Вентильне гальмування асинхронних двигунів відрізняється простотою і надійністю. Для його здійснення не потрібно додаткових джерел живлення чи ємностей. Воно ефективніше від гальмування проти включення, вигідно відрізняється від нього відсутністю давальника нульової швидкості, оскільки розгін двигуна у протилежному напрямку тут відсутній. Так, час гальмування до повної зупинки двигуна за схемою рис. 2 в два рази менший від часу гальмування в режимі противмикання.

Розглянутий числовий метод дозволяє з достатньою точністю розрахувати основні параметри гальмівного процесу і на основі отриманих результатів вибрати в кожному конкретному випадку найраціональнішу схему гальмування, а також визначити оптимальний опір додаткових резисторів.

1. Каплан Н.А., Лапидус А.И. Безвибрационное торможение асинхронних двигателей по несимметричным схемам с вентилями // Электротехника. – 1972. – № 11. 2. Mc Genis. A novel braking scheme for induction machines // @IEEE Trans. Power Appar and Syst@. – 1971. – № 90; № 6. 3. Слоньовський Р.В., Чабан В.Й., Нечай О.М. Порівняльний аналіз методів Рунге-Кутта і дробово-раціонального наближення розв'язку диференціальних рівнянь асинхронного мотора. – Львів, 1990. 4. Слоньовський Р.В., Яремко Т.М. Чисельні методи розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь. – Львів, 1990. 5. Чабан В.И. Методи аналізу електромеханічних систем. – Львів, 1985.

УДК 658.283.1:613.6

Л.О. Никонець, А.А. Маліновський, В.І. Комаров
Національний університет "Львівська політехніка", кафедри ЕС, ЕПМС, ОП

НЕОБОРОТНІ ЯВИЩА В ТІЛІ ЛЮДИНИ У ВИПАДКУ ДІЇ НА НЬОГО ЗМІННОЇ НАПРУГИ

© Никонець Л.О., Маліновський А.А., Комаров В.І., 2002

Визначені умови виникнення травмуючих необоротних явищ в тілі людини під дією змінної напруги. Запропонована методика розрахунку діючих і миттєвих значень струму крізь тіло людини під час виникнення і розвитку необоротних явищ.

Conditions of appearance traumatic irreversible phenomena in case of an alternating voltage action are defined. The methodology of calculation of the effective and instantaneous current values through the human body during an appearance and a development of the irreversible phenomena is proposed.

Дотримання нормативних вимог з електробезпеки повинно гарантувати людині не лише життя, але й захист від отримання електротравм, що супроводжуються необоротними явищами в організмі людини. Дослідження умов виникнення та розвитку електротравм має важливе значення для удосконалення нормативної бази електробезпеки і тестування нових схемно-технічних вирішень електроустановок.

Експериментальні дослідження показують, що характер зміни струму крізь тіло i_h в часі і його дія на організм за незмінності значення прикладеної змінної напруги для однакового шляху струму в тілі можуть бути різними залежно від площі поверхні дотику

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

електродів. Показовими щодо цього є осцилограми, наведені в [1] (рис. 1). Осцилограма рис. 1, *а* показує зміну струму в тілі під дією напруги 150 В через електроди з площею поверхні дотику $S = 82$ см^2. За час близько 0,1 с струм зріс приблизно на 10% і досяг досить великого усталеного значення 98,5 мА. Зафіксовані сильні болісні скорочення м'язів рук і плечей, але без порушень роботи серця й без одержання електротравми. Прикладання до тих самих точок тіла напруги 220 В через електроди з малою площею поверхні дотику ($S = 1$ мм^2) супроводжувалось різким лавинним наростанням струму, через 0,1 с він досяг значення 32 мА. Відбулося руйнування епідермісу й інших шарів шкіри з утворенням електромітки сірого кольору. Професор Г.Бігельмайєр, який проводив згадані досліди на собі, одержав електротравму, хоча в першому випадку значно більший струм не спричиняв необоротних явищ.

