate și, indiferent de tipul de curent, selectează iterativ rezistențele de sarcină consecutiv în fiecare fază pentru a obține puterea totală maximă.

Cuvinte-cheie: puterea activă maximă livrată, tripol activ de curent continuu, multipoli de curent alternativ, ecuații diferențiale parțiale.

Способ определения внутренних комплексных сопротивлений источника для получения максимальной мощности от активного многополюсника

¹Бушер В. В., ²Глазева О. В.

¹Одесский национальный политехнический университет

²Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, Украина

Аннотация. Проведено исследование активных многополюсников с соединением цепей звездой. Целью работы является определение условий получения максимальной мощности в нагрузке и разработка спо-

соба определения полного внутреннего сопротивления многофазного источника. Поставленная цель достигнута с помощью методов наложения и аналитического поиска экстремума для активного трехполюсника постоянного тока. Доказано, что необходимым условием получения максимальной мощности в нагрузке от такого трехполюсника является равенство активных сопротивлений источника и нагрузки в каждой ветви, так как только в этом случае уравнения в частных производных, на основании которых найден экстремум, становятся тождественно равными нулю независимо от электродвижущей силы источника. Научная новизна работы заключается в аналитически точном обосновании условия достижения максимума мощности и для n -фазной сети переменного тока с изолированными нейтралями – полное сопротивление каждой ветви нагрузки должно быть комплексно сопряженным сопротивлению этой же ветви источника. На основании этого решения предложен новый способ экспериментального определения внутренних сопротивлений n -фазного источника электрической энергии, основанный на подборе комплексно сопряженных сопротивлений нагрузки и источника. Процедура заключается в обеспечении резонанса напряжений в каждой фазе многополюсника переменного тока с помощью магазина индуктивностей и емкостей и, независимо от рода тока, итерационного подбора активных сопротивлений нагрузки поочередно в каждой фазе для получения максимальной суммарной мощности. Даны рекомендации по необходимым действиям в случае малого внутреннего сопротивления источника для защиты от перегрузок по току. Показан пример реализации предложенного способа в среде виртуальной лаборатории MULTISIM, приведены основные сведения о подготовке аналогичной модели в пакете MATLAB SimPowerSystem. Модель, созданная в MULTISIM, может быть использована при проведении виртуальных лабораторных работ для специалистов электротехнических специальностей.

Ключевые слова: максимум поставляемой активной мощности, активный трехполюсник постоянного тока, многополюсник переменного тока, дифференциальные уравнения в частных производных.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация передачи электрической энергии от активного многополюсника к пассивному является актуальной задачей и в технике связи, и в электроэнергетике, в том числе в автономных системах аварийного и резервного питания. В классической теории электротехники анализ передачи максимальной мощности от источника в нагрузку ограничен рассмотрением согласованного режима работы цепей на основании теоремы Тевенина о представлении источника постоянного или переменного тока, как активного двухполюсника [1 – 5]. Получены решения для трех случаев: (i) определено оптимальное для достижения максимальной мощности сопротивление нагрузки, равное сопротивлению источника; (ii) найдено оптимальное сопротивление источника для достижения этой же цели (решение тривиально – источник должен быть идеальным); (iii) выполнен анализ для двухполюсников переменного тока и также найдены требуемые оптимальные соотношения – активное сопротивление нагрузки должно быть равно полному сопротивлению источника, включая реактивную составляющую нагрузки. Последнее решение при возможности регулирования активного и реактивного сопротивления нагрузки сводится к случаю (i) [6 – 11].

Такой подход справедлив для многофазных сетей при соединении ветвей звездой в

случае заземленных нейтралей. Однако у многих потребителей (например, трехфазных двигателей или соединении ветвей треугольником) заземление нейтрали не выполняют. Анализ оптимальных соотношений в случае смещения нулевой точки из-за возможной асимметрии нагрузки и/или источника в литературе рассматривается редко и недостаточно полно. Анализ основывается на применении метода суперпозиции [12 – 14], который наилучшим образом подходит для соединений звездой и позволяет получить минимальное количество уравнений для расчета таких соединений [15]. На основании этого метода в [16] были получены желаемые условия для случая линейных трехполюсников постоянного и переменного тока. Однако даже для трехфазной сети переменного тока получена система из шести нелинейных уравнений, поэтому доказательство выполнено нестрогое, методом итерационного подбора, и не показано, как практически осуществить поиск таких параметров.

Проблема технической реализации согласования источника и нагрузки заключается в том, что экстремумы мощности при регулировании параметров нагрузки являются неярко выраженными. Поэтому необходимо применять методы прецизионного измерения параметров источника и нагрузки, основанные, например, на подключении трех вольтметров и амперметров для каждой ветви [17 – 19]. Поэтому, кроме математического обоснова-

ния метода, необходимо также разработать методику проведения экспериментальных исследований с учетом особенностей решаемой задачи.

Не менее важной задачей является подготовка методической базы для проведения экспериментальных исследований электрических цепей различной сложности с учетом специфических особенностей как объектов изучения, так и методов [20]. Этим вопросам уделяется большое внимание, в контексте чего важно отметить две особенности – из всего многообразия методов при проведении экспериментов желательно выбирать наиболее простые [21 – 23], а учитывая сложность и высокую стоимость прецизионного оборудования, во многих случаях целесообразно предварительно выполнить исследования на базе виртуальных лабораторий [24]. И на основании вышесказанного сформулируем цель и задачи работы.

Цель работы – получение условий передачи максимальной мощности для линейных многополюсников постоянного и переменного тока и обоснование способа экспериментального определения внутренних сопротивлений источника.

Для достижения поставленной цели решим следующие задачи.

Проведем анализ многополюсников постоянного и переменного тока и покажем возможность применения идентичного подхода к ним для согласования работы источника и нагрузки.

Разработаем процедуру экспериментального определения параметров многофазного источника переменного тока.

Покажем возможность реализации предлагаемого способа на базе виртуальных систем моделирования.

1. УСЛОВИЯ ПЕРЕДАЧИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ АКТИВНЫМИ МНОГОПОЛЮСНИКАМИ

Проанализируем требуемые условия передачи максимальной мощности для активных трехполюсников постоянного тока, полученные в работе [2].

Так как любой линейный активный или пассивный многополюсник может быть приведен к эквивалентной схеме с соединением звездой, то расчетная схема для трехполюсников приводится к виду, показанному на рис. 1.

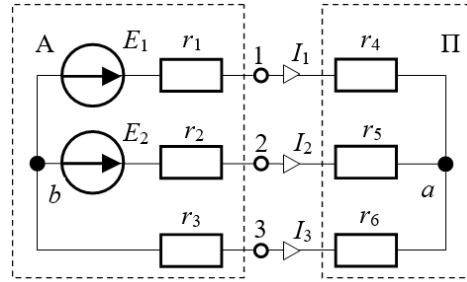


Рис. 1. Расчетная схема для трехполюсников постоянного тока.¹

Расчет токов может быть выполнен методом суперпозиции, при использовании которого сопротивления отдельных цепей источника и нагрузки попарно складываются. Поэтому для сокращения записей обозначим $r_1 + r_4 = r_{14}$, $r_2 + r_5 = r_{25}$, $r_3 + r_6 = r_{36}$.

Тогда:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1(r_{25} + r_{36}) - E_2 r_{36}}{B}, \\ I_2 &= \frac{E_2(r_{14} + r_{36}) - E_1 r_{36}}{B}, \\ I_3 &= \frac{-E_1 r_{25} - E_2 r_{14}}{B}, \\ B &= r_{14} r_{25} + r_{14} r_{36} + r_{25} r_{36}. \end{aligned} \quad (1)$$

Мощность, потребляемая нагрузкой, рассчитывается по формуле:

$$P = r_4 I_1^2 + r_5 I_2^2 + r_6 I_3^2 = \frac{A}{B^2}, \quad (2)$$

где

$$A = r_4 (E_1(r_{25} + r_{36}) - E_2 r_{36})^2 + r_6 (E_1 r_{25} + E_2 r_{14})^2 + r_5 (E_2(r_{14} + r_{36}) - E_1 r_{36})^2.$$

Найдем параметры нагрузки, при которых достигается максимум мощности.

Для этого приравняем частные производные нулю и решим получаемую систему из трех уравнений:

$$\frac{\partial P}{\partial r_4} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_5} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_6} = 0, \quad (3)$$

которая принимает следующий вид:

¹ Appendix 1

$$\left\{ \begin{aligned} & \{ (E_1(r_{25} + r_{36}) - E_2 r_{36})^2 + \\ & + 2r_5 E_2 (E_2(r_{14} + r_{36}) - E_1 r_{36}) + \\ & + 2r_6 E_2 (E_1 r_{25} + E_2 r_{14}) \} B - 2A(r_{25} + r_{36}) = 0, \\ & \{ (E_2(r_{14} + r_{36}) - E_1 r_{36})^2 + \\ & + 2r_4 E_1 (E_1(r_{25} + r_{36}) - E_2 r_{36}) + \\ & + 2r_6 E_1 (E_1 r_{25} + E_2 r_{14}) \} B - 2A(r_{14} + r_{36}) = 0, \\ & \{ 2r_4 (E_1(r_{25} + r_{36}) - E_2 r_{36})(E_1 - E_2) + \\ & + 2r_5 [E_2(r_{14} + r_{36}) - E_1 r_{36}](E_2 - E_1) + \\ & + (E_1 r_{25} + E_2 r_{14})^2 \} B - 2A(r_{25} + r_{14}) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Решение системы уравнений относительно сопротивлений r_4, r_5, r_6 дает два варианта ответов: $r_4 = \pm r_1, r_5 = \pm r_2, r_6 = \pm r_3$.

Отрицательные значения тривиальны, так как все составляющие уравнений вырождаются в 0, и решение не имеет физического смысла.

Но важно отметить, что если подставить положительные значения в уравнения, то равенство нулю достигается за счет сокращения отдельных слагаемых независимо от значений E_1, E_2 .

Тогда:

$$\begin{aligned} B &= 4(r_2 r_3 + r_1 r_2 + r_1 r_3), \\ I_1 &= 2 \frac{E_1(r_2 + r_3) - E_2 r_3}{B}, \\ I_2 &= 2 \frac{E_2(r_1 + r_3) - E_1 r_3}{B}, \\ I_3 &= -2 \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{B}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = B(E_1^2(r_2 + r_3) + E_2^2(r_1 + r_3) - 2E_1 E_2 r_3). \quad (6)$$

Суммарная мощность составит:

² Appendix 1

$$P = \frac{E_1^2(r_2 + r_3) + E_2^2(r_1 + r_3) - 2E_1 E_2 r_3}{4(r_2 r_3 + r_1 r_2 + r_1 r_3)} \quad (7)$$

Рассмотрим работу с нагрузкой активного трехполюсника переменного тока (рис. 2). Здесь комплексные сопротивления нагрузки описываются шестью переменными:

$$\underline{z}_4 = r_4 + jx_4, \underline{z}_5 = r_5 + jx_5, \underline{z}_6 = r_6 + jx_6. \quad (8)$$

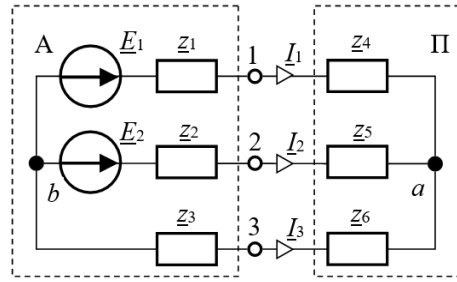


Рис. 2. Расчетная схема для трехполюсников переменного тока.²

Расчет для схемы на рис. 2 выполняется аналогично предыдущему случаю, но в комплексной форме. Поэтому значение активной мощности вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} P(r_4, x_4, r_5, x_5, r_6, x_6) &= \\ &= r_4 I_1^2 + r_5 I_2^2 + r_6 I_3^2 = \frac{A}{B^2}, \\ A &= r_4 \left| \underline{E}_1(\underline{z}_{25} + \underline{z}_{36}) - \underline{E}_2 \underline{z}_{36} \right|^2 + \\ &+ r_5 \left| \underline{E}_2(\underline{z}_{14} + \underline{z}_{36}) - \underline{E}_1 \underline{z}_{36} \right|^2 + \\ &+ r_6 \left| \underline{E}_1 \underline{z}_{25} + \underline{E}_2 \underline{z}_{14} \right|^2, \\ B &= \left| \underline{z}_{25} \underline{z}_{36} + \underline{z}_{14} \underline{z}_{25} + \underline{z}_{14} \underline{z}_{36} \right|. \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что, как и в трехполюсниках постоянного тока, в уравнениях активной мощности все комплексные сопротивления присутствуют попарно. Поэтому, учитывая свойства комплексных чисел, вместо шести независимых уравнений необходимо решать только три. И тогда значения сопротивлений $\underline{z}_4, \underline{z}_5, \underline{z}_6$, удовлетворяющих системе уравнений

$$\frac{\partial P}{\partial \underline{z}_4} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \underline{z}_5} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \underline{z}_6} = 0, \quad (10)$$

могут быть найдены аналогично решениям для постоянного тока. Но возможно большее количество реализуемых физически вариантов:

$$\begin{cases} r_4 = r_1, x_4 = x_1, \\ r_5 = r_2, x_5 = x_2, \\ r_6 = r_3, x_6 = x_3, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} r_4 = r_1, x_4 = -x_1, \\ r_5 = r_2, x_5 = -x_2, \\ r_6 = r_3, x_6 = -x_3. \end{cases} \quad (12)$$

И если использовать второе решение (12), то есть принять сопротивления ветвей

нагрузки равными комплексно сопряженным значениям источника:

$$\underline{z}_4 = \underline{z}_1^*, \quad \underline{z}_5 = \underline{z}_2^*, \quad \underline{z}_6 = \underline{z}_3^*, \quad (13)$$

то может быть сформулирован способ экспериментального определения внутренних сопротивлений трехфазного источника.

Очевидно также, что полученные уравнения инвариантны к количеству фаз и способ определения параметров методом максимума мощности в нагрузке может быть использован и для n -фазных многополюсников.

II. СПОСОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ АКТИВНОГО МНОГОПОЛЮСНИКА

Рассмотрим схему с неизвестными параметрами источника Z_A, Z_B, Z_C и нагрузкой, составленной из магазинов резисторов R_A, R_B, R_C , индуктивностей L_A, L_B, L_C , конденсаторов C_A, C_B, C_C , трех амперметров A_1, A_2, A_3 и трехфазного ваттметра W (рис. 3).

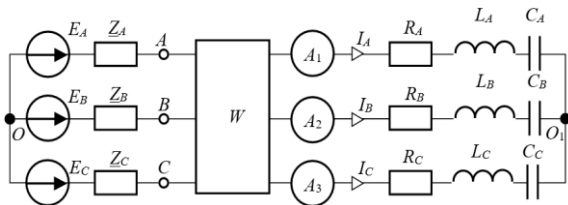


Рис. 3. Схема для определения внутренних сопротивлений трехфазного трехпроводного источника.³

Задача состоит в том, чтобы, изменяя параметры фазных сопротивлений нагрузки с помощью соответствующих магазинов, добиться максимально возможной активной мощности нагрузки (максимальных показаний ваттметра). Искомые внутренние комплексные сопротивления фаз источника будут равны сопряженным комплексным сопротивлениям соответствующих фаз нагрузки:

$$\begin{aligned} \underline{z}_1 &= \underline{Z}_A = R_A + j(X_{CA} - X_{LA}) = \underline{z}_4^* ; \\ \underline{z}_2 &= \underline{Z}_B = R_B + j(X_{CB} - X_{LB}) = \underline{z}_5^* ; \\ \underline{z}_3 &= \underline{Z}_C = R_C + j(X_{CC} - X_{LC}) = \underline{z}_6^* . \end{aligned} \quad (14)$$

Алгоритм поиска сопротивлений нагрузки состоит из трех этапов (рис. 4).

1. Учитывая, что в результате резонанса

напряжения в схеме могут быть большие токи, на стороне источника и на стороне нагрузки включают дополнительные сопротивления.

2. В каждой фазе по очереди с помощью магазинов конденсаторов C или индуктивностей L создается резонанс напряжения, возникновение которого определяется по максимуму показаний соответствующих амперметров.

3. Далее, регулируя сопротивления R_A, R_B, R_C получают максимальную суммарную мощность фаз. Эта операция повторяется, пока максимальное значение суммарной мощности ваттметров не перестает увеличиваться. Снятые с магазинов значения сопротивлений позволяют по формулам (14) определить искомые внутренние сопротивления фаз источника. Такой путь поиска в некоторых случаях может приводить к получению нескольких экстремумов, очень незначительно отличающихся по величине. Поэтому необходимо применять приборы с максимально высоким классом точности. Кроме того, при использовании метода двух ваттметров показания приборов могут отличаться во много раз, что часто приводит к необходимости переключения поддиапазонов и, соответственно, не позволяет получить данные с одинаковой точностью. Поэтому необходимо использовать метод трех ваттметров, когда даже при некоторой (реальной) несимметрии ветвей источника показания приборов близки друг к другу.

Покажем пример нахождения внутренних сопротивлений источника переменного тока с помощью модели системы, созданной в среде MULTISIM (рис. 5), с предварительно «скрытыми» параметрами источника. 1. При резонансе напряжения ток в ветви цепи достигает максимального значения, поэтому для его ограничения включим сопротивления $R_{1\text{lim}} = R_{2\text{lim}} = R_{3\text{lim}} = 10 \Omega$.

2. Будем добиваться резонанса напряжения по очереди в фазе А, потом в фазе В и в фазе С. Так как $C_1 = C_2 = C_3 = 67,6 \mu F$, то

$$X_{C_1, C_2, C_3} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 67,6} = 47,11 \Omega.$$

Условия возникновения резонанса напряжения: $X_C = X_L = 47,11 \Omega$, что соответствует значению индуктивности

$L_A = L_B = L_C = 150$ мН. Подобрал значение индуктивностей в каждой фазе нагрузки, полу-

чаем: для фазы А – $L_1 = 70$ мН, ; для фаз В и С – $L_2 = L_3 = 80$ мН.

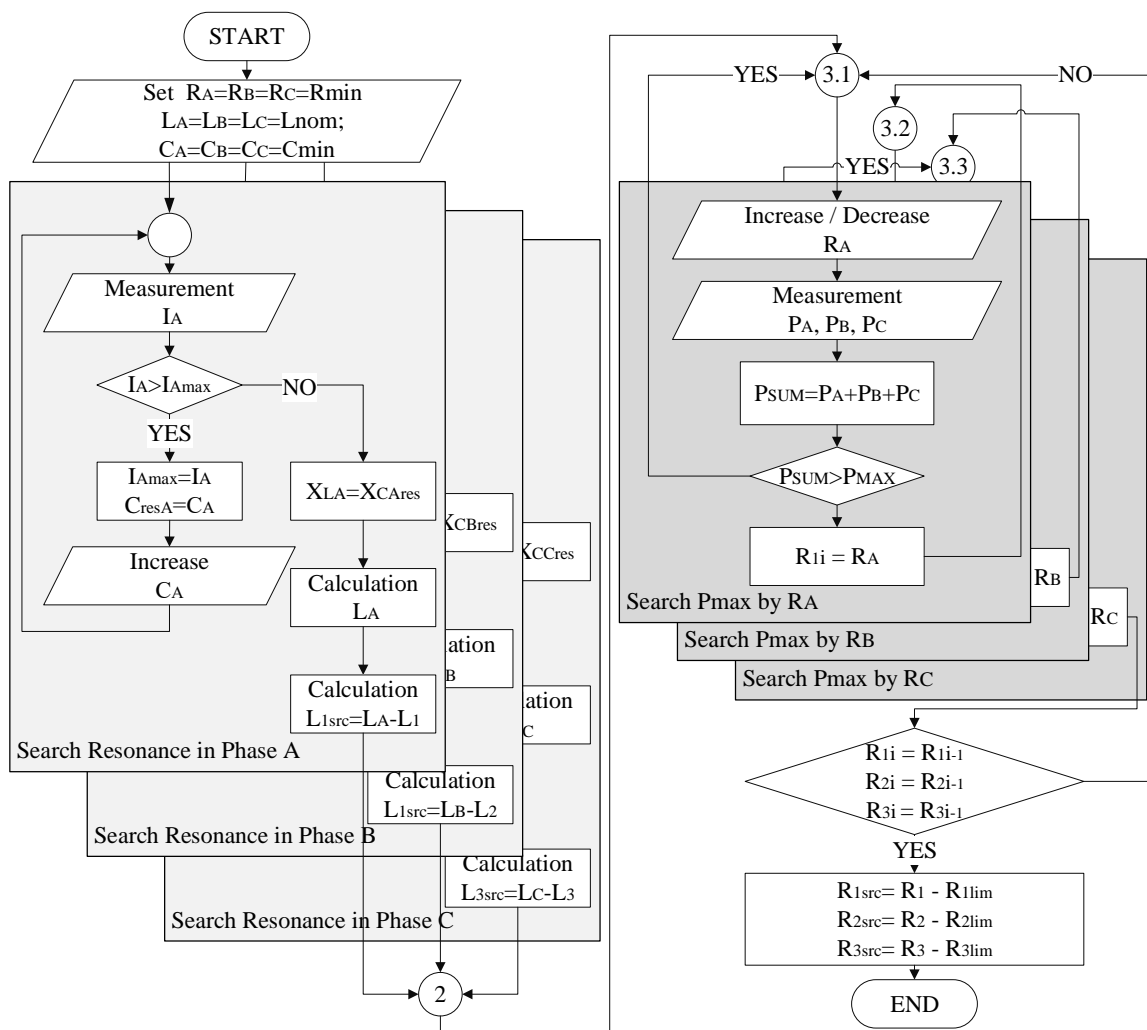


Рис. 4. Алгоритм процедуры определения внутренних сопротивлений источника.⁴

При подборе значений индуктивности учитывалось, что индуктивность каждой фазы состоит из неизвестной индуктивности источника и подобранной индуктивности нагрузки. Поэтому получаем:

$$L_{1src} = L_A - L_1 = 150 - 70 = 80 \text{ мН,}$$

$$L_{2src} = L_B - L_2 = 150 - 80 = 70 \text{ мН,}$$

$$L_{3src} = L_C - L_3 = 150 - 80 = 70 \text{ мН.}$$

3. Далее, используя метод простых итераций, будем подбирать значения сопротивлений R_1, R_2, R_3 такими, чтобы получить

$$L_{1src} = 80 \text{ мН,}$$

$$L_{2src} = 70 \text{ мН,}$$

$$L_{3src} = 70 \text{ мН.}$$

наибольшее суммарное значение мощности трех ваттметров.

В табл. 1 приведены результаты подбора значений активных сопротивлений для создания согласованного режима работы источника.

