

УДК 621.316

## КОРИГУВАННЯ РЕЖИМУ СЛАБКОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ЗАПУСКУ ВІД НЕЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗІСТАВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

**О.І. Чиженко**, докт. техн. наук, **І.В. Трач**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна  
e-mail: trachi@ied.org.ua

*Розглянуто режим слабкої електромережі при запуску електродвигуна зіставної з мережею потужності. Для компенсації пускових струмів електродвигуна запропоновано використання пристрою, який містить мостовий тиристорний регульований компенсатор реактивної потужності (ТРК) та LC-фільтри вищих гармонік струму. Складено модель електромережі з активно-індуктивним навантаженням, від якої здійснюється прямий запуск асинхронного електродвигуна у режимі без механічних навантажень на його валу. Підібрано оптимальні параметри пристрою, що складається з ТРК та фільтра. Наведено розрахунки струмів і напруги елементів моделі. Показано переваги застосування пристрою ТРК-фільтр з метою захисту обладнання електромережі від пускових струмів і просідання напруги та гарантованого запуску електродвигуна. Бібл. 8, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** електрична мережа, режим запуску асинхронної машини, тиристорний регульований компенсатор, пусковий струм, пасивні фільтри вищих гармонік.

У слабких електричних мережах (з обмеженою пропускною можливістю) існує проблема запуску від них електродвигунів зіставної потужності. Це пов'язано з тим, що пускові струми двигунів можуть перевищувати їх номінальні струми у 7,5 разу. Ці пускові струми можуть перебільшувати й номінальний струм мережі, тому, незважаючи на їх короткочасність, разом з тим спроможні нашкодити обладнанню системи. Крім того, протікання їх через розподільний трансформатор та лінії передач створює на їх опорах падіння напруги, тому запуск віддалених від розподільних трансформаторів двигунів стає проблематичним внаслідок просідання напруги на їх вхідних затисках. Провали напруги спроможні нанести шкоду й іншим (сусіднім з електродвигунами) навантаженням мережі. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є застосування пристрою, який підключається до мережі безпосередньо біля електродвигунів, щоб замкнути на себе більшу частину їх пускових струмів. Враховуючи, що струм двигунів має переважно активно-індуктивний характер, у якості цих пристроїв доцільно застосовувати такі, які поведуть себе як конденсатори з регульованою в широких межах ємністю. Вони спроможні замикати на себе пусковий стрибок струму двигуна протягом інтервалу часу виходу двигуна на номінальний сталий режим. У міру спадання величини пускових струмів ємність таких пристроїв теж пропорційно зменшується. При номінальному режимі електродвигуна ємність пристрою має бути такою, щоб обмежуватися тільки компенсацією реактивної потужності, що споживає двигун, а при необхідності компенсувати й реактивну потужність у мережі. В якості таких пристроїв, що функціонують у режимі конденсатора зі змінною у широких межах еквівалентною (за основною гармонікою, тобто гармонікою з частотою живлячої мережі) ємністю, можуть використовуватись тиристорні регульовані компенсатори реактивної потужності (ТРК) – керовані джерела реактивної потужності, запропоновані в роботах [2, 4] як системи збудження асинхронних генераторів. У таких перетворювачах максимальне значення регульованої еквівалентної ємності обмежується лише активним опором їх кола та швидкодією керованих вентилів, а саме часом встановлення запірних властивостей цих вентилів.

На рис. 1 показано схему моделі слабкої електромережі, яка живить активно-індуктивне навантаження (Н) та електричну асинхронну машину (АМ), що запускається за допомогою пускача (П). Безпосередньо мережа моделюється трифазною системою ЕРС з послідовно до них ввімкнутими у кожній фазі активно-індуктивними опорами  $z_{\text{мер}} = \sqrt{r_{\text{мер}}^2 + x_{\text{мер}}^2}$ .

