

**Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго**

**НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА  
ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ  
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ**

*Статья посвящена оценке влияния магнитных помех, при исследовании термофлуктуационных процессов в режиме динамической токовой нагрузки силовой кабельной линии (СКЛ). На основе таких методов искусственного интеллекта, как нейронные сети и нечеткая логика исследовалась термическая стойкость изоляционных материалов СКЛ определяющих пропускную способность кабельной линии электроэнергетических систем. Сравнительный обзор существующих на данный момент традиционных неразрушающих методов прогнозирования термических процессов в СКЛ показал, что большинство методов обладают низкой точностью прогноза, а также обладают высокой степенью сложности и большим количеством необходимых вычислительных операций для получения необходимых данных прогноза термических процессов в СКЛ. Также большинство методов прогноза не способны работать в режиме реального времени, что является крайне существенным недостатком. Для решения данной проблемы необходимо прибегнуть к системам прогнозирования, которые строятся на базе искусственного интеллекта с применением методов машинного обучения. Наиболее перспективным на сегодня представляется метод искусственных нейронных сетей (ИНС). Показана необходимость разработки более совершенной методики анализа старения изоляционных материалов СКЛ. Обоснована актуальность задачи создания нейросетей (НС) для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий тепловода. Разработана нейросеть для определения температурного режима токоведущей жилы силового кабеля. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры, при этом исследовались различные нагрузочные режимы работы и функции изменения тока кабеля. Разработана нейросетевая модель в Matlab Simulink для прогнозирования температуры жилы кабеля. Создание, обучение и моделирование нейронной сети осуществлялось с помощью Neural Network Toolbox. Модель может быть использована в устройствах и системах непрерывного диагностирования силовых кабелей по температурным режимам.*

*Искусственный интеллект; нейронные сети; кабельные системы; оценка влияния магнитных помех; молекулярно сшитый полиэтилен; теплопроводность; XLPE – изоляция; электромагнитная совместимость; магнитные помехи.*

**N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago**

**NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN THE TASKS OF MONITORING  
THERMOFLUCTUATION PROCESSES OF A CABLE LINE TAKING INTO  
ACCOUNT THE INFLUENCE OF INTERFERENCE**

*The article is devoted to the assessment of the influence of magnetic interference, in the study of thermal fluctuation processes in the dynamic current load mode of a power cable line (SCL). On the basis of such artificial intelligence methods as neural networks and fuzzy logic, the thermal resistance of SCL insulating materials determining the throughput of the cable line of electric power systems was investigated. A comparative review of the currently existing traditional non-destructive methods for predicting thermal processes in SCR showed that most of the methods have a low prediction accuracy, as well as have a high degree of complexity and a large number of necessary computational operations to obtain the necessary data for predicting thermal processes in SCR. Also, most forecasting methods are not able to work in real time, which is an extremely significant drawback. To solve this problem, it is necessary to resort to forecasting systems that are based on artificial intelligence using machine learning methods. The method of arti-*

*ificial neural networks (ANN) seems to be the most promising today. The need to develop a more perfect method for analyzing the aging of SCR insulating materials is shown. The urgency of the problem of creating neural networks (NN) for assessing the throughput, calculating and predicting the temperature of SCL cores in real time based on the data of the temperature monitoring system, taking into account the change in the current load of the line and the external conditions of heat removal, has been substantiated. A neural network has been developed to determine the temperature regime of the current-carrying conductor of a power cable. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of temperature distributions was carried out, while various load operating modes and functions of changing the cable current were investigated. A neural network model was developed in Matlab Simulink for predicting the temperature of a cable core. The creation, training and modeling of the neural network was carried out using the Neural Network Toolbox. The model can be used in devices and systems for continuous diagnostics of power cables by temperature conditions.*

*Artificial intelligence; neural networks; cable systems; evaluation of the influence of magnetic interference; molecularly cross-linked polyethylene; thermal conductivity; XLPE – insulation; electromagnetic compatibility; magnetic interference.*

**Введение и постановка задачи.** Силовые кабели напряжением 6 (10) кВ, в системе электроснабжения потребителей городских электрических сетей являются наиболее протяжёнными элементами. Исследования причин отказов в кабельных линиях (КЛ) вызвана результатами анализа аварийности в местах с населением более 100 тыс. жителей, где повреждения КЛ 6 (10) кВ являются причиной 80–90 % всех отключений.

Во время эксплуатации на изоляцию КЛ 6 (10) кВ воздействует целая группа факторов: электрические, тепловые, климатические, механические, коррозия. Температура высоковольтной кабельной линии является важным эксплуатационным и диагностическим параметром. С одной стороны, она характеризует рабочую нагрузку КЛ, а с другой является признаком наличия и развития дефектов в изоляции. С повышением температуры существенно возрастает диффузия воды в полимеры, что снижает их механическую и электрическую прочность. В процессе длительной эксплуатации происходит старение изоляции, которое выражается в ухудшении её электрофизических характеристик. Возникает проблема определения механизма воздействия на изоляцию факторов, обусловленных действием тока нагрузки КЛ. Общеизвестно, что вне зависимости от токовой нагрузки КЛ при наличии разности потенциалов между слоями изоляции в этих слоях от электрического поля протекают поляризационные процессы смещения упруго связанных зарядов, которые обуславливают появление токов смещения до момента наступления установившегося состояния. Наличие в диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению токов утечки, на которые действует магнитное поле от тока нагрузки.

