

ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС КОМУТАЦІЙ ВАКУУМНИМИ ВИМИКАЧАМИ, ТА ЇХ ОБМЕЖЕННЯ

Н.О. Равлик, О.М. Равлик, докт.техн.наук, М.С. Сегеда, докт.техн.наук

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79005, Україна, e-mail: Ravlyk.OM@gmail.com, mshedda@ukr.net

Розроблено математичну модель електричної мережі власних потреб блока електричної станції з урахуванням асинхронних двигунів та вакуумних вимикачів. Використовуючи комп'ютерне моделювання у спеціалізованому цифровому комплексі «REC», досліджено перенапруги під час вимкнення вакуумними вимикачами в нормальних і аварійних режимах двигунів власних потреб електричних станцій. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: власні потреби електричних станцій, асинхронні двигуни, вакуумні вимикачі, комутаційні перенапруги, нелінійні обмежувачі перенапруг, математичне моделювання, цифрові моделі.

Вступ. Надійність роботи електричних мереж власних потреб електричних станцій (ЕС) для забезпечення технологічного процесу вироблення електричної енергії електричними станціями залежить від координації їхньої ізоляції і обмеження рівня перенапруг, які виникають незалежно від їх джерела.

Невтішна статистика зростання пошкоджуваності кабелів і електричних машин у мережах з вакуумними вимикачами, що підтверджується багатьма публікаціями, а також окремі експериментальні дослідження перенапруг під час комутацій у колі вакуумний вимикач–кабель–електрична машина [1, 2] спонукають до вдосконалення схемних рішень для їх обмеження. Розв'язання задачі аналізу перенапруг в електричних мережах власних потреб ЕС можна здійснити шляхом математичних експериментів на цифрових моделях із забезпеченням необхідної адекватності моделювання [3–6].

На жаль, у багатьох проаналізованих нами публікаціях ми не знайшли вирішення проблеми щодо ефективного обмеження комутаційних перенапруг (КПН) під час вимкнення вакуумними вимикачами. Наприклад, у [1] наведена статистика значного зростання пошкоджуваності у мережах з вакуумними вимикачами на теренах Росії, ставляться нові вимоги до їхніх характеристик, представлені схеми і результати експериментальних досліджень КПН, але чомусь тільки за встановлення фазних обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) і тільки для режимів увімкнення, а не вимкнення. Дослідження КПН на математичних моделях у [7] обмежені однолінійними заступними схемами і мають теоретичний характер. У [2] на підставі отриманої експериментально і наведеної осцилограми тільки однієї із фазних напруг автори доводять існування так званої «зони замирання» в роботі ОПНів. Однак для підтвердження чи спростування цієї гіпотези необхідні як мінімум осцилограми струмів в ОПНах, не говорячи вже про струми через вимикач і всі напруги: фазні, лінійні і напруги на контактах вимикача. Справа в тому, що проведені нами дослідження показали, що найбільший рівень КПН під час вимкнення виникає тоді, коли на одній із фаз вимикача дуга погасає, а на інших продовжує горіти до переходу струму через нуль. І цей інтервал співрозмірний з інтервалом так званої «зони замирання» в [2], на якому фазні ОПНі принципово не можуть ефективно обмежити КПН згідно з параметрами їхніх нелінійних характеристик.

Метою цієї роботи є розроблення математичної моделі та дослідження перенапруг в електричних мережах власних потреб ЕС під час комутації вакуумними вимикачами в нормальних і аварійних режимах асинхронних двигунів та захист їх від перенапруг ОПНами.

Математична модель. Математична модель електричної мережі власних потреб ЕС з урахуванням асинхронних двигунів має такий вигляд:

$$\begin{aligned} L d\vec{i} / dt + \mathbf{K}_T d\vec{\psi} / dt = \vec{e} - \mathbf{R} \vec{i} - \vec{u}_c; \quad C d\vec{u}_c / dt = -\vec{i}; \quad \mathbf{K}_T d\vec{i} / dt - \mathbf{R}_m^* (\vec{\psi}) d\vec{\psi} / dt = 0; \\ \mathbf{P}_{sr} d\vec{\psi}_{\delta s} / dt + \mathbf{L}_{\sigma r} (\vec{s}) d\vec{i}_r / dt = -\mathbf{P}_{sr} \vec{\psi}_{\delta s} - \mathbf{R}_r (\vec{s}) \vec{i}_r; \quad T_j d\vec{\omega}_r / dt = \vec{M}_{MEX} - \vec{M}_E (\vec{i}_s, \vec{\psi}_{\delta s}); \quad d\vec{\theta} / dt = \vec{\omega}_r, \end{aligned} \quad (1)$$

