

Рекомендации по построению обобщенной модели тела человека при действии напряжения прикосновения

РАДЧЕНКО В.Н., ФЕДОРОВА Т.А., БАЕВА Т.Ю.

ПГУ им. Т.Г. Шевченко, Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика

Для совершенствования экспериментальной базы с целью изучения электрофизических свойств человеческого тела при действии напряжения прикосновения в диапазоне частот 0–1000000 Гц необходимо создать вероятностную модель тела как элемента электрической цепи, которая позволит стандартизировать условия контроля напряжений и токов прикосновения в электроустановках с напряжениями любого рода и частоты. Для создания обобщенной модели тела человека, адекватно описывающей его электрофизические характеристики при действии напряжения прикосновения произвольной частоты, достаточно экспериментальных вольт-амперных и ампер-секундных характеристик тела при действии постоянного напряжения и частотных характеристик в диапазоне 20–200000 Гц при действии напряжения, не превышающего напряжения ощущения. Установлены причины постепенного увеличения амплитуды переменного тока под действием неизменного по значению напряжения. Результаты компьютерного расчета повторяют результаты экспериментальных исследований, проведенных как при постоянном, так и переменном напряжении. Адекватность синтезированной обобщенной модели тела человека, построенной с использованием предлагаемого подхода, подтверждается хорошей сходимостью вероятностных расчетных (на модели) и экспериментальных вольт-амперных характеристик на частоте 50 Гц и выше.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модель тела человека, вольт-амперные характеристики, ток сквозь тело человека, напряжение прикосновения, частота, электрофизические свойства тела человека

Создание моделей, с определенной вероятностью воссоздающих электрофизические характеристики человека для произвольных условий поражения электрическим током, возможно на основе известных закономерностей изменения электрофизических характеристик людей на основе ограниченного числа результатов экспериментальных исследований [1]. Предпосылки для нормирования допустимых воздействий электрического тока без опасных экспериментов на людях, полученные в результате исследований на математической модели тела условий возникновения и закономерностей развития необратимых процессов в организме человека, приведены в [2].

При действии на человека напряжения прикосновения U_h [3] значение напряжения на нелинейной составляющей сопротивления тела $U_{нл}$ является случайной величиной с плотностью распределения, отличной от нуля для $0 < U_{нл} < U_h$ [4]. Алгоритм определения вероятности возникновения необратимых процессов в теле человека основывается на том, что оба события, которые рассматриваются (появление напряжения на нелинейном элементе U_h нл при действии напряжения прикосновения U_h и возникновение необратимого процесса при заданном $U_{нл}$), являются независимыми.

Совершенствование нормативной базы и сертификация электрооборудования по электробезопасности с различными значениями номинального напряжения в диапазоне частот 0–1000000 Гц усложняются непол-

нотой экспериментальной базы, необходимой для построения модели, которая адекватно воссоздавала бы электрофизические свойства тела человека при действии напряжений прикосновения с указанными частотами [5]. Речь идет о разработке вероятностной модели, которая воссоздает свойства представительной группы человечества. Такую модель по данным, полученным на напряжении одной частоты, принципиально создать невозможно [6]. Учитывая, что численность населения Земли уже превышает 7,9 млрд чел., что люди живут в разных климатических зонах, что пути тока сквозь тело человека разнообразны, что значение площади поверхности прикосновения к токоведущим частям во время поражения имеют вероятностный характер, встает проблема обоснования проведения достаточного количества опытов на людях [7].

Только после проведения исследований ограниченной группы людей по определению электрофизических свойств тела в широком диапазоне частот и значений напряжения для разных путей тока [8] возможно установить наличие функциональных или корреляционных связей между свойствами тела и параметрами воздействия, характер этих связей, описать математически их параметры [9]. И только после математического описания установленных законов, вероятностного описания постоянных, характеризующих соответствующие законы, возможно обоснованное определение (с помощью установленных законов) параметров вероятностной модели, которые характеризуют сообщество людей [10].

Вероятностная модель тела человека должна адекватно воссоздавать обобщенные характеристики сообщества людей. Базой для определения характеристик модели (рис. 1) служат результаты экспериментальных исследований, изложенные в разделе 1 [11]. Тело человека как элемент электрической цепи является слоистой структурой с разными электрофизическими свойствами слоев. Кроме явлений электрической проводимости, способности накапливать заряды и поляризации, модель должна учитывать также биоэлектрические явления.