Таким образом, пропускная способность линий электропередачи зависит от температуры проводника. Допустимая токовая нагрузка СКЛ может быть получена из формулы превышения температуры жилы над температурой окружающей среды [26].

Токовая нагрузка в жилах кабеля приводит к возникновению кругового вращающегося поля, создающего магнитные потери в оболочке кабеля, и к дополнительному воздействию на изоляцию. Влияние электромагнитных полей на электропроводность технических диэлектриков обусловлено небольшим количеством свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева и старения изоляции при эксплуатации. Влияние магнитной составляющей электромагнитного поля (ЭМП) кабеля на формирование ЧР, пробоя изоляции уделено мало внимания. Этот фактор, действуя совместно с электрическими и тепловыми полями, может наряду с режимом работы

приводить к ускорению старения изоляции [2]. Когда эти факторы действуют в комплексе, то происходит процесс старения изоляции, с накоплением необратимых изменений, ухудшение диэлектрических и эксплуатационных свойств кабеля, рис. 1. Поэтому для оценки старения изоляции необходимо рассмотрение КЛ как единого электромеханического объекта, подверженного действию собственных электрического и магнитного полей.



Рис. 1. Факторы старения изоляции СКЛ

В связи с нестабильной пропускной способностью СКЛ процесс планирования режимов работы распределительных электросетей и обеспечение баланса мощности становится труднореализуемой задачей. Решением этой научно-технической проблемы станет обнаружение дефектов высоковольтного оборудования на ранней стадии их развития и, как следствие, предотвращение аварийных ситуаций, которые способны привести к серьезным негативным последствиям и повлиять на работу системы электроснабжения в целом.

При работе высоковольтного оборудования в пространстве возникают электромагнитные поля (ЭМП) различных частотных диапазонов, вызывающие нарушения электромагнитной совместимости (ЭМС) первичных (силовых) и вторичных цепей (датчиков контроля температуры, и др.). В связи с этим в работе предлагается ввести подсистемы прогнозирования термофлуктуационных процессов СКЛ в зависимости от энергопотребления подключенной нагрузки и влияния ЭМП на КЛ.

*Цель работы* – оценка пропускной способности, расчёт и прогнозирование температуры жилы СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом влияния на СКЛ факторов обусловленных магнитной составляющей собственного электромагнитного поля.

Системы прогнозирования строятся на базе искусственного интеллекта с применением методов машинного обучения. Наиболее перспективным представляется метод искусственных нейронных сетей, а для их обучения могут быть использованы в том числе открытые базы данных мониторинга крупных энергетических систем и погодных явлений. "On-Line" система мониторинга позволяет вовремя выявлять быстро развивающиеся дефекты на самых ранних стадиях, что позволяет оперативно предотвратить аварийную ситуацию с кабельными линиями высокого напряжения. Либо использование системы периодического мониторинга через определенные промежутки времени.

**1 Обзор существующих систем прогнозирования термических процессов в кабельных системах.** Обзор литературных источников показал [3, 4], что к основным функциям непрерывного мониторинга теплового режима СКЛ можно отнести следующие функции:

- ◆ Возможность для определения и проведения фиксации возникающих случаев превышения установленной производителем номинальной рабочей температуры для кабеля по времени и месту вдоль всей трассы КЛ;
- ◆ Возможность проводить своевременное предотвращение возникающих в линиях токовых перегрузок КЛ;
- ◆ Возможность проводить прогнозирование допустимой для кабельной линии нагрузки в случае достижения силовым кабелем максимальной для него рабочей температуры;
- ◆ Возможность для создания оптимальных токовых нагрузок для кабельной линии, которые обеспечивают непрерывность процесса электроснабжения всех подключенных потребителей и приведение к снижению вероятности возникновения аварийных событий.

Для выполнения всего перечня необходимых функций требуется в режиме реального времени решать ряд определенных вычислительных задач:

1. Производить своевременную оценку допустимой кабельной линией токовой нагрузки, исходя из фактических условий окружающей среды, оказывающих влияние на работу кабельной линии.
2. Необходимо выполнять своевременный расчёт текущей температуры для всех жил силовой кабельной линии.
3. Необходимо производить своевременное прогнозирование скорости нагрева СК в режиме реального времени. То есть, от текущего момента времени начала прогноза на некоторое время вперёд, определяемое специалистом при последнем значении токовой нагрузки жил.

Известны системы распределённого мониторинга температуры силовых кабелей устанавливаемые на кабельные системы напряжением от 10 кВ и более. Производители систем распределенного мониторинга и прогнозирования термических процессов в СКЛ полагают, что длина распределенного датчика мониторинга температур, может достигать 40 км. Погрешность измерения температуры не превышает 1°C, а точность определения места дефекта, возникшего в изоляции находится в пределах 1 м.

Объектом исследования являются силовые кабельные линии напряжением 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена [3]. При протекании тока по жиле максимальная температура будет возникать в слоях изоляции, которые непосредственно прилегают к жиле [3]. Поэтому при расчёте длительно допустимой величины тока нагрузки, должно выполняться условие не превышения температуры жилы 90°C ( $T_{ж} \leq 90^\circ\text{C}$ ) [5].