де \vec{e} – вектор-стовпець електрорушійних сил системи живлення власних потреб ЕС; \vec{i} – вектор-стовпець струмів віток електричної мережі власних потреб; \vec{u}_c – вектор-стовпець напруг на ємностях розрахункової схеми; \mathbf{R} – діагональна матриця резистивних опорів віток, окремі елементи якої можуть мати нелінійну залежність від струму, напруги чи часу; \mathbf{L} – квадратна матриця індуктивностей і взаєміндуктивностей віток; \mathbf{C} – діагональна матриця ємностей віток; $\vec{\psi}$ – вектор-стовпець зведених до первинної обмотки робочих потокозчеплень електромагнітних апаратів (ЕМА); $\mathbf{R}_m^* (\vec{\psi})$ – діагональна матриця нелінійних опорів магнітної системи ЕМА, елементи якої віднесені до квадрата витків первинної обмотки; $\mathbf{K}_T, \mathbf{K}_{Tt}$ – пряма і транспонована діагональні матриці коефіцієнтів трансформації ЕМА; \vec{i}_s, \vec{i}_r – вектори-стовпці струмів обмоток статора і ротора асинхронних

двигунів (АД); $\vec{\psi}_{\delta s}$ – вектор-стовпець зведених до обмотки статора робочих потокозчеплень всіх АД; $\mathbf{R}_s, \mathbf{R}_r(\vec{s}), \mathbf{L}_{\sigma s}, \mathbf{L}_{\sigma r}(\vec{s})$ – діагональні матриці активних опорів та індуктивностей розсіювання обмоток статора і ротора відповідно; $\mathbf{R}_m^*(\vec{\psi}_{\delta s})$ – діагональна матриця нелінійних опорів магнітних систем всіх АД, елементи якої віднесені до квадрата витків обмотки статора; \mathbf{T}_j – діагональна матриця постійних інерції всіх АД разом з приводними механізмами; $\vec{M}_{MEX}, \vec{M}_E(\vec{i}_s, \vec{\psi}_{\delta s})$ – вектори-стовпці механічних і електромагнітних моментів відповідно; \vec{s} – вектор-стовпець ковзань роторів АД (елементи вектора \vec{s} обчислюються $s_n = (\omega_{sn} - \omega_{rn}) / \omega_{sn}$, де $n = \overline{1, m}$, m – кількість АД); $\vec{\omega}_s, \vec{\omega}_r$ – вектори-стовпці відповідно кутової частоти обмоток статорів та зведена до полюсної ділянки статора кутова швидкість обертання роторів АД; $\vec{\theta}$ – вектор-стовпець кутів вибігу роторів АД; $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_{st}$ – пряма і транспонована матриці електромагнітного зв'язку обмоток статора і магнітної системи для всіх АД відповідно; $\mathbf{P}_{sr}, \mathbf{P}_{srt}, \mathbf{P}_{sr\Theta}, \mathbf{P}_{sr\Theta t}$ – прямі та транспоновані матриці електромагнітного і електромеханічного зв'язку обмоток статора і ротора АД відповідно.

На підставі математичної моделі (1) реалізовано цифрову модель у середовищі «REC». Для розв'язання рівнянь математичної моделі (1) використовується модифікований неявний однокроковий метод інтегрування 5-го порядку [5], що забезпечує необхідну точність розрахунку перехідних процесів.