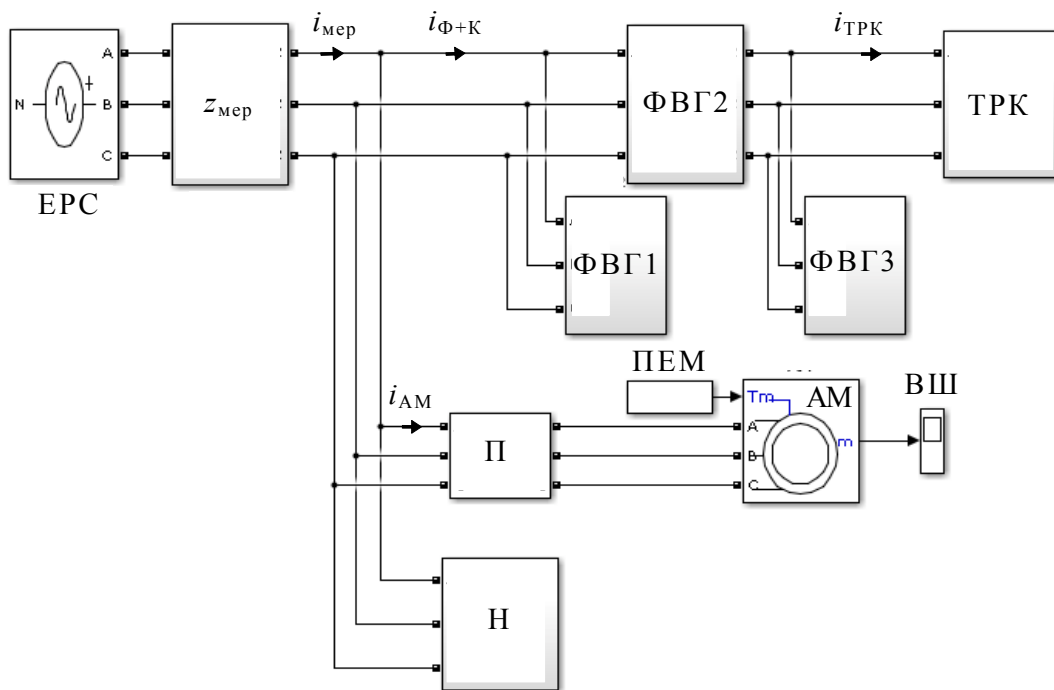


Рис. 1

Останні моделюють еквівалентні опори електромережі, що складаються з опорів  $r_{\text{ТР}}$  та  $x_{\text{ТР}}$  встановленого в мережі розподільного трансформатора та опорів  $r_{\text{лін}}$  і  $x_{\text{лін}}$  ділянки лінії передачі від розподільного трансформатора до місця підключення Н та АМ. У цьому ж місці з метою компенсування пускових струмів АМ підключено пристрій, який складається з ТРК та фільтрів вищих гармонік (ФВГ), які необхідні для фільтрації вищих гармонік, що генеруються ТРК.

На схемі рис. 1 позначено  $i_{\text{мер}}$ ,  $i_{\text{АМ}}$ ,  $i_{\text{ТРК}}$ ,  $i_{\text{Ф+К}}$  – струми фази А відповідно: мережі, асинхронної машини, ТРК та на вході пристрою, що складається з ФВГ і ТРК.

Комбінований пасивний ФВГ складається з трьох частин, а саме: ФВГ1 – фільтра високих частот [4, fig. 5.2] та резонансного гармонічного фільтра з фіксованими полюсами [7]. Останній складається з дроселя ФВГ2 та фільтра ФВГ3 із паралельно ввімкнутими один до одного резонансними LC-фільтрами другого порядку 5- і 7-ї гармонік та фільтра верхніх частот.

