

Автоматизація і інформаційні технології

УДК 621.316.9

В.О.Зданевич, магістрант;
О.Д.Подольцев, д.т.н. проф. (КНУБА, Київ)

АНАЛІЗ ПЕРЕНАПРУГИ В СИСТЕМІ "ІНВЕРТОР З ШІМ – КАБЕЛЬНА ЛІНІЯ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН" З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТА ПРОГРАМ MATLAB/SIMULINK

АНОТАЦІЯ. Проведено моделювання високочастотних електромагнітних процесів при живленні асинхронного двигуна від інвертора з ШІМ через довгу кабельну лінію. Показано вплив часу наростання імпульсу напруги ШІМ та довжини кабельної лінії на рівень перенапруги на вході двигуна.

Ключові слова: інвертор з ШІМ, кабельна лінія, асинхронний двигун, перенапруга.

АННОТАЦИЯ. Выполнено моделирование высокочастотных электромагнитных процессов при питании асинхронного двигателя от инвертора с ШИМ. Показано влияние времени нарастания импульса напряжения ШИМ и длины кабельной линии на уровень перенапряжения на входе двигателя.

Ключевые слова: инвертор с ШИМ, кабельная линия, асинхронный двигатель, перенапряжение.

SUMMARY. Numerical simulation of high frequency electromagnetic processes in the system of "inverter with PWM - power cable line - asynchronous motor" is carried out. The influence of the time of voltage pulse rise in the output of inverter and cable length on overvoltage in motor input is studied.

Key words: inverter with PWM, cable line, electric motor, overvoltage.

Вступ

Сучасне електротехнічне обладнання, що використовується в будівельних, гірничих та піднімально-транспортних машинах, характеризується масовим застосуванням засобів силових електроніки. Силові транзистори, тиристори, діоди і перетворювачі енергії на їх основі стали невід'ємною частиною переважної більшості сучасних електромеханічних комплексів [1, 2]. Особливу роль серед них відіграють енергозберігаючі частотно-керовані асинхронні електроприводи, серед яких найбільше розповсюдження знайшли двоступеневі перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, так звані АС-DC-АС системи (Alternate Current – Direct Current - Alternate Current). Поряд з безперечними перевагами такої системи, що, власне, й забезпечило її стрімке просування за останні два десятиріччя в основні галузі промисловості, їм притаманні і деякі небажані властивості, що зменшують їх ефективність. Це, перш за все, генерація високочастотних складових струму в джерело живлення і навантаження.

Серед технічних задач, що вирішуються в будівництві, виникає необхідність в окремому розташуванні перетворювача ча-

стоти і асинхронного двигуна (АД), що потребує використання кабельного з'єднання. Це погіршує умови роботи двигуна, оскільки на його клеммах виникають перенапруги за рахунок ефекту "довгої лінії". В наш час використовують, як правило, спрощені розрахунки рівня перенапруги в таких системах на основі аналітичних формул – наприклад [3]. Більш детальний аналіз щодо використання фільтрів у таких системах подано у [4].

Метою роботи є дослідження високочастотних електромагнітних процесів в системі "інвертор з ШІМ – кабельна лінія – асинхронний двигун" з використанням сучасних комп'ютерних програмних засобів, а саме пакету Matlab/Simulink та визначення рівня перенапруги на вході двигуна за різною довжиною кабельної лінії. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі, як:

- розробка Simulink-моделі системи "інвертор з ШІМ – кабельна лінія – асинхронний двигун" та проведення на її основі багатоваріантних розрахунків;

- визначення основних параметрів системи, що впливають на рівень перенапруги

на вході двигуна, та побудова графічних залежностей, що дозволяють оцінювати величину перенапруги за різною довжиною кабельної лінії.

Виклад основного матеріалу

Типова структурна схема силової частини AC-DC-AC перетворювача приведена на рис. 1.