В [2] сформульований первинний критерій електробезпеки, дотримання якого дозволяє уникнути травмування організму (виникнення лавини струму)

$$d^2 i_h / dt^2 < 0. \qquad (1)$$

Реалізація критерію (1) вимагає дослідження умов виникнення лавини струму в тілі людини. Внаслідок сильної дії змінного струму на нервову систему людини з врахуванням енергетичної природи виникнення лавини струму, була обґрунтована доцільність дослідження умов виникнення та розвитку лавини струму під дією постійної напруги. Ці дослідження мають також самостійне значення.

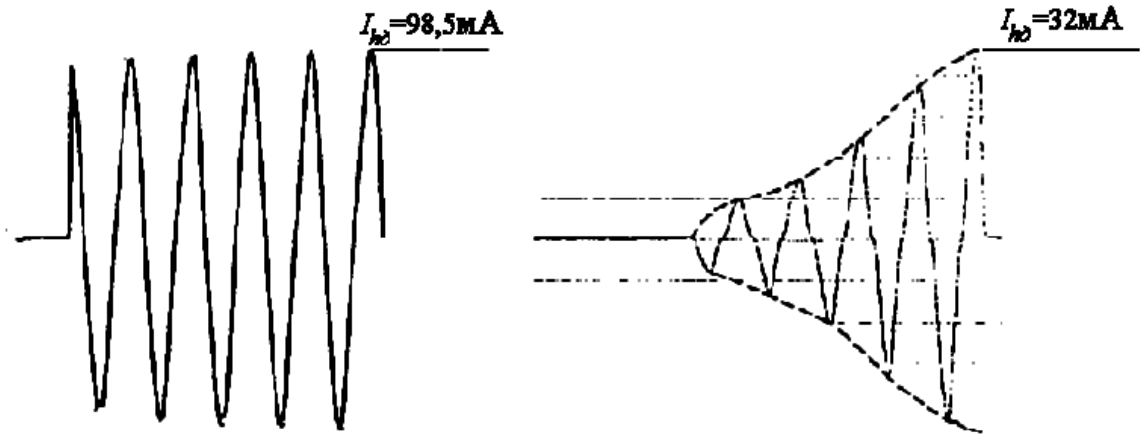

Рис. 1. Осцилограми струму крізь тіло людини (за Г.Бігельмайєром): а – напруга дотику $U_h = 150$ В, електроди циліндричні, повністю охоплені руками, шлях струму "рука-рука"; б – напруга дотику $U_h = 220$ В, площа поверхні дотику до електродів $S = 1$ мм^2

Безпосередніми експериментами встановлено, що під дією постійної напруги мінімальне значення потужності, що виділяється в тілі в момент початку лавинного процесу наростання струму, зв'язане з площею поверхні дотику електродів S рівнянням вигляду

$$P_{hкр} = a + bS. \qquad (2)$$

Для з'ясування зв'язку критичної щодо виникнення лавини струму потужності $P_{hкр}$ з відповідною критичною напругою $U_{hкр=}$ звернемося до рівняння вольтамперної характеристики тіла людини, яке, як відомо, має дві складові, що відповідають нелінійному та лінійному резисторам заступної схеми тіла як елемента електричного кола.

$$U_h = U_{h\,var}(I_h) + R_{h\,зал} \cdot I_h \qquad (3)$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Значення опору лінійного резистора (залишкового опору) $R_{hзал}$ прийнято таким, що дорівнює опору тіла людини на частоті 20 кГц, оскільки, починаючи з цієї частоти, опір тіла виявляє лінійні властивості і має практично активний характер.

Дослідження на людях умов виникнення лавини струму з міркувань безпеки проводилися в діапазоні значень U_h та I_h, за яких складовою рівняння вольтамперної характеристики $R_{h\,зал}\cdot I_h$ можна знехтувати.