Тиристорний регульований компенсатор виконано за схемою рис. 2, де В1...В6 – керувані вентилялі; Д1...Д6 – діоди (відсікаючі); С – комутуючі конденсатори;  $L_d$  – дросель у колі випрямленого струму  $i_d$ ;  $r_d$  – активний опір, що враховує активний опір кола випрямленого струму та активний опір решти елементів кола перетворювача як вентилів, провідників і т.п. Величина діючого значення  $I_{\text{ТРК}}$  вхідного фазного струму  $i_{\text{ТРК}}$  перетворювача плавно регулюється зміною кута регулювання  $\alpha$  керованих вентилів В1...В6. Кут  $\alpha$  відмірюється від точки перетину позитивних півхвиль напруги фаз А та С. Тип цих вентилів вибирається з таких умов: час встановлення їх запірних властивостей має бути таким, щоб при максимальному струмі перетворювача запобігти несанкціонованим повторним відкриттям цих вентилів, тобто щоб перетворювач гарантовано забезпечував максимальне значення  $i_{\text{ТРКmax}}$  ємнісного за характером струму, необхідного для компенсації пускового струму електродвигуна. Максимальне значення запірної напруги цих вентилів сягає амплітуди лінійної напруги. Діоди Д1...Д6 застосовуються такої ж швидкодії, як і у керованих вентилів, а клас цих діодів повинен бути вдвічі більший, тобто розрахований на подвійну амплітуду лінійної напруги. Індуктивність дроселя  $L_d$  вибирається з умов неперервності (на необхідному діапазоні регулювання величини  $I_{\text{ТРК}}$ ) випрямленого струму  $i_d$ , що необхідне для покращення показників якості вхідного струму  $i_{\text{ТРК}}$ , а саме зменшує коефіцієнт гармонік  $K_{\text{Г}}$  цього струму. До дроселя  $L_d$  приєднано пристрій електронного захисту ПЕЗ, який запобігає аварійним перенапругам, що

виникають при збоях системи керування вентилями (СКВ), таких як пропуски імпульсів керування і т.п.

Електромагнітні процеси, що протікають у цьому перетворювачі, а також регульовальні характеристики при його роботі в режимі випрямляча для більш вагомої ділянки інтервалу регулювання були аналітично досліджені у роботі [3]. У цій роботі не враховані параметри електромережі, що живить перетворювач, а також параметри ФВГ, які необхідні для забезпечення регламентованих значень коефіцієнтів гармонік  $K_{Gi}$  і  $K_{Gi}$  відповідно напруги та струму мережі.

Метою цієї роботи є: 1) дослідити режим слабкої електромережі при запуску асинхронного електродвигуна зіставної потужності; 2) розглянути можливі способи покращення показників цих режимів; 3) дослідити електромагнітні процеси, що протікають у колі перетворювача за схемою рис. 2 з урахуванням параметрів мережі та параметрів фільтрів вищих гармонік.

Розглянемо режим пуску АМ потужністю 110 кВт (номінальний струм  $I_{AMN} = 205,8$  А,  $\cos\varphi = 0,89$ ,  $\eta = 0,91$ ) від електромережі напругою 11кВ/380В, потужність короткого замикання котрої в точці загального приєднання  $S_{мерКЗ} = 2,0715$  МВА,  $x_{мер} / r_{мер} = 3,92$ . Номінальний струм мережі  $I_{мерN} = 350$  А. Опір  $z_{мер}$ , який моделює опір електричної мережі, дорівнює опору послідовного з'єднання розподільного трансформатора ТП 250 ( $u_{кз} = 0,06$ ,  $P_{кз} = 3,7$  кВт) та повітряної лінії електропередачі довжиною 110 м з мідними жилами 240 мм<sup>2</sup>. У моделі  $z_{мер} = 0,0696$  Ом ( $x_{мер} = 0,0674$  Ом;  $r_{мер} = 0,0172$  Ом). Від мережі живиться активно-індуктивне навантаження, яке в моделі змодельоване паралельно з'єднаними опорами – активним  $r_n = 7,26$  Ом та реактивним  $x_n = \omega L_n$ , де  $L_n = 30,8$  мГн. Потужності навантаження  $S_n = 25$  кВА,  $P_n = 20$  кВт,  $Q_n = 15$  квар. У момент  $t_{пд}$  запускається АМ, і в мережі починається перехідний процес, при якому в ній спостерігаються надструми, обумовлені пусковими струмами АМ. Математичну модель АМ у перехідному режимі складено за методикою, викладеною у роботі [1]. Перехідний процес закінчується, коли АМ набирає номінальних обертів. При розрахунках це фіксується вимірювачем швидкості (ВШ), який показано в схемі рис. 1 окремим блоком. Початкове значення електромагнітного моменту задається у блоці ПЕМ.