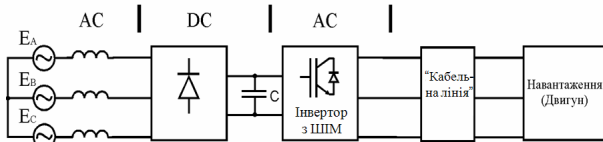


Рис. 1. Структурна схема AC-DC-AC перетворювача для живлення асинхронного двигуна через кабельну лінію

частоти і амплітуди, яка прикладається до обмоток статора АД. У вихідних каскадах інвертора в якості ключів використовуються, як правило, силові IGBT-транзистори. Порівняно з іншими видами силових ключів вони мають більш високу частоту перемикачів, що дозволяє отримувати вихідний сигнал з мінімальними спотвореннями, оскільки при збільшенні цієї частоти знижується значення коефіцієнту гармонічних спотворень вихідної напруги.

Регулювання вихідної частоти і вихідної напруги інвертора здійснюється за рахунок широтно-імпульсного (ШІМ) керування. ШІМ характеризується періодом модуляції, в межах якого обмотка статора по черзі підключається до полюсів випрямляча.

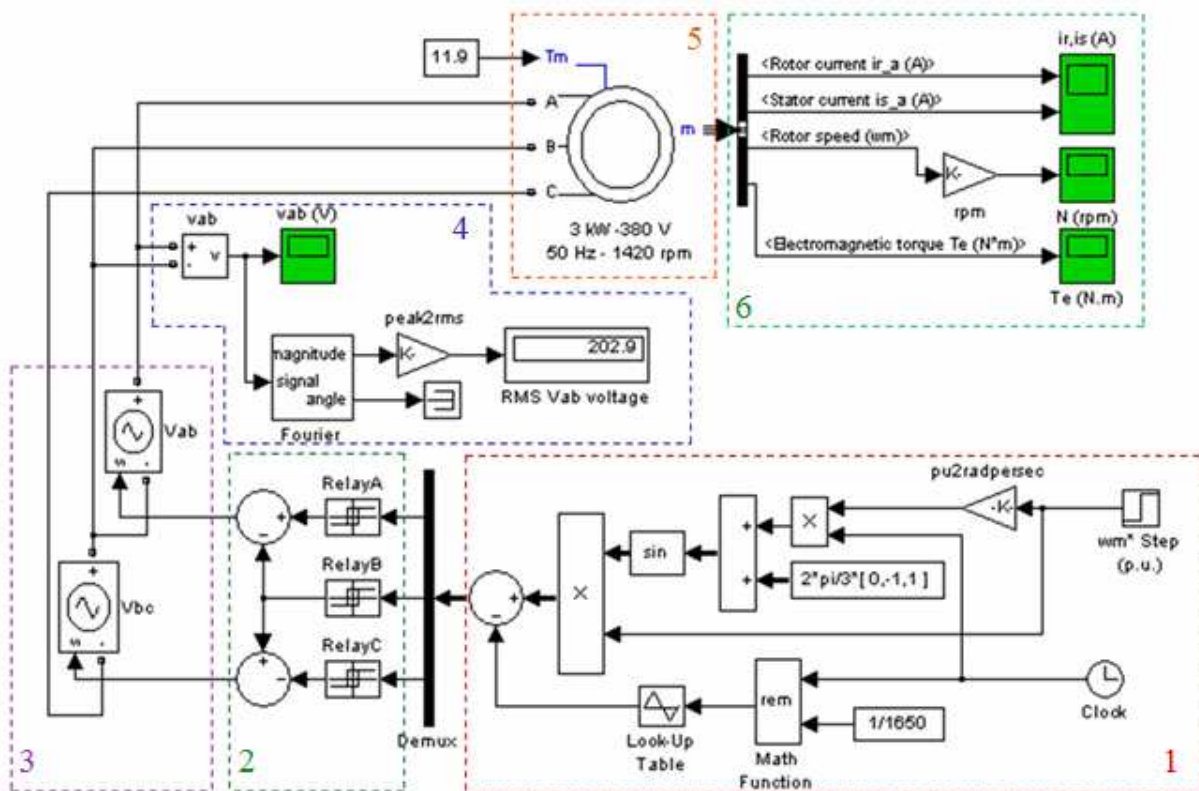


Рис. 2. Simulink-модель віртуальної системи для дослідження рівня перенапруг в асинхронному двигуні при живленні від інвертора з ШІМ за відсутності кабельної лінії