По результатам подбора R_1, R_2, R_3 получим:

$$R_{1src} = R_1 - R_{1lim} = 13 - 10 = 3 \Omega,$$

$$R_{2src} = R_2 - R_{2lim} = 12 - 10 = 2 \Omega,$$

$$R_{3src} = R_3 - R_{3lim} = 12 - 10 = 2 \Omega.$$

«Открыв» скрытые параметры источника, убеждаемся в том, что полученные данные совпадают с установленными

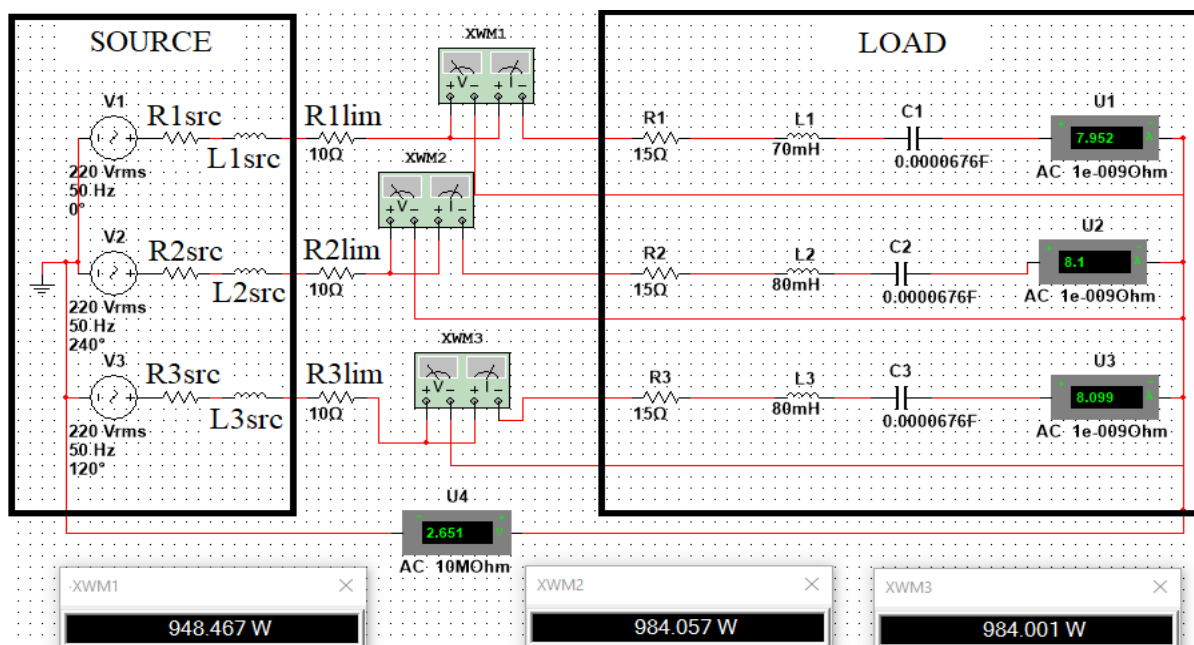


Рис. 5. Модель в MULTISIM для определения мощности методом трех ваттметров.⁵

Таблица 1.⁶

Результаты поиска максимальной суммарной мощности.⁷

1-я итерация First iteration														
Подбор резистора R_A Resistor selection R_A					Подбор резистора R_B Resistor selection R_B					Подбор резистора R_C Resistor selection R_C				
R_A , Ω	P_1 , W	P_2 , W	P_3 , W	ΣP , W	R_B , Ω	P_1 , W	P_2 , W	P_3 , W	ΣP , W	R_C , Ω	P_1 , W	P_2 , W	P_3 , W	ΣP , W
15	948.46	984.05	984.00	2916.52	15	848.61	1039	1039	2926.61	15	888.38	969.68	1077	2935.06
14	929.49	995.88	995.08	2921.25	14	864.42	1020	1050	2930.44	14	898.79	981.11	1059	2938.91
13	907.35	1009	1009	2925.35	13	873.16	998.37	1062	2933.53	13	910.07	993.48	1037	2940.56
12	881.63	1022	1022	2925.63	12	886.94	972.51	1075	2934.45	12	922.30	1007	1011	2940.30
11	851.83	1037	1037	2925.83	11	901.87	942.14	1090	2934.01	12.1	921.03	1006	1014	2941.03
10	817.41	1053	1054	2924.41	11.5	894.25	957.92	1082	2934.18	12.2	919.77	1004	1017	2940.73
10.5	835.24	1045	1045	2925.24	11.9	888.38	969.68	1077	2935.06					
10.9	848.61	1039	1039	2926.61	11.8	889.83	966.81	1078	2934.64					
10.8	845.34	1040	1041	2926.34										
2-я итерация Second iteration														
10.9	921.03	1006	1014	2941.03	11.9	980.42	978.22	986.71	2945.37	12.1	979.11	981.05	985.20	2945.37
11.4	937.0	998.59	1007	2942.59	12	979.11	981.05	985.21	2945.38	12	980.40	982.57	982.42	2945.39
12	954.58	990.04	999.09	2944.32	12.1	977.82	983.83	983.70	2945.36	11.9	981.69	984.08	979.60	2945.37
12.8	975.58	980.63	989.11	2945.33										
13	980.42	978.23	986.72	2945.37										
13.1	982.77	977.04	985.53	2945.36										

Аналогичные результаты получены и в среде Matlab Simulink (SimPowerSystem), где настройки осуществляются с помощью блоков переменных резисторов, конденсаторов, индуктивностей и блоков задания их величины, управляемых, например, экстремальными регуляторами.

Так, например, на рис.6 показана модель для поиска максимума активной мощности

для цепей с уже настроенным резонансом. Сопротивления нагрузок изменяются с помощью генератора линейно возрастающего сигнала Ramp с темпом $1\Omega/s$ и дополнительного блока, сравнивающего попарно мощности в каждой ветви и формирующего дополнительное приращение темпа изменения сопротивления так, чтобы мощности достигли максимума примерно в одно и тоже

время. Источником может быть n -фазный многополюсник как переменного, так и постоянного тока.

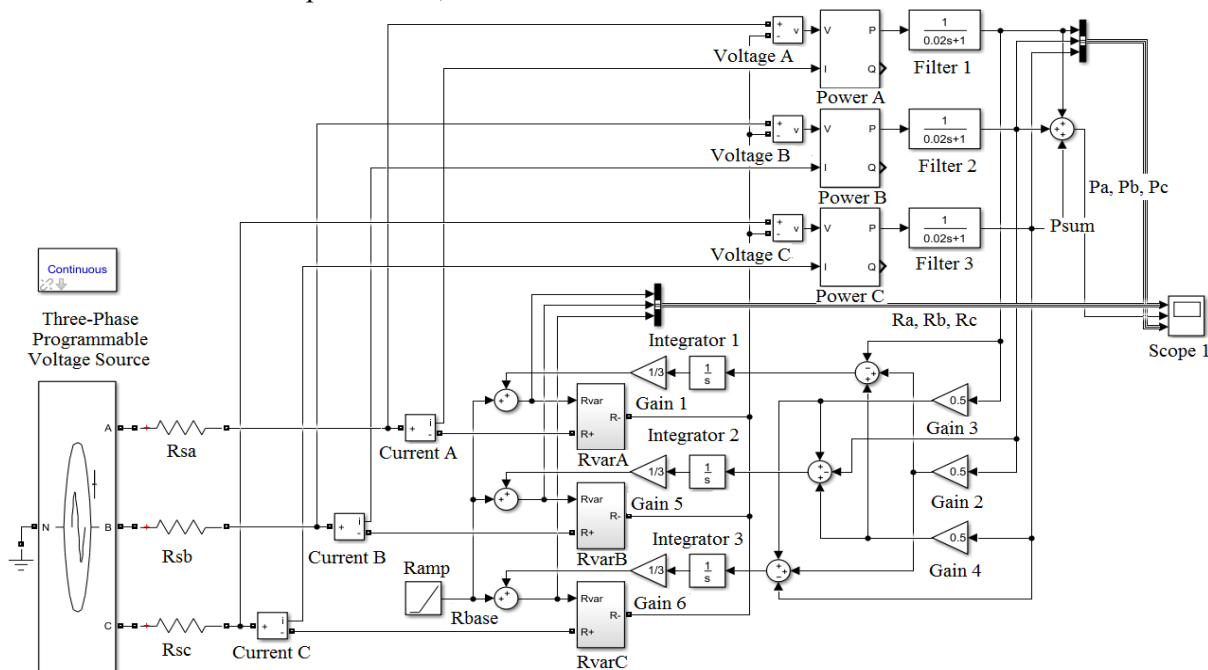


Рис. 6. Модель трехфазного несимметричного источника с автоматизированным поиском максимальной мощности.⁸

Результат работы модели приведен на рис. 7. Для заданных параметров источника $R_{1src} = 11.8 \Omega$, $R_{2src} = 12.0 \Omega$, $R_{3src} = 12.6 \Omega$, $E = 220 V$ получена максимальная мощность $2993 W$, что соответствует ожидаемому расчетному значению, однако искомые значения сопротивлений определены с погрешностью $\pm 0.05 \Omega$ из-за необходимости использования фильтров с постоянной времени $0.02 s$.

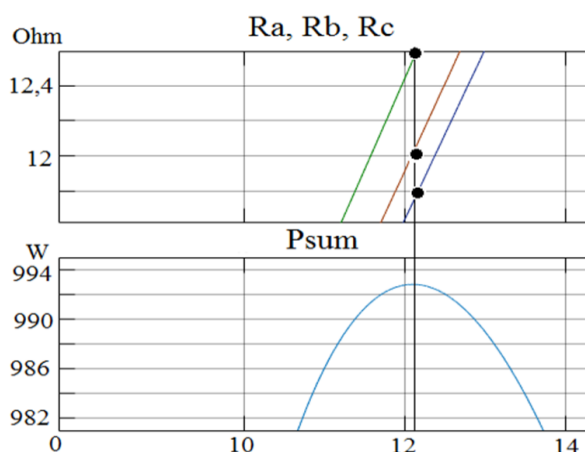


Рис. 7. Графики изменения величин сопротивлений и мощности в модели трехфазного несимметричного источника.⁹

Дальнейшая доработка модели может быть направлена на применение экстремаль-

ных регуляторов, обеспечивающих поиск реактивных составляющих сопротивлений для обеспечения резонанса, а затем и активных составляющих для достижения максимума мощности. Такие регуляторы сделают модель инвариантной к степени несимметрии источника.

Таким образом, предложенный способ поиска внутренних сопротивлений источника протестирован с помощью виртуальных моделей в различных программных пакетах, что подтверждает возможность его использования и для некоторых классов реальных систем питания с учетом допустимых токов, мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе решена задача получения максимальной мощности в многофазной нагрузке при соединении фаз источника и нагрузки звездой. Решение найдено методом суперпозиции и аналитического поиска экстремума для активного трехполюсника постоянного тока. Доказано, что необходимым условием получения максимальной мощности в нагрузке от такого трехполюсника является равенство активных сопротивлений источника и нагрузки в каждой ветви, так как только в этом случае уравнения в частных производных, на основании которых найден экстремум, становятся

тождественно равными нулю независимо от электродвижущей силы источника. Далее показано, что в комплексной форме уравнения, описывающие многофазную сеть переменного тока, записываются аналогично цепям постоянного тока. Исходя из свойств комплексных чисел и принципа аналогии, становится возможным сформулировать условия достижения экстремума мощности и для n -фазного источника переменного тока – должны быть эквивалентны как активные сопротивления, так и абсолютные значения реактивных сопротивлений в каждой фазе. Для получения максимальной мощности полное сопротивление источника должно быть комплексно сопряженным с полным сопротивлением источника.

2. На основании полученного результата предложен способ экспериментального определения внутренних сопротивлений как трехфазного, так и n -фазного источника электрической энергии, основанный на подборе комплексно сопряженных сопротивлений нагрузки и источника. Процедура заключается в обеспечении резонанса напряжений в каждой фазе многополюсника путем подбора индуктивностей и емкостей для цепей переменного тока, а затем, независимо от рода тока, итерационного поиска активных сопротивлений нагрузки поочередно в каждой фазе для получения максимальной суммарной мощности. Учитывая, что поиск резонанса и согласованного режима работы может приводить к перегрузкам по току, даны рекомендации для защиты сетей в случае малого внутреннего сопротивления источника.

3. Тестирование предложенного способа проведено на виртуальных моделях трехфазных систем в программных пакетах MATLAB Simulink SimPowerSystem и MULTISIM. Модель в MATLAB также иллюстрирует возможности автоматизированного поиска решения задачи и может быть дополнена реактивными элементами и экстремальными регуляторами, которые позволят в автоматическом режиме найти все составляющие комплексных сопротивлений нагрузки.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Circuit diagram of the three-pole DC.

²Fig. 2. Circuit diagram of the three-pole AC.

³Fig. 3. Circuit diagram for determining the internal resistances of a three-phase three-wire source.

⁴Fig. 4. Block diagram for determining the internal resistance of the source.

⁵Fig. 5. Model in MULTISIM for the determination of power by the method of three wattmeters..

^{6,7}Table 1. Results of determining internal resistance and maximum of power.

⁸Fig. 6. Model of a three-phase unbalanced source with automated maximum power search.

⁹Fig. 7. Time response of values of resistances and total power in the model of three-phase source.

Литература (References)

- [1] C. K. Alexander & M. N. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [2] L. S. Bobrow, Elementary Linear Circuit Analysis, New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1981.
- [3] R. L. Boylestad, Introductory Circuit Analysis, New York: Macmillan, 1994.
- [4] A. B. Carson. Circuits: Engineering Concepts and Analysis of Linear Electric Circuits, Stamford, CT: Brooks Cole, 2000.
- [5] Novgorodtsev A. B. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Uchebnoe posobie. [Theoretical bases of Electrotecnics]. St.Peterburg, Piter, 2006. 76 p. (In Russian).
- [6] Paul, D. K. and Gardner, P., “Maximum Power Transfer Theorem: A Simplified Approach,” *Int. J. Elect. Enging. Educ.*, vol. 35, 1998, pp. 271-273.
- [7] Boylestad, R. L., Introductory Circuit Analysis, 11th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2007.
- [8] Nilsson, J. W. and Riedel, S., Electric Circuits, 8th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2008.
- [9] Herniter, M. E., Schematic Capture with Cadence PSpice, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [10] Robbins, A. H. and Miller, W. C., Circuit Analysis (Theory and Practice), 3rd edition, Thompson Delmar Learning, 2004.
- [11] Johnson, D. E., Hilburn, J. L., Johnson, J. R. and Scott, P. D., Basic Electric Circuit Analysis, 5th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.
- [12] A. H. Robins & W. C. Miller, Circuit Analysis: Theory and Practice, Third Edition, Clifton park, NY: Thomson Delmar Learning, 2004
- [13] Robert L Damper, Can dependent sources be suppressed in electrical circuit theory?, *Int J. Electronics*, vol. 1, no 10, July 2010
- [14] Tejmal S Rathore and G A Shah, “Matrix approach: Better than applying Miller’s equivalents”, *IETE J Education*, vol. 51, no. 2&3, pp. 85-90, May-December 2010
- [15] T. S. Rathore, Jayasudha Koti, Sunita R. Sharma Analysis of Electrical Circuits with Controlled Sources through the Principle of Superposition.

International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol. 4 No. 3 Jun-Jul 2012, pp. 109-118.

- [16] Koroshchenko O. V., Rak O. M., Glazeva O. V. Metod jpredeleniya soprotivleniy istochnika dlja peredachi maksimal'noj moshchnosti v trjokhfaznoj seti [Method for determining the internal resistances of the source for transmitting the maximum power from the active three-poles network]. *Electrotechnical and computer systems*, 2017, Vol. 25(101), pp.240-244. (In Russian).
- [17] A. Muciek, F. Cabiati. Analysis of a three-voltmeter measurement method designed for low-frequency impedance comparisons, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 13, 2006, pp. 19-33.
- [18] T. L. Callegaro, G. Galzerano, C. Svelto, Precision impedance measurements by the three-voltage method with a novel highstability multiphase DDS generator, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 52, n 4, Aug. 2003, pp.1195-1199.
- [19] A. Muciek, F. Cabiati, Analysis of a three-voltmeter measurement method designed for low-frequency impedance comparisons, *Metrology and Measurements Systems*, vol. 13, 2006, pp.19-33.
- [20] Maevskaya E., Biliaiev V., Leshchenko N., Oginskayja S.N., Topuzanov A., Yarmolovich V. Laboratornyi praktikum po kursu "Spetsialnye metody i sredstva elektricheskikh izmereniy v kontekste ERASMUS+ proekta ALIOT [Laboratory practicum for course "Special methods and tools of electrical measurements tools and devices in the context of the ERASMUS+ project ALIOT]. *Electrotechnical and computer systems*, 2018, Vol. 27(103), pp.273-279. (In Russian).
- [21] T. S. Rathore. One-circuit and one-step evaluation of the Thevenin equivalent circuit, *IETE J Education*, vol. 48, pp. 9-12, JanMarch, 2007.
- [22] Kenneth, V. Cartwright., Non-Calculus Derivation of the Maximum Power Transfer Theorem. *The Technology Interface*, Spring 2008, pp. 1-19.
- [23] B. Andò, S. Baglio, and V. Marketta. Volt-Ammeter Method introducing Principles and developing Technologies to undergraduates, *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Education and Educational Technology*, 2009, pp.93-97.
- [24] F. P. Baumgartner, R. Heule, M. Peter. Web-Based Laboratory Training on Electrical Measurement Systems, *Proc. of XVII IMEKO World Congress 2003*, Dubrovnik, 2003.

Сведения об авторах.



Бушер Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры Электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета.

E-mail:

victor.v.bousher@gmail.com



Глазева Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры судовой электромеханики и электротехники Одесского национального университета «Национальная морская академия».

E-mail:

o.glazeva@gmail.com

Distributed Knowledge Base System

Kulykovska N. A., Timenko A. V., Ilyashenko M. B., Kirichek G. G.

Zaporizhzhya National Technical University.

Zaporizhzhya, Ukraine

Abstract. One of the main problems of any distributed system is the analysis of the properties of the obtained data and their further use for logical reasoning. To achieve this goal and accelerate the processing time is necessary in the first phase of the system for the development of the intellectualization control data. The creation of efficient and adaptive distribution can significantly speed up the processing velocity. Thus, the relevant direction of the research is distributed knowledge based systems. The goal of the work was the models of the distributed knowledge based systems and methods for structuring the system. The novelty of the work consisted in the identification of the main artifacts of a distributed knowledge based system. The formal model of the system consisted of a set of ontologies; lots of services; a set of events that describe the processes of the system; semantic service; a set of composite services and knowledge base. In the system under study, the semantic web technologies were used to examine the data, their processing and inference. The completeness and effectiveness of the system was determined by a multitude of ontologies. The main difference in the distributed knowledge based systems was the use of the service approach and ontologies in knowledge engineering. In this case, three methods for structuring the system have been proposed. The time spent for publishing the service in each method is different, but the complexity of the provider is also different.

Keywords: distributed system, knowledge engineering, data, ontology, service, semantic service.

DOI: 10.5281/zenodo.3244818

Sistemul distribuit, bazat pe cunoștințe

Culicovscaia N. A., Timenco A. V., Ilișenco M. B., Chricec G. G.

Universitatea Națională tehnică din Zaporijie

Zaporijie, Ucraina

Rezumat. Una dintre sarcinile principale ale sistemului distribuit este analiza datelor obținute și utilizarea ulterioară a acestora pentru raționamentul logic. Aceasta este o sarcină dificilă datorită dinamicii frecvente și eterogenității informațiilor. Scopul lucrării este de a prezenta un sistem distribuit bazat pe cunoștințele. Principala diferență a sistemelor distribuite bazate pe cunoștințele este utilizarea unei abordări de servicii și a unei inginerii de cunoștințe. În acest sistem, studiul datelor, prelucrarea acestora și inferențele logice au loc prin utilizarea tehnologiilor web semantice. Scopul a fost realizat prin dezvoltarea unui model structural și formal al sistemului, precum și a metodelor de structurare a obiectelor sistemului. Universalitatea modelului conceptual constă în prezentarea acestuia sub forma unei diagrame de clasă UML, care va face posibilă implementarea componentelor sistemului ținând cont de orice cerințe ale sferei IT și ale proceselor de afaceri. Modelul oficial reflectă funcțiile dinamice ale sistemului pentru organizarea fluxului de informații între obiecte. Noutatea științifică a rezultatelor obținute constă în identificarea principalelor artefacte ale unui sistem distribuit bazat pe cunoaștere, și anume setul de servicii, setul de ontologii, serviciul semantic, setul de evenimente care descriu procesele sistemului și baza de cunoștințe. Completitudinea și eficacitatea sistemului este determinată de setul de ontologii și constă în trei tipuri: ontologia aplicației, ontologia domeniului și ontologia sarcinilor. Utilizarea ontologiilor este motivată de faptul că acestea conțin informații structurate despre caracteristicile funcționale și non-funcționale ale serviciului și a zonei subiectului, oferind flexibilitate descrierii datelor. Prin implementarea ontologiilor, se face o tranziție în procesarea inteligentă a datelor.

Cuvinte-cheie: sistemul distribuit, componentele sistemului distribuit, ingineria cunoștințelor, date, ontologie, service, web semantic, modelul sistemului.

Распределенная система, основанная на знаниях

Куликовская Н. А., Тименко А. В., Ильяшенко М. Б., Киричек Г. Г.

Запорожский Национальный Технический Университет

Запорожье, Украина

Аннотация. Одной из основных задач распределенной системы является анализ полученных данных, и дальнейшее их использование для логических рассуждений. Это является сложной задачей из-за часто встречающейся динамики и разнородности информации. Целью работы является представление распределенной системы, основанной на знаниях. Главным отличием, распределенных систем, основанных на знаниях, является использование сервисного подхода и инженерии знаний. В

рассматриваемой системе изучение данных, их обработка и логический вывод происходит путем использования технологий семантического веба. Поставленная цель достигнута за счет разработки структурной и формальной модели системы, а также методов структуризации объектов системы. Универсальность концептуальной модели заключается в представлении ее в виде диаграммы классов UML, что позволит реализовывать компоненты системы с учетом любых требований ИТ-сферы и бизнес-процессов. Формальная модель отражает динамические функции системы для организации потоков информации между объектами. Научная новизна полученных результатов заключается в определении основных артефактов распределенной системы, основанной на знаниях, а именно, множества сервисов, множества онтологий, семантического сервиса, множества событий, которые описывают процессы системы, и база знаний. Полнота и эффективность системы определяется множеством онтологий и состоит из трех видов: онтология приложения, доменная онтология и онтология задач. Использование онтологий аргументировано тем, что они содержат в себе структурированную информацию о функциональных и нефункциональных характеристиках сервиса и предметной области, придают гибкость описанию данных. Путем внедрения онтологий осуществляется переход в интеллектуальной обработке данных. Впервые предложены методы структуризации распределенной системы, основанной на знаниях, в зависимости от возможностей и ресурсов разработчика сервиса. Создание онтологий довольно трудоемкий и специфический процесс, поэтому в большинстве случаев отказываются от семантических описаний. С другой стороны, попытки внедрить онтологии оказываются тщетными, потому что многие системы не имеют возможности работать с таковыми. Разработанные методы позволяют организовать такую систему, которая может создавать онтологии сервисов и аккумулировать их извне.

Ключевые слова: распределенная система, компоненты распределенной системы, инженерия знаний, данные, онтология, сервис, семантический веб, модель системы.

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе существует необходимость в повышении качества и скорости обработки данных в распределенных системах (РС) [1, 2]. В связи с этим возрастает значение распределенных систем, ориентированных на эффективное управление данными [3, 4], как средства решения этой проблемы. Это является сложной задачей из-за динамики и разнородности информации, что накладывает очень частые изменения в локальные значения, которые влияют на общие глобальные свойства всей системы. Создание интеллектуальных и адаптивных РС позволяет значительно ускорить скорость обработки данных.

Тем не менее, РС в условиях развития современных технологий ставят акцент на свойствах интероперабельности и масштабируемости. Такое направление связано со стремительным ростом технологии блокчейн и интернета вещей (IoT). Как прогнозируют аналитики, к 2025 году на долю блокчейн-приложений будет приходиться 10% мирового валового внутреннего продукта [5]. К 2020 году будет создано более 30 миллиардов устройств IoT [6]. Такие технологии меняют представления данных, модернизируют способы и формы коммуникации, производства и потребления информации [7]. Основные изменения заключаются в доминировании горизонтальных связей, структурообразующей роли информации, децентрализации всех ви-

дов данных, доступных в любое время на каждом устройстве. Пользователь не должен заботиться о конкретных технологиях, используемых для предоставления мощности вычислений или хранения данных, поэтому можно говорить о том, что пользователь работает с некоторой информацией об удаленном ресурсе.

Таким образом, актуальным направлением исследований является модели и методы распределенных систем, основанных на знаниях (PCOЗ).

