

ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **А.О. Стелюк**, канд. техн. наук, **О.В. Леньга**, асп.,
В.С. Макогончук, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Побудовано детальну математичну модель власних потреб атомної електростанції. На основі розрахунків режимів сформовано статичні характеристики навантаження за напругою ВП АЕС для використання під час моделювання системних аварій. Бібл. 7, рис. 5, таблиця.

Ключові слова: статична характеристика навантаження, власні потреби станції, моделювання навантаження.

Робота енергосистеми в нормальних, аварійних та післяаварійних режимах значною мірою визначається поведінкою її навантаження. Саме тому при виконанні розрахунків ustalених режимів, динамічної стійкості, впровадженні заходів щодо регулювання напруги та частоти некоректне моделювання навантаження може призвести до похибок та, як наслідок, до виникнення аварій та відключення споживачів [5].

Особливо гостро це питання постає в контексті розгляду особливої системної аварії. Під особливою системною аварією будемо розуміти таку аварію, виникнення якої призводить до знеструмлення більшої частини території України і втрати власних потреб теплових та атомних електростанцій (АЕС). У цих умовах одним з пріоритетних завдань плану відновлення ОЕС України є найскоріша подача напруги на шини АЕС для створення умов надійного живлення їх власних потреб від енергосистеми з метою забезпечення ядерної безпеки України [1]. Під час розробки заходів по відновленню ОЕС України моделюються шляхи подачі напруги на АЕС. Часто ці шляхи включають декілька ліній номінальною напругою 330...750 кВ. Робота таких транзитів у режимах, близьких до холостого ходу, є нестійкою, а вплив на них окремих елементів мережі є дуже значним. Тому необхідним є створення достовірних характеристик навантаження, які б коректно відображали поведінку споживачів власних потреб (ВП) АЕС.

Проблемі моделювання навантаження присвячено багато досліджень як в Україні [2, 4], так і за кордоном [6, 7]. Однак ці роботи були переважно спрямовані на визначення характеристик побутових та промислових споживачів. Питання визначення залежностей $P(U)$ та $Q(U)$ для навантаження ВП не виникало, оскільки завдяки можливостям регулювання напруги синхронними генераторами вважалось, що напруга на шинах ВП є незмінною. Але в умовах особливої системної аварії “картина” змінюється на протилежну. Метою статті є розробка статичної характеристики навантаження (СХН) ВП АЕС.

Статична характеристика навантаження – це математичне представлення залежності активної та реактивної потужностей навантаження від напруги та/або частоти. В практиці розрахунків режимів широко використовуються наступні моделі навантаження.

Степенева модель. Модель навантаження, де активна та реактивна потужності задаються у вигляді показникової залежності:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^a; \quad Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^b, \quad (1)$$

де P_0, Q_0 – значення активної та реактивної потужностей навантаження при напрузі U_0 ; P, Q – значення активної та реактивної потужностей навантаження при напрузі U ; a, b – коефіцієнти степеня моделі. При значеннях обох коефіцієнтів 0, 1 та 2 модель відповідає характеристикам постійної потужності, струму чи опору відповідно.

Поліноміальна модель. Модель навантаження, де активна та реактивна потужності задаються у формі полінома другого степеня:

$$P_0 \left(a_0 + a_1 \left(\frac{U}{U_0} \right) + a_2 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right); \quad Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{U}{U_0} \right) + b_2 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right), \quad (2)$$

де a_0, a_1, a_2 та b_0, b_1, b_2 – параметри моделі навантаження. У зарубіжній літературі таку модель називають *ZIP*, тому що вона є комбінацією характеристик постійного опору (Z), постійного струму (I) та постійної потужності (P). Сума відповідних параметрів повинна дорівнювати одиниці [7]:

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1; \quad b_0 + b_1 + b_2 = 1. \quad (3)$$

Найбільш поширеними методами визначення СХН є виконання реальних замірів та математичне моделювання. У цій роботі для визначення СХН навантаження ВП АЕС було