Ланка постійного струму DC складається з випрямляча (зазвичай мостового типу) та батареї фільтрових конденсаторів. Випрямляч може бути як керованим (для регулювання діючого значення напруги перетворювача), так і некерованим. Силовий трифазний імпульсний інвертор AC здійснює перетворення випрямленої напруги в трифазну змінну напругу потрібної

Тривалість такого під'єднання в межах періоду модулюється за синусоїдальним законом.

При моделюванні електромагнітних процесів у роботі використовувався пакет прикладних програм Matlab/Simulink [5]. Розроблена Simulink-модель системи "інвертор з ШІМ – асинхронний двигун" по-

казана на рис. 2. яка включає наступні блоки:

- блок 1 - математична модель ШІМ, за допомогою якої здійснюється регулювання вихідної частоти і вихідної напруги інвертора;
- блок 2 - релейні функції, за допомогою яких ми отримуємо ступінчасту напругу;
- блок 3 - джерело змінної трифазної напруги з ШІМ;
- блок 4 - вимірювач амплітуди та фази першої гармоніки напруги. За допомогою цього блоку вимірюється напруга на вході інвертора. Коефіцієнт "К" забезпечує перехід від амплітудного до діючого значення;
- блок 5 - досліджуваний трифазний асинхронний двигун;
- блок 6 - осцилографи для спостереження струму в роторі та статорі, а також швидкості та моменту асинхронного двигуна.

Слід зауважити, що попередньо використовувалась дискретна модель системи, що містила дискретну модель інвертора. За результатами розрахунків було встановлено, що ця модель не дозволяє моделювати високочастотні процеси з характерним часом 10^{-7} с. Тому далі в роботі використовувалась аналогова модель, що наведена на рис. 2.

Як об'єкт дослідження вибрано асинхронний короткозамкнений двигун типу RA 100 LB 4, параметри якого наведені в табл. 1. Номінальна лінійна напруга 380 В.

Тип двиг.	$P_{нр}$ [кВт]	n_n об/хв.	η , %	$\cos \varphi$	I_n , А	$k_I = \frac{I_K}{I_H}$	$m_n = \frac{M_K}{M_H}$	$m_{max} = \frac{M_{max}}{M_H}$	J , кгм ²
RA100	3	1420	81	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058

Таблиця 1

Для розрахунку параметрів двигуна, що необхідно ввести в його Simulink-модель, використовувалась методика розрахунку, що наведена в [6].

Діапазон зміни несучої частоти f_m в сучасних IGBT-транзисторах знаходиться в межах 2÷16 кГц. Внаслідок високого значення f_m досягається покращення спектральних характеристик вихідної на-

пруги інвертора за рахунок зсуву спектра вищих гармонік у високочастотний діапазон, причому відношення амплітуд вищих гармонік, що знаходяться найближче до основної (амплітуди основної гармоніки), зменшується. Але негативною стороною підвищення f_m є висока частота гармонік (в області радіочастот), що не завжди припустимо внаслідок широкого використання чутливого електронного устаткування, яке знаходиться поруч, підвищення динамічних втрат енергії у ключах тощо. Таким чином, форма кривої вихідної напруги є високочастотною двополярною послідовністю прямокутних імпульсів (рис. 3а).

Графіки змінення у часі електричного струму статора та ротора асинхронного двигуна зображені на рис.3(б) і свідчать, що після перехідного процесу протягом 0,2 с струми набувають сталого значення.

Практично у всіх публікаціях, у яких розглянуто передачі енергії від ШІМ-інвертора до навантаження, проблема подвоєння миттєвого значення напруги на навантаженні за рахунок використання кабельного з'єднання та великого значення dV/dt , визначається як головна. Для дослідження цього у роботі на базі моделі поданої на рис. 2 була розроблена Simulink-модель системи "інвертор з ШІМ – кабельна лінія – асинхронний двигун", що наведена на рис. 4. Порівняно з моделлю наведеною на рис. 2, ця модель додатково містить наступні блоки:

- блок 7 – блок, що формує траєкторію наростання напруги зі сталою часу t_v ;

- блок 8 – довга кабельна лінія;
- блок 9 – за допомогою якого відбувається порівняння напруги на вході та виході довгої кабельної лінії.

В якості ключів в схемі використовуються IGBT-модулі, час комутації яких менше 0,5 мкс, тобто час наростання імпульсів напруги буде дорівнювати

$t_v \leq 0,5$ мкс. При цьому перешкоди, що генеруються, будуть більше 1,0 МГц і крутизна фронту модульованих імпульсів напруги буде більше 1,0 кВ/мкс. Ці фактори діють на двигун та живлячу його лінію наступним чином: діелектрична ізоляція лінії під дією високочастотного електричного поля швидше зношується. Також несприятливо висока частота впливає на ізоляцію двигуна. Попри це, ізоляція двигуна піддається дії напруги, що перевищує майже удвічі U_d , внаслідок виникнення ефекту відбитої хвилі за довжиною живлячої лінії більше критичної.

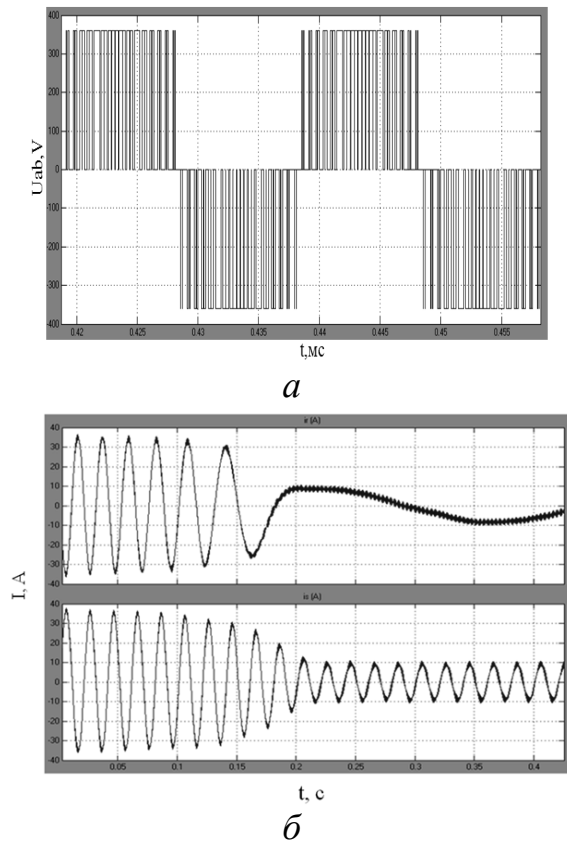


Рис.3. Змінення у часі напруги на виході інвертора з ШІМ (а) та електричного струму в роторі та статорі асинхронного двигуна (б)

Дійсно, представляючи лінію як однорідну з розподіленими параметрами, маємо лінійну напругу на клеммах двигуна:

$$U_M = \bar{U} + \bar{U} = U_d(1 + k_{lv} + \Gamma_M),$$

де \bar{U} – пряма хвиля напруги; \bar{U} – відбита хвиля напруги; Γ_M – коефіцієнт віддзеркалення навантаження двигуна

$$\Gamma_M = \frac{Z_M - Z_L}{Z_M + Z_L},$$

де Z_M – опір навантаження,

$$Z_L = p_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} - \text{хвильовий опір лінії без}$$

втрат.