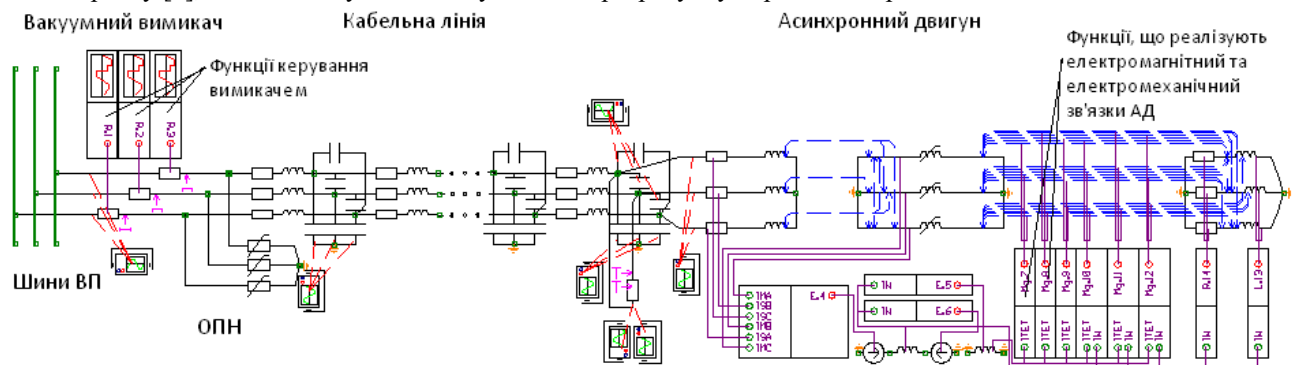


Рис. 1

Для дослідження можливості глибокого обмеження перенапруг у схемах власних потреб ЕС використовувалася математична модель металоксидного ОПН у вигляді нелінійного динамічного резистора, характеристика якого розрахована на основі узагальненої відносної вольт-амперної характеристики ОПН фірми Raychem (рис. 2, а); для ОПН класу 6 кВ і у середовищі «REC» має вигляд рис. 2, б.

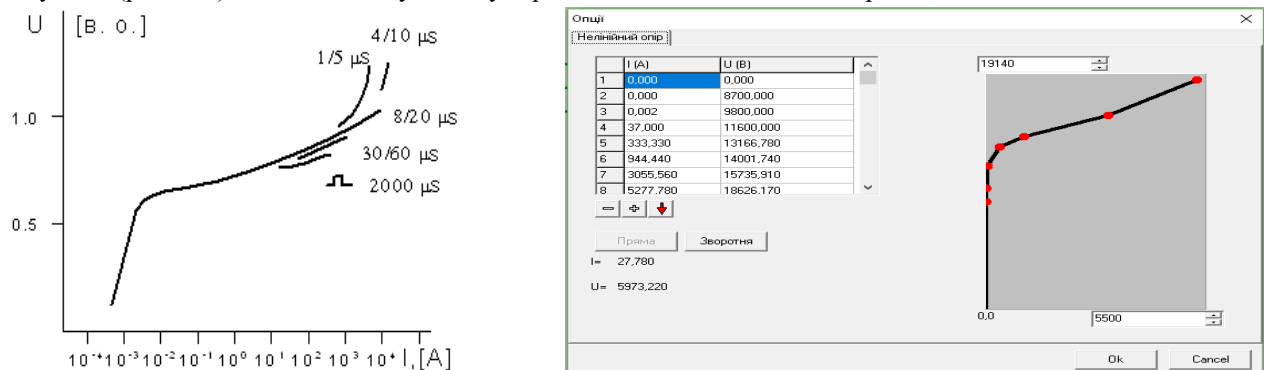


Рис. 2, а, б

Особлива увага приділена моделі вакуумного вимикача. Зміна опору між контактами вимикача в процесі вимкнення моделювалася з врахуванням теоретичних висновків і практичних досліджень, викладених у [8], нелінійною динамічною характеристикою – графічною залежністю опору між контактами окремих фаз вимикача від часу розходження контактів (підбиралася на основі модельних експериментів) для забезпечення відповідної швидкості зменшення струму вимикача до нуля під час вимкнення за допомогою спеціальних функцій керування (рис. 3), що реалізують зміну значення опору міжконтактного проміжку вимикача.

Результати досліджень. Для дослідження КПН із вакуумними вимикачами у схемах власних потреб ЕС у середовищі «REC» сформована заступна схема власних потреб одного із блоків теплової стан-

ції, живлення якої здійснюється від трансформатора власних потреб з розщепленими обмотками, з'єднаними в трикутник.