Згадані раніше експерименти проф. Г.Бігельмайєра доводять, що на значення лавинної складової струму $I_{hлав}$ крізь тіло людини істотно впливає площа поверхні дотику до електродів S. Оскільки необоротні явища починають розвиватися у зовнішньому шарі шкіри, якому відповідає нелінійний резистор заступної схеми, швидкість зміни лавинної складової струму $di_{лав}/dt$ залежить від значення напруги $U_{h\,var}$, прикладеної до нелінійного резистора.

Враховуючи, що $U_{hvar} = A\ ln(I_h/S) + C$ [3], а також наведене вище про другу складову (3), знайдемо критичне значення напруги $U_{hкр=}$ початку лавинного процесу під дією постійної напруги

$$U_{hкр=} = \frac{P_{hкр}}{Se^{(U_{hкр=}-C)/A}} = \frac{a+bS}{Se^{(U_{hкр=}-C)/A}}. \qquad (4)$$

У момент прикладання до тіла змінної напруги $U_h > U_{hкр\sim}$ через тіло проходить струм I_h, який можна розділити на дві складові: початковий струм I_{hn}, значення якого визначають за точкою вольт-амперної характеристики тіла, що відповідає прикладеній напрузі, та лавинний струм $i_{hлав}$, швидкість зміни якого, як відмічено вище, є функцією напруги U_{hvar}, прикладеної до складової опору тіла з нелінійною вольтамперною характеристикою.

Отже, для дослідження необоротних явищ в тілі людини під дією змінної напруги необхідно мати вольт-амперну характеристику тіла для заданих умов ураження, значення для цих умов критичної напруги $U_{hкр\sim}$ та залежність зміни в часі лавинної складової струму.

Результати дослідження вольт-амперних характеристик тіла людини на змінній напрузі наведені в [3], де запропонована аналітична апроксимація, яка дозволяє одержати вольт-амперну характеристику конкретної особи за дослідними даними в безпечному для неї діапазоні напруг і струмів.

Досліди на постійній напрузі з електродами різної площі поверхні дотику (0,8; 1,76; 5 см^2) дозволити з'ясувати характер зміни в часі лавинної складової струму, який в умовах експерименту виявився практично незалежним від площі дотику електродів. Це не суперечить фізичній суті явища, оскільки лавинний процес звичайно розвивається в одній точці під електродом. На підставі дослідних даних запропонована аналітична апроксимація зміни в часі лавинної складової струму $i_{hлав}(t)$ під дією незмінної напруги. Для узагальнення одержаних результатів обґрунтовано положення, що характер наростання лавинної складової струму не зміниться, якщо дію реально прикладеної до непошкодженої частини нелінійного резистора напруги замінити дією зростаючої в часі напруги $u_{hекв}$ на весь нелінійний резистор. Значення струму крізь тіло людини та напруги на непошкодженій частині нелінійного резистора в обох випадках повинні бути однаковими. На основі наявної залежності $i_{hлав}(t)$ можна встановити зміну в часі еквівалентної напруги $u_{hекв}(t)$. Знаючи зміну в часі $i_{hлав}(t)$ та $u_{hекв}(t)$, можна одержати зв'язок між цими параметрами процесу, який виявився таким:

$$di_{hлав}/dt = exp(6{,}377\ ln\ u_{hекв}(t) - 31{,}964), \qquad (5)$$

де $i_{hлав}$ – в мА, $u_{hекв}$ – в В.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

