

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ СВЕРДЛОВИННИХ КОМПЛЕКСІВ "СКІФ" ВІД ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ

О.В. Хвоцан^{*}, канд.техн.наук, О.П. Смірнов^{**}, канд.техн.наук
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
пр. Богоявленський, 43А, Миколаїв, 54018, Україна,
e-mail: khvoshchan@gmail.com

Визначено залежності електричних параметрів наземної та занурювальної частин зарядного пристрою електророзрядного свердловинного комплексу "Скіф-100М" від особливостей змінення електричних характеристик активно-реактивного навантаження у разі використання сучасних геофізичних кабелів довжиною до 10 км, які мають активний опір від 24 до 644 Ом, ємність – від 0,2 до 1,8 мкФ та індуктивність – від 2,9 до 31 мГн. На основі аналізу перехідних процесів у зарядному колі такого комплексу визначено нові залежності та умови задля підвищення потужності зарядки накопичувального конденсатора, вихідної потужності і напруги наземної частини його джерела живлення від параметрів навантаження. Обґрунтовано необхідні енергетичні параметри окремих елементів універсального занурювального зарядного пристрою для підвищення енергоефективності та продуктивності роботи високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів типу "Скіф" в указаному діапазоні навантаження. Отримані результати забезпечать ефективну модернізацію вітчизняного електророзрядного занурювального обладнання таких комплексів (зокрема їхніх наземних джерел живлення та занурювальних зарядних блоків). Це поширить сферу їхнього застосування в нафтогазовій промисловості України та збільшить привабливість інвестування в економіку України закордонних компаній, які здійснюють обробку нафтових свердловин у різних країнах світу. Бібл. 11, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: перехідні електричні процеси, електророзрядний занурювальний комплекс, зарядний пристрій, геофізичний електрокабель, активно-реактивне навантаження.

Вступ. У світовій практиці до 30% поточного видобутку нафти і газу досягається завдяки відновленню недіючих свердловин, зокрема з використанням високовольтних електророзрядних комплексів, які здатні формувати у рідині хвилі великого тиску та інші чинники, що впливають на зону перфорації свердловин та підвищують їхню продуктивність (дебіт) [1]. Комплекси такого типу дають змогу підвищувати продуктивність не тільки нафтових, а й водозабірних і дегазаційних свердловин.

Всі електророзрядні свердловинні комплекси відомих компаній I-Pulse (Франція) [2], Blue Spark (Канада) [3], Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України [4] та Новас (Росія) занурюють блоки електророзрядного пристрою, ємнісного накопичувача енергії, електродної системи і високовольтного комутатора безпосередньо в зону нафтового пласта. Ці комплекси використовують розрядні напруги від 2,5 до 30 кВ та енергію розрядних імпульсів від 1 до 2 кДж. Комутація енергії в розрядному колі може бути керованою і некерованою, а для перетворення електроенергії в акустичну застосовують електричний вибух провідників та вільний електроіскровий розряд у рідині свердловини або у спеціальному водному розчині з заданими характеристиками.

В останні роки в усіх країнах світу спостерігається тенденція збільшення видобутку нафти з похилих і горизонтальних свердловин, тому в занурювальних частинах високовольтних свердловинних комплексів використовують сучасні одно-, три-, семижильні геофізичні кабелі довжиною до 10 км, які мають різні електричні характеристики. Так, їхній питомий електричний опір може змінюватися від 10 до 41 Ом/км, питома ємність – від 0,06 до 0,2 мкФ/км, хвильовий опір – від 45 до 100 Ом, робоча напруга – від 660 до 1500 В. Наявне обладнання не завжди дозволяє урахувати змінення електричних характеристик кабелів та реалізувати енергоефективні режими електророзрядних комплексів, тому проведення досліджень енергетичних процесів у їхніх електричних колах з метою розширення області використання обладнання є актуальною задачею.

Аналіз досліджень і публікацій. Особливістю зарядних кіл занурювальних електророзрядних свердловинних комплексів є багатоступеневе перетворення енергії, пов'язане з необхідністю її передачі від наземної частини до зануреної через кабельну лінію, яка є додатковим активно-

реактивним навантаженням. На рис. 1, а наведено блок-схему електророзрядної свердловинної установки "Скіф-100М" [1] з такою лінією, де ЗП – зарядний пристрій, ЄН – ємнісний накопичувач, ВК – високовольтний комутатор, ЕС – електродна система, ЗК – з'єднувальний кабель.