Скорость реакции организма на действие тока ограничена. Если организм не может отслеживать изменение мгновенных значений параметров возмущения, то он меняет свои интегральные показатели, прежде всего интенсивность обмена веществ. Реакция организма в этом случае проявляется изменением во времени электропроводности тканей тела и их способности накапливать заряды, которые учитываются в модели рис. 1 с помощью источника биоэлектрической ЭДС $e_{\text{бел}}$.

Проведенные исследования показали, что в диапазоне частот 20–100000 Гц вольт-амперные характеристики (ВАХ) тела человека линейны [12]. Таким образом, часть резисторов модели (рис. 1) $R_{k+1} - R_n$ линейные, остальные резисторы – нелинейные.

Нелинейные ВАХ отдельных элементов определяются системой уравнений:

$$u_h(t) = \sum_{i=1}^n u_i(t) + e_{\text{бел}}(t);$$

$$\text{для } i = 1 \div k \quad u_i(t) = \alpha_i f_i(i_{Ri}(t)) = \frac{1}{C_i} \int i_{Ci}(t) dt + u_{Ci}(0); \quad (1)$$

$$\text{для } i = k+1 \div n \quad u_i(t) = R_i i_{Ri}(t) = \frac{1}{C_i} \int i_{Ci}(t) dt + u_{Ci}(0);$$

$$i_{Ri}(t) + i_{Ci}(t) = i_h(t),$$

где $u_h(t)$ – мгновенное значение напряжения прикосновения; $e_{\text{бел}}(t)$ – мгновенное значение биоэлектрической

ЭДС; $i_h(t)$ – мгновенное значение тока прикосновения; $u_i(t)$ – мгновенное значение напряжения i -го звена модели; $i_{Ri}(t)$ – мгновенное значение тока резистора i -го звена модели; $i_{Ci}(t)$ – мгновенное значение тока конденсатора i -го звена модели; $f_i(i_{Ri}(t))$ – ВАХ нелинейного резистора i -го звена модели; α_i – невредимая часть резистора i -го звена модели.

При наличии достаточного количества данных исследований по характеру зависимости ВАХ модели от частоты можно определить параметры каждого звена [13].

Поставленная выше задача математически сложна, поэтому решается поэтапно. На первом этапе выполняются синтез и оценка адекватности линейной модели для условий нормального рабочего режима электроустановки. Затем выполняются синтез и оценка адекватности нелинейной модели для условий аварийного режима с принятием допущения, упрощающего решение системы (1). И в заключение выполняется синтез усовершенствованной нелинейной модели для условий, при которых выявлена неадекватность упрощенной модели.

Из приведенных в [14] (рис. 2.9 и 2.10) результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что ВАХ тела на постоянном напряжении практически совпадают с ВАХ, построенными по амплитудным значениям на частоте до 1 Гц. Предлагается эти результаты взять за основу при построении обобщенной модели тела, разделив общее напряжение нелинейной ВАХ пропорционально начальным значениям сопротивления резисторов R_i :

$$U_{h \text{ нл } i}(I_h) = U_{h \text{ нл } i}(I_h) R_i / \sum_{i=1}^n R_i, \quad (2)$$

где $k < i \leq n$.

С помощью (2) решается система (1). Был проведен компьютерный расчет изменения мгновенных значений тока при действии напряжения прикосновения $U_h = 150$ В частотой 50 Гц. Полученная осциллограмма приведена на рис. 2,а. Аналогичная зависимость, по-