Типові значення розподілених параметрів трижильного кабелю для живлення асинхронного двигуна потужністю 10 кВт складають: $L_L \approx 0,25$ мкГн/м; $C_L \approx 0,7$ мкФ/м. Тоді хвильовий опір буде мати значення $p_L \approx 20$ Ом. Але, оскільки $Z_M \gg Z_L$ (лінія “відкрита” в кінці, для нього це – холостий хід), то $\Gamma_M \rightarrow 0$; типове значення коефіцієнта віддзеркалення навантаження $\Gamma_M \approx 0,9$.

Коефіцієнт хвильового процесу у формулі визначається виразом:

$$k_{lv} = \frac{3t_t}{t_v} \leq 1,$$

де t_t – час проходження хвилею імпульсу довжини кабелю за один раз (від інвертора до двигуна); t_v – час наростання імпульсу напруги. При $t_v > 3t_t$; $U_M < 2U_d$. При $t_v = 3t_t$ коефіцієнт хвильового процесу досягає критичного значення $(k_{lv})_{крит.} = 1,0$, за якого утворюється максимальна напруга на клеммах двигуна $U_{Mmax} \approx 2U_d$. Механізм цього явища пояснює умову $t_v = 3t_t$, тобто, коли імпульс напруги на двигуні встигає вирости до U_d (пряма хвиля \bar{U}) за час трикратного звернення віддзеркаленої хвилі \bar{U} по довжині лінії (від інвертора до двигуна, назад і знов від інвертора до двигуна); \bar{U} та \bar{U} зустрічаються на клеммах двигуна і підсумовуються, внаслідок чого утворюється подвійна напруга згідно:

$$U_M = \bar{U} + \bar{U} = U_d(1 + k_{lv} + \Gamma_M).$$

$$\text{Час } t_t = \frac{l_L}{v_t},$$

де l_L – довжина живлячого кабелю, м; v_t – фазова швидкість хвилі (швидкість проходження імпульсу напруги).