Тепловое поле для КЛ, как и для других объектов, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности (1), которое в общем случае определяет изменение распределения температуры в объеме рассматриваемого объекта в зависимости от времени.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\chi * \text{grad}(T)) + \frac{q_v}{c_v}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура, °K;  $t$  – время, с;  $q_v$  – мощность объемных источников тепла (объёмная плотность тепловыделения), Вт/м<sup>3</sup>;  $c_v$  – объёмная теплоемкость, Дж/(К·м<sup>3</sup>);  $\chi$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с. Коэффициент  $\chi$  определяют по формуле  $\chi = \lambda/c_v$ , где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

С применением аналитических преобразований и эмпирических формул была создана методика оценки тепловых стационарных режимов КЛ ИЕС 60287 [6], учитывающая все применяемые на практике конструкции КЛ. Модель Нейера-МакГрафа [7] лежит в основе стандарта ИЕС 60287, которую развили и применили к различным конструкциям КЛ другие авторы, например [8, 9].

Суть методики ИЕС 60287 сводится к определению величины допустимого тока нагрузки кабелей по формуле

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{T_{\text{доп}} - T_0 - Q_d(0.5R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4})}{R_{\text{ж}}R_{T1} + R_{\text{ж}}(1 + \Delta_1)R_{T2} + R_{\text{ж}}(1 + \Delta_1 + \Delta_2)(R_{T3} + R_{T4})}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{доп}}$  – допустимая рабочая температура кабеля (для СПЭ изоляции – 90°C), °C;  $T_0$  – температура окружающей среды, °C;  $Q_d$  – диэлектрические потери в изоляции на единицу длины, Вт/м;  $R_{\text{ж}}$  – электрическое сопротивление жилы переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м;  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ ,  $R_{T3}$ ,  $R_{T4}$  – тепловые сопротивления различных слоев конструкции кабеля и окружающей среды на единицу длины, °K·м/Вт;  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  – отношение общих потерь в металлическом экране и броне к сумме потерь в токопроводящей жиле.

Кроме оценки пропускной способности к задачам мониторинга теплового режима относят оценку температуры жилы в режиме реального времени и предупредительное (превентивное) устранение токовых перегрузок КЛ [10, 11]. Для выполнения этих задач требуется производить расчёты температуры в динамике, а для своевременного предотвращения токовых перегрузок требуется прогнозирование температур жил кабелей в режиме реального времени. Последнее означает, что необходимо постоянно прогнозировать нагрев кабелей на некоторое время вперёд, причем такое, чтобы была возможность принять меры по снижению нагрузки КЛ.

Получение аналитического решения уравнения (2) в динамике возможно при некоторых допущениях либо для простых частных случаев. При этом окончательные решения получаются громоздкими и содержат цилиндрические функции. Например, Холодный С.Д. в работе [12] решал задачу расчёта нагрева однофазного одиночного кабеля, проложенного в грунте. Поверхность грунта считалась изотермической, а кабель считался тонкостенной трубкой радиусом  $r_k$ . Для границы между кабелем и грунтом было записано уравнение теплового баланса:

$$-2\pi\lambda_{\text{гр}}r_k \frac{\partial T}{\partial r} = Q_k, \quad (3)$$

где  $Q_k$  – тепловые потери в кабеле, Вт/м;  $\lambda_{\text{гр}}$  – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К).

В результате математических преобразований была представлена формула для расчёта температуры в произвольной точке грунта, которая имеет следующий вид:

$$T(t) = \frac{Q_k}{2\pi\lambda_{\text{гр}}} \left[ \ln \frac{d}{d'} - \int_0^\infty \frac{J_0(x) - J_0\left(\frac{d}{d'}x\right)}{x} e^{-\frac{a}{d^2}x^2 t} dx \right], \quad (4)$$

где  $d$  и  $d'$  – расстояния от рассматриваемой точки до центра кабеля и до центра его зеркального изображения соответственно, м;  $J_0$  – цилиндрическая функция первого рода нулевого порядка.

Если вместо  $d$  подставить радиус кабеля  $r_k$  и вычислить соответствующее расстояние до изображения, то получим формулу для температуры на поверхности кабеля. Но для оценки теплового режима кабеля необходимо знать температуру жилы, которая будет значительно отличаться от температуры поверхности из-за низкой теплопроводности полиэтилена.

В другом подходе кабель считали бесконечно тонким линейным источником тепла, тогда решение уравнения (2) позволяет определять температуру на поверхности кабеля с помощью интегральной показательной функции

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-v}}{v} dv. \quad (5)$$

Формула для температуры на поверхности одиночного кабеля, проложенного на глубине  $h$  в грунте, имеет следующий вид:

$$T_k(t) = T_0 + Q_k \frac{1}{2\pi\lambda_{гр}} \left[ -Ei\left(-\frac{D_k^2}{16at}\right) + Ei\left(\frac{h^2}{at}\right) \right], \quad (6)$$

где  $D_k$  – внешний диаметр кабеля, м.