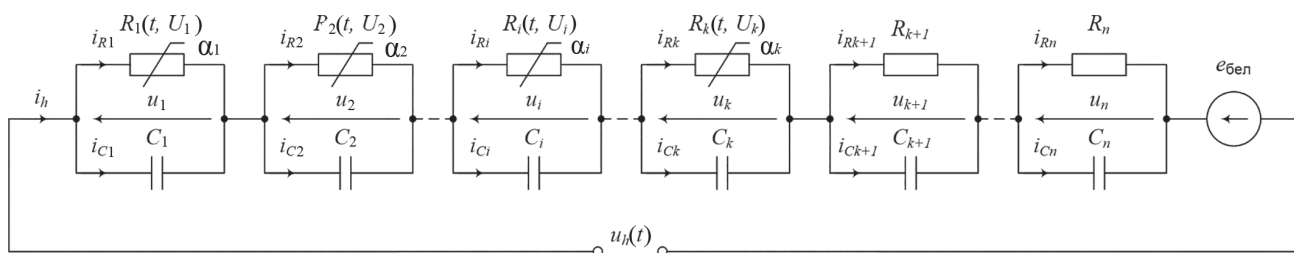


Рис.1. Модель тела человека как элемента электрической цепи: $u_h(t)$ – напряжение прикосновения; i_h – ток прикосновения; $e_{\text{бел}}$ – биоэлектрическая ЭДС; $C_1 - C_n$ – емкость слоев тела; $R_1(t, U_1) - R_n(t, U_k)$ – переменные резистивные сопротивления слоев тела; $R_{k+1} - R_n$ – постоянные резистивные сопротивления слоев тела; $u_1 - u_n$ – напряжение, приложенное к n -слою тела; $i_{c1} - i_{cn}$ – ток сквозь емкостные слои тела; $i_{R1} - i_{Rn}$ – ток сквозь резистивные слои тела; t – время прохождения тока сквозь тело человека

Fig.1. The model of the human body as an element of an electrical circuit: $u_h(t)$ – touch tension; i_h – touch current; $e_{\text{бел}}$ – bioelectric EMF; $C_1 - C_n$ – capacitance of the body layers; $R_1(t, U_1) - R_n(t, U_k)$ – variable resistive resistances of the body layers; $R_{k+1} - R_n$ – constant resistive resistances of the body layers; $u_1 - u_n$ – voltage applied to the n -layer of the body; $i_{c1} - i_{cn}$ – current through the capacitive layers of the body; $i_{R1} - i_{Rn}$ – current through the resistive layers of the body; t – time of current passage through the human body

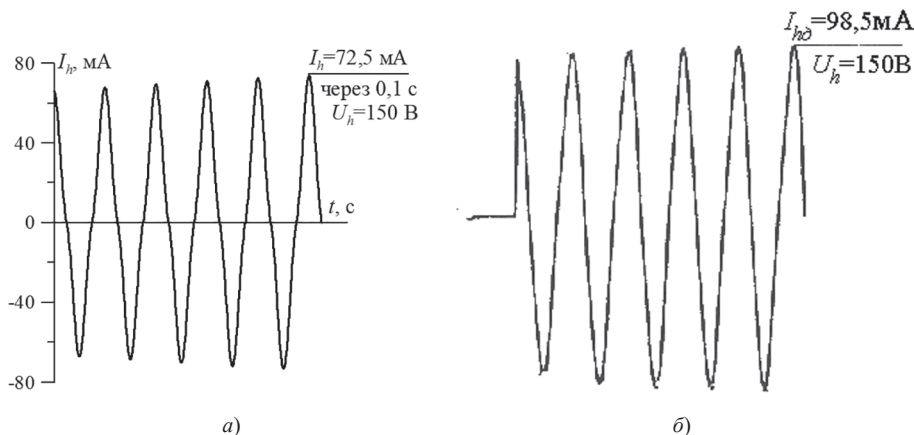


Рис. 2. Осциллограммы тока (путь «рука–рука» при большой площади прикосновения): *a* – математическое моделирование; *б* – физический эксперимент проф. Г. Бигельмайера

Fig. 2. The oscillograms of current along the "hand-to-hand" path with a large: *a* – mathematical modeling; *б* – a physical experiment by prof. G. Biegelmeier

лученная проф. Г. Бигельмайером экспериментально, приведена на рис. 2,б [15]. Таким образом впервые удалось создать модель, которая адекватно отображает электрофизические свойства тела человека.

Результаты компьютерного расчета достоверно воссоздают результаты экспериментальных исследований, проведенных как на постоянном напряжении, так и на переменном – от инфранизких до промышленных значений частоты (рис. 2).

Адекватность синтезированной обобщенной модели тела человека, созданной на основе предложенного подхода, подтверждена хорошей сходимостью вероятностных расчетных (на модели) и экспериментальных вольт-амперных характеристик на частоте 50 Гц и выше [16].