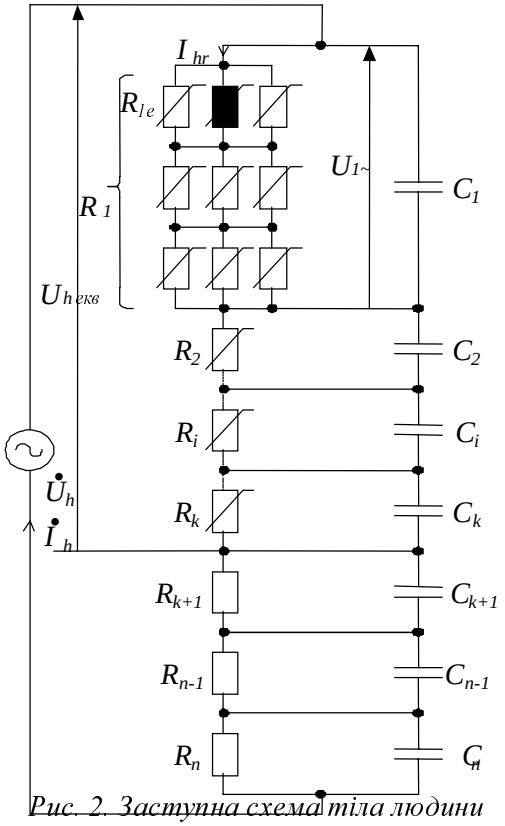

Рис. 2. Заступна схема тіла людини

На нашу думку ця залежність має загальний характер і дозволяє дослідити необоротні процеси в тілі людини під дією як постійної, так і змінної напруг.

Дослідження дії змінного струму на організм людини ускладнене тим, що різні частини (шари) тіла, крізь які проходить струм, мають не лише різну електропровідність, але й різну властивість поляризуватися. Ця обставина врахована в заступній схемі (моделі) тіла, кожна ланка якої, що відповідає певному шару тіла, містить паралельно сполучені резистор R_i і конденсатор C_i (рис. 2). Модель тіла людини як елемента електричного кола синтезована за допомогою спеціально опрацьованої програми на основі одержаних експериментально частотних і вольт-амперних характеристик тіла [2–5]. Тестування моделі показало, що достатня точність відтворення згаданих характеристик досягається в моделях з 7–9 ланками. В моделі прийнято розташування ланок відповідно до зменшення сталих часу. Окремими дослідженнями встановлено, що резистори моделі є нелінійними, за винятком резисторів ланок зі сталими часу $\tau_i < 10^{-4}$ с (на рис. 2 це резистори k+1,…Rn). Вольт-амперні характеристики всіх нелінійних резисторів у відносних одиницях прийняті однаковими.

Розподіл прикладеної до моделі змінної напруги U_h між ланками моделі залежить від її значення та частоти, а також параметрів елементів моделі, котрі в свою чергу залежать від площі поверхні дотику тіла до струмовідних частин (електродів), шляху (петлі) проходження струму в тілі, психофізіологічного стану людини, параметрів довкілля та інших факторів.

Враховуючи шунтівний вплив ємностей ланок, можна стверджувати, що лавинний процес зростання змінного струму розпочинається, коли потужність, що виділяється в зовнішньому шарі шкіри (відповідно в першій ланці моделі з найбільшим резистансом і найбільшою сталою часу R_1C_1) починає дорівнювати потужності, що виділяється у цьому шарі в момент початку лавинного зростання постійного струму

$$\Delta P_{h1\sim} = \Delta P_{h1=} = \Delta P_{h1кр} \qquad (6)$$

Інакше кажучи, руйнування тканин під дією змінного струму починається з зовнішнього шару шкіри, коли потужність, що виділяється в ньому $\Delta P_{h1\sim}$, починає дорівнювати потужності $\Delta P_{h1=}$, яка виділяється в цьому шарі в момент досягнення всією потужністю, що виділяється в тілі під дією постійної напруги, значення $P_{hкр}$. Тобто, у випадку дослідження необоротних явищ під дією змінного струму замість значення $P_{hкр}$ слід використовувати як критерій початку лавини струму похідний параметр $\Delta P_{h1кр}$, який визначається для моделі розрахунковим шляхом.