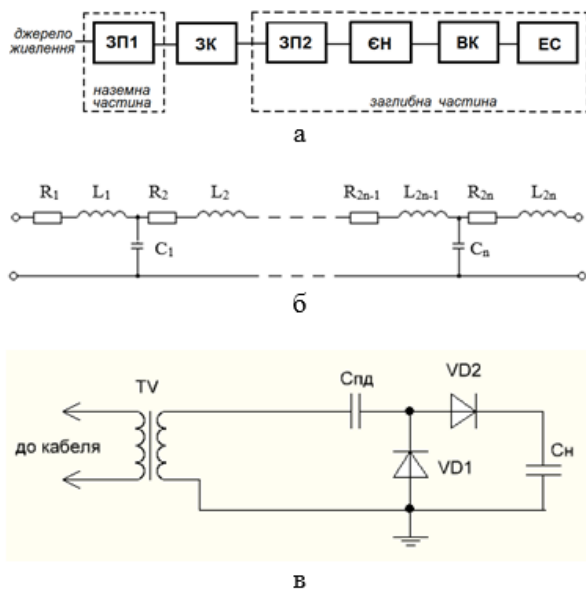


Рис. 1

з'єднує наземну та занурювальну частини, і вплив його активно-реактивного опору на перехідні процеси в колах заряду конденсаторів, автори вибирали кабелі за такими характеристиками: робоча напруга $U_{\text{каб}}$, питома ємність між жилами $C_{\text{жж}}$ та між жилою і бронею $C_{\text{жб}}$, питома індуктивність між жилами $L_{\text{жж}}$ та між жилою і бронею $L_{\text{жб}}$, питомий активний опір жили $R_{\text{ж}}$ та броні $R_{\text{б}}$, електричний опір ізоляції $R_{\text{із}}$, які приведено у табл. 1.

Таблиця 1

| Марка кабелю | $U_{\text{каб}}$ В | $C_{\text{жж}}$ пФ/м | $C_{\text{жб}}$ пФ/м | $L_{\text{жж}}$ мГн/км | $L_{\text{жб}}$ мГн/км | $R_{\text{ж}}$ Ом/км | $R_{\text{б}}$ Ом/км | $R_{\text{із}}$ МОм·км |
|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| одножильні | | | | | | | | |
| 1-FT-380-12/18-G-19 | 1500 | - | 128 | - | 1,32 | 9,2 | 4,92 | 457 |
| 1-FT-288-12/18-G-19 | 1500 | - | 180 | - | 1,6 | 9,2 | 9,2 | 457 |
| КГ 1x1,5-75-150 | 660 | - | 65 | - | 1,08 | 13,2 | 4,2 | 20000 |
| КГ 1x6-65-150 | 1500 | - | 120 | - | 0,95 | 3,11 | 5,0 | 20000 |
| трижильні | | | | | | | | |
| ЗQ37RP | 1200 | 154 | - | 1,67 | - | 23,3 | 5,6 | 457 |
| КГ 3x1,5-98-150 | 660 | 150 | - | 1,56 | - | 13,2 | 4,0 | 20000 |
| КГ 3-60-90* | 1000 | 102 | - | 3,1 | - | 28,5 | 4,0 | 10000 |
| семижильні | | | | | | | | |
| 7Q49RTZZ-EEHS | 1200 | 89 | - | 2,33 | - | 32,2 | 3,3 | 457 |
| КГ 7x1,5-100-150 | 660 | 150 | - | 1,64 | - | 13,2 | 3,7 | 20000 |
| КГ 7-68-180* | 1000 | 90 | - | 2,8 | - | 25,0 | 4,0 | 10000 |

* марку використано для розрахунку перехідних процесів у зарядному колі розробленої установки «Скіф-100М»

Виявлено, що за зростання довжини кабелів від 3 до 10 км їхнє активно-реактивне навантаження суттєво змінюється, зокрема електричний опір жили кабелю зростає від 10 до 250 Ом, а ємність – від 0,2 до 1,8 мкФ. Це суттєво зменшує енергоефективність розроблених раніше комплексів, тому проведення додаткових досліджень, спрямованих на розширення області їхнього використання, є актуальною науковою задачею.

Метою роботи є визначення залежностей електричних параметрів наземної та занурювальної частин зарядного пристрою електророзрядного свердловинного комплексу "Скіф-100М" від особливостей змінення електричних характеристик активно-реактивного навантаження у разі використання

сучасних геофізичних кабелів довжиною до 10 км задля виявлення умов підвищення потужності зарядки накопичувальних конденсаторів і вихідної потужності всього комплексу.

Допущення під час моделювання. Під час аналізу перехідних електричних процесів наземний зарядний пристрій (наземне джерело живлення) ЗПІ представлено джерелом періодичної напруги $U_{\text{ек}}$. З урахуванням результатів [5] щодо впливу проміжної частоти перетворення зарядної напруги на електричні, теплові та масогабаритні показники ЗП, частоту джерела напруги обрано 3 кГц, а форму імпульсів напруги – трапецеїдальною, близькою до прямокутної (період 333,3 мкс, а час зростання і спадання імпульсу від нульового значення до максимального 1 мкс). Досліджувався вплив навантаження на середньоквадратичну величину повної потужності для визначення її пікового значення $S_{\text{ек}}$. Ця характеристика визначає необхідну вихідну потужність наземного джерела живлення установки.

ЗК є лінією з розподіленими активними і реактивними електричними параметрами. В розрахунках його представлено ланцюговою схемою заміщення (рис. 1, б) з n Т-образних ланок [5].