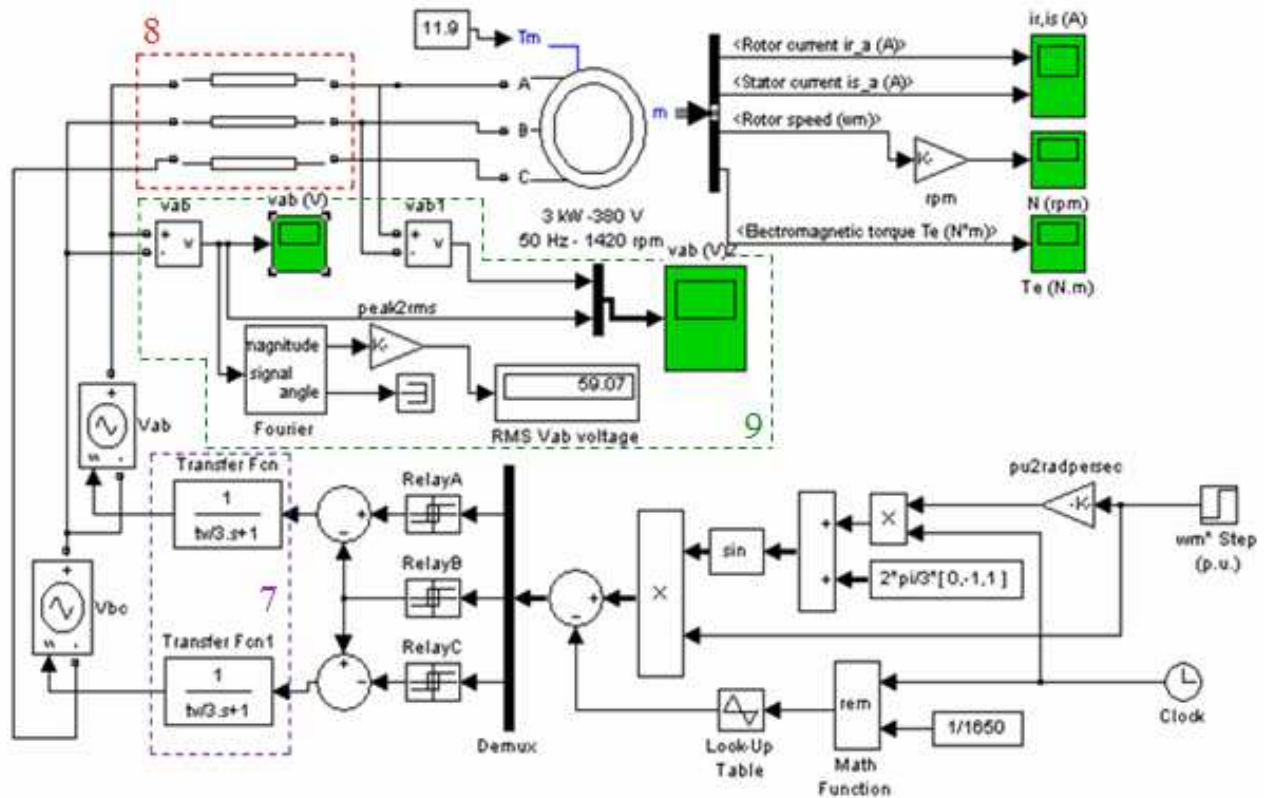


Рис.4. Simulink-модель віртуальної системи для дослідження високочастотних електромагнітних процесів у системі “інвертор з ШІМ – кабельна лінія – асинхронний двигун”

Підставляючи $t_i = \frac{l_L}{v_t}$ у формулу, знаходимо вираз для визначення критичної довжини кабелю:

$$(l_L)_{\text{крит.}} = 50t_v,$$

де $(l_L)_{\text{крит.}}$ вимірюється в м; t_v – в мкс.

Далі ці оцінювальні дані будуть підтвержені результатами комп'ютерних розрахунків.

На рис 5 а, на невеликому проміжку часу (біля 3 мс) зображена форма вихідної напруги інвертора з ШІМ, що являє собою високочастотну послідовність однополярних прямокутних імпульсів. Відповідно до цього ж проміжку часу на рис. 5 б, в наведено напругу на вході двигуна для довжини кабелю $l = 50\text{ м}$, та часу наростання імпульсу напруги: $t_v = 10^{-8}\text{ с}$ та 10^{-6} с . За результатами цих розрахунків можна відзначити наступне:

1. Кожний прямокутний імпульс напруги інвертора після проходження кабельної лінії збуджує в обмотці двигуна високочастотні коливання, що затухають у часі

приблизно за 0,1 мс. Частота цих коливань дорівнює резонансній частоті системи "кабельна лінія - двигун" і у даному випадку складає приблизно 0,77 МГц.

2. Кожен поодинокий прямокутний імпульс напруги збуджує приблизно двократну перенапругу на вході двигуна. Але два наблизнені один до одного імпульси за рахунок взаємної дії призводять до появи більшої перенапруги. Так, при $t_v = 10^{-8}\text{ с}$ рівень перенапруги складає $U_{\text{max}}/U_d = 2,8$ (рис. 5 б). Найгірший випадок буде тоді, коли пряма хвиля від другого імпульсу буде точно співпадати з екстремумом коливань напруги на навантаженні від першого імпульсу. Напруга може досягти майже трикратного збільшення порівняно з вхідним значенням.

3. При збільшенні часу наростання імпульсу напруги рівень перенапруги зменшується (рис. 5 в).

Для дослідження впливу довжини кабельної лінії на рівень перенапруги на вході двигуна в роботі проводились багатоварі-

антні розрахунки за різних значень часу наростання імпульсу та довжини кабелю.