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В PCOЗ с целью изучения данных, их обработки и использования внедряются технологии семантического веба. Семантический веб не заменяет возможности РС, а дополняет их: в то время, как задачей большинства современных веб-сервисов является обеспечение связи между приложениями. Семантический веб решает более сложную проблему – повышает релевантность поиска информации в глобальной сети [8, 9]. Для решения этой задачи необходимо построить сеть, состоящую не из разнородных, несовместимых между собой документов, а из семантически структурированных объектов, с описанием связей и взаимоотношений между ними.

Другой аспект семантической сети предполагает такие методы понимания веб-контента, как поведение человека [10]. Это связано с машинным обучением и искус-

ственным интеллектом. Семантическая сеть в основном пытается научить компьютер понимать и обрабатывать данные.

В семантической сети представление знаний – это систематизированная методика описания на машинном уровне того, что знает человек-эксперт, специализирующийся в предметной конкретной области [11].

Существует много способов описания знаний. Например, знание может быть выражено в исходном коде программы или неявно в весовых коэффициентах нейронной сети. Но исследования в области представления знаний направлены на разработку явных и декларативных моделей представления [12]. Ясность представления означает, что знание должно содержаться в базе знаний в явном и недвусмысленном виде. Декларативность означает, что смысл описанных знаний можно установить без необходимости рассматривать, как оно применяется при логическом выводе.

Существует определение системы, основанной на знаниях – это программа для компьютера, которая оперирует со знаниями в определенной предметной области с целью выработки рекомендаций или решения проблем [13].

Такие системы могут служить полной заменой человека-эксперта в данной предметной области или же быть интеллектуальным помощником человека, принимающего решения. Рассматриваемые системы предназначены для решения так называемых трудно формализуемых задач [14], т.е. таких задач, которые обладают одной или несколькими из перечисленных характеристик:

- не существует алгоритмического решения задач;
- задачи не могут быть заданы в числовой форме;
- цели не могут быть заданы в терминах точно определенной числовой функции.

Особенностями систем, основанных на знаниях, отличающими их от систем с алгоритмическим подходом, являются [13]:

- моделирование не столько природы определенной предметной области, сколько механизма мышления эксперта при решении задач данной предметной области;
- формирование выводов, основываясь на тех знаниях, которыми располагает система;

- знания в системах представлены на некотором специальном языке и содержатся в базе знаний системы.

Системы, основанные на знаниях, применяются для решения задач интерпретации, прогноза, диагностики, проектирования, планирования, мониторинга, наладочных работ, оказания помощи при ремонте, обучения и контроля в разнообразных проблемных областях [14, 15, 16, 17].

Из известных работ по применению систем, основанных на знаниях, для анализа и повышения производительности компьютерных систем, можно отметить следующие:

- в [18] приведен общий обзор и сравнение подходов, применяемых в экспертных системах для анализа производительности компьютерных программ;
- в [19] описано использование производственных правил для выявления причин недостаточной производительности распределенных веб-приложений и выдаче рекомендаций по улучшению программы;
- в [20] предложено использование системы, основанной на знаниях, для проектирования программных систем реального времени;
- в [21, 22] рассмотрены средства семантического анализа кода, для интеллектуального рефакторинга в IDE IntelliJ IDEA;
- в [23, 24] рассмотрено применение семантических технологий в организации семантического GRID.

Целью работы является представление модели распределенной системы, основанной на знаниях. Главным отличием, распределенным систем, основанных на знаниях, является использование сервисного подхода и инженерии знаний. В данной статье мы рассмотрим методы РСОЗ, которые являются синтезом существующих технологий распределенных систем и семантических сетей.

Поставленная цель достигается путем формального описания модели системы, а также разработки методов структуризации системы. Научная новизна полученных результатов заключается в определении основных артефактов распределенной системы, основанной на знаниях, а именно, множества сервисов, множества онтологий, семантического сервиса, множества событий, которые описывают процессы системы, и база знаний. Полнота и эффективность системы определяется множеством онтологий и состоит из трех

видов: онтология приложения, доменная онтология и онтология задач. Использование онтологий аргументировано тем, что они содержат в себе структурированную информацию о функциональных и нефункциональных характеристиках сервиса и предметной области, придают гибкость описанию. Путем внедрения онтологий осуществляется переход в интеллектуальной обработке данных.

Впервые предложены три метода РСОЗ: нисходящий, восходящий и смешанный. В виду причин того, что РСОЗ зависит от операций между сервисом, семантическим сервисом и базой знаний, а это в свою очередь программные объекты, чтобы сравнить каждый метод мы примем каждую операцию за единичное действие, стремящееся к наименьшему времени выполнения. Следовательно, чтобы оценить затраченное время для каждого метода, достаточно посчитать количество выполненных операций для формирования РСОЗ.

Преимуществом нисходящего метода является большая вероятность точного и релевантного поиска, быстрого роста базы знаний т.к. онтологии генерируются одним объектом системы – семантическим сервисом. При автоматической генерации онтологий появляется возможность упростить процесс представления знаний РСОЗ.

Так же, при переходе существующей РС на РСОЗ все трудозатраты сводятся к разработке доменных онтологий, которые в дальнейшем используются как базис для знаний. Затраченное время на процесс регистрации сервиса занимает 8 итераций.

В восходящем методе сервис может развиваться независимо от других ресурсов или их онтологий, поэтому при таком построении архитектуры сравнительно легко вносить изменения в сервисы, добавлять новые и т.д. (улучшаются качественные характеристики архитектуры: расширяемость, масштабируемость, способность к эволюционным изменениям).

Однако процессы добавления и выделения доменных онтологий являются очень затруднительными. При данном построении затраченное время будет состоять из 9 итераций.

При смешанном методе регистрация нового узла выполняется в 15 итераций. Но при таком увеличении затраченного времени, он наследует все преимущества двух описанных ранее методов. Семантический сервис выполняет функции валидации и верификации

онтологий, при этом база знаний аккумулирует данные извне.

Результаты статьи имеют научную и практическую ценность в области РС. Предложенные концептуальная и формальная модели РСОЗ описывают структурную организацию системы и однозначно определяют ее основные компоненты. Универсальность концептуальной модели заключается в представлении ее в виде диаграммы классов UML, что позволит реализовывать компоненты системы с учетом любых требований ИТ-сферы и бизнес-процессов. Формальная модель отражает динамические функции системы для организации потоков информации между объектами. Приведены временные UML диаграммы структуризации и представления знаний об объектах системы, которые формализуют каждый этап работы РСОЗ при различных условиях создания онтологий сервисов.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

РС состоит из информационной и аппаратной части. Информационная составляющая определяет интероперабельность компонент системы (сервисы, сетевые протоколы, реестры и т.д.), а аппаратная часть возможность распределенной обработки данных (компьютерные сети, хранилища, компьютерные ресурсы и т.п.).

В виду разнородности информации и множественности технологий разработки РС, представим каждый объект взаимодействия внутри системы как законченный программно-технический компонент, который характеризуется некоторым набором требований и характеристик для выполнения определенной задачи, а именно как сервис. Сервис, зарегистрированный в системе, получает запрос на предоставление определенных услуг и возвращает результат. Существует множество технологий, обеспечивающих создание и сопровождение сервисов в распределенных вычислительных системах: технология XML веб-сервисов, сервисы REST и др., но в большинстве из них в основе лежит сервис-ориентированная архитектура (COA) (рисунок 1). [25, 26].

COA обеспечивает масштабируемость и гибкость растущих систем и является промежуточным слоем между бизнесом и информационными технологиями. COA обеспечивает работу в распределенной гетерогенной среде, что является показателем универсальности и совместимости с другими системами.

Описанию моделей и методов СОА уделено большое количество работ. Основными разработчиками стандартов в данном направлении являются такие корпорации как IBM, OASIS, OMG, The OpenGroup, также в интеграции СОА с существующими системами посвящены работы таких зарубежных авторов, как N.Josuttis, M. Juric, S. Carter.

В то же время, при всех преимуществах СОА, остается нерешенным вопрос формализации и автоматизации управления информацией для эффективной передачи данных

между сервисами и отделение функциональности сервисов от используемых данных. Так- же СОА имеет ограничения, обусловленные семантической бедностью используемой модели данных XML, среди которых: сложная и дорогостоящая поддержка для масштабных систем с разнородными данными; достаточно хрупкие правила трансформации данных, ограничивающие динамику системы; отсутствие решения проблем качества данных, дублирования данных.

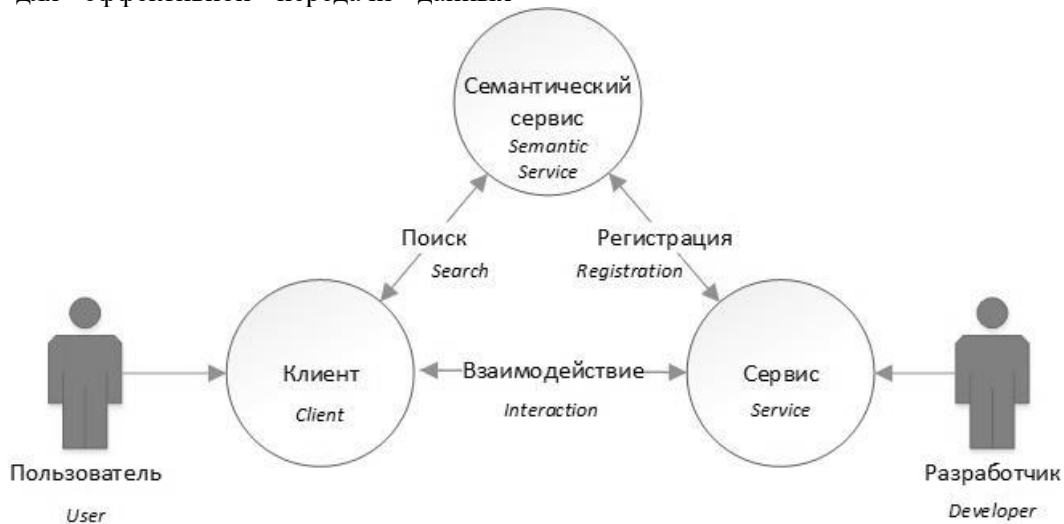


Рис. 1. Сервис-ориентированная архитектура.¹

В свою очередь, структура системы, основанной на знаниях, приведена на рис. 2. Основными ее компонентами являются [15, 27, 28, 29, 30]:

- база знаний. База знаний предназначена для хранения знаний о предметной области. Ее конкретный вид сильно зависит от выбранной модели представления знаний. Наличие этого компонента является главным отличием систем, основанных на знаниях, от других типов программ;
- машина вывода. Машина вывода формирует ответ на запрос пользователя с помощью базы знаний. Принцип ее работы также очень сильно зависит от выбранной модели представления знаний.
- редактор базы знаний – программа для изменения содержимого базы знаний;
- интерфейс пользователя – механизм, с помощью которого происходит общение пользователя и системы.

В отличие от РС, где для разработки и функционирования системы достаточно участия эксперта в предметной области и про-

граммиста, в разработке систем, основанных на знаниях, участвуют:

- эксперт в предметной области, задачи которой будет решать создаваемая система;
- инженер по знаниям – специалист по разработке систем, основанных на знаниях. Он помогает эксперту выявить и структурировать знания, необходимые для работы создаваемой системы, а также выбирает модель представления знаний и инструментальные средства;
- программист. Задачей программиста является разработка инструментальных средств.

PCOЗ стремится к организации системы с наименьшим участием человека в ее функционировании.

Такое направление предполагает полностью представить данные системы и всех ее компонентов в виде базы знаний. Объединяя ключевые элементы РС с системами, основанными на знаниях, можно получить модель PCOЗ.

-

¹ Appendix 1

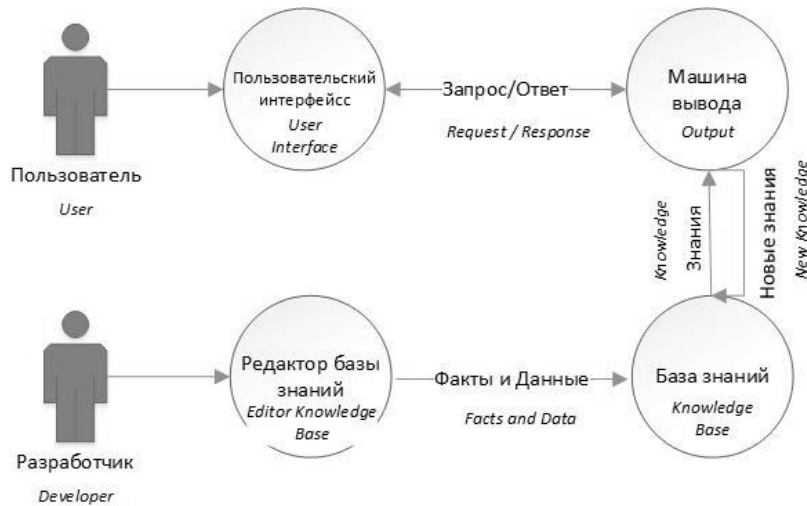


Рис. 2. Структура системы, основанной на знаниях. ²

На рисунке 3 приведена структурная модель PCOЗ. Выделим основные артефакты PCOЗ как сервис, система, событие, разработчик, семантический сервис. Из диаграммы видно, что класс сервис состоит из двух элементов: описание сервиса и онтология приложения. Представление данных в виде знаний отражено через такие элементы: доменная онтология, онтология приложения, онтология задачи и база знаний.

II. ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ PCOЗ

Структурная модель PCOЗ (англ. Distributed Knowledge Based System – DKBS) позволяет описать формальную модель системы, построенной на данной архитектуре:

$$DKBS = \langle O, S, E, SS, Syst \rangle, \quad (1)$$

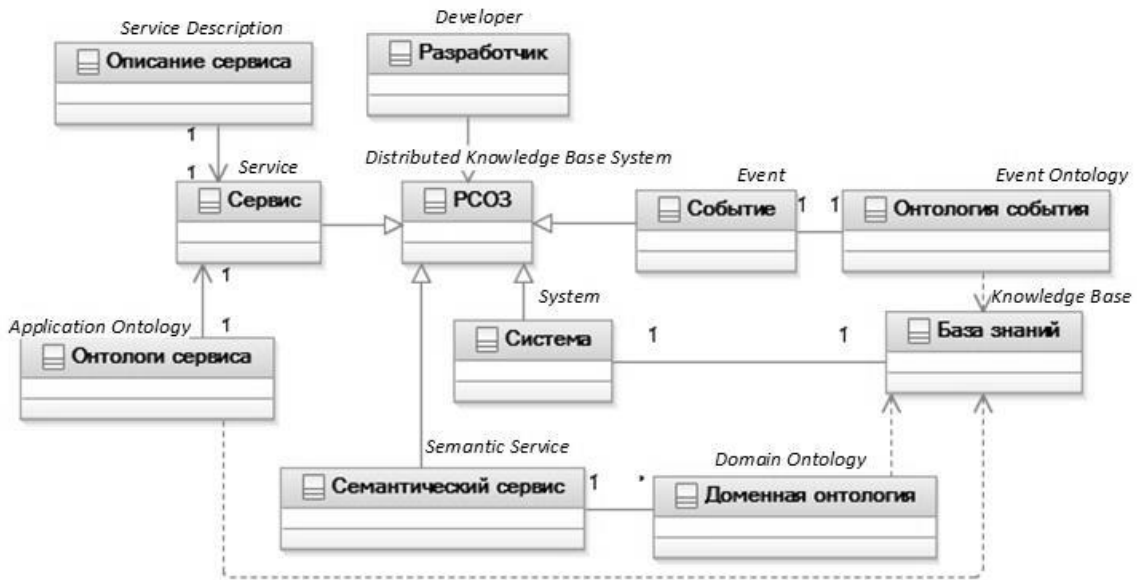


Рис. 3. Распределенная система, основанная на знаниях. ³

где O - множество онтологий;
 S - множество сервисов;
 E - множество событий, которые описывают процессы системы;
 SS -- семантический сервис;

$Syst$ - система из композитных сервисов и базы знаний.

Полнота и эффективность PCOЗ зависит от множества онтологий, которые обеспечивают ее семантический принцип:

$$O = \{O_{Task}, O_{Application}, O_{Domain}\}, \quad (2)$$

где O_{Task} – онтология событий PCOЗ;

$O_{Application}$ – онтология сервисов;

O_{Domain} – онтология предметной области применения PCOЗ.

Рассматривая все виды онтологий [31, 32, 33, 34], мы остановили свой выбор именно на трех, потому что онтология сервиса является моделью сервиса и описывает его функциональные и нефункциональные характеристики. Доменная онтология является неким базовым набором знаний для каждой предметной области. Онтология задачи хранит в себе информацию о всех функциях и действиях системы.

Каждая онтология имеет свои выразительные возможности в зависимости от функционального назначения [35, 36, 37]. Доменные онтологии описывают словарь терминов конкретной предметной области и формально задаются четырьмя конечными подмножествами: понятий (концептов), связей, аксиом и функций интерпретации. В доменных онтологиях отражаются данные конкретной PCOЗ. Онтология задачи состоит из словаря терминов, специализируют задачи и действия в PCOЗ. Всякая задача имеет различные состояния и этапы ее выполнения. Главным отличительным признаком для всех понятий онтологии задачи является время. Онтологии сервиса наиболее специфические онтологии, кроме всех основных понятий, содержит специализированные термины и экземпляры сервисов системы. Семантический сервис включает в себя доменные онтологии и набор модулей работы с сервисами и их онтологическим описанием. Множество событий мы сформировали как набор утверждений, которые могут быть применены к PCOЗ и набор аксиом их появления.

В PCOЗ режим решения задачи приобретает другой характер. В системе функционируют сервисы. Их роль - выполнять некие задачи и возвращать результат. PCOЗ стремится к автономной работе без участия пользователя. Особенностью PCOЗ является возможность сгенерировать и объяснить, как был получен результат, ссылаясь на использованные для его получения знания. Для реализации такой возможности используется подсистема формирования пояснений, кото-

рая используется как пользователем системы, так и сервисами.

III. МЕТОДЫ PCOЗ

Под процессом инженерии знаний PCOЗ понимается процесс конструирования базы знаний, который состоит из следующих этапов:

1. Идентификация и сохранение онтологий объектов системы.
2. Валидация и верификация онтологий.
3. Объединения онтологий и вывод логических рассуждений.
4. Сохранение и поиск онтологий.

Использование онтологий как отличительных структурных элементов PCOЗ определяет критерии построения архитектурной модели. Первый критерий – это использованием единой базы знаний, созданной из онтологий. При этом она может предоставлять доменные онтологии для определенных задач, аккумулировать знания и делать логические выводы.

Второй критерий - это множество онтологий сервиса. Каждый информационный ресурс описывается своей собственной онтологией. Сервис может публиковаться с уже разработанной онтологией либо с онтологией, созданной средствами системы.

Учитывая этапы процесса инженерии знаний и критерии построения системы, рассмотрим методы структурирования PCOЗ.

1. Нисходящий метод. Данный метод лучше применять при переходе от существующей PC к PCOЗ, когда уже реализовано определенное количество работающих сервисов. Он основан на использовании единых доменных онтологий. Каждый сервис системы должен быть описан в соответствии с доменной онтологией, которая связана с семантическим сервисом. Доменных онтологий может быть несколько для отдельных структур системы.

Начальными условиями такого метода являются наличие множества сервисов, семантического сервиса, множества доменных онтологий и системы (3).

Дальнейшее взаимодействие компонент системы, происходит следующим образом: генерируется онтология приложения регистрируемого сервиса с помощью семантического сервиса и соответствующей доменной онтологии. Аксиомы и функции получения знаний данной предметной области уже заданы в семантическом сервисе (4).

$$\langle S, SS, O_{Domain} \rangle, \quad (3)$$

$$S + SS + O_{Domain} \xrightarrow{f_{SS}(S)} O_{Application} \quad (4)$$

На рисунке 4 приведена диаграмма последовательности действий данного метода. Разработчик обращается к системе для регистрации своего сервиса. Система, не находя онтологии приложения, обращается к семантическому сервису для создания таковой. Семантический сервис, имея доменную онтологию, созданную экспертом, генерирует онтологию

приложения, прикрепляет ее к сервису, который теперь регистрируется в системе.

2. Восходящий метод. При первичной разработке PCOЗ целесообразней уделить внимание созданию онтологий сервисов отдельно от всей системы. Каждый сервис описывается своей собственной онтологией, которую реализует разработчик (рисунок 5). Данный метод можно описать следующим образом, где начальными условиями являются наличие множества сервисов, семантического сервиса, множества онтологий сервисов и системы.

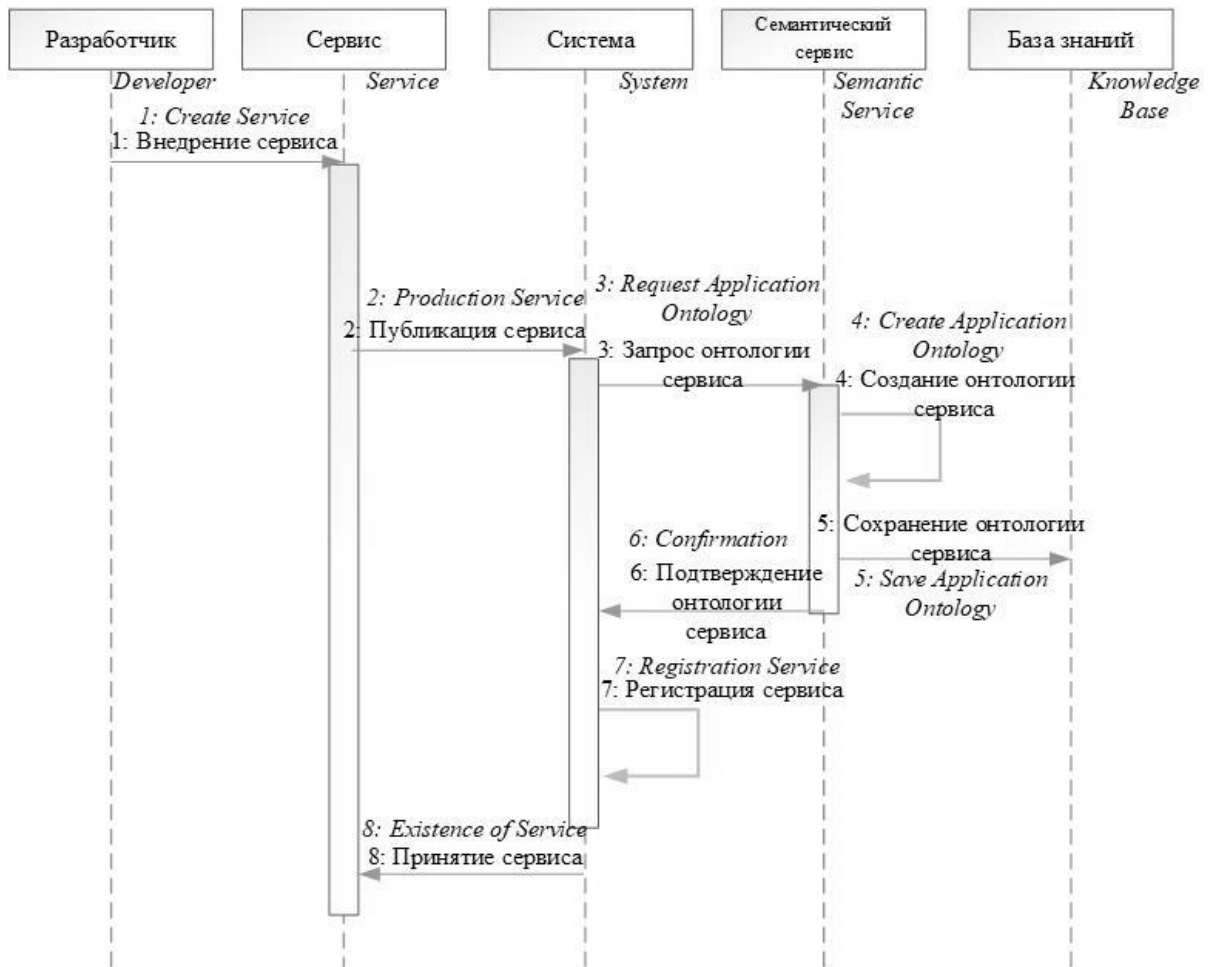


Рис. 4. Нисходящий метод PCOЗ. ⁴

⁴ Appendix 1

В восходящем методе сервис может развиваться независимо от других ресурсов или их онтологий, поэтому при таком построении архитектуры сравнительно легко вносить изменения в сервисы, добавлять новые и т.д.