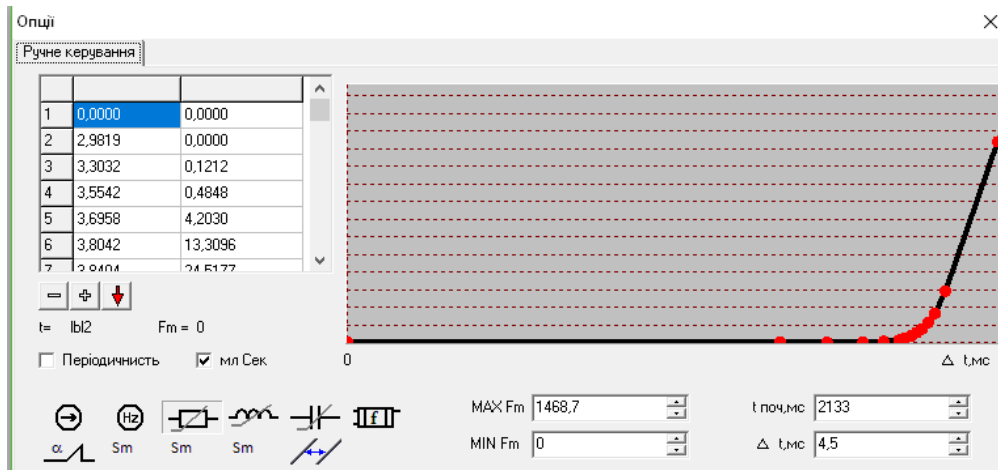


Рис. 3

Дослідження КПН на шинах схеми власних потреб і на окремих її елементах проводилися під час: комутації як робочих струмів, так і струмів під час різних видів замикань без засобів обмеження перенапруг; обмеження перенапруг фазною схемою ОПНів; повної схеми – до шин вмикаються одночасно ОПНІ, з'єднані в зірку і трикутник; обмеження комбінованою схемою – увімкнення ОПНів на лінійні напруги і на одну із фазних напруг (фазу *B*). Результати досліджень вимкнення робочих струмів показали, що найбільші КПН виникають безпосередньо на виводах АД, що вмикаються. Їхній рівень залежить від значення струму в момент розходження контактів, однак значно нижчий, ніж за вимкнення різного виду замикань, що підтверджує вплив комутованого струму на рівень КПН. Рівень КПН під час вимкнення робочих струмів можна обмежити встановленням ОПНів тільки на фазні напруги, однак в окремих випадках рівень лінійних перенапруг може знаходитись у зоні ризику пошкодження ізоляції. Дослідження під час вимкнення трифазних і двофазних коротких замикань (КЗ) та дугових однофазних замикань на землю показали, що кратність фазних і лінійних КПН зростає у разі залежно від величини струму через вимикач під час вимкнення. Встановлення тільки фазних ОПНів не забезпечує ефективного обмеження перенапруг, що підтверджується результатами отриманих рівнів фазних перенапруг у [9, 10].

Для оцінки ефективності обмеження КПН встановленням комбінованої схеми з'єднання ОПНів у мережі власних потреб під час комутації вакуумними вимикачами проведено модельні експерименти вимкнення двофазного КЗ між фазами *A* і *C* на виводах одного з АД для випадку, коли спочатку погасає дуга на контактах вимикача непошкодженої фази *B*, а основний інтервал гасіння дуги на контактах пошкоджених фаз припадає на вимкнення максимальних струмів КЗ у фазах *A* і *C*. На рис. 4 показано фрагменти осцилограм зміни напруг між контактами і струмів через контакти фаз *A* (рис. 4, *a*), *B* (рис. 4, *б*) і *C* (рис. 4, *в*) вимикача під час вимкнення двофазного КЗ.