Параметри схеми заміщення ЗК розраховано за формулами

$$R_1 = R_2 = \dots = R_{2n} = \Sigma R_i \cdot l_k / (2 \cdot n); \quad (1)$$

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n = C_i \cdot l_k / n; \quad (2)$$

$$L_1 = L_2 = \dots = L_{2n} = L_i \cdot l_k / (2 \cdot n), \quad (3)$$

де ΣR_i – сумарний питомий опір жил та броні кабелю, які підключено до зарядного кола пристрою, Ом/м; C_i – питома ємність між жилами $C_{\text{жж}}$, Ф/м або між жилою і бронею $C_{\text{жб}}$, Ф/м; L_i – питома індуктивність між жилами $L_{\text{жж}}$, Гн/м або між жилою і бронею $L_{\text{жб}}$, Гн/м; l_k – довжина кабелю, м; n – кількість Т-образних ланок.

Кількість ланок ланцюгової схеми заміщення ЗК розраховано за формулою

$$n = l_k \cdot \sqrt{\frac{|\Sigma R_i \cdot G_i - \omega_0^2 \cdot L_i \cdot C_i|}{12 \cdot (K^2 - 1)}}, \quad (4)$$

де $G_i = 1/R_{i3}$ – поперечна активна провідність ізоляції між прямим і зворотним провідниками, См/м; R_{i3} – електричний опір ізоляції, Ом·м; $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кругова частота, рад/с; f – частота струму в лінії, Гц; K – похибка заміни довгої лінії її ланцюговою схемою (від 0 до 1).

Розрахунок питомої індуктивності з'єднувальної кабельної лінії ($L_{\text{жж}}$ або $L_{\text{жб}}$) проведено за методикою [7]. Результати розрахунку питомої індуктивності ЗК та мінімальної кількості ланок (збільшеної до найближчого цілого числа) для похибки 0,99 і довжин різних марок кабелю 5 і 10 км (відповідно n_5 та n_{10}) наведено у табл. 2.

Таблиця 2

| Марка кабелю | L , мГн/км | n_5 | n_{10} |
|---------------------|--------------|-------|----------|
| 1-FT-380-12/18-G-19 | 1,32 | 3 | 5 |
| 1-FT-288-12/18-G-19 | 1,6 | 4 | 7 |
| КГ 1×1,5-75-150 | 1,08 | 2 | 4 |
| КГ 1×6-65-150 | 0,95 | 3 | 5 |
| 3Q37RP | 1,67 | 4 | 7 |
| КГ 3×1,5-98-150 | 1,56 | 3 | 6 |
| КГ 3-60-90 | 3,1 | 4 | 7 |
| 7Q49RTZZ-EEHS | 2,33 | 3 | 6 |
| КГ 7x1,5-100-150 | 1,64 | 3 | 6 |
| КГ 7-68-180 | 2,8 | 4 | 7 |

Під час моделювання перехідних процесів у зарядному колі реальний кабель замінено його ланцюговою схемою, що містить $n = 10$ ланок. Похибка такої заміни не перевищує 1 %.

Сучасні геофізичні кабелі здатні передавати напругу не більше 1500 В, проте номінальна напруга зарядки конденсаторів ємністю 2,4 мкФ комплексів "Скіф" становить 30 кВ [1]. Тому передача енергії від наземного зарядного пристрою до зануреної частини комплексу змінним або постійним струмом для зарядки накопичувальних конденсаторів до номінальної напруги вимагає використання різних рішень.

За паралельного з'єднання конденсаторів в одну батарею необхідно враховувати процеси перерозподілу енергії між ними [8] та залежність втрат електричної енергії від співвідношень їхніх ємностей та початкових і кінцевих напруг [9]. Для підвищення енергетичних характеристик пристроїв заряду високовольтних конденсаторів установок використовують подвійні резонансні контури [10] та спеціальні малоіндуктивні конструкції [11].

На основі аналізу схемо-технічних і конструктивних рішень пристроїв заряду конденсаторів у

роботі було обрано схему занурювального зарядного пристрою ЗП2, показано на рис. 1.

Змінна напруга на виході з'єднувальної кабельної лінії підвищується високовольтним трансформатором TV, потім вона випрямляється й подвоюється несиметричною схемою подвоєння, що використовує дозуючий конденсатор ємністю C_{nd} та діоди VD1 і VD2. Така схема передбачає зарядку ємнісного накопичувача C_n до напруги 30 кВ. Високовольтний комутатор ВК розряджає конденсатор C_n його підключенням до розрядного кола.