Параметри компенсаційного перетворювача такі:  $C = 10$  мкФ;  $L_d = 9,375$  мГн;  $r_d = 0,0156$  Ом. Максимальне значення реактивної потужності, яка генерується ТРК у мережу, досягається при куті регулювання  $\alpha = \alpha_{max}$ , значення якого залежить від параметрів кола ТРК. У моделі, що розглядається,  $\alpha_{max} = -67,2$  ел. град. Реактивна потужність, що генерується ТРК, при  $\alpha = \alpha_{max} = -67,2$  ел. град становить  $Q_{ТРКmax} = 2830$  квар. При цьому амплітуда ємнісного за характером фазного струму ТРК досягає значення  $I_{mТРКmax} = 3020$  А.

Вибір параметрів ФВГ є багатоцільовою задачею з багатьма локальними мінімумами [6], для вирішення якої ефективно використовувати метод рою часток та його модифікації [8]. Подробиці розв'язання цієї задачі через її громіздкість тут не наводяться. Отже, обмежимося лише результатами її розв'язання, отриманими за умови, коли в мережі у сталих режимах забезпечується регламентоване значення  $K_{Gi} = 8\%$  і якнайменше значення коефіцієнта  $K_{Gi}$ . Ще однією умовою при виборі параметрів ФВГ є те, що реактивна потужність, яка ним генерується у сталому режимі з запущеною в мережі АМ, має задовольняти рівнянню

$$Q_\phi + Q_{ТРК} = Q_n + Q_{мер} + Q_{AM}. \quad (1)$$

Отримані таким чином параметри  $L_\phi$ ,  $C_\phi$ ,  $r_\phi$  ФВГ для відповідних його складових частин ФВГ1-3 наведено у таблиці.

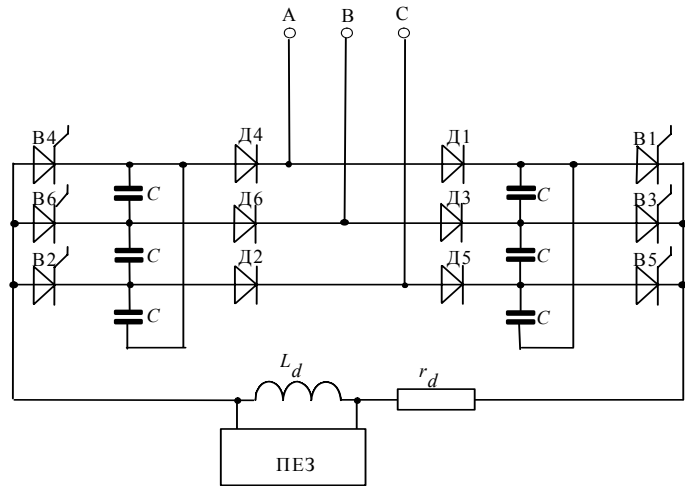


Рис. 2

Назва фільтра	Діапазон фільтрації	$C_{\Phi}, \Phi$	$L_{\Phi}, \text{Гн}$	$r_{\Phi}, \text{Ом}$
ФВГ1	ФВЧ*	$0,125 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	0,25
ФВГ2, дросель	-	-	$0,325 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
ФВГ3	5 гармонка	$1,530 \cdot 10^{-3}$	$0,3197 \cdot 10^{-3}$	0,0098
ФВГ3	7 гармоніка	$0,1874 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	0,050
ФВГ3	ФВЧ*	$1815 \cdot 10^{-3}$	$0,0348 \cdot 10^{-3}$	0,12

\* ФВЧ – фільтр вищих частот.