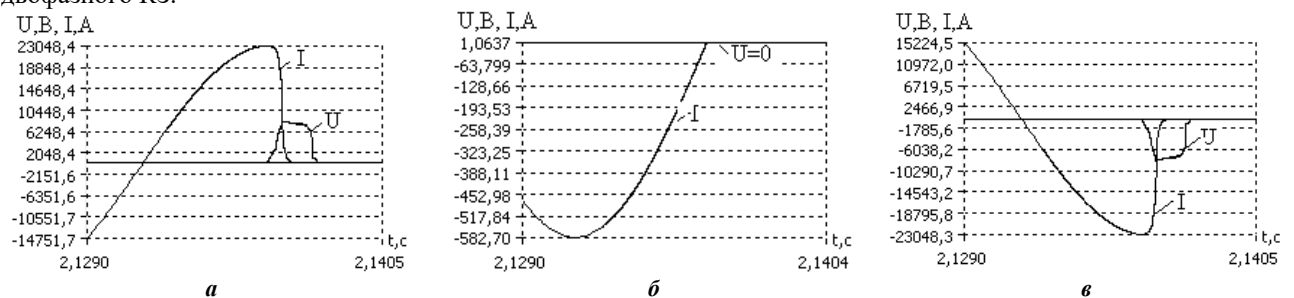


Рис. 4

На рис. 5 показано осцилограми фазних і лінійних напруг на виводах одного із найбільш віддалених від шин власних потреб АД під час вимкнення КЗ між фазами *A* і *C* без встановлення будь-яких ОПНів (рис. 5, *a*, *б* відповідно), за встановлення фазних ОПН на всіх АД і вимикачах (рис. 5, *в*, *г*), за встановлення комбінованої схеми ОПНів на виводах всіх вимикачів (рис. 5, *д*, *е*). З наведених осцилограм кратність перенапруг без ОПНів: фазних – $9,1U_{\Phi}$, лінійних – $10U$ (рис. 5, *a*, *б*); з встановленням фазних ОПНів: фазних – $3,5U_{\Phi}$, лінійних – $4U$ (рис. 5, *в*, *г*); з встановленням комбінованих схем ОПНів: фазних – $1,95U_{\Phi}$, лінійних – $1,87U$ (рис. 5, *д*, *е*). Як показали результати модельних експериментів, комбінована схема ОПНів забезпечує ефективне обмеження КПН під час вимкнення вакуумних вимикачів (рис. 5, *д*, *е*). В експерименті не розглядався можливий багатократний пробій між контактами вимикача з погляду отримання і розповсюдження мережею

максимального рівня КПН і їхнього обмеження різними схемами і місцями встановлення ОПНів. За встановлення ОПНів тільки на фазні напруги протікання процесу під час і після вимкнення КЗ (рис. 5, а, б, г) характеризується значним рівнем перенапруг за рахунок накладання високочастотних коливань, частота яких залежить від параметрів і схеми мережі та може сягати десятки кілогерц, що однозначно призведе до прискорення старіння ізоляції.

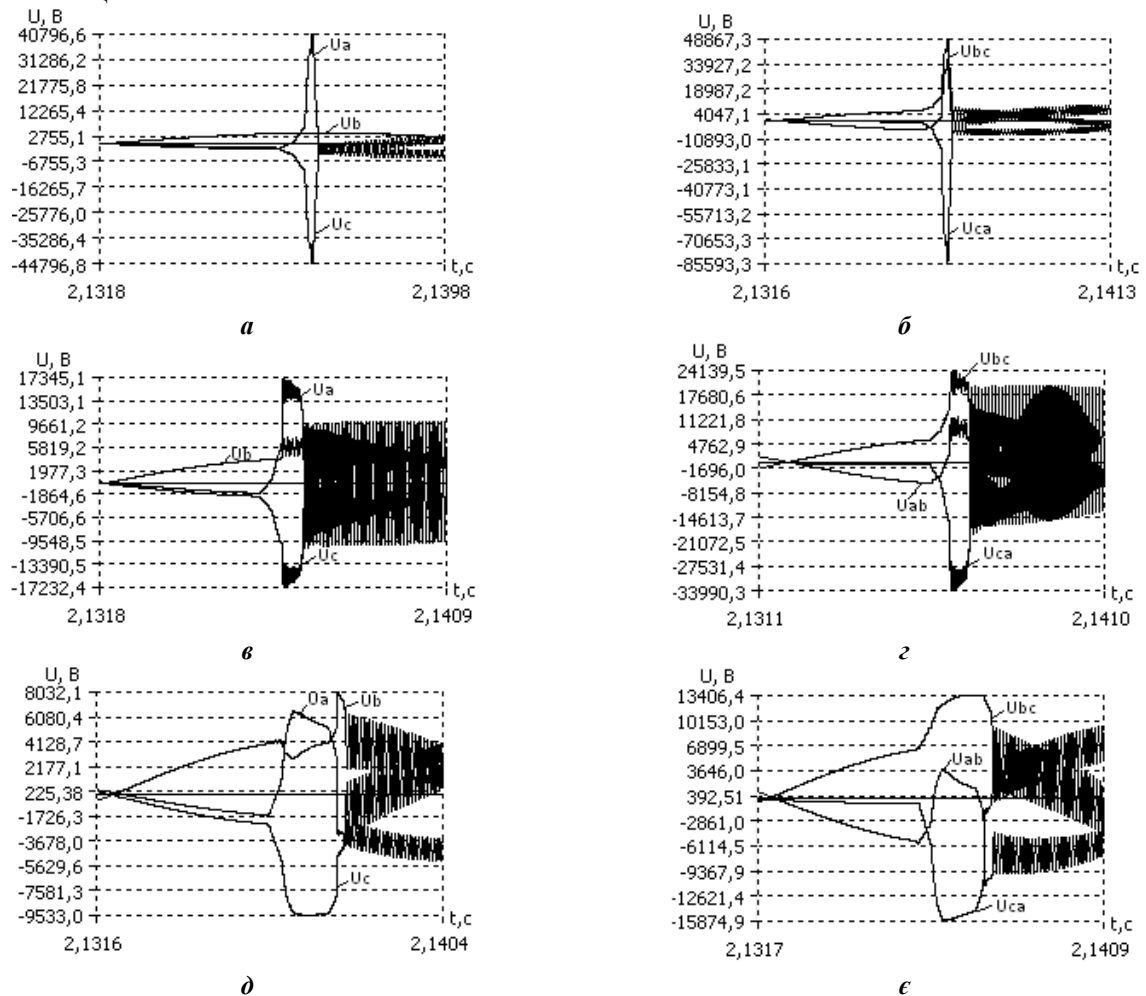


Рис. 5

Необхідність встановлення ОПН на лінійні напруги підтверджує ще і той факт, що у кабельні мережі 6 і 10 кВ зовнішні перенапруги у більшості випадків можуть потрапити через лінійні напруги понижувальних трансформаторів, оскільки їхні вторинні обмотки з'єднані у трикутник.

Висновки. Виходячи з наведених результатів дослідження на цифровій моделі обмеження внутрішніх перенапруг на шинах власних потреб ЕС за допомогою ОПНів, встановлених на фазах вакуумних вимикачів, під час їхнього вимкнення не дає змоги ефективно обмежити лінійні перенапруги. Встановлення комбінованої схеми ОПНів безпосередньо на виводах вакуумних вимикачів є більш ефективним щодо обмеження фазних і лінійних перенапруг, які виникають під час вимкнення вакуумного вимикача, у порівнянні з встановленням тільки фазних ОПНів.

1. Базавлука А.А., Сарин А.А. Михайловский Г.Г., Наумкин И.Е., Гоголюк В.В. Перенапряжения при коммутациях вакуумных выключателей. *Энергоэксперт*. 2011. № 2. С. 27 – 32.

2. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6...10 кВ горнодобывающих предприятий. *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. № 2. С. 41 – 44.

3. Кириленко А.В., Левитский В.Г. Основы автоматизации процессов расчета электротехнических схем. Киев: Наукова думка, 2004. 242 с.

4. Равлик О.М., Равлик Н.О. Програмный комплекс «REC» для анализа процессов в электрических сетях, системах их защиты и автоматики. Свідectво про реєстр. авт. права на твір. № 62351. 2015.

5. Равлик О.М. Методи розв'язування диференційно-інтегрально-скінченних рівнянь перехідних процесів електротехнічних систем. *Вісник Національного університету Львівська політехніка*. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2005. № 544. С. 122 – 126.

6. Сегеда М.С., Равлик Н.О. Обмеження внутрішніх перенапруг в електричних мережах власних потреб електростанцій під час однофазних замикань на землю. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. № 6. С. 116 – 119.

7. Куликовский В.С., Ковальова О.А. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями. *Вестник КрасГАУ Энергообеспечение и энерготехнологии*. 2012. № 5. С. 337 – 343.

8. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Издательство иностранной литературы, 1955. 714 с.

9. Patil A., Gandhare W. Switching Surge Study on High Voltage Efficient Motor. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 2015. Vol. 4. Issue 3. Pp. 150–155.