створено детальну модель ВП у програмному забезпеченні DigSILENT PowerFactory, невеликий фрагмент якої показано на рис. 1. Основними класами напруги споживачів ВП АЕС є 6 та 0,4 кВ. Повна модель складається з 95 асинхронних двигунів (АД), 30 знижувальних трансформаторів та 109 кабельних ліній. Внаслідок великої кількості споживачів ВП у мережі 0,4 кВ їх представлено еквівалентними навантаженнями, в яких враховано як статичне (освітлення, опалення тощо),

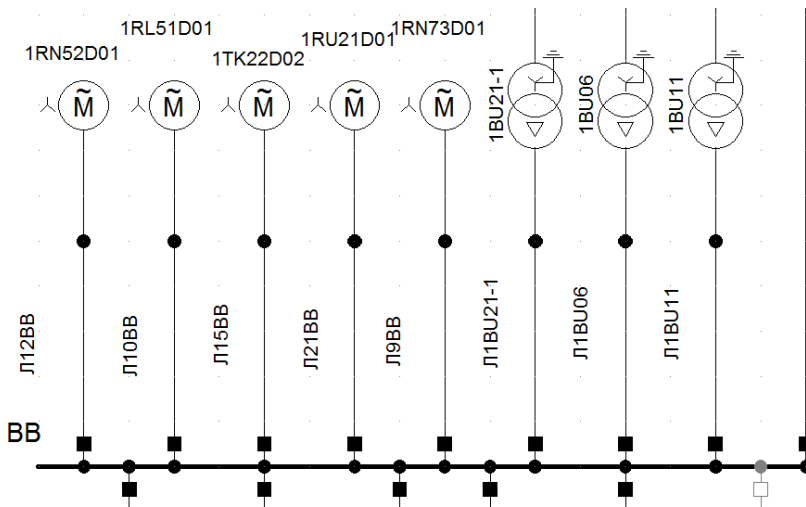


Рис. 1

так і динамічне навантаження (АД). Така модель є досить детальною та придатна для широкого кола досліджень різноманітних явищ, зокрема визначення впливу окремих елементів на режим ВП АЕС.

Проте, враховуючи існуючі раніше обмеження щодо обчислень, широкого розповсюдження набула більш спрощена (рис. 2) модель [3]. Вона складається з чотирьох секцій нормальної експлуатації: ВА, ВВ, ВС та ВД. До цих секцій приєднано електродвигуни головних циркуляційних насосів (ГЦН), конденсаційних (КН), мережевих (МН) та циркуляційних (ЦН). Крім того, від цих секцій також живляться насоси технічної води (НТВ) невідповідальних споживачів, знижуючі трансформатори 6/0,4 кВ та лінії до схеми надійного живлення. Споживачі 0,4 кВ заживлюються від блочних трансформаторів (ТБ), а також об'єднаного допоміжного корпусу (ТОДК), компресорного (ТКО) та ремонтного (ТР) цеху, хімоводоочищення (ТХВО) тощо. За допомогою трансформатора ТСКЗ здійснюється живлення споживачів 0,4 кВ системи керування та захисту реактора (СКЗР). Використання такої моделі було більш зручним при виконанні розрахунків електромеханічних перехідних процесів.