Выводы. Для создания обобщенной модели тела человека, адекватно описывающей электрофизические характеристики человека при действии напряжения прикосновения произвольной частоты, достаточно экспериментальных вольт-амперных и ампер-секундных характеристик тела при действии постоянного напряжения и частотных характеристик в диапазоне 20–200000 Гц при действии напряжения, которое не превышает напряжения ощущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко В.М. Обґрунтування та забезпечення допустимих значень напруг дотику в електроустановках змінного струму: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2010, 19 с.
2. Щуцкий В.И., Бурлаков А.А. О вероятностной оценке уровня электробезопасности. – Электричество, 1982, № 2, с. 16–21.
3. ГОСТ Р 55629-2013/IEC/TS 61201:2007. Допустимые пределы напряжения прикосновения. М.: Стандартинформ, 2014, 12 с.
4. Корнелюк В., Щуцкий В.И. Вероятностная модель полного сопротивления тела человека. – Промышленная энергетика, 1982, № 3, с. 44–46.
5. Никонцев Л.О. та ін. Імовірнісна модель тіла людини для сертифікації електроустановок за умовами електробезпеки. – Енергетика і електрифікація, 2007, № 5, с. 55–58.
6. Никонцев Л. та ін. Синтезування і тестування моделі тіла людини як елемента електричного кола. – Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2000, № 403, с. 114–119.

7. Никонцев Л. та ін. Залежність параметрів тіла людини і його лінійних моделей як елемента електричного кола від площі поверхні дотику до електродів. – Енергетика і електрифікація, 2001, № 2, с. 51–53.

8. Никонцев Л.О., Малиновський А.А., Голубов С.В. Параметри вольтамперних характеристики людей за дії напруги промислової частоти. – Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2004, № 511, с. 71–81.

9. Малиновський А.А. и др. Розрахункові значення резистансу тіла людини за різних значень постійної напруги дотику. – Енергетика і електрифікація, 2003, № 7, с. 52–55.

10. Никонцев Л. та ін. Математична модель взаємодії організму з джерелом ураження постійної напруги. – Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2003, № 487, с. 102–107.

11. Долин П.А. и др. Электробезопасность. Теория и практика. М.: МЭИ, 2012, 280 с.

12. Никонцев Л. та ін. Вольт-амперні характеристики тіла людини на змінній напрузі довільної частоти та методика визначення параметрів тіла. – Вісник Інженерної академії України, 1999, № 2–3, с. 52–54.

13. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. Л.: Энергоатомиздат, 1991, 480 с.

14. Радченко В.Н., Федорова Т.А. Экспериментальные исследования действия токов инфранизких частот на тело человека. – Вестник Приднестровского университета. Серия: физико-математические и технические науки, экономика и управление, 2016, № 3(54), с. 85–91.

15. Biegelmeier G. New Knowledge on the Impedance of the Human Body. – Symposium Toronto 1983, Pergamon Press, Toronto, 1984, pp. 115–132.

16. Никонцев Л. та ін. Оцінка адекватності узагальненої нелінійної моделі тіла людини. – Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2005, № 544, с. 114–122.

[10.06.2021]



Автори: Радченко Виктор Николаевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт», Бендерский политехнический филиал ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко», Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика.



Федорова Татьяна Анатольевна – старший преподаватель кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт», Бендерский политехнический филиал ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко», Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика.



Баева Татьяна Юрьевна – старший преподаватель кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт», Бендерский политехнический филиал ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко», Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика.

Elektrichestvo, 2022, No. 3, pp. 67–71

DOI:10.24160/0013-5380-2022-3-67-71

Recommendations for Constructing a Generalized Human Body Model for Studying the Touch Voltage Effects

RADCHENKO Victor N. (*Bendery Polytechnic Branch of the State Educational Institution “Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko”, Bendery, Pridnestrovian Moldavian Republic*) – Associate Professor of the Engineering, Industry and Transport Dept, Cand. Sci. (Eng.).

FEDOROVA Tatiana A. (*Bendery Polytechnic Branch of the State Educational Institution “Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko”, Bendery, Pridnestrovian Moldavian Republic*) – Senior Lecturer at the Engineering, Industry and Transport Dept.

BAEVA Tatiana Yu. (*Bendery Polytechnic Branch of the State Educational Institution “Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko”, Bendery, Pridnestrovian Moldavian Republic*) – Senior Lecturer at the Engineering, Industry and Transport Dept.