Експериментальними дослідженнями, на основі яких встановлена основоположна залежність (5) швидкості зміни лавинної складової струму $di_{hлав}/dt$ від значення умовної еквівалентної напруги $u_{hекв}$, прикладеної до нелінійної частини опору тіла людини, як уже згадувалося, з умов безпеки були проведені на постійному струмі. Виникає проблема коректного використання (5) у випадку дії змінного струму. Для обґрунтування методики

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

розрахунку лавинного зростання змінного струму скористаємося показаною на рис. 2 заступною схемою тіла людини. Додамо, що в межах кожного шару тіла, якому відповідає ланка заступної схеми, резистор R_i еквівалентує множину паралельно і послідовно сполучених елементарних резисторів. На рис. 2 це показано на прикладі резистора R_1 як еквівалента елементарних резисторів R_{1e}.

Наведемо тепер алгоритм дослідження необоротних процесів в тілі людини під дією змінної напруги. За $P_{hкр}$ для заданої площі поверхні електродів S визначаємо критичне значення постійного струму в резисторах моделі $I_{hrкр}$ і потужність, яка виділяється у першому шарі $\Delta P_{h1кр}$. Ця потужність у свою чергу дозволяє визначити критичні значення змінної напруги на першому шарі $U_{h1кр}$ та для всієї моделі $U_{hкр}$. Лавинний процес розвивається за умови $U_h \geq U_{hкр}$. Далі визначається дійсна, прикладена до першого шару, напруга $U_{1\sim(0)}$ та струм $I_{hr(0)}$. Для використання залежності (5), одержаної для постійної напруги, зведемо напругу $U_{1\sim(0)}$ до еквівалентної постійної напруги $U_{hекв(0)}$, що прикладається до нелінійних резисторів моделі (на рис. 2 – це резистори $(R_1,\ldots R_k)$. Під дією постійної напруги через резистори моделі проходить однаковий струм I_{hr}, а тому можна записати

$$U_{hекв(0)} = U_{1\sim(0)}\left(\sum_{i=1}^{k} U_i(I_{hr}) / U_1(I_{hr})\right), \tag{7}$$

де $U_i(I_{hr})$ – напруга, що визначена за вольт-амперною характеристикою резистора i-ї ланки моделі для значення струму I_{hr}. Оскільки вольт-амперні характеристики нелінійних резисторів моделі у відносних одиницях прийняті однаковими, вираз у дужках (7) зберігає своє значення для будь-якого I_{hr}.

Під $U_{hекв(0)}$, розуміємо таку постійну напругу, прикладену до k нелінійних резисторів моделі, під дією якої до першої ланки буде прикладена $U_{1=(0)} = U_{1\sim(0)}$. Відповідно, однаковою буде потужність, що виділяється у резисторі ланки, та початкова швидкість зміни лавинної складової струму $i_{hлав}$, що визначається за (5) як функція $u_{hекв}$, тобто $(di_{hлав}/dt)$. За проміжок часу Δt_0 від моменту виникнення лавинного процесу струм через резистор першої ланки зростає від $I_{hr(0)}$ до $I_{hr(1)} = I_{hr(0)} + \Delta I_{hr(0)}$, що зумовлене зменшенням опору внаслідок руйнування елементарного резистора R_{1e} еквівалентного резистора R_1. Приріст струму $\Delta I_{hr(0)}$ можна наближено визначити, наприклад, за методом Ейлера

$$\Delta I_{hr(0)} = (di_{hлав}/dt)_0 \Delta t_0.$$

Тепер вольт-амперна характеристика резистора R_1 буде визначатися залежністю

$$U_1(I_h)_{t=\perp t_0} = a_0 U_1(I_h)_{t=0},$$

де α_0 – коефіцієнт, що відповідає непошкодженій частині резистора R_1.