Предложение о расчете температуры на поверхности кабеля с помощью экспоненциального интеграла было реализовано в [13], где перепад температур между поверхностью кабеля и поверхностью грунта рассчитывали с помощью теории [14], а перепад температуры между жилой и внешней оболочкой, как и в [15], рассчитывали с помощью тепловой схемы замещения. Но расчёт её параметров выполняют с помощью метода Ван-Вормера. Так как тепловая волна от жилы и экрана не сразу достигает поверхности кабеля, то для согласования между двумя расчётными областями ввели некоторый коэффициент  $\alpha(t)$  («attainment factor»), который предложили определять следующим образом

$$\alpha(t) = \frac{\Delta T_{жк}(t)}{\Delta T_{жк}(\infty)}, \quad (7)$$

где  $\Delta T_{жк}$  перепад температур между поверхностью жилы и внешней поверхностью кабеля.

Результирующая формула для расчёта температуры жилы однофазного кабеля в КЛ имеет следующий вид:

$$T_{ж}(t) = \Delta T_{жк} + \alpha(t)T_{к}(t) + \alpha(t)T_{mn}(t). \quad (8)$$

В [17] авторы выполнили расчёт температуры жилы в режиме реального времени на основе данных о токовой нагрузке жилы и температуре в экране. Затем сопоставили результаты расчёта с экспериментальными данными. Измерения тока жилы и температуры экрана производили с интервалом 15 минут в течение суток. В расчётах учитывался тепловой поток от жилы  $Q_{ж}$  и тепловой поток, обусловленный изменением температуры металлической оболочки (экрана)  $\Delta T_{э}$ . Учёт влияния однократных ступенчатых скачков тока жилы ( $\Delta I_{ж} = I_{ж1} - I_{ж0}$ ) и температуры экрана  $\Delta T_{э}$  на изменение температуры жилы производили по следующей формуле:

$$(T_{жс} - T_{э})_t = Q_{ж0} R_{Tu} + \Delta Q_{жс} R_{Tu} \left(1 - e^{-\frac{1}{c_1 R_{Tu}} t}\right) + \Delta T_{э} \left(1 - e^{-\frac{1}{c_1 R_{Tu}} t}\right), \quad (9)$$

где  $Q_{ж0} = I_{ж20} R_{ж}$  – значение теплового потока жилы до скачка ток на величину;  $\Delta Q_{жс} = (I_{ж21} - I_{ж20}) R_{ж}$  – изменение теплового потока от жилы за счёт  $\Delta I_{жс}$ ,  $R_{ж}$  – электрическое сопротивление жилы переменному току без учёта теплового коэффициента сопротивления.

Для расчёта величины  $(T_{жс} - T_{э})$  с учётом постоянно изменяющихся тока жилы и температуры экрана авторы [8] представили их в виде ступенчатого графика. Влияние каждого скачка тока и температуры экрана учитывали с помощью формулы (9). В итоге расчётная формула для текущего момента времени получилась в виде суммы слагаемых, учитывающих предыдущие скачки тока.

В работе [17] с помощью такого же метода предлагают вычислять превышение температуры поверхности кабелей над температурой окружающей среды. В результате текущую температуру на поверхности одиночного кабеля определяют согласно приведенным выражениям:

$$T_k(t) = T_0 + \sum_{i=1}^m F_1(t, i) - \sum_{i=1}^{m-1} F_2(t, i);$$

$$F_1(t, i) = Q_k(i) \frac{1}{2\pi\lambda_{rp}} \left[ -Ei\left(-\frac{D_k^2}{16\alpha(t-t_{i-1})}\right) + Ei\left(-\frac{h^2}{\alpha(t-t_{i-1})}\right) \right]; \quad (10)$$

$$F_2(t, i) = Q_k(i) \frac{1}{2\pi\lambda_{rp}} \left[ -Ei\left(-\frac{D_k^2}{16\alpha(t-t_{i-1})}\right) + Ei\left(-\frac{h^2}{\alpha(t-t_{i-1})}\right) \right];$$

где  $m$  – число шагов, предшествующих текущему моменту времени  $t$ , которые соответствуют ступенчатому графику тепловыделения в кабеле  $Q_{k,i}$ .

Таким образом, анализ рассмотренных неразрушающих методов прогнозирования термофлуктуационных процессов в СКЛ показал, что большинство методов обладают низкой точностью прогноза, и имеют высокую степень сложности, а также содержат большое количество вычислительных операций. Большинство методов прогноза не способны работать в режиме реального времени, что является крайне существенным недостатком. Решением проблемы, на наш взгляд, является применение систем прогнозирования, основанное на базе искусственного интеллекта с применением методов машинного обучения. Наиболее перспективным на сегодня представляется метод искусственных нейронных сетей (ИНС).

**2. Учет магнитных помех.** С точки зрения теплотехники силовой кабель не является сложной системой, однако факторы окружающей среды и электромагнитные процессы усложняют задачу анализа тепловых режимов на несколько порядков. Проблемой, препятствующей широкому распространению метода регистрации и анализа термофлуктуационных процессов в изоляции СКЛ, является его низкая помехозащищенность [22–23]. Как известно уровень магнитных помех, источником которых является ток в жиле кабеля, тем выше, чем больше пропускная способность, т.е. чем больше сечение жилы и, соответственно, ток нагрузки каждой фазы. Поэтому вопросы электромагнитной совместимости работы электроэнергетического оборудования играют важную роль при проектировании КЛ и кабельных систем (КС). Отдельно выделим задачу снижения уровня магнитного поля в непосредственной близости от силовых КЛ.