Під час моделювання перехідних процесів зроблено припущення:

– моделі всіх активних, реактивних і напівпровідникових елементів та джерел сигналів взято зі стандартних бібліотек програми PSpice;

– високовольтний трансформатор TV прийнято ідеальним (тобто враховано лише його коефіцієнт трансформації K_{mp}), усі електричні параметри елементів схеми приведено до його первинної обмотки (в подальшому усі приведені параметри позначено символом (')), наприклад, C_n – ємність накопичувального конденсатора комплексу, а C_n' – приведені значення цієї ємності);

– розрахунок коефіцієнта трансформації K_{mp} узгоджувального трансформатора TV та дозуючої ємності C_{nd} виконано за формулами

$$K_{mp} = 30000 / U_c' ; \quad (5)$$

$$C_{nd} = C_n' / K_{mp}^2, \quad (6)$$

де U_c' – величина розрядної напруги на накопичувальній ємності C_n' для відповідного режиму роботи схеми, В; C_{nd} – ємність дозуючого конденсатора схеми подвоєння, Ф;

– під режимом роботи схеми приймалося досягнення певної усередненої за період зарядно-розрядного циклу потужності (в подальшому корисної потужності P), з якою відбувалася зарядка накопичувача ЄН (рис. 1, а). У роботі в залежності від величини активно-реактивного навантаження кабельної з'єднувальної лінії ЗК отримано набори електричних параметрів елементів схем для трьох режимів роботи схеми. В першому режимі визначено найбільшу корисну потужність P_{max} для найменшого часу зарядки ЄН та збільшення частоти зарядно-розрядних циклів, що призводить до зменшення часу обробки свердловини. В другому визначено шлях отримання корисної потужності $P_{200} = 200$ ВА, що відповідає номінальному режиму роботи комплексу "Скіф-100М" [4], у разі зарядки ЄН ємністю 2,4 мкФ до напруги 30 кВ за час 5 с і реалізації повторних зарядно-розрядних циклів до отримання технологічного ефекту. В третьому режимі оцінювалася можливість досягнення корисної потужності $P_{1000} = 1000$ ВА. Він відповідає номінальному режиму роботи експериментального занурювального комплексу, що забезпечує зарядку ЄН ємністю 2,4 мкФ до напруги 30 кВ за час 1 с.

Аналіз отриманих результатів. Результати дослідження режиму найбільшої корисної потужності зарядки конденсатора занурювального свердловинного комплексу за умов передачі одно-, три- або семижильним з'єднувальним кабелем довжиною від 3 до 10 км змінної напруги наведено на рис. 2, де зображено залежності найбільшої корисної потужності зарядки конденсатора P_{max} (рис. 2, а) та вихідної потужності наземного джерела живлення комплексу S_{ex} (рис. 2, б) від довжини трижильного з'єднувального кабелю l_k (відповідні індекси: 1 – кабель КГ 3-60-90; 2 – кабель КГ 3×1,5-98-150; 3 – кабель 3Q37RP). Цей граничний режим можна отримати за умов подачі в кабель з джерела живлення найбільшої можливої напруги.

Значимо, що в деяких випадках через резонансні явища у разі використання кабелю довжиною менше певної величини діюче значення напруги на його зануреному кінці перевищує значення на наземному кінці, тому задля уникнення пробою кабелю слід зменшувати вихідну напругу наземного джерела. Відповідні залежності найбільшої корисної потужності зарядки та вихідної потужності наземного джерела з урахуванням обмеження напруги представлено з позначкою "о" (наприклад, P_{max1_o} або S_{ex2_o}).

Аналогічні залежності для семижильних кабелів зображено на рис. 2, в-г (індекси: 1 – кабель КГ 7-68-180; 2 – кабель КГ 7×1,5-100-150; 3 – кабель 7Q49RTZZ-EEHS), а для одножильних кабелів – на рис. 2, д-е (індекси: 1 – кабель КГ 1×1,5-75-150; 2 – кабель КГ 1×6-65-150; 3 – кабель 1-FT-380-12/18-G-19; 4 – кабель 1-FT-288-12/18-G-19) відповідно.

Аналіз залежностей на рис. 2 вказує, що корисна потужність зарядки конденсатора комплексу перевищує 200 ВА у разі використання більшості розглянутих кабелів довжиною до 10 км.

Порівняно великі показники комплексного опору в зарядному колі, на який впливають питомий активний опір (від 46,6 до 64,4 Ом/км) та питома ємність (від 0,089 до 0,154 мкФ/км) не дали змоги отримати таку потужність на кабелях марок КГ 3-60-90, 3Q37RP, 7Q49RTZZ-EEHS довжиною

10 км. Крім того, в цих випадках для досягнення потужностей від 150 до 160 Вт наземний зарядний пристрій має проектуватися на вихідну потужність до 12 кВА (за використання 3Q37RP) або 8 кВА (за 7Q49RTZZ-EEHS). Серед сучасних багатожильних кабелів найкращі електричні питомі параметри мають кабелі типу КГ 3×1,5-98-150 та КГ 7×1,5-100-150.

Отримані результати забезпечують розрахунок найбільш доцільних параметрів елементів занурювальних зарядних пристроїв ЗПІ за найбільшої корисної потужності зарядки конденсатору комплексу у разі використання різних довжин приведених марок кабелю. Проте важливим є створення універсального занурювального зарядного пристрою для забезпечення роботи комплексу з усіма розглянутими сучасними кабелями за їхньої довжини від 3 до 10 км.

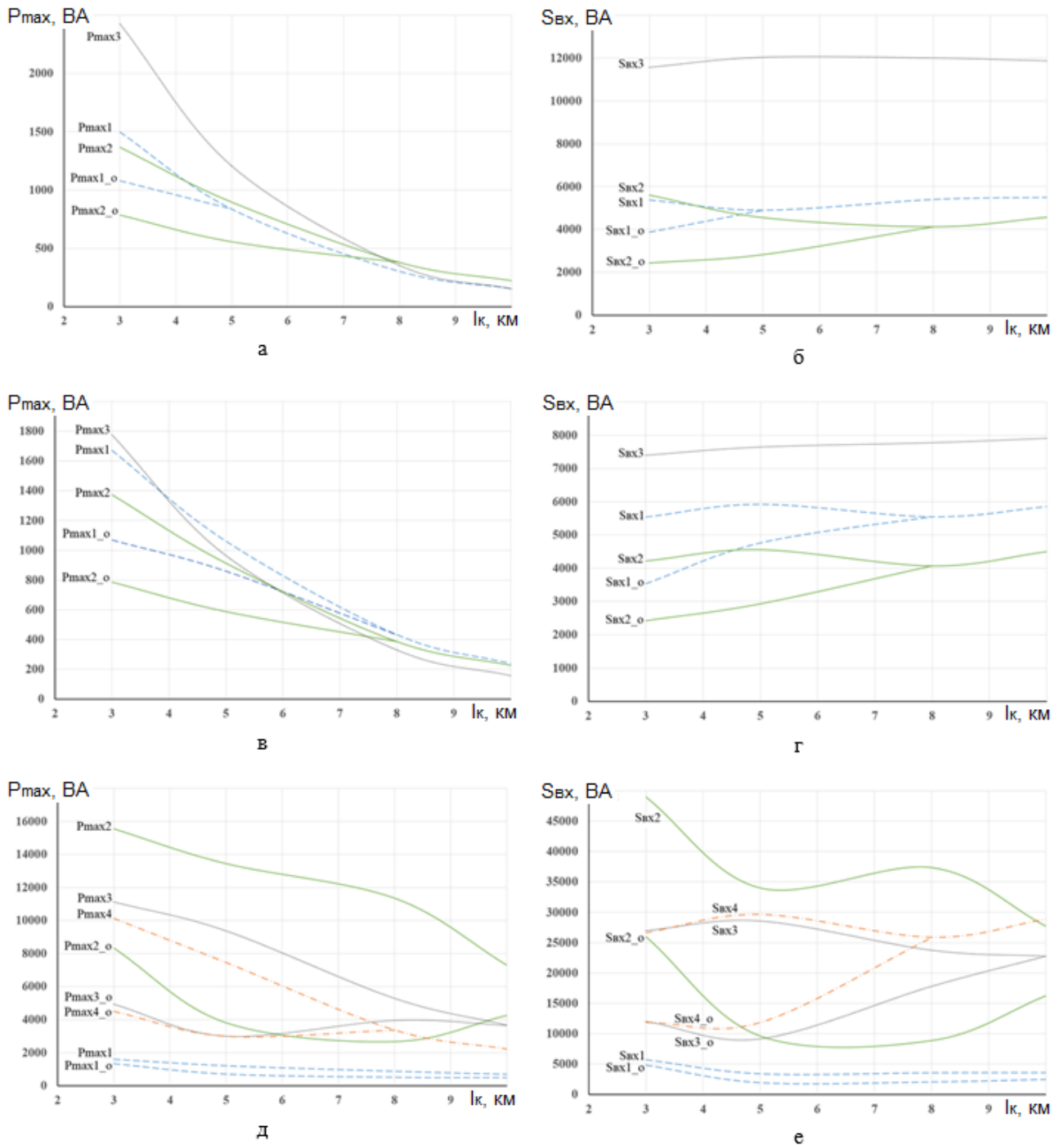


Рис. 2.

У табл. 3 приведено результати розрахунку коефіцієнта трансформації узгоджувального трансформатора, розрахованого за формулою (5) для умов найбільшої корисної потужності зарядки кон-

денсатору занурювального розрядного комплексу.

Задля досягнення зарядної напруги 30 кВ на конденсаторі установки з урахуванням активно-реактивних опорів кабельних ліній довжиною від 3 до 10 км коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора має бути найбільшим, а саме 57,8. Залежність найбільшої корисної потужності від величини приведеної ємності дозуючого конденсатора схеми подвоєння C_{nd} та результати розрахунку його реальної ємності C_{nd} за формулою (6) наведено на рис. 3.