За відомими U_h та $I_{hr(1)}$, виконавши аналіз режиму моделі, можна визначити прикладену до резистора першої ланки напругу $U_{1\sim(1)}$ і відповідно точку зміненої вольт-амперної характеристики резистора з координатами $U_{1\sim(1)}$, $I_{hr(1)}$ (рис. 3) Відношення напруг нової і вихідної характеристик за однакового значення струму дає значення коефіцієнта α_0, тобто

$$a_0 = U'_{1\sim(1)} / U_{1\sim(0)} = U_{1\sim(1)} / U'_{1\sim(0)}$$

Тепер можна записати алгоритм числового аналізу необоротних явищ в тілі людини під дією змінної напруги у загальному вигляді. З попереднього k-го кроку інтегрування відомі U_h та $I_{hr(k)}$, α_k, що дозволяє визначити значення еквівалентної напруги

$$U_{hекв(k)} = U_{1\sim(k)}\left((a_k U_1(I_{hr}) + \sum_{i=2}^{k} U_i(I_{hr}))/a_k U_1(I_{hr})\right),$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

далі, скориставшись залежністю (5), знаходимо

$$(di_{hлав}/dt)_k = f(U_{hекв(k)}),$$

тепер обчислюємо значення струму через резистор в кінці $(k+1)$-го кроку інтегрування

$$I_{hr(k+1)} = I_{hr(k)} + (di_{hлав}/dt)_k \Delta t_k$$

та на підставі аналізу режиму моделі за відомими U_h та $I_{hr(k+1)}$, знаходимо нове значення

$$a_{k+1} = U_{1\sim(1)}/U'_{1\sim(k+1)}.$$

Тепер маємо всі дані для виконання наступного кроку інтегрування.

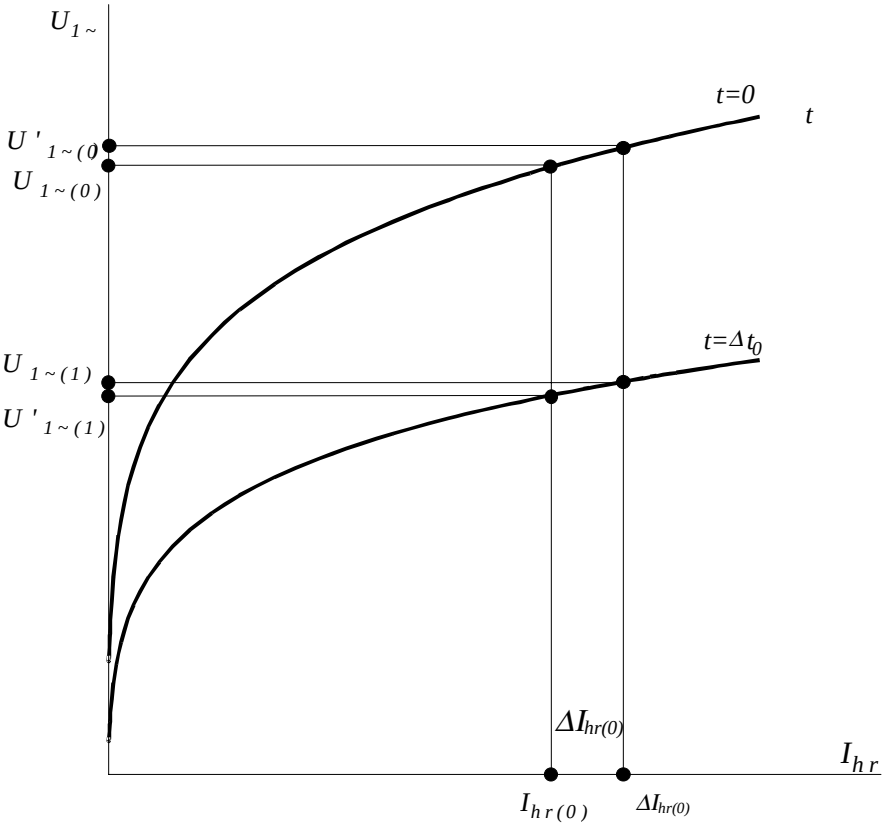

Рис. 3. Зміна вольт-амперної характеристики резистора R_1 моделі тіла людини

Нульове значення коефіцієнта α відповідає руйнуванню першого шару тіла, а в заступній схемі – шунтуванню нульовим опором конденсатора першої ланки. Отже, одержана схема зі зменшеною кількістю ланок, яка аналізується так само, як вихідна. Граничне значення струму крізь тіло обмежене ланками з лінійними резисторами, практично $Z_{hзал}$.