Рассматривая взаимные наводки КЛ, основное внимание сосредоточим на влиянии через магнитное поле. Кабельные линии через свои магнитные поля влияют друг на друга. Магнитное поле, создаваемое токами жил и экранов КЛ, имеется как внутри кабеля, так и за его пределами. Остановимся на магнитном поле вне кабеля, поскольку именно оно определяет степень влияния соседних КЛ друг на друга и на цепи контроля параметров СКЛ.

В высоковольтных сетях очень много высокочастотных импульсов. Очень высока вероятность регистрации сигналов, наведенных на датчик [19], смонтированный на кабельной линии, извне или же с соседних кабельных линий. Это значительно снижает достоверность диагностических заключений системы мониторинга.

Экранирование элементов кабеля необходимо для электромагнитной совместимости кабеля с различными внешними цепями и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жилы кабеля и, следовательно, для создания более благоприятных условий работы изоляции. Внутренние экраны выполняются из полупроводящей пластмассы, внешний экран – из медных проволок и лент.

**3. Очистка снимаемого сигнала от помех.** Рассмотрим напряжение наведенное на датчики контроля параметров СКЛ. Модель зашумленного сигнала обычно принимается аддитивной:  $s(n) = f(n) + k \cdot e(n)$  с равномерным шагом по аргументу  $n$ , где  $f(n)$  – полезная информационная составляющая,  $e(n)$  – шумовой сигнал, например, белый шум определенного уровня со средним нулевым значением.

Процедура удаления шума выполняется с использованием ортогональных вейвлетов и включает в себя следующие операции [20]:

- ◆ Вейвлет-разложение сигнала  $s(n)$  до уровня  $N$ . Значение уровня  $N$  определяется частотным спектром информационной части  $f(n)$  сигнала, которую желательно оставлять в рядах аппроксимационных коэффициентов. Тип и порядок вейвлета может существенно влиять на качество очистки сигнала от шума в зависимости как от формы сигналов  $f(n)$ , так и от корреляционных характеристик шумов.

- ◆ Задание типа и пороговых уровней очистки по известным априорным данным о характере шумов или по определенным критериям шумов во входном сигнале. Пороговые уровни очистки могут быть гибкими (в зависимости от номера уровня разложения) или жесткими (глобальными).

- ◆ Модификация коэффициентов детализации вейвлет-разложения в соответствии с установленными условиями очистки.

- ◆ Восстановление сигнала на основе коэффициентов аппроксимации и модифицированных детализационных коэффициентов.

Использовалась программа специализированной системы компьютерной математики (СКМ) MATLAB. Процесс шумоочистки выполнялся с помощью утилиты Wavelet Toolbox. Окна программы и графики Вейвлет преобразования сигналов температурных зависимостей  $\theta_{3,0}$  для исследуемого образца силового кабеля АПВПу г-1х240/25-10 представлены на рис. 2.

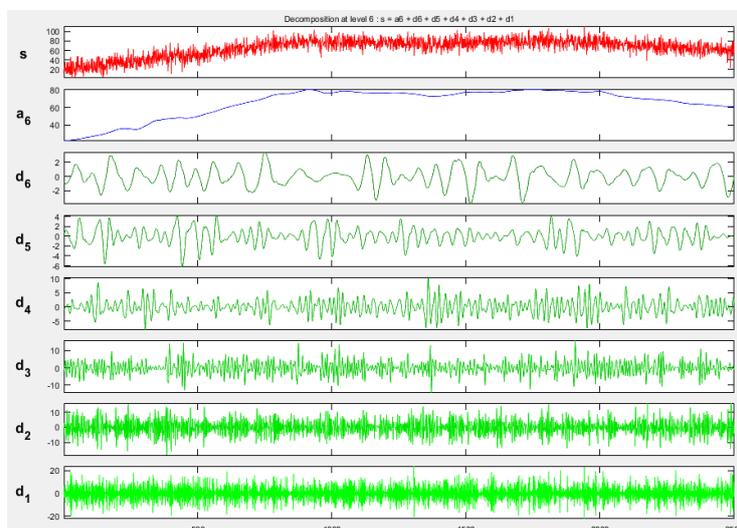


Рис.2. Окно программы и графики сигнала  $\theta_{3,0}$  для исследуемого образца кабеля

**4. Результаты расчета.** Постановка задачи. При работе высоковольтного оборудования (СКЛ, линий электропередач, трансформаторов) в пространстве возникает электромагнитное поле (ЭМП) с различным частотным диапазоном, вызывающее нарушение электромагнитной совместимости (ЭМС) первичных (силовых) и вторичных цепей.

В работе рассматриваются нефункциональные источники помех, к которым относятся проводные линии, частичные и коронные и разряды [18, 20], коммутации в сетях высокого напряжения и т.д. Создаваемые помехи случайно возникают во времени, как правило с широким частотным спектром, и являются паразитными, т. к. имеют мало общего с первичной функцией источника.

Напряженность магнитного поля (E) трёхфазной кабельной линии на расстоянии 0,5 м от исследуемого образца СКЛ составляет  $\approx 0,084$  А/м. Напряженность магнитного поля силового трансформатора на расстоянии 0,4 м от исследуемого образца СКЛ составляет  $\approx 4,6$  А/м.

Исследовались температурные зависимости образцов силового кабеля (СК). На рис. 3 показан исходный сигнал  $\theta_{з.о}$  с датчика температуры с помехами.

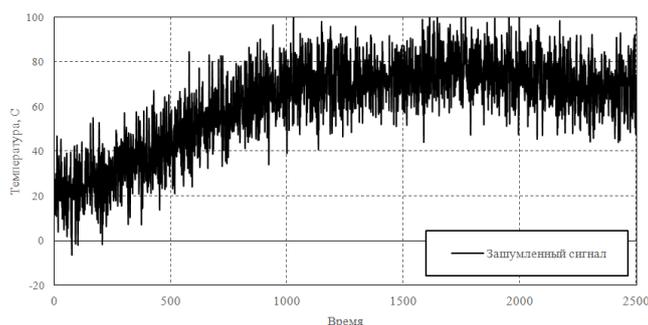


Рис. 3. Исходный сигнал  $\theta_{з.о}$  с датчика температуры с помехами

Задача выбора предельно допустимых токов СКЛ и оценка максимальной токовой нагрузки [19, 21] является обратной задачей расчета теплового поля [22, 23]. Решением прямой задачи является задание тока в каждой фазе СКЛ и вычисление температуры жилы. Процесс изменения тока жилы является динамическим, хотя время в явной форме не входит в динамический закон тока жилы (I<sub>ж</sub>), записанный в дифференциальной или рекуррентной форме, поэтому процесс называется стационарным. Выборка значения тока жилы (I<sub>ж</sub>), может задаваться дискретно через определённые промежутки: секунда, час, день. В нашем случае промежуток между выборками составляет – 30 с. На рис. 4 приведен график изменения значений тока центральной жилы СКЛ.

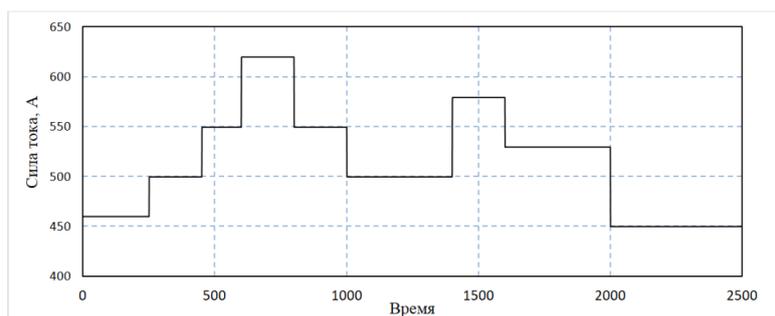


Рис. 4. График изменения значений тока центральной жилы СКЛ

На рис. 5 показаны графики экспериментальной зависимости температуры центральной жилы СКЛ  $\theta_{з.о}$  (черн), и очищенная от помех для исследуемого образца кабеля напряжением 10 кВ с изоляцией из СПЭ.



Рис. 5 Прогноз температуры центральной жилы силового кабеля с учетом магнитных помех

Погрешность, между экспериментальной температурной зависимостью и очищенным сигналом представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Погрешность, между экспериментальной температурной зависимостью и очищенным сигналом**

Средняя температура, $\theta$ з.о, °С		Погрешность	
Исходного сигнала	Очищенного сигнала	t средняя, °С	t, %
61,2	61,3	0,6	1,03