Фільтри вищих гармонік у сталому режимі генерують у мережу реактивну потужність  $Q_{\Phi} = 143,8$  квар. Втрати активної потужності на фільтрах при цьому становлять  $P_{\Phi} = 0,97$  кВт.

У момент  $t_{\text{пд}} = 0,197$  с, як показано на часових діаграмах рис. 3 і 4, здійснюється запуск АМ. Якщо пристрій ТРК –ФВГ при цьому відключено, то пусковий струм АМ замикається через мережу і тим самим підвищує струм цієї мережі суттєво вище номінального. Тому для запобігання цьому в момент  $t_{\text{фор}} = t_{\text{пд}} - t_{\Delta} = 0,16$  с здійснюється попереджувальне підключення ТРК-ФВГ. СКВ перетворювача при цьому відпрацює максимально можливе у складеній моделі значення кута регулювання  $\alpha_{\text{max}} = -67,2$  ел. град. При цьому куті у разі закінчення перехідного процесу в ТРК встановився б сталий режим з  $Q_{\text{ТРК}} = 2830$  квар і діючим значенням фазного ємнісного струму  $I_{m\text{ТРКmax}} = 3020$  А. Але перехідний процес наростання струму ТРК  $i_{\text{ТРК}}$  продовжується лише доти, поки струм мережі не зменшиться до номінального свого значення  $I_{\text{мерN}} = 350$  А. Після чого наростання  $i_{\text{ТРК}}$  зупиняється СКВ, яка відпрацює відповідне зменшення кута  $\alpha$ . Значення ємнісного за характером струму ТРК, яке він встиг набутися за час перехідного процесу, тобто за час  $t_{\Delta} = 0,037$ , значною мірою компенсує пік індуктивного пускового струму АМ. Далі, у міру того, як АМ набирає номінальні оберти, вона входить у сталий номінальний режим, її струм поступово зменшується. Пропорційно цьому спадає й вхідний струм ТРК – це відпрацюється СКВ шляхом відповідного плавного зменшення кута управління  $\alpha$  керованих вентилів В1...В6, чим запобігається перекомпенсація реактивної потужності в електромережі. У сталому режимі у ТРК встановлюється значення кута управління  $\alpha$  таке, що генерована ТРК реактивна потужність задовольняє рівнянню (1).

Параметр  $t_{\Delta}$  безпосередньо пов'язаний зі сталою часу  $\tau_{\text{пер}}$  перехідних процесів у ТРК. Зменшення значення  $t_{\Delta}$  є метою подальшої оптимізації параметрів перетворювача.

На часових діаграмах рис. 3 і 4 показано, як змінюються струми і напруга на елементах системи рис. 1 після пуску АМ: 1) при наявності в системі пристрою ТРК–ФВГ (рис. 3) і 2) без нього (рис. 4). На цих діаграмах прийняті такі позначення струмів і напруги:  $i_{\text{мер}}$  і  $u_{\text{мер}}$  – миттєві значення відповідно струмів і напруги фаз мережі у місці підключення АМ;  $i_{\text{ТРК}}$  – миттєві значення струмів у фазах ТРК;  $i_{\Phi+\text{К}}$  – миттєві значення фазних струмів на вході пристрою ТРК–ФВГ;  $i_{\text{AM}}$  – миттєві значення фазних струмів АМ;  $i_{\Phi} = i_{\Phi+\text{К}} - i_{\text{ТРК}}$  – складова струму мережі, яка пов'язана з ФВГ. Жирними лініями на рис. 3 позначені струми і напруга фази А.

На діаграмах значення струмів – в амперах, напруги – у вольтах, часової координати  $t$  – у секундах.