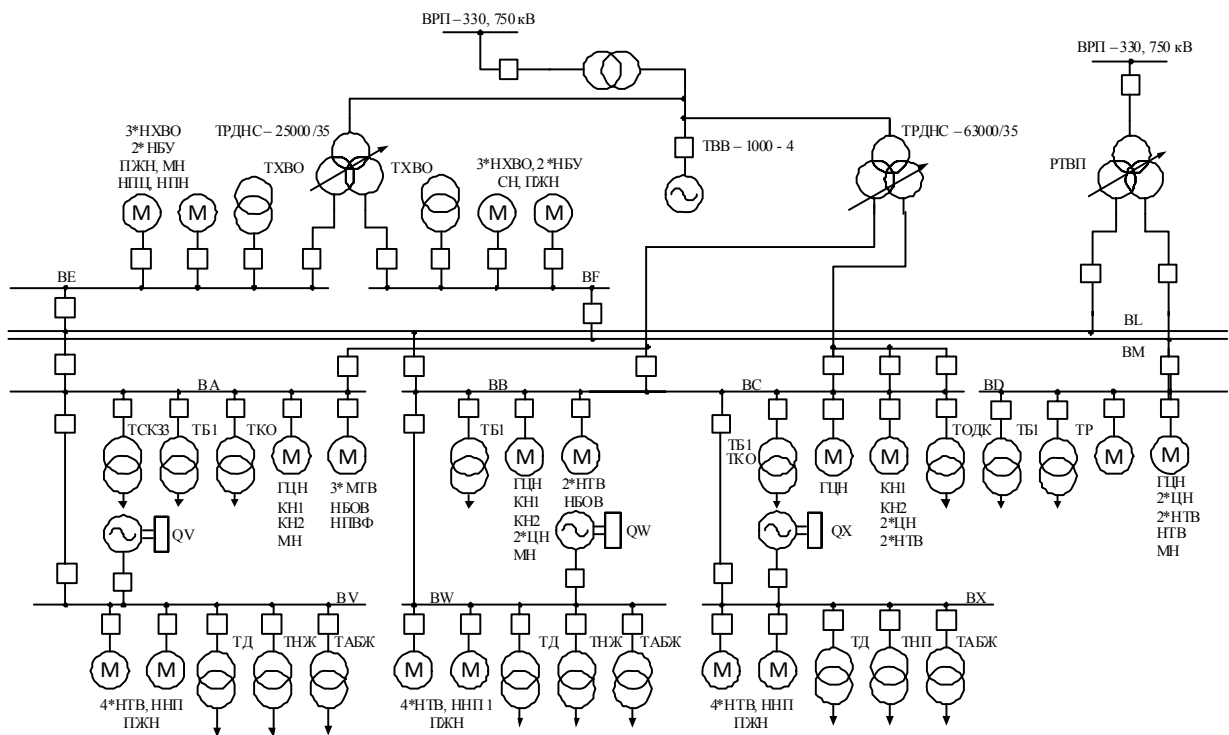


Рис. 2

В обох представлених моделях АД задаються у вигляді спрощеної Г-подібної заступної схеми (рис. 3). У цій схемі не враховуються втрати активної потужності в статорі та сталі, де x_s – сумарний опір розсіювання обмоток статора (x_1) і ротора (x_2); r_2 – приведений до статора опір обмотки ротора; s – ковзання. Активна потужність АД дорівнює

$$P = 3I^2 \frac{r_2}{s} = \frac{U^2}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_s} \frac{r_2}{s} = \frac{U^2 r_2 s}{r_2^2 + (x_s s)^2} \quad (4)$$

Механічний момент АД становить

$$M_{\text{МЕК}} = \frac{P_{\text{МЕК}}}{\omega_0} = \frac{P}{\omega_0} = 3I^2 \frac{r_2}{s} \frac{1}{\omega_0} \quad (5)$$

де ω_0 – швидкість обертання АД. При $M_{\text{МЕК}} = \text{const}$, $\omega_0 = 1$ можна вважати, що відносні значення моменту та активної потужності рівні. З цього випливає, що

$$P = 3I^2 \frac{r_2}{s} = \text{const} \quad (6)$$

Активна потужність $P(U)$ приймається незалежною від напруги, оскільки при коливаннях напруги зміни ковзання та швидкості обертання АД будуть незначними.

Відомо, що реактивна потужність, яку споживає АД, складається з двох складових (рис. 4):

$$Q = Q_\mu + Q_s \quad (7)$$

де Q_μ – потужність намагнічування, пов’язана зі струмом намагнічування; Q_s – потужність розсіювання, або реактивна потужність, пов’язана з x_s . Намагнічуюча потужність залежить від квадрату напруги: $Q_\mu = U^2/x_\mu$ (крива 2 на рис. 4 а).

Потужність розсіювання залежить від квадрату струму: $Q_s = 3I^2 x_s$ (крива 1, рис. 4 а). При постійному механічному моменті квадрат струму