Таблиця 3

| марка | довжина | | | |
|---------------------|---------|------|------|-------|
| | 3 км | 5 км | 8 км | 10 км |
| КГ 3x1,5-98-150 | 25,3 | 24,9 | 39,0 | 56,5 |
| 3Q37RP | 14,1 | 18,0 | 38,8 | 57,8 |
| КГ 7x1,5-100-150 | 24,5 | 23,9 | 39,4 | 56,5 |
| 7Q49RTZZ-EEHS | 13,6 | 16 | 32,0 | 47,6 |
| КГ 1x1,5-75-150 | 24,7 | 24,6 | 24,2 | 24,8 |
| КГ 1x6-65-150 | 11 | 11 | 10,5 | 10,5 |
| 1-FT-380-12/18-G-19 | 10,9 | 10,5 | 10,5 | 13 |
| 1-FT-288-12/18-G-19 | 10,5 | 10,5 | 15 | 19,1 |

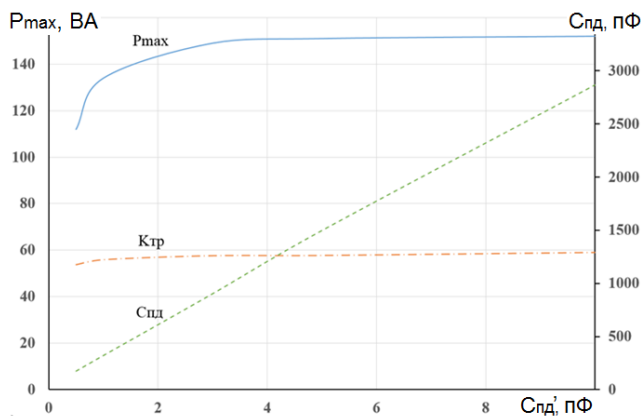


Рис. 3

3x1,5-98-150, б – 3Q37RP, в – КГ 7x1,5-100-150, г – 7Q49RTZZ-EEHS, д – КГ 1x1,5-75-150, е – КГ 1x6-65-150, ж – 1-FT-380-12/18-G-19, з – 1-FT-288-12/18-G-19).

За результатами аналізу характеристик зроблено наступні висновки:

- додаткові активно-реактивні навантаження, які вносять сучасні три- та семижильні геофізичні кабелі довжиною від 3 до 10 км до зарядного кола електророзрядних заглибних комплексів (а саме: активний опір від 79 до 644 Ом, ємність від 0,27 до 1,54 мкФ, індуктивність від 4,68 до 28 мГн), не дають змоги отримати корисну потужність зарядки конденсатора комплексів на рівні 1000 ВА;

- необхідність роботи з багатожильними з'єднувальними лініями довжиною 10 км під час забезпечення корисної потужності на рівні 200 ВА вимагає використання сучасної імпоротної кабельної продукції;

- в залежності від довжини багатожильної з'єднувальної лінії наземне джерело живлення ЗПІ має забезпечити вихідну напругу в діапазоні від 260 до 660 В (у разі використання сучасних кабелів типу КГ) та від 350 до 1200 В (для інших сучасних кабелів), а вихідну потужність до 4,3 кВА (для сучасних кабелів типу КГ) і до 12 кВА (для інших сучасних кабелів);

- використання сучасних одножильних кабелів з робочою напругою 1500 В довжиною від 3 до 10 км дає змогу отримати корисну потужність зарядки конденсатора комплексів на рівні 1000 ВА;

- сучасні одножильні геофізичні кабелі довжиною до 3 км мають незначний активний опір і призводять до споживання суттєвої потужності на початковій стадії перехідного процесу в зарядному колі пристрою, тому залежності $S_{ex, max}$ на рис. 4, д-з мають спадаючий характер; відомими способами зменшення пікових значень вихідної потужності наземного джерела живлення можуть бути введення додаткового струмообмежувального реактивного чи активного опору до його складу або програмне керування вихідною напругою джерела живлення протягом зарядного циклу з використанням, зокрема, принципів широтно-імпульсної модуляції;

Цю залежність отримано для навантаження зарядного кола комплексу з кабелем 3Q37RP довжиною 10 км.

Аналіз залежностей на рис. 3 обґрунтував обрання таких параметрів універсального зарядного пристрою:

- коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора $K_{тр} = 57,8$;

- ємність дозуючого конденсатора схеми подвоєння C_{nd} від 500 до 1000 пФ.

Отримані результати дають змогу проектувати блок ЗПІ (рис. 1) без регулювання його параметрів за автономної роботи або випробуваннях. Він має забезпечити роботу комплексу у разі змінення активно-реактивного навантаження з кабелями довжиною від 3 до 10 км.

У разі змінення вихідних електричних параметрів наземного зарядного пристрою ЗПІ як регулюючі характеристики використовуються залежності вихідної напруги U_{ex} і потужності S_{ex} наземного пристрою від довжини з'єднувального кабелю для досягнення певних корисних потужностей $P_{max}, P_{200}, P_{1000}$.

Відповідні регулюючі характеристики для різних марок кабелю наведено на рис. 4 (а – КГ

– для досягнення корисної потужності зарядки конденсатора до 200 ВА наземне джерело живлення ЗПІ має забезпечити вихідну напругу від 180 до 460 В і потужність до 2,7 кВА, а для досягнення потужності 1000 ВА – напругу від 490 до 1280 В і потужність до 21 кВА.