З діаграм видно, що на момент, який відповідає піку пускового струму АМ, ТРК замикає на себе значну його частину, а саме 910 А, що становить 40 % (від піку пускового струму АМ), зменшує струм мережі й тим самим стабілізує напругу мережі при запуску АМ. Максимальне значення пускового струму АМ становить  $i_{\text{AMmax}} \approx 2250$  А, як видно з діаграм, при перехідному режимі протягом тривалого часу (0,4 с) воно змінюється не суттєво. При цьому завдяки наявності ТРК з ФВГ максимальне перехідне значення струму в мережі  $i_{\text{мер}}$  має найбільше значення 1700 А, яке, навпаки, у перехідному процесі спостерігається лише на незначному інтервалі часу, довжина якого складає не більше 0,01 с. Після чого амплітуда коливань перехідного струму мережі швидко спадає до значень, близьких  $I_{m\text{мерN}}$ , а потім протягом 0,37 с зменшується й до амплітуди сумарного струму ненавантаженої АМ і Н. Діюче значення струму АМ у ненавантаженому режимі складає  $I_{\text{AMNxx}} = 56,4$  А.

Пуск АМ без пристрою ТРК–ФВГ у системі проілюстровано на діаграмах рис. 4. Явно, що у цьому випадку пусковий струм АМ замикається через мережу, внаслідок чого її струм перевищує своє номінальне значення протягом 20 періодів (тобто 0,4 с) й тому він