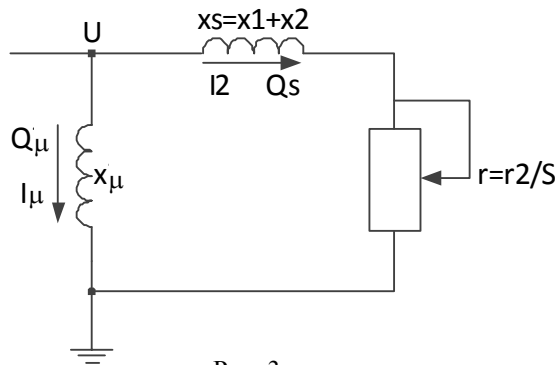


Рис. 3

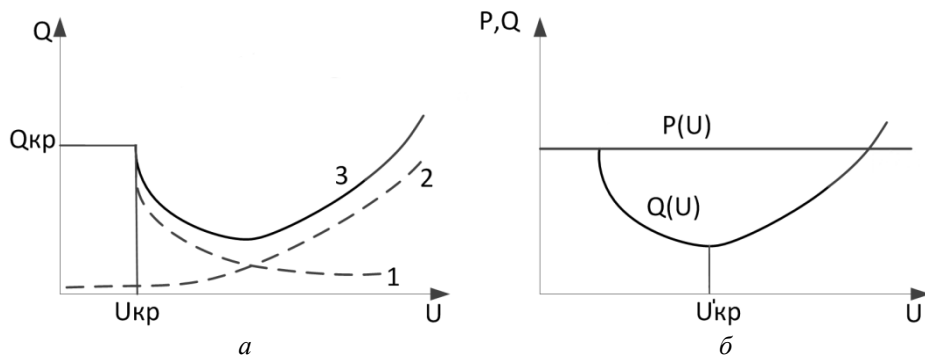


Рис. 4

прямо пропорційний ковзанню (5). Тому залежність $Q_s(U)$ матиме такий же вигляд, як і $s(U)$. Сумарна реактивна потужність Q , що споживається АД, визначається кривою 3 рис. 4 а. Точка при $U_{кр}$ та $Q_{кр}$ відповідає режиму роботи

при критичному значенні ковзання. Фізично при зниженні $U < U_{кр}$ двигун буде гальмуватися, струм і реактивна потужність зростатимуть, а потім двигун зупиниться. Статичні характеристики АД за напругою показані на рис. 4 б. [3]. Однак для практичних розрахунків об'єктивних та післяаварійних режимів більш важливим є значення критичної напруги $U'_{кр}$ (рис. 4 б). При зниженні напруги нижче рівня $U'_{кр}$ споживання реактивної потужності АД починає зростати, що в свою чергу призводить до подальшого зниження напруги на статорі АД. Починається лавина напруги, яка спричинює зупинку АД.

Для визначення СХН ВП АЕС було проведено серію розрахунків усталених режимів для детальної та еквівалентної моделей ВП АЕС при різних значеннях напруги живлення на генераторних шинах (U_G , в.о.). Результати розрахунків наведені в таблиці.

U_G , в.о.	Детальна модель ВП АЕС		Еквівалентна модель ВП АЕС		Різниця	
	P , МВт	Q , Мвар	P , МВт	Q , Мвар	P , %	Q , %
0,77	46,92	33,16	46,21	31,31	1,51	5,58
0,80	46,95	31,85	46,17	30,32	1,66	4,80
0,85	46,04	30,97	46,12	29,72	0,17	4,04
0,90	46,18	30,97	46,09	29,89	0,19	3,49
0,95	46,34	31,52	46,07	30,59	0,58	2,95
1,00	46,51	32,47	46,05	31,69	0,99	2,40
1,05	46,7	33,74	46,04	33,11	1,41	1,87
1,10	46,89	35,28	46,04	34,81	1,81	1,33

Як і очікувалося, активна потужність, що споживається ВП АЕС, при зміні напруги змінюється незначно (таблиця). Тому для задання СХН за активною потужністю можна використати модель навантаження $P = \text{const}$. Визначення параметрів полінома СХН для реактивної потужності виконується шляхом розв'язання системи рівнянь, отриманих після підстановки результатів розрахунків усталених режимів для детальної моделі ВП АЕС (таблиця) у рівняння (2):

$$\begin{cases} 31,85 = 32,47 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{0,8}{1} \right)^1 + b_2 \left(\frac{0,8}{1} \right)^2 \right), \\ 35,28 = 32,47 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{1,1}{1} \right)^1 + b_2 \left(\frac{1,1}{1} \right)^2 \right), \\ b_0 + b_1 + b_2 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Рішення системи рівнянь (7) має такий вигляд: $b_0 = 2,96$; $b_1 = -4,52$; $b_2 = 2,56$, що дає змогу сформулювати СХН ВП АЕС як $Q = Q_0 \left(2,96 - 4,52 \left(\frac{U}{U_0} \right) + 2,56 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right)$.