(улучшаются качественные характеристики архитектуры: расширяемость, масштабируемость, способность к эволюционным изменениям). Однако процессы добавления и выделения доменных онтологий являются очень затруднительными.

$$\langle S, SS, O_{Application} \rangle, \quad (5)$$

$$SS + O_{Application} \xrightarrow{f_{SS}(O_{Application})} true / false. \quad (6)$$

$$SS + O_{Application} \xrightarrow{f_{SS}(O_{Application})} O_{Domain}. \quad (7)$$

В данном методе работа эксперта и инженера по знаниям заключается в наполнении семантического сервиса функциями верификации онтологий. База знаний формируется из полученных онтологий.

3. Смешанный метод – онтология сервиса не генерируется средствами семантического сервиса на основе доменной онтологии, которую получает разработчик (рисунок 6).

$$\langle S, SS, O_{Domain} \rangle, \quad (8)$$

$$S + O_{Domain} \xrightarrow{f_{provider}} O_{Application}, \quad (9)$$

$$SS + O_{Application} \xrightarrow{f_{SS}(O_{Application})} true / false. \quad (10)$$

В данном методе необходимо использование знаний эксперта для формирования доменной онтологии. В таком случае, начальный этап будет самый затратный, но дальнейшая разработка онтологий сервисов будет упрощена.

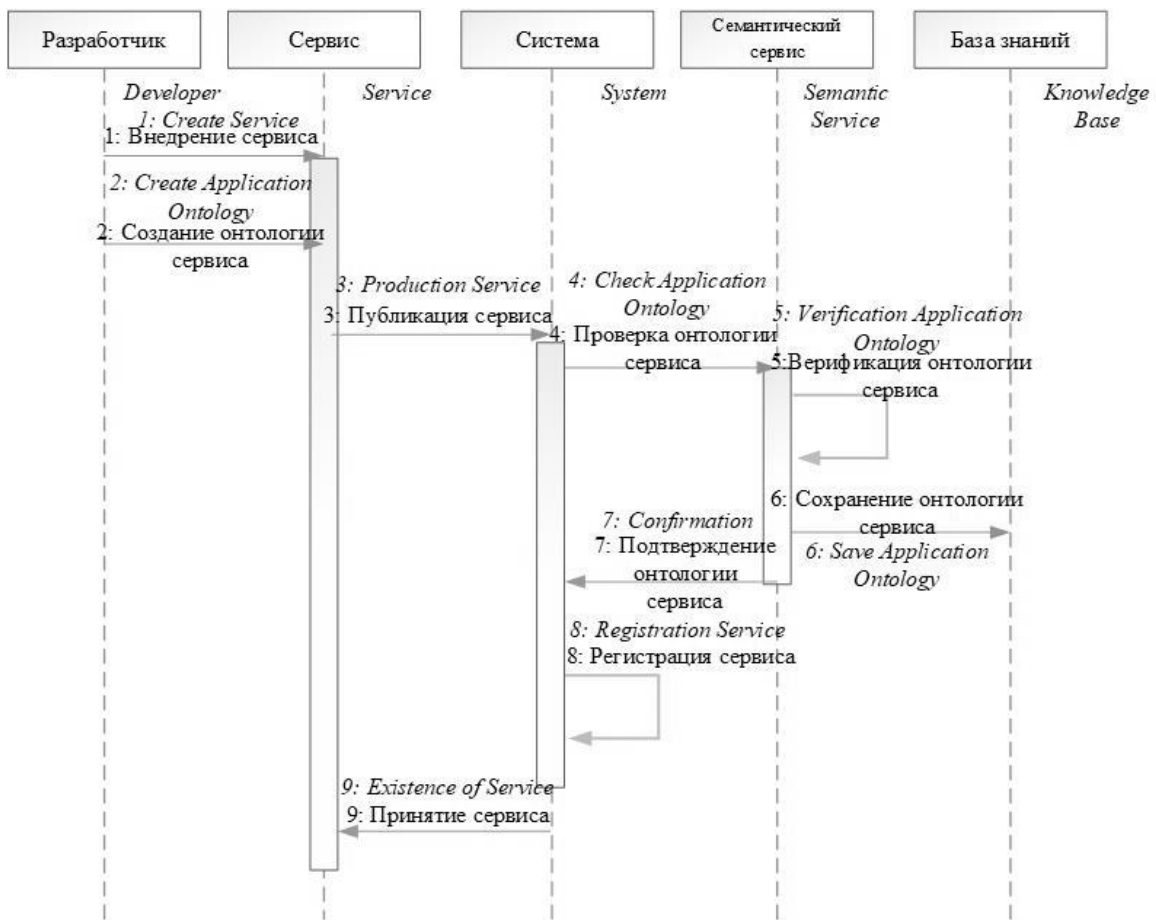


Рис. 5. Восходящий метод PCOЗ. ⁵

В каждом методе используется семантический сервис. Функции семантического сервиса заключаются в работе с онтологиями. Каждая функция характеризуется входными (11) и выходными аргументами (12). Соответственно, каждое действие семантического сервиса (13) характеризуется функцией работы с онтологией, значения ее аргумента при

вызове и результатом завершения для системы.

$$f_{SS} \rightarrow FA_k^{IN} = (fa_1^{IN}, \dots, fa_k^{IN}); k = 1, \dots, K. \quad (11)$$

$$f_{SS} \rightarrow FA_n^{OUT} = (fa_1^{OUT}, \dots, fa_K^{OUT}); k = 1, \dots, K. \quad (12)$$

$$a_{ij} = \{f_k, FAval_i^{IN}, FAval_j^{OUT}\}; \quad (13)$$

$$i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, K; f_k \in F.$$

⁵ Appendix 1

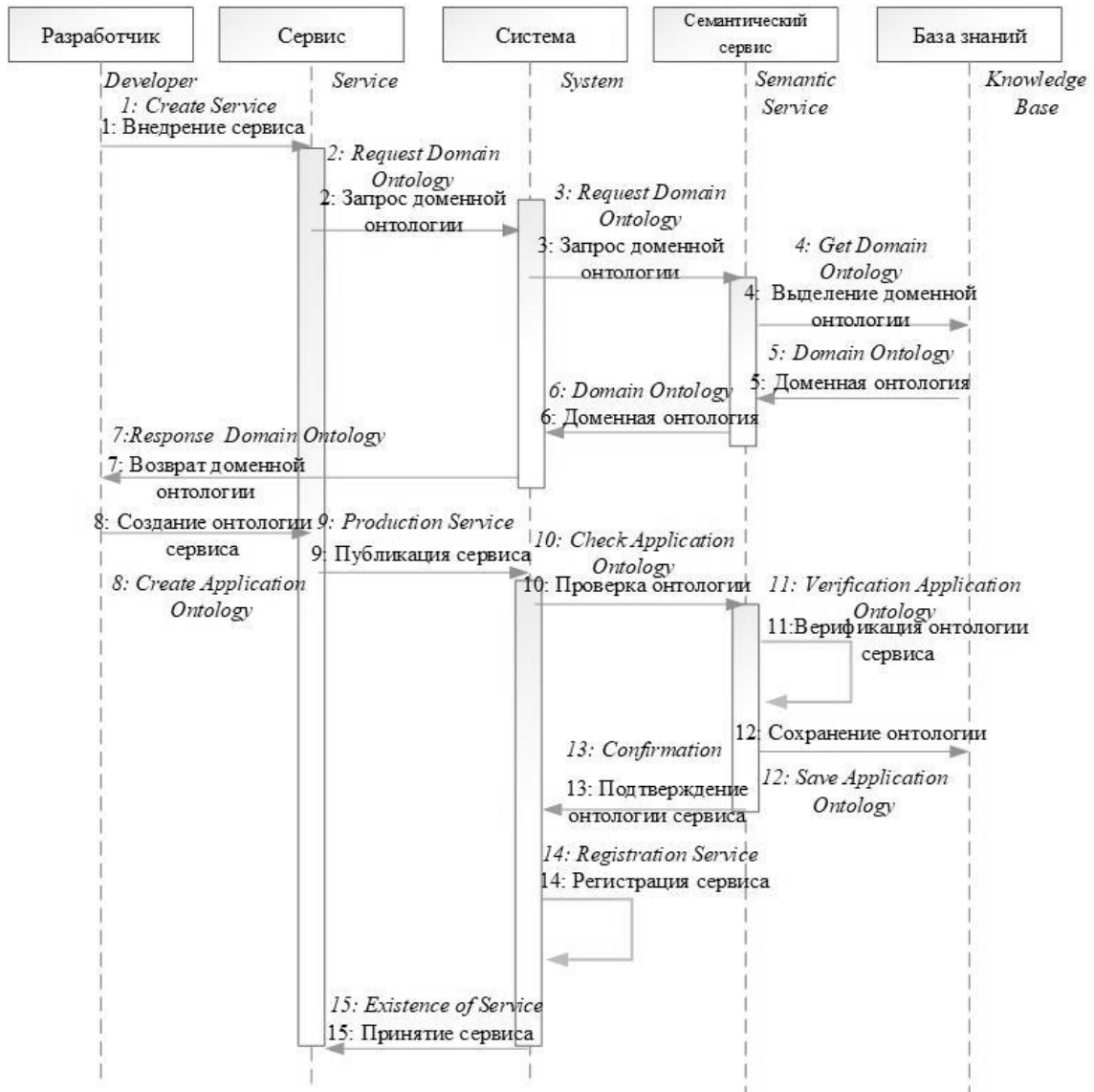


Рис. 6. Смешанный метод РСОЗ.⁶

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В РСОЗ функционируют сервисы. Их роль - выполнять некие задачи и возвращать результат. РСОЗ стремится к автономной работе без участия пользователя. Особенностью РСОЗ является возможность сгенерировать и объяснить, как был получен результат, ссылаясь на использованные для его получения знания. Для реализации такой возможности реализован семантический сервис, который используется как пользователем системы, так и сервисами. Таким образом, главным отличием РСОЗ от распределенных систем и систем, основанных на знаниях является ис-

пользование сервисного подхода и онтологий в инженерии знаний.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Service-oriented architecture.

²Fig. 2. Structure of systems based on knowledge.

³Fig. 3. The diagram of distributed knowledge based system.

⁴Fig. 4. Top-down method distributed knowledge based system.

⁵Fig. 5. Bottom-up method distributed knowledge based system.

⁶Fig. 6. Mixed method distributed knowledge based system.

⁶ Appendix 1

References

- [1] Burns B. *Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms for Scalable, Reliable Services*. O'Reilly Media, Inc, 2018. 166 p.
- [2] Tsvetkov V.Ya. *Bazy dannykh. Ekspluatatsiya informatsionnykh sistem s raspredelennymi bazami dannykh*. [Database. Operation of information systems with distributed databases]. Moskva, 2009. 88 p. (In Russian).
- [3] Wolfgang Dvořák, Sarah Alice Gaggl. Stage semantics and the SCC-recursive schema for argumentation semantics *Journal of Logic and Computation*, 2016, vol. 26(4), pp.1149-1202.
- [4] Shokin YU.I., Zhizhimov O.L., Pestunov I.A., Sinyavskiy YU.N., Smirnov V.V. Raspredelennaya informatsionno-analiticheskaya sistema dlya poiska, obrabotki i analiza prostranstvennykh dannykh [Distributed information and analytical system for searching, processing and analyzing spatial data]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2007, vol. 12, no. 3, pp. 108-115. (In Russian).
- [5] *WEB 3.0 budet pitat'sya stekom tekhnologii blokcheyn* [WEB 3.0 will be powered by blockchain technology stack]. Available at: <https://101blockchains.com/ru/web-3-0-%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D1%87%D0%B5%D0%B9%D0%BD/> (accessed 01.03.2019)
- [6] *Deloitte projects by 2025 that 10% of global GDP to be built on blockchain applications*. Available at: <https://www.freightwaves.com/news/2017/9/2/deloitte> (accessed 02.09.2017)
- [7] Allemang D, Hendler J. *Semantic web for the working ontologist modeling in RDF, RDFS and OWL*. Elsevier Inc., 2008. 330 p.
- [8] Yelena G.U. Tekhnologii opisaniya semanticheskikh veb-servisov [Technologies for describing semantic web services]. *Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire*. Novosibirsk, 2016, no. 9 (44), pp. 29-34. (In Russian).
- [9] Kulikovskaya N.A. Semanticheskoye opisaniye veb-servisa [Semantic description of web service]. *Nauchnyye trudy Donetskogo natsional'nogo universiteta: vseukrainskiy nauchnyy zbornik. Seriya: Informatika, kibernetika, i vychislitel'naya tekhnika*. Donetsk, 2015, no. 2(21), pp.100-105. (In Russian).
- [10] Srimathi H. Knowledge Representation of LMS using Ontology. *International Journal of Computer Applications*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 35 – 38.
- [11] Wu Z., Palmer M. Verb semantics and lexical selection. *Proceedings of the 32nd Annual meeting of the Associations for Computational Linguistics*. New Mexico, 1994, pp. 133-138.
- [12] Resnik P. Semantic similarity in a taxonomy: An information based measure and its application to problems of ambiguity in natural language. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1999, vol. 11, pp. 95- 130.
- [13] Dzhekson P. *Vvedeniye v ekspertnyye sistemy: per. s angl. V. T. Tertysnogo* [Introduction to expert systems]. Moskva, Vil'yams, 2001. 624 p. (In Russian).
- [14] Negnevitsky M. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Pearson Education Limited, 2011. 504 p.
- [15] Dzharratano Dzh. *Ekspertnyye sistemy: printsipy razrabotki i programmirovaniye: per. s angl. K. A. Ptitsyna. – 4-ye izd.* [Expert systems: principles of development and programming]. Moskva, Vil'yams, 2007. 1152 p. (In Russian).
- [16] Brogi A., Corfini S. SAM: A Semantic Web Service Discovery System. *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, 2008, vol. 4694, pp. 703-710.
- [17] Czajkowski K., Ferguson D., Foster I., Frey J., Graham St., Maguire T., Snelling D., Tuecke St. *From Open Grid Services Infrastructure to WS-Resource Framework: Refactoring & Evolution. Version 1.1. 2004*. Available at: http://toolkit.globus.org/wsrfl/specs/ogsi_to_wsrfl_1.0.pdf (accessed 02.02.2019).
- [18] Velez R., Zhang D., Kho J. An intelligent tool for UNIX performance tuning. *Fifth International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Boston, 1993, pp. 118-122.
- [19] Wolf F., Mohr B. EARL – A Programmable and Extensible Toolkit for Analyzing Event Traces of Message Passing Programs. *Proceedings of the 7th International Conference on High-Performance Computing and Networking*, 2010, pp. 503-512.
- [20] Wolf F., Wylie B. J. N., Abraham E. Usage of the SCALASCA toolset for scalable performance analysis of large-scale parallel applications. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel Tools for High Performance Computing*. Stuttgart, 2008, pp. 157-167.
- [21] *Obzor sredstv avtomatizirovannogo refaktoringa v Java IDE* [An overview of automated refactoring in Java IDE]. Available at: http://www.javaportal.ru/java/ide/review_refactoring.html (accessed 01.03.2019)
- [22] Veronika Thost. *Using Ontology-Based Data Access to Enable Context Recognition in the Presence of Incomplete Information (Extended Abstract)* KI, 2017, vol. 31(4), pp. 377—380.
- [23] Zhaohui Wu, Huajun Chen. *Semantic Grid: Model, Methodology, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2008. 230 p.
- [24] Foster I., Kesselman C., Nick J. M., Tuecke St. Grid Services for Distributed System Integration. *Computer*, 2002, vol. 35, issue 6, pp. 37-46.

- [25] *The Open Group COA Reference Architecture*. Available at: <http://www.opengroup.org/soa/source-book/soa/index.htm> (accessed 01.03.2019)
- [26] *The Fast Guide to Model Driven Architecture. The Basics of Model Driven Architecture*. Available at: www.omg.org/docs/omg/03-06-01.pdf (accessed 01.03.2019)
- [27] Smolin D. V. *Vvedeniye v iskusstvennyy intellekt: konspekt lektsiy* [Introduction to Artificial Intelligence]. Moskva, 2004. 208 p. (In Russian).
- [28] Behnam Azvine, Nader Azarmi, Detlef D. Nauck. *Intelligent Systems and Soft Computing: Prospects, Tools and Applications*. Springer, 2006, 358 p.
- [29] Gandon F. *Ontology engineering: A Survey and a Return of experience*. INSTITUT DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET AUTOMATIQUE, March 2002, 181 p.
- [30] Noy N., McGuinness D. L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, march 2001. 25 p.
- [31] Gruber Thomas R. A translation approach to portable ontology specifications. *Appeared in Knowledge Acquisition*, 1993, vol. 5(2), pp. 199-220.
- [32] Yu Liyang. *Introduction to Semantic Web and Semantic Web services*, CRC Press, 2007, 368 p.
- [33] John Davies, Rudi Studer, Paul Warren. *Semantic Web technologies: trends and research in ontology-based systems*. John Wiley & Sons, 2006, 327 p.
- [34] Dean Allemang, James Hendler. *Semantic Web for the Working Ontologist: Effective Modeling in RDFS and OWL*. Elsevier, 2011, 384 p.
- [35] Leuf, Bo. *The Semantic Web: crafting infrastructure for agency*. John Wiley & Sons, 2006, 380 p.
- [36] Dieter Fensel, Holger Lausen, Axel Polleres, Jos de Bruijn, Michael Stollberg, Dumitru Roman, John Domingue. *Enabling semantic web services. The Web Service Modeling Ontology*. Springer Science & Business Media, 2007, 188 p.
- [37] *Semantic Web services architecture (SWSA)*. Available at: <http://www.daml.org/services/swsa/note/> (accessed 01.03.2019)

Сведения об авторах.



Куликовская Наталья А.
 Ассистент кафедры
 Компьютерных систем и
 сетей, Запорожского
 национального
 технического университета.
 Научные интересы:
 распределенные системы,
 семантический веб.
 E-mail:
natalya.gontar@gmail.com



Ильяшенко Матвей Б.
 к.т.н., доцент кафедры
 Компьютерных систем и
 сетей, Запорожского
 национального технического
 университета.
 Научные интересы: графы,
 машинное обучение,
 большие данные.
 E-mail:
matviy.ilyashenko@gmail.com



Тименко Артур В.
 Ассистент кафедры
 Компьютерных систем и
 сетей, Запорожского
 национального
 технического университета.
 Научные интересы: IoT;
 компьютерные сети.
 E-mail:
timenko.artur@gmail.com



Киричек Галина Г.
 к.т.н., доцент кафедры
 Компьютерных систем и
 сетей, Запорожского
 национального технического
 университета.
 Научные интересы:
 компьютерные сети, веб-
 технологии.
 E-mail: kirgal08@gmail.com

Analysis and Evaluation of Competence of Information Sources in Problems of Intellectual Data Processing

Krisilov V. A., Komleva N. O.

Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine

Abstract. The issues of work related to solving problems of intellectual data processing is to increase the efficiency of qualimetry, classification, diagnostics, choice, decision making, forecasting, taxonomy, etc., using data mining algorithms and a statistical approach. The aim of the work is to formalize the description and analysis of the source data as a means of improving the quality of solving intellectual problems. Compared with the well-known works, in which the emphasis was placed on certain informational criteria, the approach proposed in the work allows to form a set of quantitative and qualitative criteria for the formalization of information sources. To achieve the goal, taking into account the knowledge of the structure and context of the problem, objective requirements imposed on the input information have been formulated. To ensure the specified quality of solving the problems of intellectual data processing, it is necessary that the input information be objective, reliable, relevant, complete, timely, understandable, etc., and have a certain degree of accuracy, which is possible only with competent experts. The paper considers the concept of single and group expertise. The dependence of the quality of the solution of the data processing problem on the requirements for the source data is considered by the example of the forecasting problem. The accuracy of forecasting the results of external independent estimation in the selected section on the degree of completeness of the initial data and the selected methods of data processing and analysis is analyzed.

Keywords: building models, intellectual tasks, competence, quality of the solution, the properties of the input data, forecasting.

DOI: 10.5281/zenodo.3239185

Analiza și evaluarea competenței surselor de informație în sarcinile procesării inteligente a datelor

Krisilov V.A., Komlevaya N.O.

Universitatea Politehnică Națională din Odessa, Odessa, Ucraina

Rezumat. Rezolvarea problemelor complexe sociale, tehnice, economice și științifice necesită utilizarea unor sisteme ierarhizate pe mai multe niveluri bazate pe prelucrarea inteligentă a datelor. Probleme legate de acest domeniu de cercetare sunt creșterea eficienței rezolvării problemelor de calimetrie, clasificare, diagnosticare, selecție, luare a deciziilor, prognoză, taxonomie etc., utilizând algoritmi de extragere a datelor și o abordare statistică. Scopul lucrării este de a formaliza descrierea și analiza datelor sursă ca mijloc de îmbunătățire a calității rezolvării problemelor intelectuale. În comparație cu lucrările bine-cunoscute, în care s-a pus accentul pe anumite criterii informaționale, abordarea propusă în lucrare permite formarea unui set de criterii cantitative și calitative pentru formalizarea surselor de informare. Pentru atingerea scopului, ținând seama de cunoașterea structurii și a contextului problemei, au fost formulate cerințe obiective impuse informațiilor de intrare, nerespectarea cărora limitează utilizarea rezultatelor rezolvării problemei. Pentru a asigura calitatea specificată de rezolvare a problemelor de prelucrare a datelor intelectuale, este necesar ca informațiile de intrare să fie obiective, fiabile, relevante, complete, la timp, ușor de înțeles etc. și să aibă, de asemenea, un anumit grad de exactitate, posibil numai cu experți competenți. Dependența calității soluției problemei de prelucrarea datelor de cerințele surselor de date sursă este luată în considerare prin exemplul problemei de prognoză. Se analizează precizia prognozării rezultatelor estimării externe independente în secțiunea selectată privind gradul de completare a datelor inițiale și a metodelor selectate de prelucrare și analiză a datelor. Studiul a arătat fezabilitatea utilizării metodei medii mobile și a metodei celor mai mici pătrate pentru a obține o evaluare calitativă a prognosticului.

Cuvante-cheie: modele de construcție, sarcini intelectuale, competență, acuratețe, precizie, exhaustivitate, calitatea soluției, proprietăți ale informațiilor de intrare, prognoză.

Анализ и оценка компетентности источников информации в задачах интеллектуальной обработки данных

Крисиллов В.А., Комлевая Н.О.

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

Аннотация. Решение сложных социальных, технических, экономических и научных задач требует использования иерархических многоуровневых систем, в основе работы которых лежит интеллектуальная

обработка данных. Проблематикой работ, связанных с этим направлением исследований, является повышение эффективности решения задач квалиметрии, классификации, диагностики, выбора, принятия решений, прогнозирования, таксономии и др. с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных и статистического подхода. Целью работы является формализация описания и анализа исходных данных как средство повышения качества решения интеллектуальных задач. По сравнению с известными работами, в которых акценты делались на определенные информационные критерии, предлагаемый в работе подход позволяет сформировать множество количественных и качественных критериев для формализации источников информации. Для достижения цели с учетом знания структуры и контекста решаемой проблемы были сформулированы предъявляемые ко входной информации объективные требования, несоблюдение которых ограничивает область использования результатов решения задачи. Для обеспечения заданного качества решения задач интеллектуальной обработки данных необходимо, чтобы входная информация была объективной, достоверной, релевантной, полной, своевременной, понятной и др., а также обладала определенной степенью точности, что возможно лишь при наличии компетентных экспертов. Рассмотрена зависимость качества решения задачи обработки данных от требований, предъявляемых к источникам исходных данных на примере задачи прогнозирования. Проанализирована точность прогноза результатов внешнего независимого оценивания в выбранном разрезе от степени полноты исходных данных и выбранных методов обработки и анализа данных. Исследование показало целесообразность использования метода скользящей средней и метода наименьших квадратов для получения качественной прогностической оценки. При этом, несмотря на отсутствие почти трети исходных данных от компетентных источников, средняя относительная ошибка прогноза не превысила 10%.