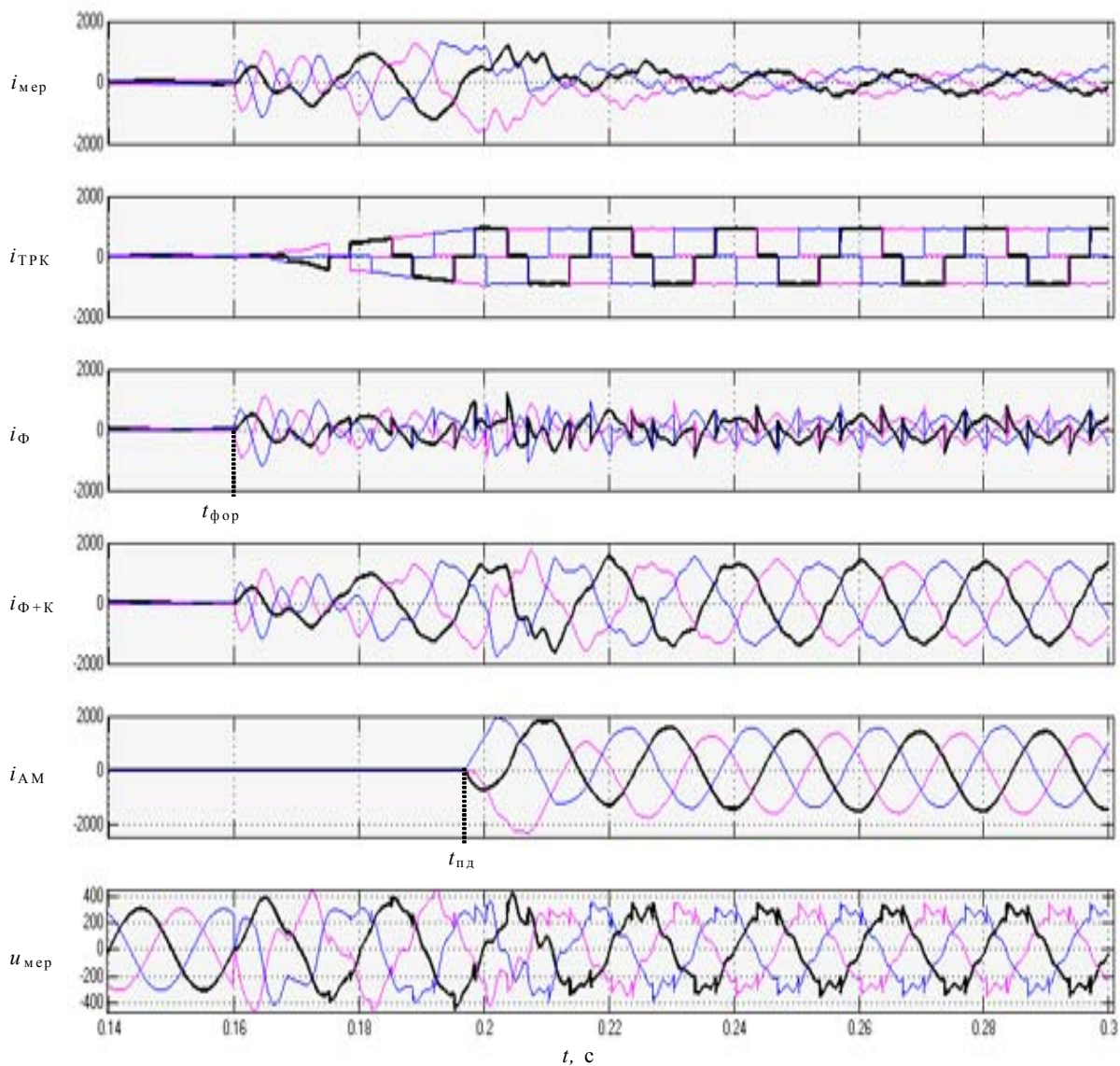


Рис. 3

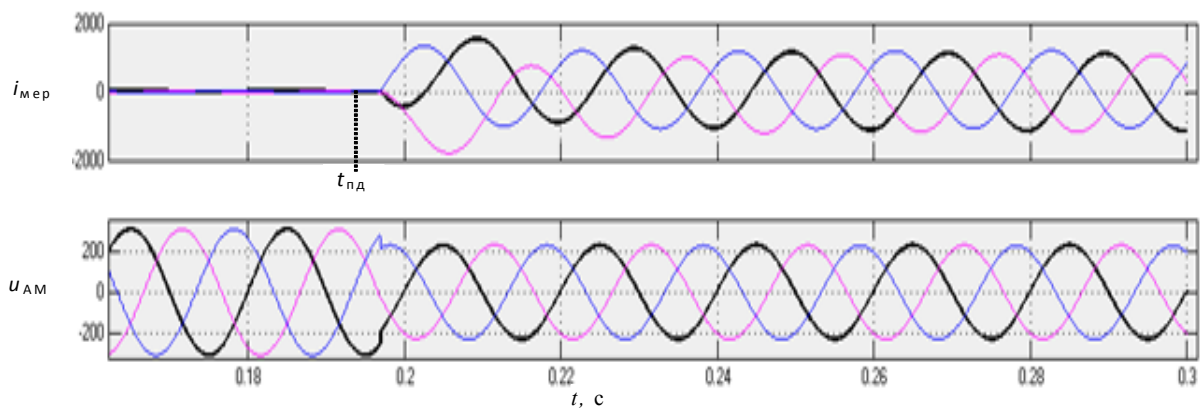


Рис. 4

спроможний заподіяти шкоду встановленому в мережі обладнанню та викликати просідання напруги на інших навантаженнях, які вона живить. Максимальне просідання напруги у місці підключення АМ становить 21 %.

**Висновки.** Використання пристрою ТРК-ФВГ у слабких електромережах, навантаження яких містить і потужні електродвигуни, дає змогу суттєво зменшити впливи на мережу пускових струмів електродвигунів та запобігти пов'язаним з цим просіданням напруги, перенавантаженню розподільного трансформатора й тим самим захистити інші навантажен-

ня електромережі від цих негативних факторів. Окрім того ці пристрої гарантують запуск від електромережі двигунів з'являючої з нею потужності. Шляхом використання рекомендованих LC-фільтрів у мережі забезпечується коефіцієнт гармонік напруги не більше 8 %, як це регламентовано вітчизняними стандартами, та якнайменше значення коефіцієнта гармонік струму. Перевагою такого схемотехнічного рішення є можливість експлуатації в електричній мережі АМ з'являючої з мережею потужності без додаткового устаткування, що дорого коштує, для плавного їх запуску.

1. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Энергоэффективные режимы электромеханической системы насосной установки многоэтажного здания // Техн. электродинамика. – 2016. – № 5. – С. 38–45.
2. Волков И.В., Лесник В.А., Чиженко А.И. Асинхронный генератор с высокой перегрузочной способностью // Техн. электродинамика. Темат. вып. Проблемы современной электротехники. – 2000. – Ч. 4. – С. 48–53.
3. Чиженко А.И. Анализ электромагнитных процессов в компенсационном выпрямителе при ограниченных значениях индуктивности сглаживающего дросселя // Пр. Ин-ту электродинамики. Энергоэффективность: 36. науч. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2001. – С. 17–27.
4. Пат. України № 26222, МКІ 6 Н 02 Р 9/44 1999 Генераторне джерело енергії / І.М. Чиженко, І.В. Волков, В.Я. Лісник, О.І. Чиженко. – Опубл. 1999. – Бюл. № 4.
5. Czarnecki L.S. Common and Fixed-Poles Resonant Harmonic Filters // Europ. Trans. on Electrical Power, ETEP Vol. 8, No. 5, Sept./Oct. – 1998. – P. 345–351.
6. Ginn H.L. III and Czarnecki L.S. An Optimization Based Method for Selection of Resonant Harmonic Filter Branch Parameters // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No.3, July 2006. – P. 1445–1451.
7. Mishra G. Design of Passive High Pass Filter for Hybrid Active Power Filter Applications A Thesis of the Degree of Master of Technology. National Institute of Technology. – Rourkela. – 2013. – P. 57.
8. Trach I., Zubiuk Yu. A combined approach to multiobjective optimization of capacitor placement in radial distribution networks // 3-rd Intern. Conf. on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS 2013) [http://www.epecs-conf.org/files/EPECS13\\_CP\\_FV.pdf](http://www.epecs-conf.org/files/EPECS13_CP_FV.pdf).

УДК 621.316

**А.И. Чиженко**, докт. техн. наук, **И.В. Трач**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

#### **Корректирование режима слабой электрической сети при запуске от нее электродвигателя сопоставимой мощности**

*Рассмотрен режим слабой электросети при запуске электродвигателя сопоставимой с сетью мощности. Для компенсации пусковых токов электродвигателя предложено использовать устройство, содержащее мостовой тиристорный регулируемый компенсатор реактивной мощности (ТРК) и LC-фильтры высших гармоник тока. Составлена модель электрической сети с активно-индуктивной нагрузкой, от которой осуществляется прямой запуск асинхронного электродвигателя в режиме отсутствия механической нагрузки на его валу. Подобраны оптимальные параметры устройства ТРК-фильтр. Приведены расчеты токов и напряжений элементов модели. Показаны преимущества использования устройства ТРК-фильтр с целью защиты оборудования электросети от пусковых токов и провалов напряжения, а также гарантированного запуска электродвигателя. Библи. 8, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, режим запуска асинхронной машины, тиристорный регулируемый компенсатор, пусковой ток, пассивные фильтры высших гармоник.

#### **O.I. Chyzenko, I.V. Trach**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Correction of the regime of a weak electric network when starting the electric motor with comparable power**

*The regime of a weak electric network when starting the electric motor is considered when its power is comparable with the power of the network. To compensate the starting currents of the electric motor, it is proposed to use a device containing a bridge thyristor controlled reactive power compensator and LC filters of higher current harmonics. A model of an electric network with an active-inductive load is considered, from which a direct start of an induction motor is carried out in the absence of a mechanical load on its shaft. The parameters of the TRK filter are selected. The currents and voltages on the elements of the model are analyzed. The advantages of using the "reactive power compensator-filter" device for the purpose of protecting the electrical equipment from starting currents and voltage drops, as well as guaranteed start of the electric motor are shown. References 8, figures 4, table.*

**Key words:** weak electric network, thyristor compensator of reactive power, LC-filters, start the electric motor, currents and voltages.

Надійшла 17.07.2017  
Received 17.07.2017