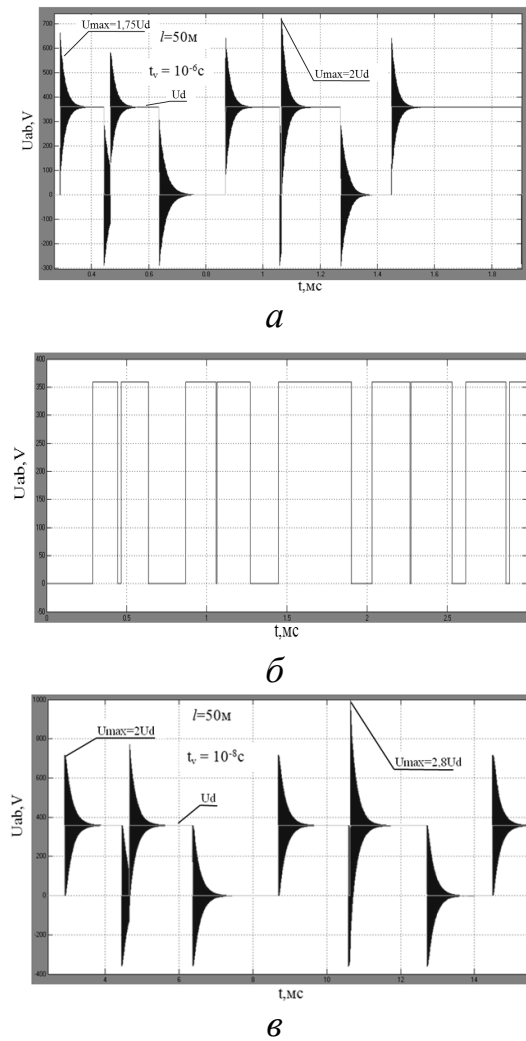


Рис.5. (а) – напруга на виході інвертора з ШІМ, (б) – напруга на вході двигуна при $t_v = 10^{-8}$ с. та (в) – при $t_v = 10^{-6}$ с

Результати цих розрахунків були зведені у таблиці 2 –5, та на їх основі були побудовані графічні залежності, що наведені на рис. 6.

Ці дані свідчать про те, що з ростом довжини кабелю рівень перенапруги монотонно зростає, а при довжині більш 100 м – наближується до насиченого значення. При малій довжині кабелю (менше 10 м) рівень перенапруги невеликий. На цьому рисунку також видно, що при зменшенні часу наростання імпульсу збільшується величина перенапруги. За результатами цих розрахунків доцільно визначити критичну довжину кабелю, при якій $U_{\max} / U_d = 2$ [3]. Ці критичні довжини позначені на рис. 6 для різних значень t_v і дозволяють у кожному конкретному випадку визначити таку довжину кабелю, при якій рівень перенапруги буде значний. Це свідчитиме про необхідність застосування фільтрів на виході інвертора (або на вході двигуна).

Висновки

1. Розроблено Simulink-модель для дослідження високочастотних електромагнітних процесів та перенапруги в системі “інвертор з ШІМ – кабельна лінія – асинхронний двигун”. За результатами моделювання встановлено, що величина перенапруги на вході двигуна залежить як від довжини кабельної лінії l , так і від часу наростання імпульсу напруги ШІМ t_v , що формується вибраними напівпровідниковими елементами.

Таблиця 2

Час наростання імпульсу $t_v=10^{-8}$ с.

l	0	10	18	20	30	33.5	40	48	50	60	70	80	90	100	110
$U_d/U_{\text{Макс}}$	1	1.65	2	2.15	2.7	2.8	3	3.2	3.25	3.45	3.6	3.75	3.8	3.85	3.9

Таблиця 3

Час наростання імпульсу $t_v=10^{-7}$ с.

l	0	10	18	20	30	33.5	40	48	50	60	70	80	90	100	110
$U_d/U_{\text{Макс}}$	1	1.55	2	2.1	2.6	2.7	2.9	3.1	3.17	3.35	3.5	3.65	3.7	3.75	3.8

Таблиця 4

Час наростання імпульсу $t_v=10^{-6}$ с.