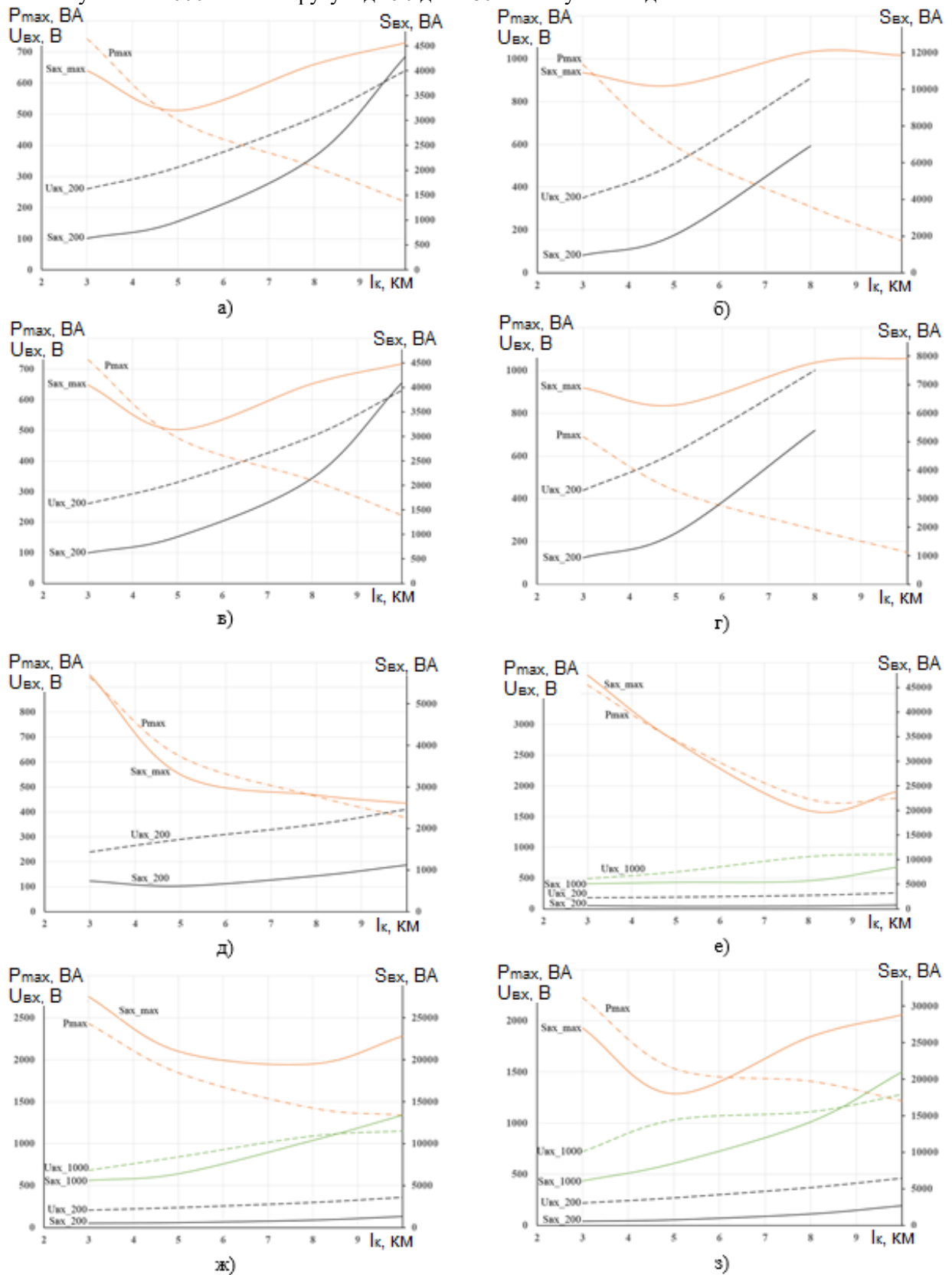


Рис. 4

Висновки. У роботі визначено залежності електричних параметрів наземної та занурювальної частин зарядного пристрою електророзрядного свердловинного комплексу "Скіф-100М" від особливостей змінення електричних характеристик активно-реактивного навантаження у разі використання сучасних геофізичних кабелів довжиною до 10 км, які мають активний опір від 24 до 644 Ом, ємність від 0,2 до 1,8 мкФ та індуктивність від 2,9 до 31 мГн. З урахуванням виявлених залежностей обґрунтовано шляхи удосконалення зарядних пристроїв таких комплексів та визначено параметри для реалізації універсального занурювального зарядного пристрою для проектування його високовольтного трансформатора та випрямляча. Визначено доцільні вихідну потужність та регульовальні характеристики наземних зарядних пристроїв електророзрядного свердловинного комплексу та рекомендації щодо зменшення пікових значень вихідної потужності наземного джерела живлення свердловинних комплексів.

Роботу виконано за бюджетною темою «Пошук шляхів модернізації зарядного пристрою для різних активно-реактивних навантажень заглиблених електророзрядних установок з метою розширення їх функціональних можливостей», державний реєстраційний номер 0120U101716, КПКВ 6541050.

1. Хвоцан О.В., Жекул В.Г., Смирнов А.П. Современное состояние и перспективы развития конструкции электроразрядных погружных устройств для обработки скважин. *Електротехніка та електроенергетика*. 2019. № 3. С. 24–33.
2. I-Pulse. Oil-well production optimization. URL: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization (дата доступу 04.10.2021)
3. Blue Spark. URL: <https://bluesparkenergy.com> (дата доступу 04.10.2021)
4. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M". URL: http://www.iipt.com.ua/dep43_e_4.html (дата доступу 04.10.2021)
5. Щерба А.А., Хвоцан О.В., Курашко Ю.И., Швец И.С. Оптимизация режимов в зарядных цепях высоковольтных электроразрядных погружных систем для электроимпульсной обработки нефтяных скважин. *Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки*. 2006. Ч. 5. С. 98–101.
6. Дубовенко К.В. Моделирование зарядных цепей емкостных накопителей энергии со звеном повышенной частоты. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 58–63.
7. Мамлеев Т.С., Давыдов А.В. Импульсная пропускная способность каротажных кабелей. *Известия УГГА. Серия: Геология и геофизика*. 2002. Вып. 15. С. 155–166.
8. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.
9. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
10. Jingdong L., Dayong H., Xingwang Y., Yong W. High voltage pulse capacitor charging power supply based on double resonant topology[J]. (2019). *High Power Laser and Particle Beams*. 2019. Vol. 31. No 4. Pp. 040021-1 – 040021-6. DOI: <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180314>.
11. Zhang Y., Wu J., Li Z., Jin Y., Tian H., Li W., Li B. Design of compact high-voltage capacitor charging power supply for pulsed power application. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*. Austin, USA, May 31 - June 4, 2015. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/PPC.2015.7297001>.

DEPENDENCE OF ENERGY PROCESSES OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC-DISCHARGE BOREHOLE COMPLEXES "SKIF" ON CHARACTERISTICS OF LOADING

O.V. Khvoshchan, A.P. Smirnov

Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Sciences of Ukraine,
Bohoyavlensky Ave., 43A, Mykolaiv, 54018, Ukraine.

E-mail: khvoshchan@gmail.com

The work determines the dependences of electrical parameters of the ground and submerged parts of the charging unit of the electric-discharge borehole complex "Skif-100M" on peculiarities of changing of electrical characteristics of the active and reactive load contributed by modern geophysical cables up to 10 km long with an active resistance from 24 to 644 Ohm, capacitance from 0.2 to 1.8 μ F and inductance from 2.9 to 31 mH. New dependences and conditions to increase the charging power of storage capacitor, the output power of the complex and the voltage of ground part of its power supply from load parameters were determined on the basis of analysis of transients in the charging circuit of a

complex. There were realized necessary energy characteristics for creation of a universal submersible charging unit to increase energy efficiency and productivity of high-voltage borehole electric-discharge complexes of "Skif" type. The obtained results provide effective modernization of the domestic submersible electric-discharge equipment of such complexes (in particular, their ground power sources and submersible charging units). This extends the scope of their application in the oil and gas industry of Ukraine and increases the attractiveness of investment of foreign companies engaged in the processing of oil wells in different countries of the world to the Ukrainian economy. References 11, figures 4, tables 3.

Keywords: electrical transients, electric discharge submersible complex, charging unit; geophysical electric cable, active and reactive load.

1. Khvoshchan O.V., Zhekul V.H., Smirnov O.P. Current state and perspectives of development of design of electric discharge submersible devices for treatment of wells. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*. 2019. No 3. Pp. 24–33. (Rus)
2. I-Pulse. Oil-well production optimization. URL: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization (accessed at 04.10.2021)
3. Blue Spark. URL: <https://bluesparkenergy.com> (accessed at 04.10.2021)
4. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M". URL: http://www.iipt.com.ua/dep43_e_4.html (accessed at 04.10.2021)
5. Shcherba A.A., Khvoshchan O.V., Kurashko Ju.I., Shvets I.S. Optimization of modes in charging circuits of high-voltage electric discharge submersible systems for electric pulse treatment of oil wells. *Tekhnichna Elektrodynamika. Problemy suchasnoi elektrotekhniki*. 2006. Vol. 5. Pp. 98-101. (Rus)
6. Dubovenko K.V. Simulation of capacitor storage charging circuits with a high frequency loop. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*. 2006. No 3. Pp. 58-63. (Rus)
7. Mamleev T. S., Davydov A. V. Pulse capacity of logging cables. *Izvestija UGGGA. Geologija i geofizika*. 2002. No 15. Pp. 155-166. (Rus)
8. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
9. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.03.009>.
10. Jingdong L., Dayong H., Xingwang Y., Yong W. High voltage pulse capacitor charging power supply based on double resonant topology[J]. (2019). *High Power Laser and Particle Beams*. 2019. Vol. 31. No 4. Pp. 040021-1 – 040021-6. DOI: <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180314>.
11. Zhang Y., Wu J., Li Z., Jin Y., Tian H., Li W., Li B. Design of compact high-voltage capacitor charging power supply for pulsed power application. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*. Austin, USA, May 31 - June 4, 2015. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/PPC.2015.7297001>.

Надійшла 11.10.2021

Остаточний варіант 25.11.2021