Ключевые слова: построение моделей, интеллектуальные задачи, компетентность, достоверность, точность, полнота, качество решения, свойства входной информации, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стремительно растут объемы данных, сопровождающие различные социальные, технические, экономические, научные и другие процессы. В работах [1, 2] показаны пути выявления в огромных информационных массивах причинно-следственных связей и закономерностей. В работах [3, 4] описано построение моделей, которые помогают принимать решения в навигационных и эксплуатационных задачах, оперирующих большими объемами информации. Статьи [5, 6] описывают проблемы приема-передачи информационных блоков большой размерности с помощью сети Internet. Статья [7] рассматривает проблемы автоматизации процесса обучения студентов при большом количестве возможных режимов обучения. Сложность и многообразие описанных ситуаций и проблемы, возникающие при их решении, подчеркивают важность предварительного анализа исходных данных как средства повышения качества результата.

I. ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Во всем множестве задач интеллектуальной обработки данных принято выделять следующие типы: квалиметрия, классификация, диагностика (распознавание

образов), выбор, принятие решений, формирование заключений, построение прогноза, кластерный анализ (таксономия). Каждая из таких задач может носить как чисто теоретический характер, так и служить основанием для разработки специализированных и комплексных технических, социальных, организационных и экономических систем.

В [8] описаны общие информационные подходы к решению задач и выделены основные этапы. В работе [9] внимание уделяется вопросу прогнозирования и связанному с ним исследованию точности исходной информации. В статье [10] описаны технологии, которые являются вспомогательными инструментами для решения задачи квалиметрии с учетом релевантности исходных данных. Труды [11, 12] показывают влияние степени достоверности информации на качество решения задач классификации и диагностики. Статья [13] рассматривает связь между вероятностными характеристиками атрибутов исходных данных и качеством полученного решения. Проблемы потери качества при принятии решения в задачах систематизации и кластеризации ввиду несвоевременного поступления данных описаны в [14]. Вопросы влияния отдельных выбросов на степень однородности исходных данных и механизмы ее поддержания на требуемом уровне рассмотрены в [15, 16].

Зачастую существуют объективные требования, предъявляемые ко входной информации, несоблюдение которых ограничивает область использования результатов решения задачи или же делает их вовсе непригодными. Так, в работе [17] показано, что качество входной информации и, соответственно, качество решения снижается при наличии пропусков в исходных данных, в работах [18, 19] – при наличии противоречивости этих данных, в [20 – 22] – при наличии аномальных значений и неустранимой шумовой составляющей, в [23] – из-за несоответствия форматов данных, ошибок ввода данных или опечаток, дублирования и т.д. Работа [24] посвящена исследованию функций распределения энтропии исходных данных и предельных допустимых случаев.

Таким образом, анализ и систематизация информационных подходов к обеспечению заданного качества решения описанных выше задач показали, что входная информация должна обладать определенным набором свойств: быть объективной, достоверной, релевантной, полной, своевременной, понятной и др., а также обладать определенной степенью точности [25]. В [26] описана различная природа, представление и принципы оценивания этих свойств.

В общем виде под качеством некоторого решения понимается степень его соответствия поставленной цели, при этом каждое решение получается на основании входной информации, имеющей определенную совокупность свойств. Заметим, что именно точность, достоверность, релевантность и полнота входной информации, представленные в числовом виде, позволяют рассматривать ситуацию снижения неопределенности при решении некоторой выбранной задачи как параметрическое представление функции от нескольких переменных. Знание структуры и контекста разрешаемой проблемы позволяет определить ее целевую функцию, в которой переменными и ограничениями выступают свойства входной информации. Это в очередной раз подчеркивает важность наличия компетентных источников информации, данным от которых можно доверять.

Целью работы является формализация описания и анализа исходных данных как средство повышения качества решения

интеллектуальных задач. По сравнению с известными работами, в которых акценты делались на определенные информационные критерии, предлагаемый в данной работе подход позволяет сформировать множество количественных и качественных критериев для формализации источников информации.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В общем виде свойства входной информации, требующие контроля, можно представить множеством M :

$$M = \{O, D, R, G, T, U\}, \quad (1)$$

где O — объективность информации;

D — достоверность;

R — релевантность;

G — полнота;

T — своевременность;

U — понятность.

Рассмотрим более подробно свойства входной информации и их взаимосвязи с качеством решения выбранной задачи.

Объективность информации O заключается в том, что она отражает внешний мир, существующий независимо от конкретных объектов, субъектов и процессов и носит общепризнанный характер. Объективность – важнейшее свойство информации, которое, к сожалению, крайне редко бывает абсолютным, ведь данные – это только один компонент информации. Второй компонент – информационные методы – связан с источником или потребителем информации и имеет субъективную природу. В зависимости от того, какой компонент превалирует в информационном процессе, результирующая информация может быть объективной более или менее. В науке принято считать объективной информацию воспроизводимую. Например, законы химии воспроизводимы, а законы астрологии – нет. Соответственно, химия считается объективной наукой, а астрология – нет. Основной способ повышения объективности информации заключается в увеличении её полноты. Например, оценка уровня квалификации программиста – субъективна, но при увеличении числа независимых экспертов объективность оценки повышается.

Как исходная, так и результирующая информация характеризуются с двух позиций – достоверности (внутренней валидности) и

обобщаемости (внешней валидности, применимости). Случайные ошибки возникают из-за отклонения результата отдельного наблюдения или измерения от его истинного значения, что обуславливается случайностью. Случайные вариации проявляются на любом этапе решения задачи и связаны с индивидуальной вариабельностью свойств изучаемых объектов, случайными ошибками измерения и недостаточным объёмом выборки. В отличие от систематических ошибок, случайные ошибки нельзя устранить, но можно свести к минимуму. Этого достигают правильным планированием процесса решения задачи, увеличением размера исходной выборки, требованием многократного получения данных от одних и тех же источников, и, кроме того, путём оценки вероятности случайной ошибки с использованием выбранных методов.

Достоверность D (внутренняя валидность) исходных данных определяется тем, насколько они соответствуют методам и инструментам, выбранным для решения поставленной задачи. Достоверность полученных результатов решения задачи определяется тем, насколько структура решения соответствует поставленным целям, и в какой степени полученные данные справедливы в отношении изучавшейся выборки. Исходя из этого, достоверным нужно считать решение, в котором возможность возникновения систематических и случайных ошибок сведена к минимуму. При этом объективная информация всегда является достоверной, а субъективная информация не всегда достоверна.

Выбор методов оценки достоверности определяется подходом, который наилучшим образом учитывает структуру и контекст решаемой задачи. Например, при использовании статистического подхода к решению задачи выделяют параметрические и непараметрические методы оценки достоверности результатов, позволяющие перенести результаты выборочного решения на генеральную совокупность.

Параметрическими называют количественные методы статистической обработки данных, применение которых требует обязательного знания закона распределения изучаемых признаков в совокупности и вычисления их основных параметров. В тех случаях, когда имеется

малое количество наблюдений и характер распределения неизвестен, когда кроме количественных характеристик результаты выражаются полуколичественными, а иногда описательными характеристиками (например, для медицинского исследования – тяжесть заболевания, интенсивность реакции, результаты лечения), параметрические методы становятся непригодными. В этих ситуациях следует использовать непараметрические методы оценки достоверности.

Непараметрическими являются количественные методы статистической обработки данных, применение которых не требует знания закона распределения изучаемых признаков в совокупности и вычисления их основных параметров. В то же время следует отметить, что назначение применения непараметрических методов гораздо шире, чем только оценка достоверности результатов исследования (в том числе они применяются и для характеристики одной выборочной совокупности, и для изучения связи между явлениями). В рамках данной статьи, говоря о непараметрических статистических методах, исследуется только оценка достоверности результатов исследования.

Как параметрические, так и непараметрические методы, используемые для сравнения результатов исследований, т.е. для сравнения выборочных совокупностей, заключаются в применении определенных формул и расчете определенных показателей в соответствии с предписанными для того или иного метода алгоритмами. В конечном результате высчитывается определенная числовая величина, которую сравнивают с табличными пороговыми значениями. Критерием достоверности будет результат сравнения полученной величины и табличного значения при данном числе наблюдений (или степеней свободы) и при заданном уровне безошибочного решения.

Следует заметить, что достоверность информации является обобщенным показателем качества информации, обозначающим её точность и полноту. В общем смысле точность можно рассматривать как степень приближения истинного значения рассматриваемого параметра процесса, значения величины и т.д. к его теоретическому номинальному значению. Точность измерений –

характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю погрешностей их результатов. Высокая точность измерений соответствует малым составляющим погрешностей всех видов (как случайных, так и систематических). Количественно точность может быть выражена значением, обратным модулю относительной погрешности измерения. Например, при относительной погрешности измерения, равной 2%, или 0,02, точность измерений равна $1/0,02 = 50$.

В общем виде достоверность информации – это характеристика ее неискаженности. Решение многих сложных задач подразумевает разбиение их на этапы, которые зачастую идут последовательно один за другим. При этом информация, которая является результирующей для одного этапа задачи, может поступать в качестве входной для решения следующего этапа и т.д. Никакие методы и инструменты, задействованные на каждом этапе решения задачи, не могут повысить достоверность информации, являющейся входной для данного этапа. Напротив, для выбранного набора методов и инструментов обработки можно оценить степень искажения первоначальной информации. Таким образом, в ходе решения задачи от этапа к этапу, достоверность информации может лишь снижаться.

Говоря об оценке достоверности информации, в ряде случаев целесообразно проводить это оценивание на промежуточном этапе. Это имеет смысл, когда известны допустимые пороговые значения достоверности для каждого этапа. При этом можно отследить этап, при котором уровень достоверности информации стал недостаточным, а, значит, выполнять оставшиеся этапы бессмысленно. Такой подход, с одной стороны, требует временные и вычислительные ресурсы для получения промежуточных оценок, но, с другой стороны, при недостаточном уровне достоверности информации позволяет сэкономить аналогичные ресурсы за счет сокращения этапов решения задачи. Знание того, на каком этапе уровень достоверности информации стал недопустимым, может помочь в исправлении ситуации.

Если нет возможности получить количественную оценку достоверности информации, как входной, так и результирующей, то ее оценивают по

шкалам: чаще всего надёжная, полностью надёжная, довольно надёжная и так далее до абсолютно ненадёжной и той, у которой статус не определён. Информация, которую невозможно проверить на достоверность, является бессмысленной.

Важным показателем качества информации является ее релевантность R . Релевантность информации определяется как степень соответствия цели, для которой она требуется. Принято выделять полезную информацию и информационный шум. Их взаимное отношение и определяет степень релевантности информации. Одна и та же информация может быть полезной для решения одних задач и бесполезной для решения других. Таким образом, вычисление релевантности должно быть связано с определенным классом решаемых задач.

То, какая информация является полезной, а какая – нет, следует решать априорно, либо же рассматривать процесс решения задачи как систему с отрицательной обратной связью, и тогда степень полезности информации будет коррелировать с уровнем неопределенности получаемого решения.

Информация считается полной G , если ее достаточно для снятия неопределенности при решении задачи. Процесс решения можно считать оправданным, если поступающая входная информация уменьшает существовавшую ранее неопределенность результата [27]. При этом количество информации I может быть выражено как разность между априорной H_{apr} и апостериорной H_{apost} энтропиями:

$$I = H_{apr} - H_{apost}. \quad (2)$$

С использованием вероятностного подхода, согласно Шеннону [28], энтропия исследуемого информационного атрибута $Attr$ может быть выражена как

$$H_{Attr} = - \sum_{i=1}^{k_{Attr}} P_{iAttr} \log_2 P_{iAttr}, \quad (3)$$

где P_{iAttr} — вероятность определенного значения для атрибута $Attr$ входной информации (точное соответствие, соответствие с учетом допуска, вхождение в диапазон, принадлежность категории и т.д.);

k_{Attr} — количество разных значений для атрибута $Attr$, $i=1..k_{Attr}$.

Как видно, степень полноты информации нелинейно зависит от имеющихся вероятностей значений атрибутов. При этом для однократных пропусков данных величина вероятности значения определенного атрибута может быть восстановлена в любом случае, а для многократных – только при равновероятных значениях атрибута, причем для случая многократных пропусков должно быть известно общее число измерений значения атрибута.

Своевременность информации T означает, что она присутствует в системе в тот момент времени, когда ее необходимо обрабатывать. Часто решение некоторой сложной задачи распадается на несколько этапов, для каждого из которых известны момент времени начала информационной обработки и исходная для этого этапа информация. При этом следует учесть, что вся информация, поступившая на вход некоторого этапа после того, как процесс обработки информации уже начался, не может быть использована при решении. Заметим, что чрезмерно раннее получение входной информации приводит к необходимости ее хранения до момента использования, что требует дополнительных системных ресурсов.

Понятность информации U – это качество, которое основывается на степени соответствия вида представления информации виду ее восприятия. Здесь нужно четко разграничивать категории пользователей данной информации. Если пользователем является техническая система, то информация должна быть представлена в виде сигналов. Если же пользователем является человек, то качество понятности может быть выражено через качество человеко-машинного интерфейса. Низкий уровень понятности сводит на нет многие усилия по получению качественной информации.

Объективности, а также определенного уровня достоверности и полезности входной информации можно достичь, предъявляя четкие требования к уровням компетентности источников информации. При этом следует учитывать механизм получения входной информации для решения задачи: формулирование мнения эксперта на основании его опыта решения подобных задач, съем показаний измерительного прибора, подсчет величин, формулировка заключения на основании значений

статистических характеристик, знания аналитических зависимостей и др. Методы обеспечения качества информации для этих категорий совершенно разные. Далее будет рассмотрена только ситуация, при которой входная информация определяется мнением эксперта на основании его опыта решения подобных задач.

Рассмотрим задачи, решением которых является получение значения целевого свойства объекта (наименования класса, интегральной оценки) на основании значений свойств, описывающих этот объект. При этом разные решения будут соответствовать разным поставленным целям.

Пусть, например, в рамках решения задачи классификации пользователя интересует одно наиболее вероятное значение класса, к которому относится исследуемый объект, и при этом классы нельзя сравнивать между собой и, соответственно, упорядочивать. Тогда качество полученного решения определяется логической функцией соответствия найденного класса теоретическому номинальному с учетом вероятности принадлежности решения найденному классу. В случае, когда классы сравнимы между собой, качество решения можно определить, как величину, обратную расстоянию между центральными характеристиками (центр тяжести, математическое ожидание) найденного и теоретического номинального классов также с учетом вероятности принадлежности решения найденному классу.

В другой ситуации пользователь может отталкиваться от минимально допустимого значения вероятности правильного решения. Для задачи классификации это означает определение набора классов, вероятности принадлежности объекта к которым больше либо равны минимально допустимому значению, и качество решения определяется полнотой такого набора.

Для задачи интегрального оценивания состояния сложного объекта также можно рассматривать разные ситуации. Например, определение наименьшего диапазона значений целевой характеристики с заданной вероятностью, или же определение вероятности попадания значения целевой характеристики в заданный диапазон значений. Как видно, в каждой из описанных ситуаций качество решения задачи

выражается по-своему, но все они имеют вероятностную составляющую.

В случае, когда имеющийся уровень компетентности источника информации не позволяет обеспечить требуемое качество, необходимо либо повышать уровень компетентности (прямая задача), либо снижать требования к качеству (обратная задача), либо, если это невозможно, использовать альтернативные подходы для решения поставленной задачи.

Компетентности источников информации могут определяться априорно или апостериорно. Если источник предоставляет информацию многократно для решения одной и той же либо подобной задачи, его апостериорная компетентность принимается за априорную.

Априорная компетентность источника информации может определяться одним из способов либо их совокупностью:

- назначением, сделанным ответственным лицом. Например, для случая экспертного оценивания – лицом, принимающим решение, либо сторонним экспертом, исходя из их собственных представлений о компетентности этого источника;
- самооценкой, при которой источник информации самостоятельно задает свой уровень компетентности;
- при помощи группового экспертного оценивания [29, 30].

Последний метод предполагает обработку полученных данных экспертного оценивания, которые характеризуют обобщенное мнение и степень согласия индивидуальных оценок экспертов. Обработка данных экспертов служит исходным материалом для синтеза прогнозных гипотез, проведения классификации, формирования заключения о состоянии исследуемого объекта или системы и т.д.

Наиболее распространенными экспертными методиками при классификации по признаку оценки преимущества при принятии решений являются следующие:

- методика ранжирования;
- методика непосредственного оценивания;
- методика сопоставления, включающая две разновидности: методику последовательного сопоставления и методику попарного сравнения.

Все они имеют много общего, а их отличие состоит, преимущественно, только в том, что оценивание исследуемых объектов осуществляется разными способами. При этом каждая методика имеет свои преимущества и недостатки.

Концепция групповой экспертизы рассматривает содержательную часть экспертизы как процесс разрешения проблемы компетентности, в котором обычно различают следующие этапы: формирование коллектива экспертов; получение экспертной информации; обработка экспертной информации с целью принятия решения [31, 32]. Проблема подбора экспертов является одной из наиболее сложных. Очевидно, в качестве экспертов необходимо использовать тех людей, чьи суждения наилучшим образом помогут принятию адекватного решения. Формирование результата группового экспертного оценивания заключается в нахождении для поставленной задачи верного (искомого) решения, обладающего достаточной объективностью.

Числовым выражением согласованности мнений экспертов является коэффициент конкордации. Оценка согласованности мнений экспертов необходима в первую очередь потому, что мнения экспертов могут сильно расходиться по оцениваемым параметрам. Зачастую изначально оценку проводят по ранжированию показателей и присвоению им определенного коэффициента значимости (весомости). Несогласованное ранжирование приводит к тому, что данные коэффициенты будут статистически недостоверными. Мнения экспертов при их необходимом количестве (более 7-10) должны быть распределены по нормальному закону. Коэффициент конкордации – это безразмерная величина, показывающая в общем случае отношение дисперсии к ее максимальному значению. Коэффициент конкордации выражается числом от 0 до 1, показывающим согласованность мнений экспертов при проведении ранжирования каких-либо свойств. Чем ближе это значение к 0, тем согласованность считается более низкой. При величине данного коэффициента менее 0.3 мнения экспертов считаются несогласованными. При нахождении величины коэффициента в диапазоне от 0.3 до 0.7 согласованность считается средней, при величине более 0.7 – высокой.

Если об источнике информации нет предварительных данных, позволяющих априорно оценить его компетентность, можно задать для него некоторое среднее значение компетентности.

В работах [33, 34] было предложено вычислять апостериорную компетентность эксперта-источника информации на основании знания его априорной компетентности и коэффициента доверия, который может быть определен автоматически путем сравнения информации, поступающей от него и от других источников. Разумеется, эксперт, чье мнение сильно отличается от мнения других экспертов, может оказаться ближе к истине, чем остальные, но вероятность такой ситуации гораздо меньше, чем обратной. Поэтому такой эксперт чаще всего либо оказывается менее компетентным, чем остальные, либо намеренно искажает информацию.

Вычисление коэффициента доверия основывается на понятии опорного факта. В качестве опорного факта принимается либо усредненное значение факта (данных, знаний), полученное от группы источников, либо один, но точно установленный факт. Оценивается расстояние между значением, полученным в i -й итерации от определенного эксперта, и опорным фактом. Измеряемые характеристики могут быть получены на числовой шкале, либо же на шкалах порядка или наименований в нормированном евклидовом пространстве посредством приведения их все к той же числовой шкале. Если величина полученного расстояния превышает некоторый порог, то значение, предоставленное в данной итерации экспертом, считается несоответствующим истине. В результате коэффициент доверия для такого эксперта должен понизить его уровень компетентности. И наоборот, если значение, полученное от эксперта, достаточно близко к опорному факту, то компетентность эксперта должна возрасти. Коэффициент доверия, как шаг изменения уровня компетентности, может быть как фиксированной величиной, так и зависеть от степени несоответствия значения, полученного в i -й итерации от определенного эксперта, опорному факту.

Отдельно следует решать вопрос как поступить, если уровень компетентности эксперта столь низок, что выходит за область

допустимых значений. Необходимо выбрать наилучший подход в зависимости от условий, сопутствующих решению задачи. Например, такого эксперта можно сразу исключать из круга лиц, поставляющих исходную информацию. Это целесообразно делать в случаях, когда мнение эксперта бесспорно признано бесполезным, и обработка получаемых от него данных лишь напрасно потребляет вычислительные ресурсы. Такая ситуация влечет решение вопроса о назначении нового эксперта на место выбывшего либо же уменьшении числа экспертов.

Другим подходом может стать требование получения от такого эксперта нескольких значений за каждую i -ю итерацию решения задачи, усреднения этих значений, и рассмотрения только лишь такого усредненного значения. Этот подход может быть удобен в тех случаях, когда условия решения задачи динамически меняются, и мнение эксперта зависит от этих условий.

Еще одним подходом может стать игнорирование низкого уровня компетентности эксперта и использование получаемых от него значений только в случае их соответствия опорному факту. Такая ситуация может стать полезной, когда требуется выявить область экспертности какого-либо специалиста. Предлагая ему задачи из различных (но чаще смежных) областей знаний, можно провести границы экспертности.

Открытым пока остается вопрос о связи между уровнями компетентности экспертов и их требуемым количеством в рамках решения конкретной задачи. Логичным кажется факт, что при наличии экспертов, уровень компетентности которых стремится к максимальному значению, нет смысла в их большом количестве.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим зависимость качества решения задачи обработки данных от требований, предъявляемых к источникам исходных данных, и выбранных методов обработки и анализа данных на примере задачи прогнозирования. Исследуем зависимость оценки точности прогноза от степени полноты исходных данных с использованием статистических методов.

В качестве исходных данных используем результаты, полученные украинскими

абитуриентами при прохождении внешнего независимого оценивания, которое предполагает получение по каждому из сдаваемых предметов целочисленного значения результата по шкале от 0 до 200 баллов. В качестве исследуемого предмета выбрана «математика», анализируемый временной период – 2010–2018 годы. Исследуемую выборку составили выпускники трех школ Одессы общим количеством 127 человек. Данные взяты с открытого ресурса Украинского центра оценивания качества образования [35].

В связи с тенденцией к повышению нижних пороговых результатов, необходимых для поступления в высшие учебные заведения Украины, интерес представил анализ процентной части абитуриентов с результатами внешнего независимого оценивания в диапазоне [150; 200] баллов, а также прогностические оценки по данному диапазону на 2019 год с учетом предположения о возможности распространении прошлых и настоящих тенденций и закономерностей на будущее развитие выбранного объекта прогнозирования. Первоначальное оценивание прогноза проводилось на полной выборке абитуриентов путем последовательной экстраполяции методами скользящей средней, наименьших квадратов и экспоненциального сглаживания. Затем с

использованием тех же методов был вычислен прогноз на неполных исходных данных, полученных по двум школам из трех (83 человека), и проведено оценивание точности рассчитанных прогнозов в точках экстраполяции.

Применение метода скользящей средней позволило элиминировать случайные колебания и получить с его помощью краткосрочные прогностические значения, соответствующие влиянию главных факторов. В таблице 1 приведено прогностическое решение методом скользящей средней на основании полных и неполных выборок за 2010–2018 годы проведения внешнего независимого оценивания. Используются следующие обозначения:

V – данные временного ряда на полной выборке абитуриентов, результат которых попал в диапазон [150; 200] баллов;

m – скользящая средняя временного ряда на полной выборке;

ε – средняя относительная ошибка;

V' – данные временного ряда на неполной выборке абитуриентов с результатом от 150 до 200 баллов;

m' и ε' – скользящая средняя и средняя относительная ошибка на неполной выборке соответственно.