10. Vollet C., Noblat B. Protecting High-Voltage Motors Against Switching Overvoltages. 4th European Conference on Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry. PCIC. Paris. 13-15 June, 2007. Pp. 1-7.

УДК 621.314.057

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ВО ВРЕМЯ КОММУТАЦИИ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

Н.А. Равлик, А.М. Равлик, докт.техн.наук, М.С. Сегада, докт.техн.наук

Национальный университет «Львовская политехника»,

ул. Ст. Бандеры, 12, Львов, 79005, Украина, e-mail: Ravlyk.OM@gmail.com, mseheda@ukr.net

Разработана математическая модель электрической сети собственных нужд блока электрической станции с учетом асинхронной нагрузки и вакуумных выключателей. С помощью компьютерного моделирования в специализированном цифровом комплексе "REC" исследованы перенапряжения во время отключения вакуумными выключателями в нормальных и аварийных режимах двигателей собственных нужд электрических станций. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: собственные нужды электростанций, асинхронные двигатели, вакуумные выключатели, коммутационные перенапряжения, нелинейные ограничители перенапряжений, математическое моделирование.

OVERVOLTAGES IN ELECTRIC NETWORKS OF OWN NEEDS OF POWER PLANTS DURING THE COMMUTATION OF VACUUM SWITCHES, AND THEIR LIMITATIONS

N.O. Ravlyk, O.M. Ravlyk, M.S. Sehed

Lviv Natsional Polytechnik University,

str. S. Bandera, 12, Lviv, 79005, Ukraine.

E-mail: Ravlyk.OM@gmail.com, mseheda@ukr.net

A mathematical model of the electrical network of own needs of power stations unit based on an asynchronous load and switching properties of the vacuum circuit breakers has been developed. Using computer simulation in a specialized digital complex "REC" investigated surge during switches of vacuum circuit breakers in the normal and emergency modes motors of own needs of power stations. References 10, figures 5.

Keywords: own needs of power stations, asynchronous motors, vacuum switches, switching overvoltage, nonlinear overvoltage limiters, mathematical modeling.

1. Bazavluk A.A., Sarin L.I., Mikhailovskyi H.H., Naumkin I.E., Hoholiuk V.V. Surges due to switching of vacuum circuit breakers. *Energoekspert*. 2011. No 2. Pp. 27 - 32. (Rus)

2. Kuzmin S.V., Gavrilova E.V., Baryshnikov D.V. Effect of arc suppression process in the high-voltage circuit breakers on the value of switching surges that occur in networks 6 - 10 kV mining. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2009. No 2. Pp. 41 - 44. (Rus)

3. Kyrylenko O.V., Levitskiy V.G. Fundamentals of automation of processes of calculating the electrical circuits. Kiev: Naukova Dumka, 2004. 242 p. (Rus)

4. Ravlyk O.M., Ravlyk N.O. Program complex «REC» to analyze processes in electrical networks, their protection and automation. Certificate of Registration of Copyright. No 62351. 2015. (Rus)

5. Ravlyk O.M. Methods for solving integral-differential equations finite transients of electrical. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu Lvivska Politekhniky*. Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy. 2005. No 544. Pp. 122 - 126. (Ukr)

6. Sehed M.S., Ravlyk N.O. Limitations of Internal surge in electric networks of own needs power when the single-phase earth fault. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho himychoho Universytetu*. 2014. No 6. Pp. 116 - 119. (Ukr)

7. Kulikovskii V.S., Kovalova O.A. Simulation of switching surges when switching high-voltage vacuum circuit breakers, motors. *Vestnik KrasGAU. Energoobespechenie i energotekhnologii*. 2012. No 5. Pp. 337 - 343. (Rus)

8. Ryudenberg R. Transients in power systems. Moskva: Izdatelstvo inostranoi literatury, 1955. 714 p. (Rus)

9. Akash M. Patil, W.Z. Gandhare. Switching Surge Study on High Voltage Efficient Motor. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 2015. Vol. 4. Issue 3. Pp. 150-155.

10. C.Vollet, B.de Metz Noblat. Protecting High-Voltage Motors Against Switching Overvoltages. 4th European Conference on Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry, PCIC. Paris. 13-15 June, 2007. Pp. 1-7.

Надійшла 14.11.2016

Остаточний варіант 04.10.2018