**Заключение.** Показана необходимость разработки более совершенной методики оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жилы СКЛ в режиме реального времени с учетом влияния на изоляцию силового кабеля факторов, обусловленных магнитной составляющей собственного электромагнитного поля. Синтезирована нейросеть для определения температурного режима токоведущей жилы силового кабеля. Исследованы термофлуктуационные процессы в силовом кабеле АПв Пу г-1х240/25-10 при реальной диаграмме действующего значения тока жилы кабеля и разработанной модели прогноза с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Приведены результаты экспериментальных исследований прогноза температуры жилы кабеля ( $\theta$ ж), с помощью ИНС, для образца кабеля, при учете влияния магнитных помех. При анализе данных было определено, что максимальное отклонение данных, полученных от нейросети от данных обучающей выборки, при наличии магнитных помех на кабель (учет их в качестве входного параметра нейросети) повышает погрешность на 1.3 градуса (или 0,8 %). Очистка снимаемых сигналов от помех показала, что при различном уровне зашумленности погрешность восстановленного сигнала составила примерно 1 %. Проведенные сравнения прогнозных значений с фактическими позволяют говорить об адекватности выбранной модели сети и ее применимости на практике для надежной работы кабельной системы электроснабжения потребителей. Основная область применения разработанной нейросети для определения температурного режима токоведущей жилы заключается в диагностике и прогнозировании ресурса ЭИ силового кабеля.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Короткевич М.А., Подгайский С.И., Голомуздов А.В.* Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 2 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 505-522. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522>.
2. Elcut. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов: Версия 6.3.1. Руководство пользователя. – Режим доступа: [https://elcut.ru/downloads/manual\\_r\\_pocket.pdf](https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf).
3. *Полюянович Н.К., Дубяго М.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (205). – С. 51-62.
4. *Удовиченко О.В.* Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: Материалы III российской научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск, 2008. – С. 301-304.
5. IEC Standard 60287–1–1. Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1: Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses – Section 1: General. – 2006.
6. *Шурыкин А.А., Полюянович Н.К.* Оценка математического ожидания ресурса изоляции в задачах повышения надежности электрооборудования // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №2 (53). – С. 16.
7. *Neher J.H. McGrath M.H.* Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems // AIEEE Transactions. – 1957. – Vol. 76. – Part 3. – P. 755-772
8. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
9. *Sellers S.M., Black W.Z.* Refinements to the Neher-McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 12-30.
10. *Лавров Ю.А.* Кабели высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Требования экономичности, надежности, экологичности // Новости электротехники. – 2008. – № 2.
11. *Лавров Ю.А.* Системный подход к проектированию воздушных и кабельных линий электропередачи среднего и высокого напряжения // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III российской научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск, 2008. – С. 17-27.
12. *Холодный С.Д.* Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле // Электричество. – 1964. – № 6. – С. 35-40.
13. *Morello A.* Variazioni Transitorie di Temperatura Nei Cavi per Energia // L'Elettrotecnica. – 1958. – Vol. XLV, No. 4. – P. 213-222.
14. *Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C.* Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications – New York: McGraw-Hill, 1954.
15. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic Ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function // Electra. – 1972. – No. 24. – P. 63-96.
16. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100, No. 1. – P. 211-219.
17. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
18. *Dubyago M.N., Polyuyanovich N.K., Burkov D.V.* Consideration of partial discharge energy in a mathematical model of thermal-fluctuation processes of a power cable // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. European Alliance for Innovation. – 2019. – Vol. 6, No. 24. – С. e3. [doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.157036](https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.157036).
19. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V.* Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: publishing complex USATU, 2019. – P. 127-132. – 978-1-7281-1728-7 ©2019 IEEE.

20. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Partial Discharge Signal Selection Method for Interference Diagnostics of Insulating Materials // in Proc. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves. – 2019. – P. 124-127.
21. *Dubyago Marina N. and Poluyanovich Nikolay K.* Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Re-source Considering the Current Core Temperature // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2019. – Vol. 7, No. 1. – P. 415-420.
22. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. – 12 2017-01 2018. – Vol. 5. Issue 16. E3.
23. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4360>.
24. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В.* Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4377>.
25. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Шурькин А.А. и Бурков Д.В.* Оценка энергии парциального разряда в математической модели тепловых флуктуационных процессов силового кабеля, 2019 г. // Международная конференция по электротехническим комплексам и системам (ИКОЭКС), Уфа, Россия, 2019 г. – С. 1-6.

## REFERENCE

1. *Korotkevich M.A., Podgayskiy S.I., Golomuzdov A.V.* Effektivnost' primeneniya kabeley napryazheniem 6–110 kV s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena [Efficiency of application of cables with voltage of 6–110 kV with cross-linked polyethylene insulation]. Part 2, *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Energy. Proceedings of higher educational institutions and Energy associations of the CIS], 2017, Vol. 60, No. 6, pp. 505-522. Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522>.
2. Elcut. Modelirovanie elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh poley metodom konechnykh elementov: Versiya 6.3.1. Rukovodstvo pol'zovatelya [Elcut. Simulation of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method: Version 6.3.1. User's Guide]. Available at: [https://elcut.ru/downloads/manual\\_r\\_pocket.pdf](https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf).
3. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Prognozirovaniye resursa kabel'nykh liniy s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the resource of cable lines using the method of artificial neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (205), pp. 51-62.
4. *Udovichenko O.V.* Temperaturnyy monitoring kabel'nykh liniy vysokogo napryazheniya na osnove kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena [Temperature monitoring of high voltage cable lines based on XLPE insulated cables], *Linii elektropredachi 2008: proektirovaniye, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskiiy progress: Mater. III rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Power lines 2008: design, construction, operating experience and scientific and technical progress: Materials of the III Russian scientific and practical. conf. with international participation]. Novosibirsk, 2008, pp. 301-304.
5. IEC Standard 60287–1–1. Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1: Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses – Section 1: General, 2006.
6. *Shurykin A.A., Poluyanovich N.K.* Otsenka matematicheskogo ozhidaniya resursa izolyatsii v zadachakh povysheniya nadezhnosti elektrooborudovaniya [Estimation of the mathematical expectation of the insulation resource in the tasks of increasing the reliability of electrical equipment], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of the Don], 2019, No. 2 (53), pp. 16.
7. *Neher J.H. McGrath M.H.* Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems, *AIEE Transactions*, 1957, Vol. 76, Part 3, pp. 755-772.
8. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
9. *Sellers S.M., Black W.Z.* Refinements to the Neher-McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 12-30.
10. *Lavrov Yu.A.* Kabeli vysokogo napryazheniya s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena. Trebovaniya ekonomichnosti, nadezhnosti, ekologichnosti [XLPE insulated high voltage cables. Requirements for efficiency, reliability, environmental friendliness], *Novosti elektrotekhniki* [Electrical Engineering News], 2008, N. 2.