l	0	10	18	20	30	33.5	40	48	50	60	70	80	90	100	110
$U_d/U_{\text{Макс}}$	1	1.35	1.58	1.6	1.9	2	2.3	2.57	2.6	2.9	3.15	3.23	3.25	3.29	3.3

Час наростання імпульсу $t_v=5 \cdot 10^{-7}$ с.

l	0	10	18	20	30	33.5	40	48	50	60	70	80	90	100	110
$U_d/U_{\text{Ммакс}}$	1	1.2	1.45	1.5	1.6	1.65	1.75	2	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1	3.2	3.27

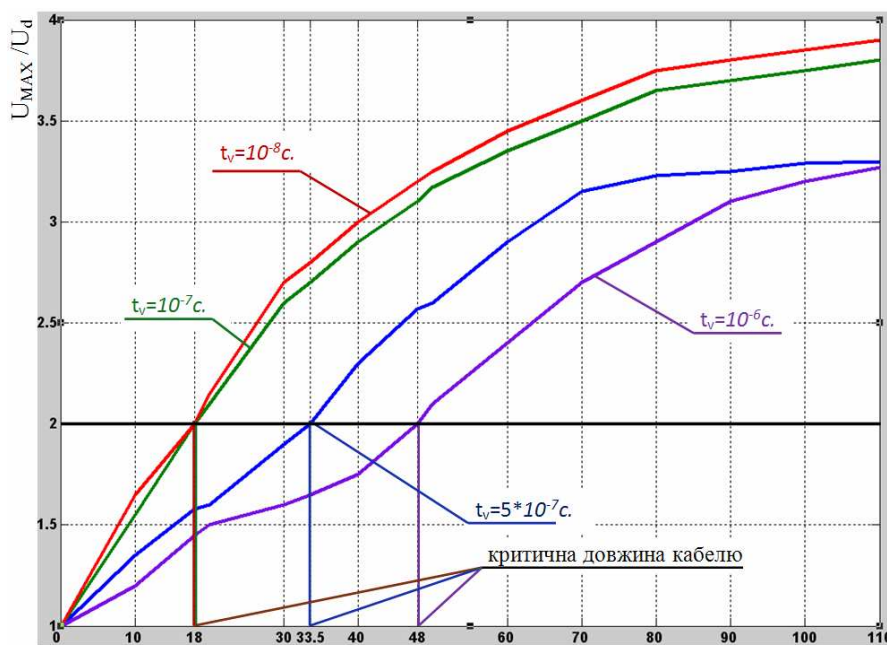


Рис. 6. Вплив довжини кабельної лінії та часу наростання напруги на величину перенапруги на вході двигуна

2. Показано, що при використанні довгої кабельної лінії величина напруги на вході двигуна може збільшуватися у два - три рази порівняно з напругою на виході інвертора. В розглянутому випадку має місце відношення цих напруг як $U_{\text{макс}} / U_d = 2,8$, а максимальне значення перенапруги у проміжок часу досягається, коли два імпульси напруги ШІМ наближені один до одного.

3. За результатами чисельних розрахунків побудовані графічні залежності, що дозволяють залежно від часу наростання імпульсу напруги ШІМ визначити критичну довжину кабельної лінії, для якої максимальна напруга на вході двигуна складає $U_{\text{макс}} / U_d = 2$.

Література

1. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для студ. вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
2. Москаленко В. В. Электрический привод / – М.: Мастерство, 2000. – 416 с
3. Стрежелецки Р., Синчук О.Н. и др.. Воздействие модулированного напряжения на асинхронный электрический двигатель. Вісник КДПУ ім. М.Остроградського. Вип. 4, 2009, частина 1, С. 82 - 86.
4. Черных. И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. - М, ДМК Пресс, Питер, 2008. – 288 с.

Рецензент: Л.І. Мазуренко, д.т.н., проф.
(КНУБА, Київ)

Отримано: 13.09.2010 р