To improve the experimental base aimed at studying the electrophysical properties of a human body when subjected to a touch voltage in the frequency range 0-1000000 Hz, it is necessary to develop a probabilistic model of a human body as an electrical circuit element, using which it will be possible to standardize the conditions for monitoring touch voltages and currents in electrical installations with voltages of any kind and frequency. To develop a generalized human body model that would adequately represent the human body electrophysical characteristics under the effect of a touch voltage of an arbitrary frequency, it is sufficient to have experimental volt-ampere and ampere-second characteristics of the body when subjected to a constant voltage and its frequency responses in the range of 20-200000 Hz under the effect of a voltage that does not exceed the sensitivity threshold. Factors causing a gradual increase in the AC current amplitude at a constant applied voltage are revealed. The obtained computation results are in close agreement with the results of experimental studies carried out both at DC and AC voltages. The adequacy of the generalized human body model developed using the proposed approach is confirmed by good agreement between the predicted probabilistic (obtained on the model) and experimental volt-ampere characteristics at a frequency of 50 Hz and higher.

Key words: human body model, volt-ampere characteristics, current through a human body, touch voltage, frequency, human body electrophysical properties

REFERENCES

1. Radchenko B.M. Justification and provision of permissible values of touch voltages in AC electrical installations: Autoref. dis. ... Cand. Sci. (Eng). Dnepropetrovsk: Nats. Gorny Un., 2010, 19 p.
2. Shchutskiy V.I., Burlakov A.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1982, No. 2. pp. 16–21.
3. GOST R 55629-2013/IEC/TS 61201:2007. *Dopustimye predely napryazheniya prikosnoventiya. Rukovodstvo po primeneniyu (Use of conventional touch voltage limits. Application Guide)*. M.: Standartinform, 2014, 12 p.

4. Kornelyuk V., Shchutskiy V.I. *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 1982, No. 3, pp. 44–46.
5. Nikonets L.O., et al. Probabilistic Model of the Human Body for Certification of Electrical Installations under Electrical Safety Conditions. – *Power Engineering and Electrification*, 2007, No. 5, pp. 55–58.
6. Nikonets L.O., et al. Synthesis and Testing of the Human Body Model as an Element of an Electrical Circuit. – *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, 2000, No. 403, pp. 114–119.
7. Nikonets L.O., et al. Dependence of the Human Body Parameters and Its Linear Models as an Element of an Electrical Circuit on the

Surface Area of Contact with the Electrodes. – Power Engineering and Electrification, 2001, No. 2, c. 51–53.

8. **Nikonets L.O., Malinovsky A.A., Golubov S.V.** Parameters of Volt Ampere Characteristics of People Under the Action of Industrial Frequency Voltage. – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", 2004, No. 511, pp. 71–81.

9. **Malinovsky A.A., et al.** Calculated Values of Human Body Resistance at Different Values of Constant Touch Voltage. – Power Engineering and Electrification, 2003, No. 7, pp. 52–55.

10. **Nikonets L.O., et al.** Mathematical Model of the Interaction of an Organism with a Source of Constant Voltage Damage. – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", 2003, No. 487, pp. 102–107.

11. **Dolin P.A., et al.** *Elektrobezopasnost'. Teoriya i praktika* (Electrical Safety. Theory and Practice). M.: MEI, 2012, 280 p.

12. **Nikonets L.O., et al.** Volt-Ampere Characteristics of the Human Body at Alternating Voltage of Arbitrary Frequency and a Method for

Determining Body Parameters. – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 1999, No. 2–3, pp. 52–54.

13. **Manoylov V.E.** *Osnovy elektrobezopasnosti* (Fundamentals of Electrical Safety). L.: Energoatomizdat, 1991, 480 p.

14. **Radchenko V.N., Fedorova T.A.** *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki, ekonomika i upravlenie – in Russ. (Bulletin of the Pridnestrovian University. Series: Physical, Mathematical and Technical Sciences, Economics and Management)*, 2016, No. 3(54), pp. 85–91.

15. **Biegelmeier G.** New Knowledge on the Impedance of the Human Body. – Symposium Toronto 1983, Pergamon Press, Toronto, 1984, pp. 115–132.

16. **Nikonets L.O. et al.** Evaluation of the Generalized Nonlinear Model Adequacy of the Human Body. – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", 2005, No. 544, pp. 114–122.

[10.06.2021]