11. Lavrov Yu.A. Sistemnyy podkhod k proektirovaniyu vozdukhnykh i kabel'nykh liniy elektroperedachi srednego i vysokogo napryazheniya [A systematic approach to the design of medium and high voltage overhead and cable power lines], *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy III rossiyskoy nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Power lines 2008: design, construction, operating experience and scientific and technical progress: materials of the III Russian scientific and practical. conf. with international participation]. Novosibirsk, 2008, pp. 17-27.
12. Kholodnyy S.D. Nagrevanie i okhlazhdenie kabelya, prolozhennogo v zemle [Heating and cooling of a cable laid in the ground], *Elektrichestvo* [Electricity], 1964, No. 6, pp. 35-40.
13. Morello A. Variazioni Transitorie di Temperatura Nei Cavi per Energia, *L'Elettrotecnica*, 1958, Vol. XLV, No. 4, pp. 213-222.
14. Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications – New York: McGraw-Hill, 1954.
15. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic Ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function, *Electra*, 1972, No. 24, pp. 63-96.
16. Prime J.B., Valdes J.G. Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 211-219.
17. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
18. Dubyago M.N., Polyuyanovich N.K., Burkov D.V. Consideration of partial discharge energy in a mathematical model of thermal-fluctuation processes of a power cable, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web. European Alliance for Innovation*, 2019, Vol. 6, No. 24, pp. e3. doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.157036.
19. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V. Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. Ufa State Aviation Technical University. Ufa: publishing complex USATU, 2019, pp. 127-132. 978-1-7281-1728-7 ©2019 IEEE.
20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Partial Discharge Signal Selection Method for Interference Diagnostics of Insulating Materials, in *Proc. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*, 2019, pp. 124-127.
21. Dubyago Marina N. and Poluyanovich Nikolay K. Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Re-source Considering the Current Core Temperature, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 415-420.
22. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies*. 12 2017-01 2018, Vol. 5. Issue 16. E3.
23. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Termodinamicheskii sposob vyyavleniya destruktivnoy izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method for detecting the destruction of insulation in the problems of diagnostics and forecasting the resource of cable systems], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2017, No. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4360>.
24. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Bur'kov D.V. Razrabotka metoda prognozirovaniya protsessa stareniya izolyatsii na osnove termoflukuatsionnoy teorii chastichnykh razryadov [Development of a method for predicting the aging process of insulation based on the thermal fluctuation theory of partial discharges], [Engineering Bulletin of Don], 2017, No. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4377>.
25. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A. i Burkov D.V. Otsenka energii partial'nogo razryada v matematicheskoy modeli teplovykh flukuatsionnykh protsessov silovogo kabelya, 2019 g. [Estimation of the partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes in a power cable], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po elektrotekhnicheskim kompleksam i sistemam (IKOEKS), Ufa, Rossiya, 2019 g.* [International Conference on Electrical Complexes and Systems (IKOEKS), Ufa, Russia, 2019], pp. 1-6.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.м.н., профессор А.И. Матвеев.

**Полуянович Николай Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

**Дубяго Марина Николаевна** – e-mail: w\_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

**Poluyanovich Nikolay Konstanti** – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – e-mail: w\_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 51.74

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-88-99

**С.Г. Буланов****КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

*Предложен подход к анализу устойчивости в смысле Ляпунова систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В основе подхода лежат критерии устойчивости в виде необходимых и достаточных условий, полученные на основе матричных мультипликативных преобразований разностных схем численного интегрирования. Матричная, мультипликативная форма критериев влечет возможность их циклической программной реализации в виде цикла по числу сомножителей. Математически обосновано, что необходимая в процессе программирования замена бесконечного матричного произведения на конечное произведение, сохраняет достоверность анализа устойчивости по предложенным критериям. Проведено исследование зависимости достоверности компьютерного анализа устойчивости от погрешности разностного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С целью повышения точности разностных приближений решения и линеаризации системы используется метод варьируемого кусочно-полиномиального приближения решения. Метод дает непрерывные и непрерывно-дифференцируемые приближения искомых решений на всем промежутке интегрирования. Требуемые приближения получаются на основе кусочно-полиномиальной аппроксимации интерполяционными полиномами Ньютона, преобразованными к форме полинома с числовыми коэффициентами. Компьютерная аппроксимация подынтегральных функций повышает точность вычисления интеграла. Тем самым повышается точность вычисления выражений в каждом сомножителе матричных произведений, как следствие повышается достоверность анализа по критериям устойчивости. Проведен программный и численный эксперимент по анализу устойчивости системы Лоренца при заданных начальных условиях и вариации параметров. На основе численных данных, полученных в ходе эксперимента, однозначно установлен характер устойчивости исследуемой системы. В целом предложенный подход дает возможность выполнить анализ устойчивости произвольной системы обыкновенных дифференциальных уравнений в режиме реального времени без обращения к методам качественной теории дифференциальных уравнений и системам компьютерной математики.*

*Устойчивость по Ляпунову; компьютерный анализ устойчивости; разностные решения дифференциальных уравнений.*