Запропонована методика була застосована до розрахунку параметрів струму під дією змінної напруги 220 В частотою 50 Гц. Зміна в часі діючих значень струмів зображена на рис. 4, а миттєвих значень струмів – на рис. 5.

Як видно на рис. 4, зі зменшенням площі дотику до електродів S зменшується початкове значення струму, але збільшується швидкість його зростання. Це пояснюється залежністю від площі дотику загального опору тіла, а також його нелінійної і лінійної

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

складових. Вольт-амперна характеристика тіла людини, результати дослідження необоротних процесів в тілі якої показані на рис. 4, апроксимується аналітичною залежністю

$$U_h(I_h) = U_{hvar}(I_h) + U_{hзал}(I_h), \quad (8)$$

де $U_{hvar}(I_h) = 40{,}7 \ln(5 I_h/S) + 61{,}74$, $U_{hзал}(I_h) = Z_{hзал}(I_h) = \exp(-0{,}294 \ln S + 7{,}59) \cdot I_h$.

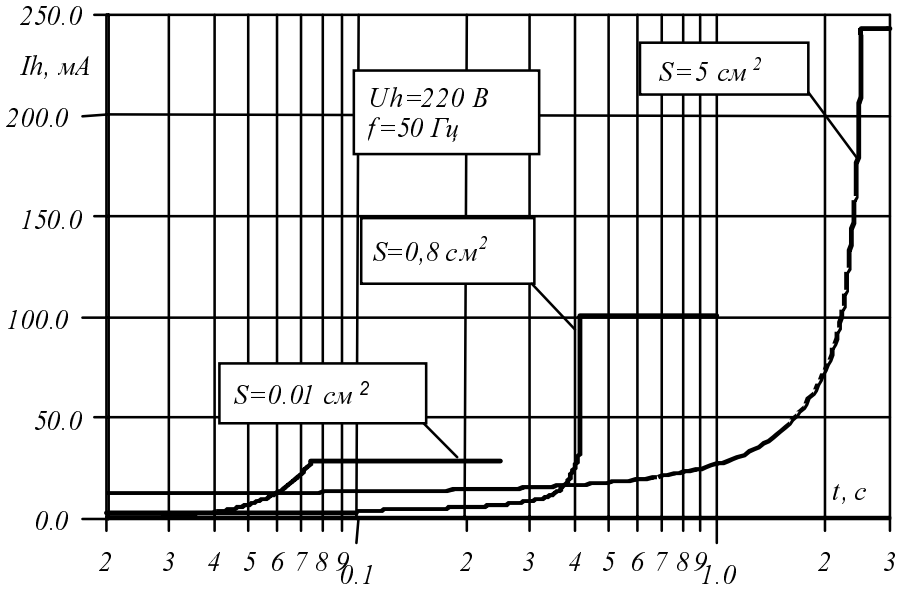

Рис. 4. Зміна діючих значень струму в моделі тіла людини. Шлях струму – "рука-рука"