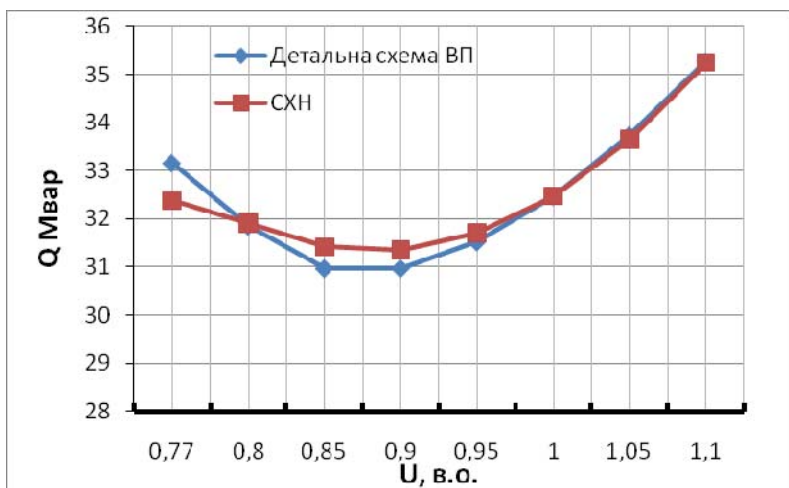


Рис. 5

З метою верифікації визначеної СХН ВП АЕС було проведено серію розрахунків усталених режимів. На рис. 5 показано залежності споживання реактивної потужності навантаження ВП від напруги, одержані шляхом моделювання детальної схеми ВП та з використанням еквівалентного навантаження з визначеною СХН. У діапазоні напруги 0,8...1,1 в.о. СХН досить точно відображає поведінку навантаження.

Висновки.

Побудовано детальну математичну модель мережі власних потреб АЕС та сформовано її статичну характеристику навантаження за напругою. Отримана СХН відображає фізичну суть процесів, що протікають у мережі власних потреб АЕС. Коли експериментальні дослідження навантаження є неможливими, доцільним є застосування запропонованої моделі. Це дало змогу провести розрахунки шляхів подачі напруги на АЕС з урахуванням поведінки споживачів власних потреб.

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Стелюк А.О., Баталов А.Г. Моделювання об'єднання синхронних зон в процесі відновлення ОЕС України після особливої системної аварії // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 36–40.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
3. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: Учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 136 с.
4. Электротехнический справочник: Т. 3. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. проф. МЭИ И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
5. Aronovich I.M., Lipsky A.M. Experimental analysis of power system static load models // Mat. XI Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми сучасної електротехніки – 2010". – http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/s2/2_1.pdf
6. Kundur P. Power System Stability and control // McGraw – Hill. – New-York, 1993. – 1176 p.
7. Linden K., Segerqvist I. / Modeling of load devices and studying load/system characteristics // Goteborg. – 1992.

УДК 621.311.001.57

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **А.О. Стелюк**, канд. техн. наук, **О.В. Леньга**, асп., **В.С. Макогончук**, инж. Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Определение статических характеристик нагрузки потребителей собственных нужд атомных электростанций
Построена детальная математическая модель собственных нужд атомной электростанции. На основе расчетов сформированы статические характеристики нагрузки по напряжению СН АЭС для использования при моделировании системных аварий. Библ. 7, рис. 5, таблица.

Ключевые слова: статическая характеристика нагрузки, собственные нужды станции, моделирование нагрузки.

V.V. Pavlovskiy, A.O. Stelyuk, O.V. Lenga, V.S. Makogonchuk

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine, Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Definition of the static load model of nuclear power plant auxiliaries

Detail mathematical model of nuclear power plant auxiliaries was created. Using load flow analysis static load model of auxiliaries of NPP was formed. This load model can be used for power system blackout modeling. References 7, figures 5, table.

Key words: static load characteristics, power plant auxiliaries, load modeling.

Надійшла 18.10.2013

Received 18.10.2013