Таблица 1¹.

Решение методом скользящей средней²

t	$V, \%$	$m, \%$	$\varepsilon, \%$	$V', \%$	$m', \%$	$\varepsilon', \%$
2010	88.1			85.2		
2011	93.1	88.04	5.43	88.5	84.10	9.67
2012	82.93	87.15	5.09	78.6	82.40	0.64
2013	85.42	85.75	0.38	80.1	79.53	6.89
2014	88.89	87.41	1.66	79.9	81.53	8.28
2015	87.93	88.19	0.30	84.6	84.77	3.60
2016	87.75	84.29	3.94	89.8	83.20	5.19
2017	77.2	74.75	3.17	75.2	74.40	3.63
2018	59.3			58.2		
Прогноз (forecast) 2019	68.78			68.73		

^{1,2} Appendix 1 К имеющимся полной и неполной выборкам применили следующий типовой подход. Для расчета прогностического значения сперва рассчитывали скользящую среднюю, а

затем прогнозируемый показатель. Расчет скользящей средней выполнялся по формуле:

$$m_t = \frac{V_{t-1} + V_t + V_{t+1}}{n}, \quad (4)$$

где V_{t-1} , V_t и V_{t+1} – результаты оценивания абитуриентов за прошлый, текущий и следующий годы соответственно;

n – число уровней, входящих в интервал сглаживания, принято $n=3$.

Прогнозируемый показатель для полной и неполной выборок определялся стандартным образом:

$$V_{t+1} = m_{t-1} + \frac{1}{n}(V_t - V_{t-1}), \quad (5)$$

где $t + 1$ – прогнозный год;

t – год, предшествующий прогнозируемому;

V_{t+1} – прогнозируемый результат оценивания абитуриентов;

m_{t-1} – скользящая средняя за два года до прогнозного;

V_t – фактическое значение результата оценивания за предыдущий год;

V_{t-1} – фактическое значение результата оценивания за два года, предшествующих прогнозному.

Расчет средних относительных ошибок по каждому году для полной (ε_t) и неполной (ε'_t) выборок выполнялся по формулам:

$$\varepsilon_t = \frac{|V_t - m_t|}{V_t} * 100\%, \quad \varepsilon'_t = \frac{|V_t - m'_t|}{V_t} * 100\%, \quad (6)$$

где V_t – результат оценивания абитуриентов за текущий год, взятый из полной выборки:

m_t и m'_t – скользящие средние за текущий год для полной и неполной выборок соответственно.

Итоговая средняя относительная ошибка для полной выборки показала высокую точность результата прогнозирования:

$$E = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \varepsilon_t = 2.85\% \quad (7)$$

Расчеты средней относительной ошибки для неполной выборки выявили некоторое снижение точности прогностического решения, что, однако, не является достаточно критичным:

$$E' = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \varepsilon'_t = 5.41\% \quad (8)$$

Это означает, что общность закономерностей, которые проявляются в результатах внешнего независимого оценивания, позволяет строить достаточно точный прогноз методом скользящей средней в условиях неполных данных.

Для тех же наборов данных построены прогнозы еще двумя методами.

Применение метода наименьших квадратов состоит в минимизации суммы квадратичных отклонений между наблюдаемыми и расчетными величинами, которые находятся по подобранному уравнению – уравнению линейной регрессии со скалярной переменной. Чем меньше расстояние между фактическими значениями и расчетными, тем более точен прогноз, построенный на основе уравнения регрессии. В таблице 2 приведено прогностическое решение методом наименьших квадратов на основании полных и неполных выборок соответственно. Прогнозируемое значение показателя для полной (и аналогично для неполной) выборки вычислялось по формуле:

$$V_{t+1} = a * X_{t+1} + b, \quad (9)$$

где $t + 1$ – прогнозный год;

V_{t+1} – прогнозируемый показатель;

a и b – коэффициенты;

X_{t+1} – условное обозначение времени.

Расчет коэффициентов a и b осуществляется следующим образом:

$$a = \frac{k \sum_{t=1}^k (V_t * X_t) - \sum_{t=1}^k X_t \sum_{t=1}^k V_t}{k \sum_{t=1}^k X_t^2 - (\sum_{t=1}^k X_t)^2} = -2.51, \quad (10)$$

$$b = \frac{\sum_{t=1}^k V_t - a * \sum_{t=1}^k X_t}{k} = 95.96,$$

где k – число уровней временного ряда.

Аналогичные вычисления для неполной выборки дали $a' = -2.02$, $b' = 90.09$.

Расчет средних относительных ошибок по каждому году для полной (ε_t) и неполной (ε'_t) выборок на основании расчетных значений m_t и m'_t выполнялся по формулам (6).

Таблица 2³.

Решение методом наименьших квадратов⁴

<i>t</i>	<i>X</i>	<i>V</i> , %	<i>m</i> , %	ϵ , %	<i>V'</i> , %	<i>m'</i> , %	ϵ' , %
2010	1	88.1	93.45	6.08	85.2	88.08	0.03
2011	2	93.1	90.94	2.32	88.5	86.06	7.56
2012	3	82.93	88.43	6.63	78.6	84.04	1.34
2013	4	85.42	85.91	0.58	80.1	82.03	3.97
2014	5	88.89	83.40	6.17	79.9	80.01	9.99
2015	6	87.93	80.89	8.01	84.6	77.99	11.30
2016	7	87.75	78.38	10.68	89.8	75.98	13.42
2017	8	77.2	75.86	1.73	75.2	73.96	4.20
2018	9	59.3	73.35	23.70	58.2	71.94	21.32
Прогноз (forecast) 2019		70.84			69.93		

Вычисления итоговых средних относительных ошибок для полной (*E*) и неполной (*E'*) выборок по формулам (7) и (8) также показали достаточно высокую точность результатов прогнозирования: $E=7.32\%$, $E'=8.12\%$. Это хуже, чем при использовании метода скользящей средней, однако, если установлено требование, чтобы ошибка не превышала 10%, то применение метода наименьших квадратов при отсутствии части исходных данных можно считать приемлемым.

Применение метода экспоненциального сглаживания обеспечивает простоту процедуры вычислений. Для расчета прогноза использована рабочая формула метода экспоненциального сглаживания:

$$m_{t+1} = \alpha V_t + (1-\alpha)m_t, \quad (11)$$

где *t* – год, предшествующий прогнозируемому;

t + 1 – прогнозный год;

*m*_{*t*+1} – прогнозируемый показатель;

α – параметр сглаживания;

*V*_{*t*} – фактическое значение исследуемого показателя за год, предшествующий прогнозируемому;

*m*_{*t*} – экспоненциально взвешенная средняя для года, предшествующего прогнозируемому.

При прогнозировании данным методом возникает два затруднения: выбор значения параметра сглаживания α ; определение начального значения *m*₀.

Значение параметра сглаживания определяли с учетом числа наблюдений, входящих в интервал сглаживания:

$$\alpha = \frac{2}{k+1}. \quad (12)$$

Начальное значение *m*₀ определяли двумя способами: I способ – приравнивали к среднему арифметическому всех фактических значений исследуемого показателя, II способ – использовали первое фактическое значение исследуемого показателя.

В таблице 3 колонки *m*₁ и ϵ ₁ содержат прогностические значения и их средние относительные ошибки, рассчитанные I способом, а колонки *m*₂ и ϵ ₂ – II способом соответственно.

Вычисления итоговых средних относительных ошибок для полной (*E*₁, *E*₂) и неполной (*E*_{1'}, *E*_{2'}) выборок показали снижение точности результатов прогнозирования: $E_1 = 9.04\%$, $E_2 = 8.41\%$, $E_1' = 10.64\%$, $E_2' = 9.15\%$. Как видно, для неполной выборки ошибка превысила 10%, что не позволяет интерпретировать соответствующую точность как «высокую».

Таким образом, если к сформулированной задаче прогнозирования процентной части абитуриентов с результатами внешнего независимого оценивания в диапазоне [150; 200] баллов по дисциплине «математика» на изучаемой выборке предъявляются требования по точности, метод экспоненциального сглаживания на неполных данных не обеспечивает заданное качество решения.

Решение методом экспоненциального сглаживания⁶

t	$V, \%$	$m_1, \%$	$\varepsilon_1, \%$	$m_2, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$V', \%$	$m_1', \%$	$\varepsilon_1', \%$	$m_2', \%$	$\varepsilon_2', \%$
2010	88.1	83.4	5.33	88.10	0.00	85.2	80.01	9.18	85.20	3.29
2011	93.1	84.34	9.41	88.10	5.37	88.5	81.05	12.94	85.20	8.49
2012	82.93	86.09	3.81	89.10	7.44	78.6	82.54	0.47	85.86	3.53
2013	85.42	85.46	0.05	87.87	2.86	80.1	81.75	4.29	84.41	1.18
2014	88.89	85.45	3.87	87.38	1.70	79.9	81.42	8.40	83.55	6.01
2015	87.93	86.14	2.04	87.68	0.28	84.6	81.12	7.75	82.82	5.81
2016	87.75	86.50	1.43	87.73	0.02	89.8	81.81	6.77	83.17	5.22
2017	77.2	86.75	12.37	87.73	13.64	75.2	83.41	8.05	84.50	9.45
2018	59.3	84.84	43.07	85.63	44.40	58.2	81.77	37.89	82.64	39.36
Прогноз (forecast) 2019		79.73	9.04	80.36	8.41		77.05	10.64	77.75	9.15

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе было сформировано множество (1) количественных и качественных критериев для формализации источников информации. В это множество вошли такие критерии, как объективность, достоверность, релевантность, полнота, своевременность и понятность. Требования, предъявляемые к источникам информации в соответствии с этими критериями, позволяют обеспечить заданное качество решения таких задач интеллектуальной обработки данных как квалиметрия, классификация, таксономия, диагностика, прогнозирование, принятие решений и др.

Были выявлены и сформулированы в обобщенном виде требования, предъявляемые к компетентности источников информации. Выявлены проблемы, возникающие при формировании результата группового экспертного оценивания, а также проанализированы методики определения компетентности экспертов с целью их учета при нахождении искомого решения поставленной задачи, которое обладает достаточной объективностью. Рассмотрены задачи, решением которых является получение значения целевого свойства объекта (интегральной оценки, наименования класса) на основании значений, получаемых от экспертов.

Для практического исследования зависимости качества решения задачи обработки данных от требований, предъявляемых к источникам информации, и

от использованных информационных методов обработки и анализа данных выбрана задача прогнозирования. Исследование зависимости оценки точности прогноза от степени полноты исходных данных на примере результатов внешнего независимого оценивания показало целесообразность использования метода скользящей средней и метода наименьших квадратов для получения качественной прогностической оценки. При этом, несмотря на отсутствие почти трети исходных данных от компетентных источников, средняя относительная ошибка прогноза не превысила 10%.

Дальнейшее изучение процесса оценивания компетентности источников информации требует разработки четко выстроенных моделей исходных данных с учетом требований к их качеству, а также формализации целевых процессов обработки данных.

Наличие формальных моделей позволит частично автоматизировать процесс анализа и оценивания источников информации в задачах интеллектуальной обработки данных. При этом следует учесть такие ситуации, при которых входные данные являются разнородными, противоречивыми либо еще каким-нибудь образом ухудшают качество решения задачи.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

^{1,2}Table 1. Moving average solution.

^{3,4}Table 2. Least-squares solution.

^{5,6}Table 3. Exponential smoothing solution.

Литература (References)

- [1] Boutkhom O. Multi-Agent Based Modeling Using Multi-Criteria Decision Analysis and OLAP System for Decision Support Problems. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering*, 2015, vol. 9, no. 12, pp. 2553-2560.
- [2] Koncilia C., Morzy T., Wrembel R., Eder J. [Interval OLAP: Analyzing interval data] *Proceedings of the 16th International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery, DaWaK*. Munich, 2014, pp. 233-244.
- [3] Guerra J., Schunn C. D., Bull S., Barria-Pineda J., Brusilovsky P. Navigation support in complex open learner models: assessing visual design alternatives. *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 160-192. doi 10.1080/13614568.2018.1482375
- [4] Ishaq R., Nasim R. Enhancing information extraction techniques from structured database using artificial intelligence. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 2018, vol. 16, no. 11, pp. 140-143.
- [5] Hoifung P., Domingos P. Joint Inference in Information Extraction. *Association for the Advancement of Artificial Intelligence, USA*, 2015, vol. 34(5), pp. 171-176.
- [6] Krisilov V.A., Gorodnichaya K.O., Huy Vu.N. [Method of adapting content by the volume of transmitted information on the Internet] *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT*. Lviv, 2018, vol. 2, Article № 8526647. - Proceedings.
- [7] Makarova Y., Krisilov V., Vu H.N., Langmann R. [User profile creation and training mode determination in the 'Smart lab' system] *4th IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, 2014, Article № 6826110, pp. 315-320.
- [8] David J.C. MacKay. Information Theory, Inference, and Learning Algorithms. Cambridge University Press, 2005, 640 p.
- [9] Spirtes P., Glymour C., Scheines R. Causation, prediction, and search. *Lecture Notes in Statistics*, New York: Springer-Verlag, 1993, vol. 81. 44 p.
- [10] Parsaye K. A Characterization of Data Mining Technologies and Processes. *The Journal of Data Warehousing*, 1998, vol. 1, pp. 11-28.
- [11] Michalski R.S. Machine Learning and Data Mining, Methods and Applications. N.Y.: John Wiley & Sons, 1998. 472 p.
- [12] Hongjun L., Setiono R., Liu H.. NeuroRule: A Connectionist Approach to Data Mining. *Computer Science Learning, Cornell University Library, UK*, 2017, vol. 6(1), pp. 40-47.
- [13] Chen B., Li P., Wu H., Husain T., Khan F. MCFP: a Monte Carlo simulation-based fuzzy programming approach for optimization under dual uncertainties of possibility and continuous probability. *J Environ Inform*, 2017; vol. 29(2), pp. 88-97.
- [14] Tagasovska N., Andritsos P. Distributed clustering of categorical data using the information bottleneck framework. *Information Systems*, 2017, vol. 72, pp. 161-178.
- [15] Lee I. H., Mahmood M. T. Adaptive outlier elimination in image registration using genetic programming. *Information Sciences*, 2017, vol. 421, pp. 204-217.
- [16] Cohen P. R., Feigenbaum E. A. The handbook of artificial intelligence. *Butterworth-Heinemann*, 2014, vol. 3, 587 p.
- [17] Krisilov V. A. Ocenka slozhnyh ob'ektov – osnovnoj mekhanizm pri reshenii zadach kolichestvennogo obosnovaniya reshenij [Evaluation of complex objects as the main mechanism for solving problems of quantitative substantiation of decisions] *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Odessa Polytechnic University]*. – Odesa, 2003, vol. 1 (19), pp. 102-106.
- [18] Komlevaya N. O., Komlevoy A. N., Chernega K. S. Designing of the specialized computer system for making pulmonology diagnosis. *CEUR Workshop Proceedings, 9th International Conference of Programming, UkrPROG*, Kyiv, 2014, vol. 1843, pp. 253-263.
- [19] Komleva N.O., Chernega K.S., Tymchenko B.I., Komlevoy O.M. Intellectual approach application for pulmonary diagnosis. *Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP*, 2016, Article № 7583505, pp. 48-52.
- [20] Awawdeh S., Edinat A., Sleit A. Enhanced K-means Clustering Algorithm for Multi-attributes Data. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 1-6.
- [21] Rokach L. A survey of clustering algorithms. *Data mining and knowledge discovery handbook*, Springer, Boston, MA, 2009, pp. 269-298.
- [22] Firdaus S., Uddin, M. A. A Survey on Clustering Algorithms and Complexity Analysis. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2015, vol.12, is. 2, pp. 62-85.
- [23] Goswami J. A Comparative Study on Clustering and Classification Algorithms. *International Journal of Scientific engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 2015, vol. 1, is. 3, pp. 2395-3470.
- [24] Huang K, Dai L, Yao M, Fan Y, Kong X. Modeling dependence between traffic noise and traffic flow through an entropy-copula method. *J Environ Inform*, 2017, vol. 29(2), pp. 134-151.

- [25]Krisilov V. A., Komleva N. O., Prigozhev O. S. Navchalnyi posibnyk po dystsyplini "Teoriia informatsii ta koduvannia" dlia studentiv spetsialnosti 6.050103 «Prohramna inzheneriia» [Teaching manual on discipline "Theory of information and coding" for students of specialty 6.050103 "Software engineering". Grif of the Ministry of Education of Ukraine: No. 1/11-4058 dated 26.03.12]. Odessa, ONPU, 2012, 178 p. (In Ukrainian).
- [26]Hamming R.W. Coding and Information Theory. *Prentice Hall*, 1986, 259 p.
- [27]Cover T.M., Thomas J.A. Elements of Information Theory. 2006, 748 p.
- [28]Shannon C. E. Matematicheskaya teoriya svyazi. Raboty po teorii informatsii i kibernetike [Mathematical theory of communication. Works on information theory and cybernetics]. M., 1963. 830 p. (In Russian).
- [29]Saaty T.L. The analytic hierarchy process. N.-Y.: McGraw Hill, 1980, 288 p.
- [30]Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, *ORInsight*, 2009, vol. 22(4), pp. 201-220.
- [31]Larichev O.I. Teoriya i metody prinyatiya reshenij: Uchebnik [Theory and methods of decision making: Textbook]. - M., 2002, 392 p. (In Russian).
- [32]Drake P.R. Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education. *International Journal of Engineering Education*, 1998, vol.14 (3), pp. 191-196.
- [33]Zagorujko N.G. Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk, 1999, 270 p. (In Russian).
- [34]Zagorujko N.G. Doverie k informatsii i ee istochniku v ekspertnoj sisteme [Confidence in information and its source in the expert system]. *Ekspertnye sistemy i raspoznavanie obrazov* [Expert systems and pattern recognition]. M., 1988, vol. 126, pp. 3-23. (In Russian).
- [35]Ukrainian Center for Educational Quality Assessment. <http://testportal.gov.ua/> (accessed 26.04.19).

Сведения об авторах.



**Крисиллов Виктор
Анатольевич,**
д. т. н., проф.,
заведующий кафедры
«Системное программное
обеспечение» Института
компьютерных систем
Одесского национального
политехнического
университета
krissilovva2014@gmail.com



**Комлевая
Олеговна,**
к.т.н., доцент кафедры
«Системное программное
обеспечение» Института
компьютерных систем
Одесского национального
политехнического
университета
nkomlevaya@gmail.com

Ways to Reduce the Resistance Torque During the Disk Rotor Spinning and to Increase the Electromotive Force in the Transverse Magnetic Flux Generator in No-Load Mode

Yehorov A.V.¹, Duniev O.O.¹, Masliennikov A.M.¹, Stamann M.²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Kharkiv, Ukraine

²Otto von Guericke University Magdeburg
Magdeburg, Germany

Abstract. The article reviews the transverse magnetic flux machine designs. The work aim was the analysis of the transverse magnetic flux generator with a disk rotor, the stator poles optimal number selection and the resistance torque reducing. This resistance torque was created by one-sided magnetic attraction force from the permanent magnets on the rotor and it hasn't been considered previously, which is a novelty of this work. The ways to increase the electromotive force in the generator are also considered. The main work goal was obtained by magnetic system analysis of generator using Ansys Maxwell software and disk rotor strength analysis using ASCON Компас-3D software. It is concluded that the magnetic reversal frequency of the stator cores depends on the number of permanent magnets on the rotor. The dependence of the magnetic induction average value in the U-shaped stator core on their number was obtained during the magnetic analysis. The disk rotor strength simulation allowed getting the maximum possible bend of the disk rotor under the influence of the one-sided magnetic attraction force. The neodymium permanent magnets help to improve generator efficiency and to decrease its mass-dimensional indicators. It was proposed to use an uneven permanent magnets distribution on the rotor in the transverse magnetic flux generator to reduce the resistance torque of the disk rotor. The permanent magnets attraction force that interacts with stator steel poles was considered. The dependence of magnetic attraction force of the permanent magnets on the air gap size of the generator has been obtained.

Keywords: resistance torque, electromotive force, transverse magnetic flux generator, disk rotor, permanent magnet, force of one-sided magnetic attraction.

DOI: 10.5281/zenodo.3239164

Modalități de reducere a momentului de rezistență în timpul rotirii rotorului disc și de creștere a forței electromotoare într-un generator cu flux magnetic transversal la mers în gol

Egorov A.V.¹, Dunev A.A.¹, Maslennikov A.M.¹, Shtamann M.²

¹Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic din Kharkhov"

Kharkhov, Ucraina

²Universitatea din Magdeburg Otto-von-Guericke

Magdeburg, Germania

Rezumat. Articolul prezintă o privire de ansamblu asupra principalelor modele de mașini electrice cu flux magnetic transversal, subliniază simplitatea relativă a designului acestora și indicatorii de putere specifici. Scopul lucrării este de a analiza un generator de flux magnetic transversal cu un rotor disc, de a selecta numărul optim de poli ai miezului statorului și de a reduce momentul rezistenței la acțiunea unei forțe magnetice unilaterale, care nu a fost considerată mai devreme și este o noutate a acestei lucrări. De asemenea, au fost luate în considerare modalitățile de creștere a forței electromotoare din generator, fiind unul dintre cei mai importanți indicatori ai eficienței mașinii. Obiectivul principal al lucrării a fost atins prin analiza sistemului magnetic al generatorului folosind software-ul Ansys Maxwell și calculul rezistenței rotorului disc folosind software-ul ASCON Compass-3D. În timpul analizei sistemului magnetic al generatorului cu un număr diferit de poli pe stator pentru regimul de mers în gol, dependența valorii medii a inducției magnetice în miezul statorului în formă de Π de numărul lor a fost obținută. Accentul este pus pe utilizarea mai multor magneți permanenți neodimi care consumă mai multă energie, ceea ce permite crearea unui design al generatorului cu indicatori de putere mai înalți. Se propune utilizarea unei distribuții inegale a magneților permanenți pe rotorul generatorului cu flux magnetic transversal pentru a reduce momentul rezistenței rotorului disc de forța atracției magnetice unilaterale a magneților permanenți. Se ia în considerare problema influenței forței de atragere a magneților permanenți asupra miezurilor stator laminate din tablă de oțel electric.

Cuvinte-cheie: generator cu flux magnetic transversal, forță electromotoare, moment de rezistență, rotor disc, magnet permanent, forță de atracție magnetică unilaterală.

Пути уменьшения момента сопротивления при вращении дискового ротора и увеличение электродвижущей силы в генераторе с поперечным магнитным потоком в режиме холостого хода
Егоров А.В.¹, Дунев А.А.¹, Масленников А.М.¹, Штаманн М.²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

г. Харьков, Украина

²Магдебургский университет Отто-фон-Герике

г. Магдебург, Германия

Аннотация. В статье представлен обзор основных конструктивных исполнений электрических машин с поперечным магнитным потоком, подчеркивается относительная простота их конструкции и высокие удельные показатели мощности. Целью работы является анализ генератора с поперечным магнитным потоком с дисковым ротором, выбор оптимального числа полюсов сердечника статора и уменьшение момента сопротивления от действия силы одностороннего магнитного притяжения, что не было рассмотрено ранее и является новизной данной работы. Также рассмотрены способы увеличения электродвижущей силы в генераторе, как одного из важнейших показателей эффективности работы машины. Основная цель работы была получена путем анализа магнитной системы генератора с использованием программного обеспечения Ansys Maxwell и прочностного расчета дискового ротора с использованием программного обеспечения ASCON Компас-3D. В ходе анализа магнитной системы генератора с различным числом полюсов статора для режима холостого хода были получены зависимости среднего значения магнитной индукции в П-образном сердечнике статора от их количества. Делается акцент на использовании более энергоёмких неодимовых постоянных магнитов, которые позволяют создать конструкцию генератора с более высокими удельными показателями мощности. Предлагается использовать неравномерное распределение постоянных магнитов на роторе в генераторе с поперечным магнитным потоком для уменьшения момента сопротивления дискового ротора от силы одностороннего магнитного притяжения постоянных магнитов. Рассмотрен вопрос влияния силы притяжения постоянных магнитов к шихтованным сердечникам статора из листов электротехнической стали. Получена зависимость силы магнитного притяжения постоянного магнита от величины воздушного зазора между статором и ротором. В программе АСКОН Компас-3D проведено твердотельное моделирование, которое позволило рассчитать максимально возможный прогиб дискового ротора под влиянием силы одностороннего магнитного притяжения. Делается вывод о достаточной жесткости дискового ротора для обеспечения равномерного воздушного зазора при работе генератора в режиме холостого хода.

Ключевые слова: генератор с поперечным магнитным потоком, электродвижущая сила, момент сопротивления, дисковый ротор, постоянный магнит, сила одностороннего магнитного притяжения.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире наблюдается тенденция производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии, в частности от малой энергетики, что демонстрируется популярностью «зеленого тарифа» среди населения. Разработка и внедрение высокоэффективных и надежных электрических машин, которые способны генерировать электрическую энергию, имеет практический и научный интерес. Одной из таких машин, является электрическая машина с поперечным магнитным потоком (ЭМП), которая в последнее время активно обсуждается и исследуется научной общественностью, как одна из высокоэффективных и достаточно простых по конструкции электрических машин.

Впервые ЭМП предложил В. М. Морди еще в 1895 году. Но, к сожалению, на тот момент отсутствовали возможности современного автоматизированного проектирования, производства и электронные

компоненты управления. Однако, в последние десятилетия в связи с развитием моделирования на основе численных методов, а также современных технологий в силовой электронике и промышленности, ЭМП стали приобретать все больший интерес научной и производственной общественности.

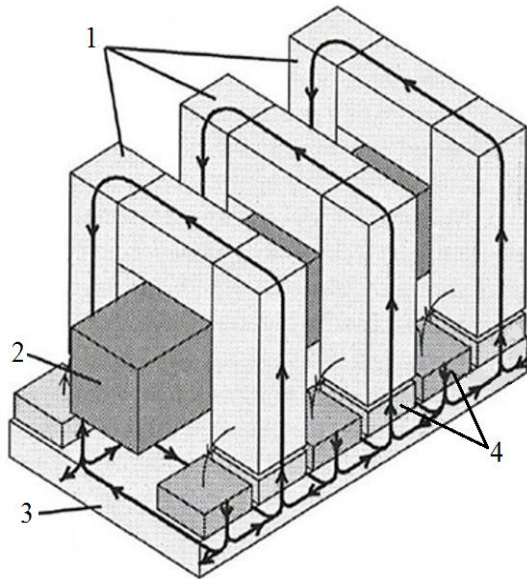
Это связано с тем, что они обладают высокими энергетическими показателями в генераторном режиме работы и высоким значением удельного вращающего момента в двигательном режиме (до 6 Н·м/кг).

Вместе с этим, ЭМП имеют ряд преимуществ по конструктивному исполнению и массогабаритным показателям, в сравнении с классическими электрическими машинами общего назначения [1-4].

Помимо этого, ЭМП позиционируются как многополюсные, высокомоментные, безредукторные машины, применяемые в качестве электрических двигателей или генераторов прямого привода.

Конструктивные особенности ЭМПП позволяют применять простые, экономичные и надежные на сегодня обмотки статора, простой кольцевой формы, без усложнения процесса намотки и схемы соединения выводных концов [5, 6].

Базовая конструкция ЭМПП изображена на рис. 1 с линиями магнитного потока, которые замыкаются через магнитно-мягкие П-образные сердечники статора, диск ротора и постоянные магниты.



1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 1. Конструкция и магнитная цепь ЭМПП.¹

Из-за отсутствия лобовой части обмотки статора электрические потери мощности меньше, чем в электрических машинах классической конструкции.

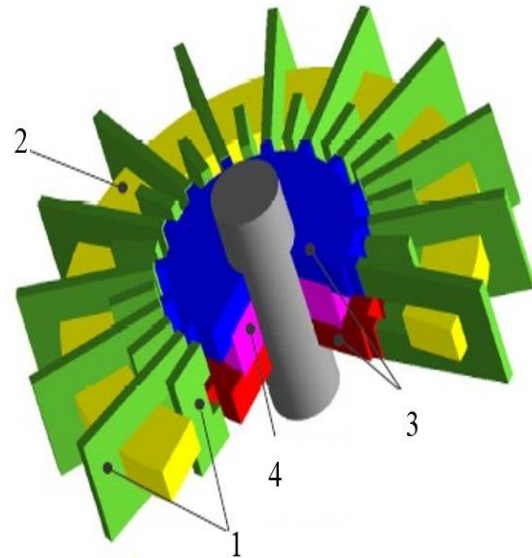
Кроме того, отсутствуют потери мощности, связанные с системой возбуждения из-за использования постоянных магнитов.

В целом, это приводит к гораздо большей эффективности при высокой удельной мощности машины.

За последние 50 лет в этом классе машин было предложено более сотни различных конструктивных исполнений [7–19]. Основными конструктивными исполнениями ЭМПП стали внешнее, внутреннее или дисковое расположения ротора, а обмотка статора выполняется одно-, двух- и трехфазной.

Одним из классических представителей ЭМПП с цилиндрическим ротором является конструкция, приведенная на рис. 2. Ее

исследование выполнено ученым G. Kastinger [8]. По сравнению с классическими концепциями ЭМПП здесь предложены магнитные шунты в межполюсном пространстве статора, для уменьшения потоков рассеяния магнитного поля от действия неактивных постоянных магнитов в межполюсном пространстве статора.



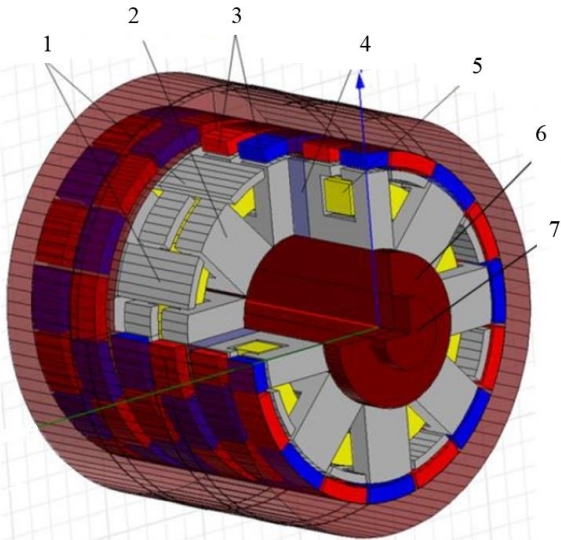
1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 2. Расположение элементов магнитной системы ЭМПП с цилиндрическим ротором.²

Конструкция ЭМПП, предложенная в [7], имеет внешний ротор и когтеобразные полюса статора (рис. 3). Как подчеркивает автор, она похожа на конструкцию ротора гибридного шагового двигателя.

В этой конструкции на внутренней поверхности ротора, в виде стального пустотелого цилиндра, наклеены постоянные магниты с чередующейся полярностью. Машина представляет собой трехфазную ЭМПП со сдвигом каждого следующего ряда П-образных полюсов статора на 1/3 от зубцового деления предыдущего ряда.

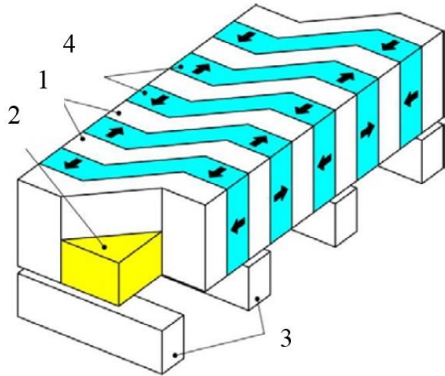
Конструкция с внешним ротором обладает большим плечом действия силы, и как следствие, большим вращающим моментом в двигательном режиме работы, по сравнению с конструкцией ЭМПП с внутренним ротором [21].



1 - шунты, 2 - сердечник статора, 3 - постоянные магниты, 4 - дистанционное кольцо, 5 - обмотка статора, 6 - сердечник ротора, 7 - вал.

Рис. 3. Конструкция ЭМПП с внешним цилиндрическим ротором.³

Интересную конструкцию линейного двигателя предложил Deok je Bang в 2010 году [6]. Она представляет собой одностороннюю, однофазную ЭМПП с П-образными сердечником и пассивным ротором, как показано на рис. 4. Монолитные стальные сегменты были изготовлены из цельного куска металла в силу сложности шихтовки такой формы.



1 - сердечник статора, 2 - обмотка статора, 3 - сердечник ротора, 4 - постоянные магниты.

Рис. 4. Фрагмент линейного ЭМПП.⁴

Данная конструкция обеспечивает жесткое закрепление постоянных магнитов между полюсами статора и строгое соблюдение их полярности с надежной фиксацией без склеивания. Однако, сегменты полюса статора представленной формы достаточно трудоемки в изготовлении, что удорожает стоимость конструкции в целом.

Важным критерием отбора типа конструктивного исполнения ЭМПП для исследования и изготовления является, прежде всего, эффективность и технологичность конструкции. Поэтому в работе будет уделено внимание конструкции ЭМПП с дисковым ротором (рис. 5).

Такая конструкция наименее трудоемка в изготовлении, а поклейка и крепление постоянных магнитов на диск ротора гораздо легче, чем на внутреннюю поверхность цилиндра. Тем не менее, необходимо учитывать и тот факт, что диск с валом должен быть жестко зафиксирован в подшипниках, во избежание перекоса и неравномерности воздушного зазора.

ЭМПП с дисковой конструкцией ротора является относительно новым типом электрической машины и получила «вторую жизнь» благодаря использованию современных постоянных магнитов на основе NdFeB и развитию элементной базы в электронике.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является анализ генератора с поперечным магнитным потоком с дисковым ротором, а именно выбор оптимального количества полюсов сердечника статора и уменьшение момента сопротивления от действия силы одностороннего магнитного притяжения, что не было рассмотрено ранее и является новизной данной работы. Также рассмотрены способы увеличения электродвижущей силы, как одного из важнейших показателей эффективности работы генератора, в результате чего работа является актуальной.

II. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый генератор с поперечным магнитным потоком (ГПП) представляет собой электрическую машину, состоящую из двух статоров и дискового ротора, на котором расположены в два ряда постоянные магниты с каждой стороны. Каждый статор, в свою очередь, состоит из кольцевой обмотки, на которую равноудалено одеты шихтованные П-образные сердечники, изготовленные из листовой электротехнической стали (рис. 5) [22].

В основе принципа действия ГПП, как и любого другого генератора, лежит закон электромагнитной индукции. Для его

^{3,4} Appendix 1

выполнения необходимо, чтобы на роторе постоянные магниты располагались с чередованием полярности в шахматном порядке и количеством одна пара на один П-образный сердечник статора.

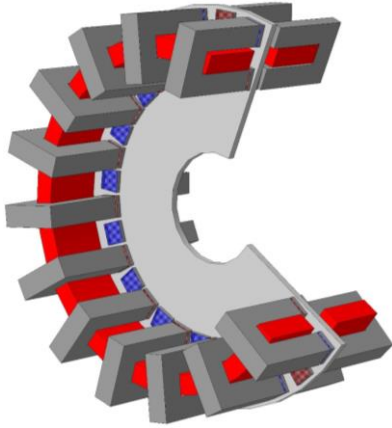


Рис. 5. Трехмерная модель с вырезом 16-ти полюсного ГПП с дисковым ротором.⁵

Для выполнения закона электромагнитной индукции необходимо перемагничивание сердечника статора, поэтому число пар постоянных магнитов должно быть в два раза больше, чем самих П-образных сердечников. Таким образом, общее количество постоянных магнитов превышает количество П-образных сердечников в 4 раза. На рис. 6 приведен эскиз дискового ротора 16-ти полюсного ГПП, на котором штриховой линией показано где будут располагаться полюса статора.

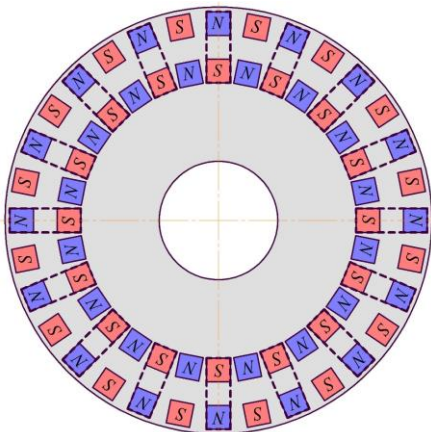


Рис. 6. Эскиз ротора 16-ти полюсного ГПП.⁶

Постоянные магниты, которые расположены не под П-образным сердечником никакой полезной работы не совершают, а создают магнитное поле рассеяния. Известны различные способы борьбы с этим полем рассеяния, в частности –

использование магнитных шунтов между П-образными сердечниками. Это приводит к увеличению ЭДС генератора за счет подмагничивания магнитных шунтов. Однако, стоит отметить, что это так же приводит к созданию дополнительного тормозного момента [23].

Сотрудниками кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ» совместно с сотрудниками кафедры «Системы электропривода» Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике разработан, спроектирован и создан экспериментальный образец низкооборотного ГПП с дисковым ротором ГПП-100/16, внешний вид которого показан на рис. 7, а его технические характеристики приведены в табл. 1.

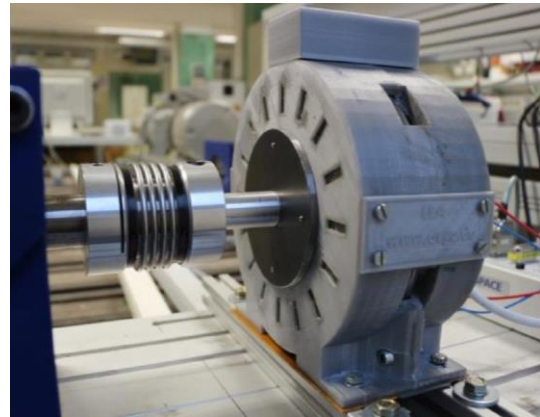


Рис. 7. Экспериментальный образец ГПП-100/16.⁷

Таблица 1²⁰.
Номинальные данные и размеры ГПП-100/16²¹

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	24
Номинальная частота вращения, об/мин Nominal speed, rpm	20
Количество статоров Number of stators	2
Количество полюсов на статоре Number of poles on the stator	16
Внешний диаметр сердечника статора, мм External diameter of the stator core, mm	176
Длина машины, мм Machine length, mm	90
Длина воздушного зазора, мм Air gap length, mm	1

Проведенные экспериментальные исследования ГПП-100/16 подтвердили расчетные значения и показали, что при номинальной частоте вращения в его катушках наводится ЭДС синусоидальной формы с максимальным значением около 33 В.

III. Пути повышения ЭДС в ГПП

Значение ЭДС, которое наводится в катушках ГПП определяется как:

$$E = \sum_0^p 4.44 \cdot \Phi \cdot W \cdot f, \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток в П-образном сердечнике статора;

W – количество витков в катушке статора;

f – частота перемагничивания сердечника статора.

Таким образом, влиять на величину ЭДС, которая наводится, в катушках статора ГПП, можно изменением одного из этих параметров. Величина магнитного потока зависит от запасенной энергии постоянного магнита, то есть от его объема и величины остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы.

Частота перемагничивания сердечника статора, как и в каждой синхронной машине, определяется следующей формулой:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \quad (2)$$

Таким образом, возможно два пути влияния на частоту перемагничивания сердечника статора: первый – увеличение частоты вращения ротора и второй – увеличение количества П-образных сердечников. Первый вариант не приемлем, так как одним из условий создания тихоходного генератора является фиксированное значение его частоты вращения. Остается только возможность изменять количество П-образных сердечников.

Для сравнения различных конструктивных исполнений проведем постепенное варьирование каждым из этих параметров, при соблюдении следующих условий:

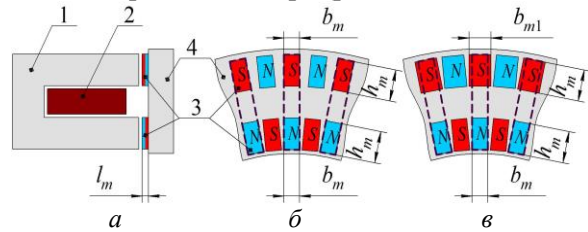
– внешний и внутренний диаметры, а также длина сердечника статора остаются величиной постоянной;

– площадь паза под катушку статора в каждой модели не изменяется;

– используются постоянные магниты с остаточной магнитной индукцией 1,3 Тл;

– длина воздушного зазора в каждой модели одинаковая и составляет 1 мм.

Исходя из принципа действия ГПП необходимо соблюдение чередования полярности постоянных магнитов на роторе (рис. 9, а) и количества пар постоянных магнитов, которое должно быть в два раза больше, чем П-образных сердечников магнитопровода статора (рис. 9, б).



1 - П-образный сердечник статора;

2 - катушка статора; 3 - постоянные магниты;

4 - сердечник ротора.

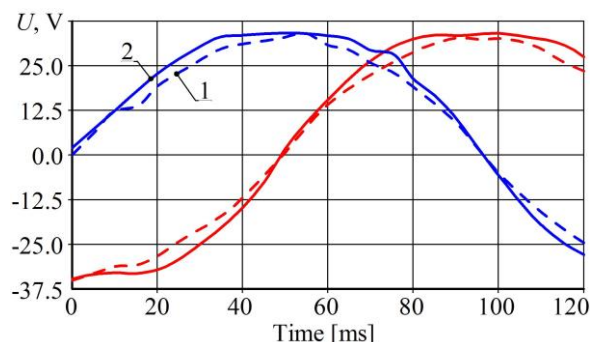
а - поперечное сечение; б - продольный разрез с одинаковыми по размерам постоянными магнитами; в - продольный разрез с различными по размерам постоянными магнитами.

Рис. 8. Эскизы магнитной системы ГПП.⁸

Так как ГПП выполняется с дисковым ротором, то постоянные магниты будут расположены на дисковом роторе по внешнему и внутреннему диаметрам, размеры которых заданы размерами П-образного сердечника. Поэтому исходя из условий, когда на длине окружности внутреннего диаметра необходимо расположить стандартные по размерам (b_m – ширина, h_m – высота, l_m – длина) постоянные магниты в количестве $2p$ таким образом, чтобы промежуток между ними был минимален и составлял $\delta_m = 0.1-0.2$ мм. Поэтому размеры поперечного сечения П-образного сердечника магнитопровода статора будут равняться размеру постоянного магнита на роторе. Поскольку эта площадь по всей длине пути следования магнитного потока не изменяется, то размер постоянного магнита на внешнем диаметре должен быть таким же. Это приводит к тому, что расстояние между постоянными магнитами не удовлетворяет условию $\delta_m = 0.1-0.2$ мм. Для выполнения этого условия выберем ближайший стандартизированный постоянный магнит, в котором высота и длина будут такими же, а ширина чуть больше и равна b_{m1} .

⁸ Appendix 1

Влияние увеличения ширины постоянного магнита внешнего диаметра на величину ЭДС ГПП рассчитано на трехмерных моделях в программной среде Ansys Maxwell [25] и показано на рис. 10.



1 - модель с одинаковыми по размерам постоянными магнитами;
2 - модель с различными по размерам постоянными магнитами.

Рис. 9. График ЭДС, наводимый в катушке статора.⁹

Исходя из результатов моделирования видно, что увеличение ширины постоянного магнита на внешнем диаметре привело к незначительному увеличению площади под графиком ЭДС, т.е. большей отдаче энергии постоянным магнитом за одинаковый период времени, однако амплитуда ЭДС не изменилась. Полученный результат считается целесообразным, поскольку контакт с краем П-образного сердечника статора будет длиннее в конструкции, изображенной на рис.9, в, чем в конструкции изображена на рис.9, б.

В рассматриваемой конструкции ГПП увеличение количества П-образных сердечников возможно только с одновременным уменьшением их ширины. Это связано с тем, что внешний диаметр сердечника статора необходимо оставить величиной постоянной. Для анализа создан ряд трехмерных моделей с количеством П-образных сердечников от 16 до 64 с шагом 8, некоторые эскизы которых показано на рис. 11 [24].

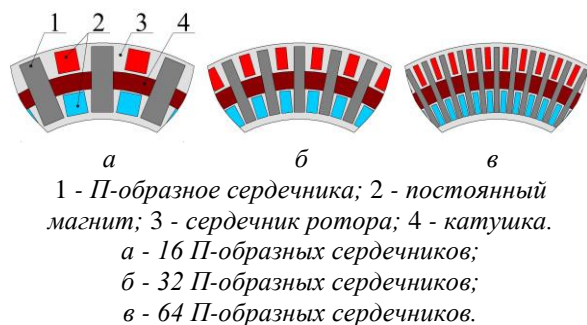


Рис. 10. Эскизы магнитной системы ГПП.¹⁰

После завершения трехмерного моделирования в программе Ansys Maxwell получено графики ЭДС, приводятся в катушках статора. Значение каждой ЭДС меняется по синусоидальному закону, а для 16-ти полюсной конструкции максимальное значение ЭДС составляет 31 В (рис. 12).

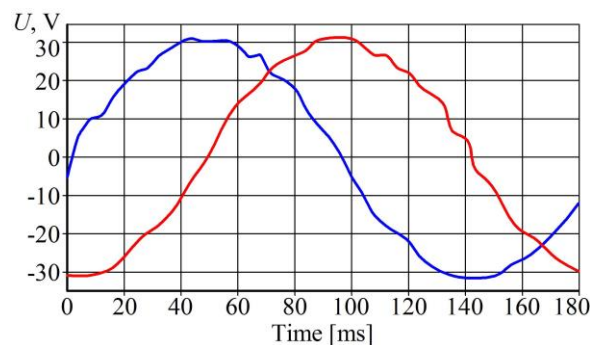


Рис. 11. График ЭДС, наводимый в катушке статора 16-ти полюсного ГПП.¹¹

Моделирование электромагнитных процессов, для каждого из вариантов конструкции также показало, что уменьшение ширины полюса, а соответственно и ширины постоянного магнита, приводит к значительному уменьшению насыщения самого полюса (рис. 13). Это связано с тем, что запасенная энергия в магните уменьшается пропорционально уменьшению объема самого магнита, а величина воздушного зазора и длина пути замыкания силовой линии магнитного потока остается величиной постоянной.

После проведения электромагнитного расчета программа Ansys Maxwell [25] позволяет получить значение магнитной индукции в каждой точке трехмерной модели. Среднее значение насыщения П-образного сердечника статора показано на рис. 14. Моделирование показало, что уменьшение насыщения П-образного сердечника статора происходит по нелинейному закону.

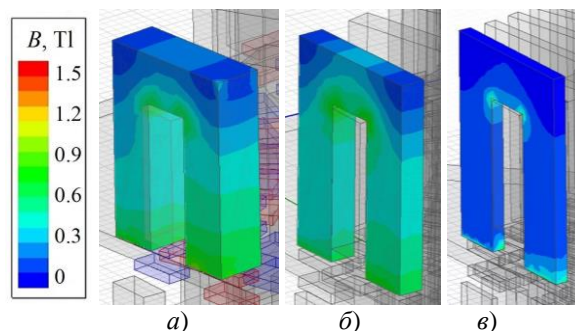


Рис. 12. Картина насыщения полюса статора ГПП с 16 (а), 32 (б) и 64 (в) полюсами.¹²

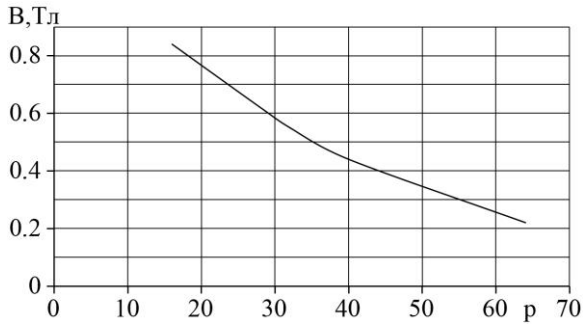


Рис. 13. Зависимость среднего значения магнитной индукции в П-образном сердечнике статора от их количества.¹³

Зная форму кривой зависимости магнитной индукции от количества П-образных сердечников на статоре можно подобрать уравнение для её аппроксимации. Для достижения этой цели можно использовать линейную, экспоненциальную, логарифмическую или полиномиальную аппроксимацию. Из всех перечисленных видов аппроксимации наиболее удачной для данного случая считается экспоненциальная аппроксимация. Таким образом, аппроксимация графика среднего значения магнитной индукции в П-образных сердечниках статора ГПП при их различном количестве имеет следующее выражение:

$$B = 1.34 \cdot e^{-0.028p} . \quad (3)$$

Подставляя найденные ранее выражения (1), (2) и (3) в формулу (4), получим уравнение ЭДС в катушке ГПП

$$E = 0.025 \cdot \pi \cdot k_{pm} \cdot p \cdot n \cdot W \times \left((d_s + b_i)^2 - d_s^2 \right) \cdot e^{-0.028p} . \quad (4)$$

где: k_{pm} – коэффициент заполнения сердечника ротора постоянными магнитами;

d_s – внутренний диаметр сердечника статора;

b_i – высота постоянного магнита.

Как видно из уравнения, зависимость $E(p)$ имеет нелинейный характер. Если подставить в это уравнение геометрические размеры 16-ти полюсного ГПП, можно построить зависимость ЭДС от количества полюсов и найти максимум ЭДС. В то же время можно оперировать двумя величинами: количеством полюсов и числом витков в катушке статора.

Используя программу Ansys Maxwell [25] можно получить зависимость значений ЭДС в катушке в зависимости от количества полюсов статора. Данная зависимость показана на рис. 15 линией из точек ($W = 1000$, Maxwell).

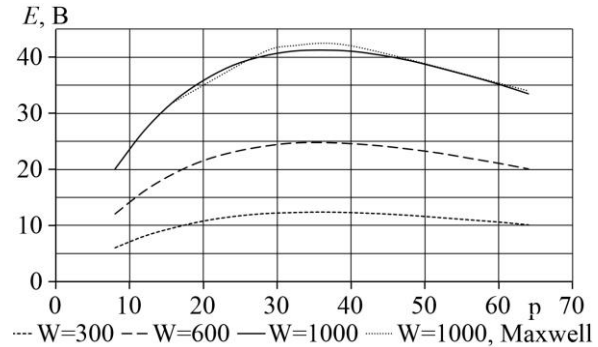


Рис. 14. Зависимость ЭДС от числа полюсов статора.¹⁴

Анализируя рис.15 можно сделать вывод, что:

- аналитический расчет показал достаточно высокую точность полученных результатов по сравнению с расчетом в программе Ansys Maxwell;

- максимальное значение ЭДС приходится на количество полюсов статора ГПП, которое находится в диапазоне от 32 до 38. Причем такая тенденция соблюдается и при других количествах витков обмотки.

Из технологических соображений легче изготовить конструкцию генератора с меньшим количеством полюсов на статоре, поэтому наилучшей примем модель с 32 полюсами на статоре, так как дальнейшее увеличение полюсности не приводит к увеличению ЭДС в катушках статора.

IV. ПУТИ УМЕНЬШЕНИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Постоянные магниты – это элементы, которые позволяют конструировать оригинальные электрические генераторы для альтернативных источников энергии и, неважно, какими способами они будут приводиться в движение: ветром, водой.

В восьмидесятые годы прошлого века ученые разработали новый магнитный материал – неодим-железо-бор (NdFeB) и начиная с 1984 г. началось широкое применение его в промышленности. Магниты NdFeB имеют широкий диапазон рабочих

температур (от -40°C до $+150^{\circ}\text{C}$), некоторые их виды можно использовать до $+200^{\circ}\text{C}$.

Чтобы избежать коррозии, сплав NdFeB покрывают цинком, никелем, медью или комбинацией этих материалов. Кроме этого, во избежание возможных химически нестабильных соединений в структуре сплава процесс изготовления проводится при отсутствии воздуха.

В настоящее время магниты NdFeB очень широко используются в двигателях электроприводов или в конструкциях генераторов малой мощности. Использование более энергоёмких постоянных магнитов позволяет сделать конструкцию ГПП компактной. Однако, следует помнить, что одновременно с увеличением мощности постоянного магнита растёт и сила притяжения постоянного магнита к сердечнику статора, а также момент сопротивления, который необходимо преодолеть, чтобы повернуть ротор ГПП с места.

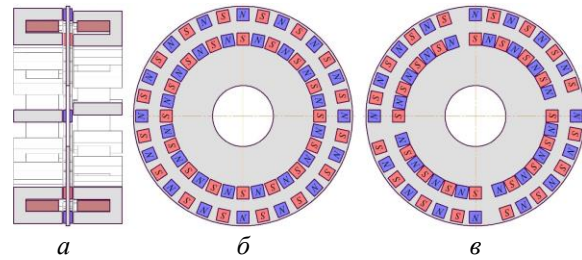
Вопрос уменьшения момента сопротивления от действия постоянных магнитов, которое создается за счет силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП) к П-образным сердечникам на статоре, является актуальным с точки зрения уменьшения потерь мощности. Критерием уменьшения тормозных составляющих момента является сохранение величины ЭДС, которая наводится в кольцевых обмотках статора.

Одним из вариантов уменьшения тормозного момента сопротивления является увеличение величины воздушного зазора. Это является достаточно простым, но не приемлемым решением, поскольку это приведет к существенному уменьшению ЭДС.

Другим вариантом уменьшения тормозного момента сопротивления является изменение расположения постоянных магнитов на диске ротора таким образом, чтобы они находились с неравномерным смещением относительно П-образных сердечников на статоре и друг относительно друга. Сравнение поперечных сечений классического исполнения и неравномерного распределения постоянных магнитов показано на рис. 16.

Анализ магнитной системы и расчет был проведен для 16-полюсной конструкции генератора, однако его результаты и описанные выше способы борьбы с моментом сопротивления дискового ротора в целом

можно считать действенными и эффективными для любого другого числа полюсов генератора с поперечным магнитным потоком.



*а - продольный разрез;
б - поперечное сечение при равномерном распределении постоянных магнитов;
в - поперечное сечение при неравномерном распределении постоянных магнитов.*

Рис. 15. Эскизы магнитной системы ГПП-100/16.¹⁵

Предложенное неравномерное распределение постоянных магнитов значительно влияет на путь замыкания силовой линии магнитного поля, и будет происходить не симметрично, а с определенным смещением. Это приводит к уменьшению составляющих тормозного момента, так как в одновременном сцеплении с П-образными сердечниками на статоре находятся не все постоянные магниты ротора, а только их часть.

В программной среде ANSYS Maxwell [25] выполнено трехмерное моделирование магнитного поля для трех вариантов конструкции, а результаты сведены табл. 2.

Исходя из полученных результатов моделирования видно, что предложенная конструкция ротора с неравномерным распределением постоянных магнитов позволяет снизить влияние момента сопротивления вращению от действия постоянных магнитов, при незначительном уменьшении ЭДС, которое наводится в катушках генератора.

V. ПРОГИБ РОТОРА ГПП ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ОМП

Конструкция ГПП с дисковым ротором не симметрична в магнитном отношении относительно плоскости, проходящей перпендикулярно оси и посередине ротора. Таким образом, когда под П-образными сердечниками одного статора будут расположены постоянные магниты, то под вторым статором – они будут сдвинуты на

половину полюсного деления. Это объясняется принципом действия и на рис. 5, а этот сдвиг видно на осциллограмме ЭДС. Кроме того, во время сборки ГПП, ротор взаимодействует с одним статором без магнитного «противовеса» со стороны второго статора. Данный факт значительно усложняет сборку генератора, поскольку сила ОМП ротора к полюсам статора составляет 200 Н.

Таблица 2²².
Результаты моделирования²³

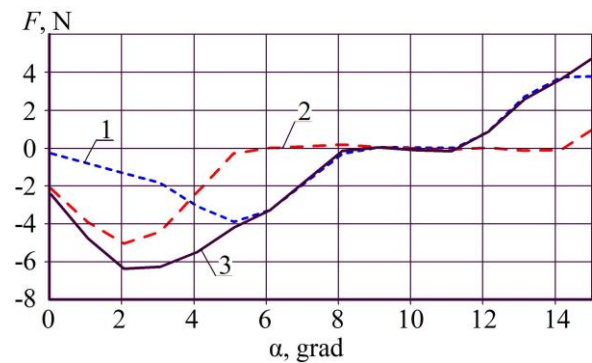
Разновидность конструкции ГПП TFG design variety	ЭДС одной катушки EMF of one coil		Момент сопротивления вращению Resistance torque	
	V	о.е. r.u.	Н·м N·m	о.е. r.u.
1	2	3	4	5
Базовое исполнение Basic design	24	1	5	1
Увеличение длины воздушного зазора 2 раза Increasing the air gap length 2 times	16	0,7	4,2	0,83
Уменьшение длины постоянного магнита на 20% Reducing the permanent magnet length by 20%	19	0,8	3,9	0,78
Неравномерное распределение постоянных магнитов Uneven distribution of permanent magnets	20	0,83	3,1	0,62

VI. ПРОГИБ РОТОРА ГПП ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ОМП

Конструкция ГПП с дисковым ротором не симметрична в магнитном отношении относительно плоскости, проходящей перпендикулярно оси и посередине ротора. Таким образом, когда под П-образными сердечниками одного статора будут расположены постоянные магниты, то под вторым статором – они будут сдвинуты на половину полюсного деления. Это

объясняется принципом действия и на рис. 5, а этот сдвиг видно на осциллограмме ЭДС. Кроме того, во время сборки ГПП, ротор взаимодействует с одним статором без магнитного «противовеса» со стороны второго статора. Данный факт значительно усложняет сборку генератора, поскольку сила ОМП ротора к полюсам статора составляет 200 Н.

При вращении дискового ротора с постоянными магнитами, на него будет действовать переменная сила ОМП, которая может привести к изгибу диска ротора на внешнем диаметре. Значение данной силы рассчитано в программной среде ANSYS Maxwell [25] и показано на рис. 17.



1 - внутренний круг; 2 - внешний круг;
3 - суммарная сила

Рис. 16. График действия силы ОМП на один магнит при повороте ротора.¹⁶

Согласно результатам расчета видно, что сила, действующая на постоянные магниты, и соответственно на диск ротора, не равномерна: ближе к краю диска, т.е. на внешнем диаметре, сила больше и ее максимум составляет 5 Н, а на внутреннем круге – меньше и составляет 1,3 Н от каждого постоянного магнита. На рис. 18 схематично стрелками показано направление действия силы ОМП.

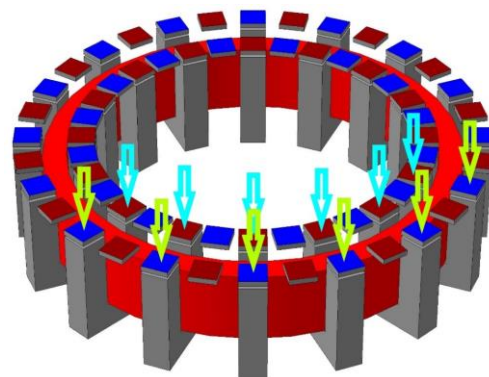


Рис. 17. Силы ОМП, действующие через один магнит.¹⁷

При работе ГПП такой прогиб недопустим, так как при уменьшении воздушного зазора постоянные магниты могут механически повредить себя и полюса статора в случае недостаточной жесткости конструкции диска ротора (рис. 19).

В программе АСКОН Компас-3D проведено твердотельное моделирование с помощью приложения АРМ FEM. Для этого, по существующей трехмерной модели ротора ГПП-100/16 задано распределенную силу на поверхности каждого постоянного магнита, значение которой получено из расчета в программной среде ANSYS Maxwell [25]. Так же заданы совпадающие поверхности и выбраны неподвижные поверхности – внутренний диаметр диска ротора, который через посадку с натягом сопрягается с валом. В качестве материала вала ГПП выбран алюминиевый сплав марки Д16, сердечник ротора Сталь 10, постоянные магниты NdFeB марки N48.

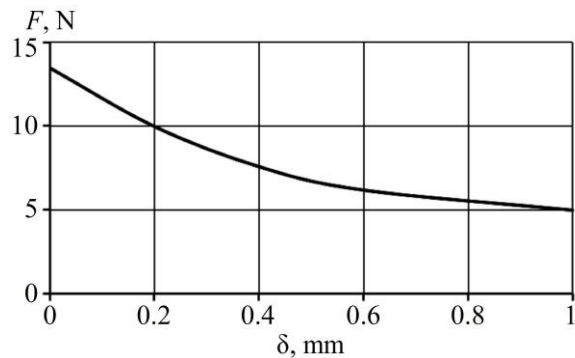
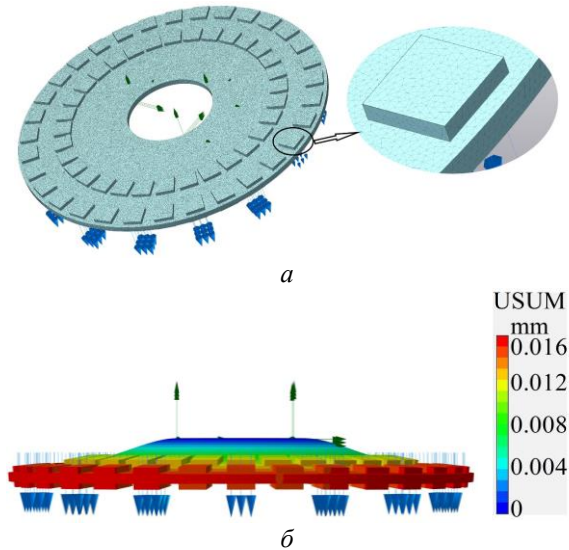


Рис. 18. Зависимость силы магнитного притяжения постоянного магнита от величины воздушного зазора.¹⁸

Генерация сетки конечных элементов выполнена в ручном режиме, с указанием наибольшей длины ребра тетраэдра в половину толщины постоянного магнита, и составляет 1 мм. Трехмерная модель со сгенерированной сеткой показана на рис.20, а. В результате расчета получены значения деформации, а картина перемещений, показана на рис. 20, б.

Значения деформации не превышают максимально допустимое значение для пластической деформации материала и имеет коэффициент запаса для максимально напряженного места на уровне 8 единиц.

Из расчета ротора на прогиб от действия силы ОМП общий прогиб диска составил – 0.016 мм, что составляет 1,5 % от длины воздушного зазора, что является достаточным для надежной работы генератора.



а - подготовленная модель к расчету;
б - деформированный ротор.

Рис. 19. Расчет ротора ГПП-100/16 на прогиб от действия силы ОМП.¹⁹

Для сравнения, как изменится сила ОМП при увеличении длины воздушного зазора и при неравномерном распределении постоянных магнитов, в программной среде ANSYS Maxwell выполнено трехмерное моделирование этих моделей, а результаты сведены табл. 3.

Как видно из табл.3, максимальное значение силы ОМП приходится на базовую конструкцию, таким образом нет смысла проводить механические расчеты для двух других конструктивных исполнений, поскольку сила ОМП снизилась, а значит запас по деформации и перемещению вырос.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования и экспериментального исследования показали, что:

1. Увеличение ширины постоянного магнита на внешнем диаметре приводит к незначительному увеличению площади под графиком ЭДС и большей отдаче энергии за одинаковый период времени, однако амплитуда ЭДС не изменяется.

2. Уменьшение ширины полюса, а соответственно и ширины постоянного магнита, приводит к значительному уменьшению насыщения самого полюса.

3. Уменьшение количества П-образных сердечников с 64 до 32 и 16 не приводит к повышению частоты ЭДС в катушках, и вообще снижает амплитудное значение ЭДС ГПП. В итоге, можно отметить, что частота перемагничивания сердечников статора зависит

только от количества постоянных магнитов на роторе, а амплитудное значение ЭДС от количества П-образных сердечников статора.

Таблица 3²⁴.

Результаты моделирования силы ОМП²⁵

Разновидность конструкции ГПП TFG design variety	Сила ОМП одного магнита, Н One-sided magnetic attraction force of a single magnet, N		
	Внешний диаметр External diameter	Внутренний диаметр Inner diameter	Суммарное значение Total value
Базовое исполнение Basic design	5	1,3	6,3
Увеличение длины воздушного зазора в 2 раза Increasing the air gap length 2 times	2,1	0,5	2,6
Уменьшение длины постоянного магнита на 20% Reducing the permanent magnet length by 20%	4,1	0,9	5
Неравномерное распределение постоянных магнитов Uneven distribution of permanent magnets	3,4	0,9	4,3

4. Максимальное значение ЭДС наводится в катушках ГПП, при наличии на статоре П-образных сердечников в количестве от 32 до 38 штук. Данная тенденция сохраняется при разном количестве витков в самих катушках статора.

5. Предложенная конструкция дискового ротора ГПП с неравномерным распределением постоянных магнитов на нем является лучшим результатом среди

рассмотренных конструктивных исполнений, поскольку приводит к уменьшению момента сопротивления при вращении на 38%.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Design and magnetic circuit of TFM (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - rotor core, 4 - permanent magnets).

²Fig. 2. The location of the TFM magnetic system elements with a cylindrical rotor (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - rotor core, 4 - permanent magnets).

³Fig. 3. TFM design with an external cylindrical rotor (1 - shunts, 2 - stator core, 3 - permanent magnets, 4 - distance ring, 5 - stator winding, 6 - rotor core, 7 - shaft).

⁴Fig. 4. Fragment design of the linear TFM (1 - stator core, 2 - stator winding, 3 - the rotor core, 4 - permanent magnets).

⁵Fig. 5. Three-dimensional TFG 16-poles cutout model with a disk rotor.

⁶Fig. 6. Sketch of the TFG 16-poles rotor.

⁷Fig. 7. TFG-100/16 experimental sample.

⁸Fig. 8. TFG magnetic system sketches (1 - U-shaped stator core, 2 - stator coil, 3 - permanent magnets, 4 - the rotor core, a - cross section; b - longitudinal section with the same size permanent magnets, c - longitudinal section with various sized permanent magnets).

⁹Fig. 9. EMF value that was induced in the stator coil (1 - model with the same size of permanent magnets, 2 - model with various size of permanent magnets).

¹⁰Fig. 10. TFG magnetic system sketches (1 - U-shaped core, 2 - permanent magnet, 3 - the rotor core, 4 - coil, a - 16 U-shaped cores, b - 32 U-shaped cores, c - 64 U-shaped cores).

¹¹Fig. 11. EMF value that was induced in the stator coil calculated by using Ansys Maxwell software.

¹²Fig. 12. The saturation picture of the TFG stator pole with 16 (a), 32 (b) and 64 (c) poles.

¹³Fig. 13. The dependence of the magnetic induction average value in the U-shaped stator core on their quantity.

¹⁴Fig. 14. The dependence of the EMF on the number of stator poles.

¹⁵Fig. 15. TFG-100/16 magnetic system sketches (a - longitudinal section, b - cross section with a even distribution of permanent magnets, c - cross section with uneven distribution of permanent magnets).

¹⁶Fig. 16. The graph of the one-sided magnetic attraction force effect on one magnet during the rotor rotation (1 - inner circle, 2 - outer circle, 3 - total force).

¹⁷Fig. 17. The one-sided magnetic attraction force forces acting through one magnet.

¹⁸Fig. 18. The dependence of the permanent magnet magnetic force on the size of the air gap.

¹⁹Fig. 19. The TFG-100/16 rotor band calculation depending on the one-sided magnetic attraction force (a - prepared model for calculation; b - deformed rotor as a result of calculation).

^{20,21}Table 1. Nominal data and dimensions of the TFM-100/16.

^{22,23}Table 2. Simulation results.

^{24,25}Table 3. Simulation results of the one-sided magnetic attraction force.

Литература (References)

- [1] Weh H. *Transversalflußmaschine. Elektrische Antriebe – Grundlagen.* Springer, 2007.
- [2] Jiang J. *Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversal-flussmaschinen.* Braunschweig, 1988. 192 p.
- [3] Svecharenko D. Transverse flux machines for sustainable development – road transportation and power generation. *PEDS-2007*, 2007, pp. 1108–1114.
- [4] Svecharenko D. *On design analysis of a novel transverse flux generator for direct-driven wind application.* Sweden, 2010, 151 p.
- [5] Werner U. Transverse flux generators with high power density in multi-megawatt wind turbines. *Wissenschaftsforum, Messe HUSUMBTIND*, 2005. 286 p.
- [6] Deokje Bang. *Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines*, 2010 / Deokje Bang. Дата оновлення 26.11.2018.
- [7] Dobzhanskyi O. *Study on permanent magnet transverse flux machine.* Louisiana State, 2012. 149 p.
- [8] Kastinger G. Design of a novel transverse flux machine. *Body Electronics, Engineering Advanced Development*, Bühl, Germany, pp. 1–6.
- [9] Bang D. *Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines.* Delft, 2010. 275 p.
- [10] Lima J. *Transverse Flux Permanent Magnet Generator for Ocean Wave Energy Conversion.* Available at: <https://hal.inria.fr/hal-01566599/document> (accessed 08.12.2018).
- [11] Wan-Tsun Tseng. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu einem permanentmagneterregten Transversalfluß-Synchronearmotor in Sonderbauform. 2008.
- [12] Kang D.H., Bang D.J., Kim J.M., Jeong Y.H., Kim M.H. A Study on the design of PM excited transverse flux linear motor for ropeless elevator. *Trans. KIEE*, 2000, vol. 49b, no. 3, pp. 46-54.
- [13] Hackmann W. *Systemvergleich unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, permanenterregte Synchronmaschine, Transversal-flussmaschine.* Shaker, 2003. 260 p.
- [14] Gräf M. *Einseitige Transversal-flußmaschine mit multifunktionellem, keramischem Tragring.* Shaker, 2001. 183 p.
- [15] Dubois M.R., Polinder H., Ferreira J.A. Transverse-flux permanent magnet (TFPM) machine with toothed rotor, *IEEE Transaction on Power Electronics*. 2002, no. 487, pp. 16-28.
- [16] Muljadi E., Drouilhet S., Holz R., Gevorgian V. Analysis of permanent magnet generator for wind power battery charging. *IEEE-IAS Annual Meeting*. 1996, vol. 1, pp. 541-548.
- [17] Polinder H., F.F.A. van der Pijl, Vilder G.J., Tavner P. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Trans. Energy Conversion*. 2006, vol. 21, pp. 725-733.
- [18] Masmoudi A., Elantably A. An approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion. *Electric machines and power systems*. 2000, no. 28, pp. 341-354.
- [19] Anpalaham P. Design of transverse flux machines using analytical calculations & finite element analysis, *Tech. Royal Institute of Technology, Stockholm*, 2001.
- [20] Lyubarsky, B.G. and etc. Simplified mathematical model of the magnetic field of the motor with a transverse field [Uproschennaya matematicheskaya model magnitnogo polya dvigatelya s poperechnym polem]. *Light engineering and electric power engineering*. 2008, no. 2, pp. 75–78. (In Russian).
- [21] Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user’s guide. *Ansys Inc.* Pittsburgh, 2012, 1006 p.

Сведения об авторах.



Егоров Андрей Владимирович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: yehorov.andrii@gmail.com



Дунев Алексей Александрович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: duniev.khpi@gmail.com



Масленников Андрей Михайлович к.т.н., доцент кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина. E-mail: x-maslennikov@yandex.ua



Штамманн Марио к.т.н., научный сотрудник кафедры систем электрического привода Магдебургского университета им. Отто-фон-Герике, Universitätsplatz 2, г. Магдебург, Германия. E-mail: mario.stamann@ovgu.de