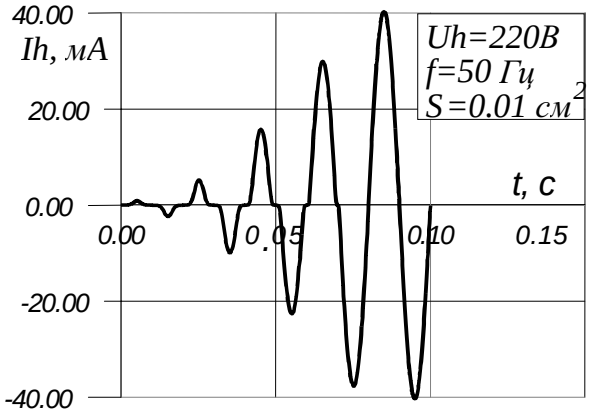

Рис. 5. Зміна миттєвих значень струму крізь тіло людини. Значення напруги дотику U_h=220 В, площа поверхні дотику до електродів – 1 мм^2, шлях струму – "рука-рука", руки сухі

У (8) $U_h(I_h)$, $U_{hvar}(I_h)$, $U_{hзал}(I_h)$ – у В, I_h – в мА, $Z_{hзал}$ в Ом, S – в см^2.

Розглянемо для прикладу випадки з мінімальною (0,01 см^2) та максимальною (5,0 см^2) площами дотику до електродів, для яких побудовані залежності зміни струму на рис. 4. Розрахунки показали, що для змінної напруги промислової частоти 220 В опір тіла для площі 0,01 см^2 становить 2283,96 кОм, для площі 5,0 см^2 – 9,28 кОм. У першому випадку до частини моделі з нелінійною вольт-амперною характеристикою прикладається 219,26 В, з лінійною характеристикою (до залишкового опору $Z_{hзал}$) – 0,74 В. У другому випадку ці

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

напруги становлять відповідно 190,59 В та 29,41 В. Тобто, зі зменшенням площі дотику збільшується загальний опір тіла і частка у ньому опору з нелінійною характеристикою, що призводить до зростання напруги, що діє на цей опір і визначає швидкість лавинного наростання струму. Як наслідок, зі зменшенням площі дотику швидкість зростання струму збільшується, що може зумовити для інтервалу часу в межах якого $I_{hS1}>I_{hS2}$ у випадку $S1<S2$ до більшого об'єму електротравми.

Для спрощення оцінювальних розрахунків замість моделей тіла людини можна використати вольт-амперні характеристики тіла для заданої частоти. У цьому випадку методика розрахунку ідентична викладеній в [2]. У зв'язку з імовірнісним характером таких процесів доречна оцінка можливого діапазону часу зростання струму лавини.

Висновки

1. Допустимі напруги дотику людини повинні нормуватися для мереж з номінальною напругою до 1000 В, враховуючи критерій неможливості одержання електротравм.

2. Запропоновану методику розрахунку значень струму крізь тіло людини під час виникнення і розвитку необоротних явищ можна використати для обґрунтування нормативних значень допустимих напруг дотику.

1. Biegelmeier G. Die Wirkung des elektrischen Stromes auf den Menschen und die elektrische Wiederstand des menschlichen Körpers. 2., vollig uberarbeitete Aufgabe. VDE-verlag GMBH, Berlin und Offenbach, 1987. – 29 s. 2. Никонець Л.О., Маліновський А.А., Лисяк Г.М., Фещенко П.П., Крукеницький Т.П., Натальченко В.А. Дослідження дії постійного струму на організм людини та обґрунтування первинного критерію електробезпеки // Вісн. Інженерної академії України. – 1998. – № 3–4. – С. 124–131. 3. Никонець Л.О., Маліновський А.А., Лисяк Г.М., Фещенко П.П., Комаров В.І. Вольт-амперні характеристики тіла людини на змінній напрузі // Энергетика и электрификация. – 1999. – № 2. – С. 43-48. 4. Никонець Л.О., Маліновський А.А., Лисяк Г.М., Фещенко П.П., Мальцева Н.Г. Частотні характеристики тіла людини // Энергетика и электрификация. – 1999. – №5. – С. 43–37. 5. Никонець Л., Маліновський А., Комаров В., Натальченко В., Черемних Є. Синтезування і тестування моделі тіла людини як елемента електричного кола // Вісн. НУ "Львівська політехніка". – 2000. – № 403. – С. 114–119.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua