

А.А. ЧЕРНО, канд. техн. наук, доц. кафедры компьютеризированных систем управления, НУК, Николаев;
А.П. ГУРОВ, канд. техн. наук, проф. кафедры автоматики, НУК, Николаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА КПД

Введение. В современной промышленности для обеспечения многих технологических процессов широкое применение нашли вибрационные установки. К таким процессам относятся: вибрационное уплотнение бетонных смесей, вибрационное транспортирование, сепарация и многие другие [1]. Из известных видов вибрационных приводов наиболее перспективным является электромагнитный привод, обладающий такими преимуществами, как высокая надежность, большой рабочий ресурс, высокий коэффициент полезного действия (КПД) при работе в околорезонансном режиме, простота управления амплитудой колебаний, возможность создавать вибрации с частотами выше 100 Гц [3]. Устойчивая работа электромагнитного вибрационного привода в режиме, близком к резонансному, обеспечивается путем автоматического управления его частотой и амплитудой [7]. При этом частота должна выбираться из условия максимальной энергетической эффективности. Поэтому, актуальной задачей является определение частот, обеспечивающих максимальный КПД электромагнитного привода вибрационных установок.

Анализ последних исследований. В работе [6] путем численного моделирования проведены исследования энергетических характеристик управляемого электромагнитного вибрационного привода при варьировании частотой тока в обмотке вибратора, а также определена оптимальная частота, обеспечивающая максимум КПД. Этот результат может быть использован только для фиксированных параметров привода, рассмотренного в [6] в качестве примера.

Целью данной работы является получение регрессионной модели, позволяющей определять оптимальную по критерию максимума КПД частоту электромагнитного вибрационного привода для разных значений его параметров.

Материал исследования. Возьмем за основу вибрационный привод, рассмотренный в [6]. Он включает в себя электромагнитный вибратор и преобразователь частоты. Вибратор состоит из двух одинаковых электромагнитов, каждый из которых содержит U-образные сердечник и якорь с размещенной на них 4-хсекционной обмоткой. Магнитопровод изготовлен из шихтованной электротехнической стали 3413, толщина листа 0,35 мм. Сердечники жестко закреплены на неподвижной части вибратора, а якоря – на подвижной. Обмотки электромагнитов подключены параллельно. Основные параметры вибратора: b_m – ширина магнитопровода; h_m – толщина магнитопровода; H_{core} – высота сердечника; H_{anchor} – высота якоря; b_{pole} – ширина полюса; δ_0 – начальная величина воздушного зазора; W – число витков обмотки; R – активное сопротивление обмотки; n_{el} – число электромагнитов; c – жесткость упругой связи между подвижной и неподвижной частью; b_{spr} – коэффициент вязкого трения в пружинах вибратора; X_n – номинальная амплитуда относительных колебаний подвижной и неподвижной части; $P_{out.n}$ – номинальная выходная мощность. Значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электромагнитного вибратора

b_m , мм	h_m , мм	H_{core} , мм	H_{anchor} , мм	b_{pole} , мм	δ_0 , мм	W	R , Ом	n_{el}	c , МН/м	b_{spr} , Н/(м/с)	X_n , мм	$P_{out.n}$, Вт
89	50	71	58	24	1,8	800	2,8	2	10	100	1	250

Преобразователь частоты включает в себя однофазный диодный выпрямитель, дроссель и однофазный инвертор, состоящий из 4-х транзисторов IGBT, включенных по мостовой схеме. Основные параметры преобразователя: f_{PWM} – частота сигнала широтно-импульсной модуляции; E_{on} , E_{off} и E_{rec} – потери энергии соответственно при открытии, закрытии транзистора и восстановлении встречного диода при стандартных значениях тока и напряжения I_{st} и U_{st} , приведенных в справочнике; U_{CE} – прямое падение напряжения на открытом транзисторе; U_{IF} – прямое падение напряжения на встречном диоде инвертора; U_{RF} – прямое падение напряжения на диоде выпрямителя; R_r – активное сопротивление обмотки дросселя. Значения параметров преобразователя частоты приведены в таблице 2.

Кроме перечисленных параметров электромагнитного привода, для расчета его энергетических характеристик необходимо также знать резонансную частоту виброустановки ω_r и частоту вибрации ω , которая в данной задаче является оптимизируемой величиной. Для рассматриваемой колебательной системы $\omega_r = 278$ рад/с

© А.А. Черно, А.П. Гуров, 2015

(44,3 Гц).

Таблица 2 – Параметры преобразователя частоты

f_{PWM} , кГц	E_{on} , мкДж	E_{off} , мкДж	E_{rec} , мкДж	I_{st} , А	U_{st} , В	U_{CE} , В	U_{IF} , В	U_{RF} , В	R_r , Ом
8	390	150	35	10	400	1,75	1,9	0,8	0,2

Для упрощения задачи, в качестве оптимизируемой величины будем рассматривать не абсолютное значение частоты ω , а относительную частоту $\omega^* = \omega/\omega_r$. В работе [6] показано, что оптимальная частота отличается от резонансной ($\omega_{opt}^* < 1$), а ее значение зависит от величины выходной мощности P_{out} . Для того, чтобы из упомянутых выше параметров выделить факторы, которые также влияют на величину ω_{opt}^* , проанализируем физические явления, которые вызывают несоответствие между резонансной и оптимальной частотами.

На рис. 1 приведены временные диаграммы электромагнитной силы F , величины воздушного зазора δ и тока в обмотке I для частот $0,95\omega_r$ и ω_r , рассчитанные с помощью динамической модели, описанной в [5]. На частоте $0,95\omega_r$ амплитуда электромагнитной силы больше, чем при резонансе, но отставание относительного перемещения от силы по фазе – меньше. Поэтому, максимальным значениям силы на частоте $0,95\omega_r$ соответствуют значения воздушного зазора $\delta = 1$ мм, а на резонансной частоте – $\delta = 1,5$ мм. При меньшей величине зазора большее значение электромагнитной силы может быть получено при меньшей МДС, и, следовательно, при меньших потерях мощности. Поэтому, при уменьшении частоты вниз от резонансной, наблюдается увеличение КПД электромагнитного привода, обнаруженное в [6].

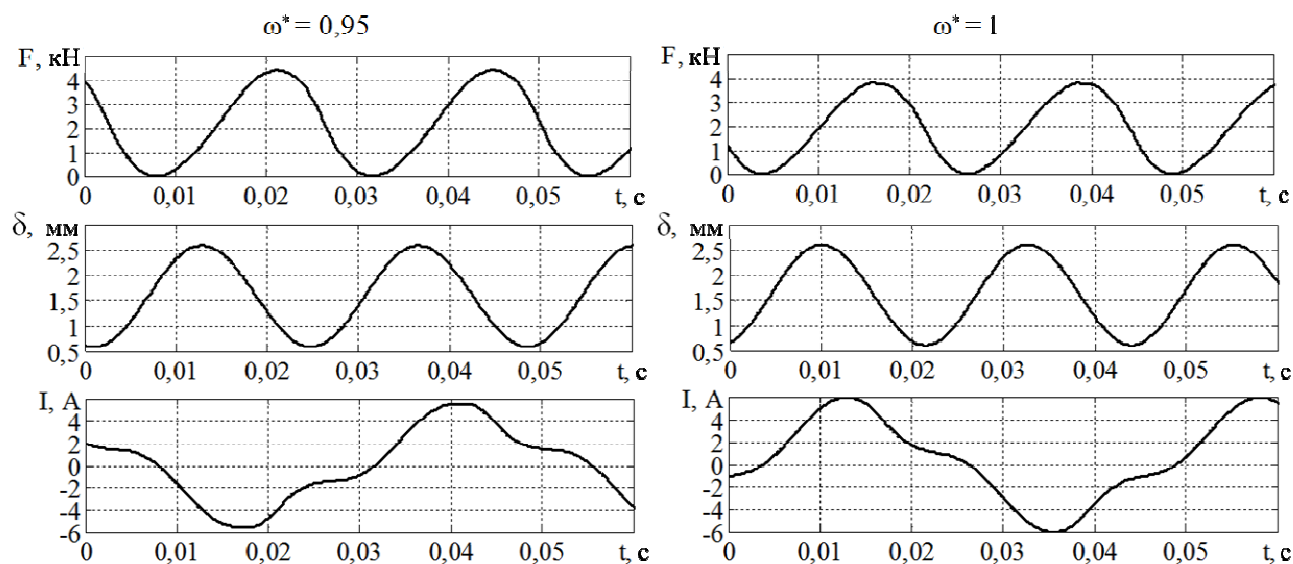


Рис. 1 Временные диаграммы электромагнитной силы, воздушного зазора и тока в обмотке вибратора

Таким образом, смещение оптимальной частоты в дорезонансную область обусловлено изменением величины воздушного зазора во времени. Следовательно, величина ω_{opt}^* зависит от факторов, оказывающих непосредственное влияние на пределы изменения воздушного зазора и на его фазу относительно электромагнитной силы. Этими факторами являются: жесткость пружин вибратора c , начальная величина воздушного зазора δ_0 , амплитуда относительных колебаний якоря и сердечника X и выходная мощность P_{out} .

Поскольку величина δ_0 выбирается в зависимости от требуемой амплитуды X , эти два фактора нельзя считать независимыми. Поэтому, вместо δ_0 будем рассматривать величину $\delta'_0 = \delta_0 - X$.

Составим матрицу планирования численного эксперимента в соответствии с ортогональным планом второго порядка [2]. Для этого введем кодированные факторы x_0, x_1, \dots, x_{14} , связанные с величинами c , δ'_0 , X , P_{out} и между собой уравнениями:

$$x_1 = \frac{c}{2 \cdot 10^6 \text{ Н}} - 4; \quad x_2 = \frac{\delta'_0}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} - 5; \quad x_3 = \frac{X}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} - 6; \quad x_4 = \frac{P_{out}}{62,5 \text{ Вт}} - 3;$$

$$x_5 = x_1^2 - 0,8; \quad x_6 = x_2^2 - 0,8; \quad x_7 = x_3^2 - 0,8; \quad x_8 = x_4^2 - 0,8;$$

$$x_9 = x_1 x_2; \quad x_{10} = x_1 x_3; \quad x_{11} = x_1 x_4; \quad x_{12} = x_2 x_3; \quad x_{13} = x_2 x_4; \quad x_{14} = x_3 x_4.$$

Фактор $x_0 = 1$.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3 (столбцы 6 – 20).

Таблица 3 – Значения факторов и результаты полного факторного эксперимента

№, МН/	δ'_0 , мм	X, мм	P_{out} , Вт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	ω_{opt}^*	$\bar{\omega}_{opt}^*$	$\Delta\omega_{opt}^*$
1	6	0,8	1	125	1	-1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	0,929	0,932	0,003
2	10	0,8	1	125	1	1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	0,966	0,964	0,002
3	6	1,2	1	125	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	0,954	0,953	$7 \cdot 10^{-4}$
4	10	1,2	1	125	1	1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	0,975	0,973	0,002
5	6	0,8	1,4	125	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	0,964	0,958	0,006
6	10	0,8	1,4	125	1	1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	0,98	0,987	0,007
7	6	1,2	1,4	125	1	-1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	0,97	0,97	$7 \cdot 10^{-5}$
8	10	1,2	1,4	125	1	1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	0,984	0,986	0,002
9	6	0,8	1	250	1	-1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	0,926	0,922	0,004
10	10	0,8	1	250	1	1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	0,959	0,96	0,001
11	6	1,2	1	250	1	-1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	0,956	0,95	0,006
12	10	1,2	1	250	1	1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	0,972	0,976	0,004
13	6	0,8	1,4	250	1	-1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	0,924	0,927	0,003
14	10	0,8	1,4	250	1	1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	0,963	0,962	$8 \cdot 10^{-4}$
15	6	1,2	1,4	250	1	-1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	0,945	0,946	$8 \cdot 10^{-4}$
16	10	1,2	1,4	250	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	0,971	0,969	0,002
17	5,172	1	1,2	187,5	1	-1,414	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,919	0,925	0,006
18	10,83	1	1,2	187,5	1	1,414	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,969	0,964	0,005
19	8	0,717	1,2	187,5	1	0	-1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,948	0,947	0,001
20	8	1,283	1,2	187,5	1	0	1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,964	0,966	0,002
21	8	1	0,917	187,5	1	0	0	-1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0,947	0,951	0,004
22	8	1	1,483	187,5	1	0	0	1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0,968	0,965	0,003
23	8	1	1,2	99,11	1	0	0	0	-1,414	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0,978	0,977	0,001
24	8	1	1,2	275,9	1	0	0	0	1,414	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0,955	0,957	0,002
25	8	1	1,2	187,5	1	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,956	0,954	0,002

Для каждой из 25 комбинаций значений факторов с помощью вычислительной программы, основанной на динамической модели, предложенной в [5], и формулах, приведенных в [6], были рассчитаны значения КПД электромагнитного вибрационного привода η при разных значениях частоты. Путем интерполяции полученных зависимостей определены непрерывные функции $\eta_i(\omega^*)$, где i – номер опыта (№ строки в таблице 3). Для каждой из полученных функций была выделена область, где находится максимум и отсутствуют другие экстремумы, и в этой области методом половинного деления решено уравнение

$$\frac{d\eta_i}{d\omega^*} = 0.$$

В результате были получены оптимальные значения частоты ω_{opt}^* , приведенные в таблице 3 (21-й столбец).

Для получения регрессионной модели выполним аппроксимацию зависимости ω_{opt}^* от факторов методом наименьших квадратов. Согласно [2], коэффициенты аппроксимирующей функции определяются выражениями:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (x_j)_i \omega_{opt_i}^*}{\sum_{i=1}^N (x_j)_i^2},$$

где $j = 0..m-1$; $m = 15$ – число кодированных факторов; $N = 25$ – число опытов. Полученные коэффициенты (табл. 4) отражают степень влияния каждого фактора x_j на функцию отклика ω_{opt}^* .

Таблица 4 – Коэффициенты аппроксимирующей функции

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
$\times 10^{-3}$														
957,7	13,64	6,931	4,685	-6,926	-4,95	1,05	1,8	6,3	-3	-7,5	1,625	-2,375	1,75	-5,25

Уравнение регрессии:

$$\hat{\omega}_{\text{opt}}^*(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}) = \sum_{j=0}^{m-1} b_j x_j. \quad (1)$$

Значения аппроксимирующей функции в точках проведения численного эксперимента приведены в таблице 3 (22-й столбец). Сравнив их со значениями функции отклика ω_{opt}^* , определим абсолютные погрешности:

$$\Delta\omega_{\text{opt}}^* = \left| \omega_{\text{opt}}^* - \hat{\omega}_{\text{opt}}^* \right|.$$

По приведенным в таблице 3 значениям $\Delta\omega_{\text{opt}}^*$ видно, что если определять относительную частоту по уравнению (1), она будет отличаться от оптимальной не более, чем на 0,007. При этом КПД уменьшится не более, чем на $3,7 \cdot 10^{-3}$.

Оценить адекватность полученной регрессионной модели можно также, определив множественный коэффициент детерминации [4]:

$$R_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\omega_{\text{opt}_i}^* - \bar{\omega}_{\text{opt}}^*)^2}{\sum_{i=1}^N (\omega_{\text{opt}_i}^* - \bar{\omega}_{\text{opt}}^*)^2} = 0,961,$$

где $\bar{\omega}_{\text{opt}}^*$ – среднее значение функции отклика:

$$\bar{\omega}_{\text{opt}}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{\text{opt}_i}^* = 0,958.$$

Полученное значение коэффициента детерминации показывает, что построенная регрессионная модель учитывает 96,1% изменений оптимальной частоты, вызванных рассматриваемыми факторами.

Выводы. Оптимальное значение частоты колебаний вибрационной установки с электромагнитным приводом по критерию максимума КПД зависит от жесткости пружин вибратора, начальной величины воздушного зазора, амплитуды относительных колебаний якоря и сердечника, а также от выходной мощности привода. Полученная регрессионная модель позволяет определить оптимальную частоту в зависимости от перечисленных факторов, поэтому она может быть использована при управлении частотой электромагнитного вибрационного привода с целью обеспечения его максимальной энергетической эффективности.

Список литературы: 1. Вибрации в технике: Справочник: в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с. 2. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с. 3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 324 с. 4. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Ленинград: Судостроение, 1980. – 384 с. 5. Черно А.А. Динамическая модель электромагнитного вибрационного привода // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 37 – 43. 6. Черно А.А., Монченко М.Ю. Исследование энергетических характеристик электромагнитного вибрационного привода // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки", Миколаїв: НУК, 2015. Інтернетресурс: <http://conference.nuos.edu.ua>. 7. Черно, А.А. "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 – 68.

Bibliography (transliterated): 1. Lavendel, E.E. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t., T. 4: Vibratsionnyye protsessy i mashiny*, Mashinostroenie, Moscow, USSR, 1981. Print. 2. Ivobotenko, B.A., Ilyinskiy, N.F. and Kopylov, I.P. *Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike*, Energiya, Moscow, 1975. Print. 3. Lanets, O.S. *Vysokoeffektivni mizhrezonansni vibratsiini mashiny z elektromagnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): Monohrafiya*, Lviv: NULP, 2008. Print. 4. Montgomery, D.K. *Planirovaniye eksperimenta i analiz dannykh*, Sudostroeniye, Leningrad, 1980. Print. 5. Cherny, A.A. "Dinamicheskaya model elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 2, 2014, pp. 37 – 43. Print. 6. Cherny, A.A., Monchenko, M.J. "Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda." *Materialy Vseukrainskoi naukovotekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhniki"*, Mykolayiv, NUOS, 2015, <http://conference.nuos.edu.ua>. 7. Cherny, A.A. "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 – 68. Print.

Поступила (received) 27.08.2015

В.Г. СИЧЕНКО, д-р техн. наук, с.н.с., зав. каф. «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ІНТЕГРАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СИСТЕМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ. Сьогоднішня сучасної енергетики обумовлюється зростаючим обсягом електроенергії отриманої від відновлюваних джерел. В основі цього процесу є необхідність вирішення екологічних проблем, охорони довкілля і складної енергетичної політики у світі, обумовленої, серед іншого, і зростаючим дефіцитом традиційних енергетичних ресурсів. Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Україна за останні декілька років добилася значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій. На сьогодні у світі існують приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел, в системі електричної тяги. Так, наприклад, у 2011 році було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж-Амстердам з використанням енергії сонця від фотобатарей, встановлених на маршруті руху поїзда. ВАТ «РЖД» також має намір використовувати альтернативні джерела енергії для залізниць Росії. На сьогодні електроенергія від фотобатарей забезпечує потреби станції Комсомольська (Краснодарський край). В подальшому передбачається, що використання енергії вітру дасть максимальний ефект на Північній залізниці та на Сахаліні, а сонячних батарей – на Північно-Кавказькій залізниці [1]. На сьогоднішній день в Україні також реалізовано пілотний проект паралельної роботи СЕС та зовнішньої системи електропостачання для живлення шин 10 кВ на тяговій підстанції Самбір.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Науково-практичні аспекти розробки і впровадження систем децентралізованого виробництва як традиційної, так і альтернативної енергетики малої і середньої потужності досліджені у багатьох наукових роботах відомих вітчизняних і зарубіжних вчених. Вагомий внесок у вирішення цієї проблеми внесли С. П. Денисюк, А.В. Кириленко, А.В. Крюков, А.В. Праховник, Є.І. Сокол, А.С. Яндульський, Caldop R., Conti S. та ін. [2-12]. На думку вчених, децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності і дозволяє, серед іншого, зменшити втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення джерела до споживача, зменшити число і довжину магістральних ЛЕП, зменшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП, забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей.

Сферами застосування джерел розподіленої генерації на залізничному транспорті, як слідує з аналізу наукових публікацій, можуть бути наступні напрями: об'єкти залізничного транспорту в регіонах з нестійким електропостачанням; створення транспортно-енергетичних коридорів, що поєднують траси залізниць і автомобільних доріг, високовольтні лінії електропередач і лінії зв'язку; підвищення якості електроенергії; живлення автономних об'єктів інфраструктури залізничного транспорту з використанням нетрадиційних поновлюваних джерел енергії. Установки розподіленої генерації можуть бути застосовані для зниження відхилень і несиметрії напруги в системах електропостачання нетягових споживачів. Реалізовані пілотні проекти по застосуванню сонячної енергії для потреб залізничного транспорту показують їх високу технологічність і ефективність.

Постановка задачі дослідження. У розрізі розвитку нетрадиційних джерел електричної енергії та інтеграції їх у загальну енергетичну систему держави, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, виникає задача щодо погодження передпроектної та проектної документації суб'єктів господарювання та окремих компаній, а також технічних умов на приєднання названих типів генерації до електричних мереж Укрзалізниці. При цьому необхідно мати на увазі, що електричні мережі Укрзалізниці мають специфічні особливості функціонування пов'язані, в першу чергу, з необхідністю забезпечення безпеки руху поїздів та нестационарним характером електроспоживання.

Викладення основного матеріалу. Інтеграція сонячних електростанцій в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування та керування режимами роботи тягового електропостачання. Необхідність їх розробки обумовлена наступними факторами: змінюється структура електричної системи, потужність генерації сонячних джерел електроенергії визначається зовнішніми факторами (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони під'єднанні, сонячні установки можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, що може призвести до сильних коливань потужності в системі та впливати на режими її роботи, більшість сонячних генераторів під'єднанні до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруг [7]. Звідси, необхідно вирішувати низку питань: визначення впливу СЕС на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових та інших споживачів, що приєднані до шин тягової підстанції з

урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання даного типу генерації до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту та автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками, тощо.

Розглянемо поставлені питання більш детально.

1. Рекомендації щодо приєднання СЕС до шин тягових підстанцій. Проведені на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ дослідження дозволили виявити наступні лімітуючі фактори при підключенні відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕ) до систем тягового електропостачання залізниць України: встановлена потужність головних знижувальних трансформаторів тягових підстанцій, комутаційні можливості вимикачів приєднань, наявність необхідних видів релейного захисту у складі відповідних розподільних установок тягових підстанцій та забезпечення їх чутливості.

Крім того, принципово різна фізична природа ВДЕ обумовлює відмінності у значеннях параметрів їх схем заміщення, що, в свою чергу, впливає на характер зміни струмів к.з. у приєднаних до них електроустановках.

З урахуванням викладеного вище, при розробці технічних умов на приєднання СЕС до об'єктів системи електропостачання залізниць України, за результатами проведених досліджень, пропонується наступне:

- при загальному аналізі можливості приєднання та формуванні Технічних умов на приєднання по технічним питанням необхідно керуватися вимогами чинних нормативних документів;

- враховуючи важливість забезпечення безперервного електропостачання тягових споживачів для гарантування безпеки руху, доцільну точку приєднання, пов'язаний з цим обсяг модернізації обладнання тягової підстанції та необхідність встановлення додаткових видів релейного захисту і автоматики необхідно визначати на основі техніко-економічного обґрунтування окремо для кожного нового об'єкта, що планується до підключення;

- з метою уникнення реверсного режиму роботи обладнання, забезпечення правильності та надійності роботи релейного захисту і автоматики тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту, мінімізації витрат на реконструкцію електричних мереж та релейного захисту і автоматики при виборі точки приєднання до тягової підстанції перевагу слід надавати шинам вищої напруги (35 кВ, 110 кВ і вище).

- якщо на підставі техніко-економічного обґрунтування здійснюється приєднання до шин напруги 10 кВ тягової підстанції, рекомендовано здійснювати приєднання ВДЕ таким чином, щоб потужність приєданого джерела не перевищувала потужності споживачів, яка розподіляється на даному рівні напруги та забезпечувалась відсутність реверсного режиму роботи обладнання і гальванічний розв'язок електричних систем через трансформаторні підстанції районів електричних мереж.

- враховуючи різкозмінний характер тягового навантаження, великі пускові струми електровозів на фідерній зоні, приєднання ВДЕ безпосередньо до шин, від яких отримують живлення тягові агрегати (10 або 35 кВ) не допускається.

- не допускається також приєднання ВДЕ до ліній, комплектних трансформаторних підстанцій та шин розподільчих пристроїв 6-10 кВ станцій і перегонів, якщо вони мають електричний зв'язок із системами живлення пристроїв автоблокування та інших систем забезпечення безпеки руху поїздів;

- враховуючи те, що фотоелектрична панель має високий внутрішній опір і відповідно струм СЕС в режимі к.з. незначно відрізняється від струму робочого режиму і є суттєво нижчим за струм к.з., зумовлений дією джерела системи зовнішнього електропостачання, при приєднанні електростанцій цього типу необхідно передбачати струмовий захист, який унеможливує підживлення місця к.з. в системі тягового електропостачання за рахунок СЕС. Тому, для приєднань, через які підключена сонячна електростанція, доцільним є застосування струмового захисту з блокуванням по напрузі. Для унеможливлення підживлення точки к.з. на підстанції від ВДЕ доцільно доповнити діючу автоматику функцією відключення ВДЕ від шин тягової підстанції при виникненні к.з.;

- при приєднанні СЕС до шин ВН, СН або НН тягових підстанцій повинні бути перевірені на чутливість до струмів короткого замикання, що протікають по елементах електричної схеми від вітки живлення СЕС, що приєднується, релейні захисти, зокрема: відповідних секційних вимикачів; диференційних захистів силових трансформаторів; захистів основних фідерів, що відходять від шин, до яких приєднано СЕС; інші.

У випадку незабезпечення необхідної чутливості захисту, приймаються інші види захисту, або інші технічні рішення виконання приєднання. Повинна бути забезпечена чутливість струмових (або нових типів захистів) на лініях зв'язку СЕС з шиною тягових підстанцій при коротких замиканнях на цих лініях та на шибах приєднання.

- при приєднанні СЕС до шин тягових підстанцій повинні бути забезпечені вимоги щодо якості електроенергії в місці балансового розмежування електричних мереж власника СЕС та залізниці. Якість електроенергії, яка генерується ВДЕ, повинна задовольняти вимогам чинних нормативних документів. Необхідно також забезпечити доцільні рівні генерації вищих гармонік і реактивної потужності та умови синхронної роботи для забезпечення стійкості роботи електричної мережі.

2. Підвищення якості напруги в тяговій мережі постійного струму. Існуюча система тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити необхідні провізну та пропускну спроможності. Особливо гостро ця проблема проявляється при впровадженні швидкісного руху на лініях, освоєнні зростаючого об'єму вантажних і пасажирських перевезень. Тому важливим стає пошук сучасних

технічних рішень та перспективних напрямків розвитку систем тягового електропостачання [13].

Сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху. Використання існуючих засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогим. Зростаючий дефіцит енергоресурсів ставить задачу дослідити можливість використання незалежних джерел електричної енергії для живлення пунктів підсилення тягової мережі (ПП).

Перевага живлення ПП від сонячних батарей полягає в тому, що немає необхідності в монтажі додаткової живильної лінії від тягової підстанції і незалежність їх роботи від неї. До питань, підлягаючих вирішенню слід віднести: тип джерела поновлюваної електричної енергії; компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії; схемотехніка, компоновання і елементна база; техніко-економічне обґрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками. Схема лінійного ПП складається з однофазного інвертора на IGBT транзисторах, перетворюючого трансформатора і випрямляча. Для зменшення вагогабаритних розмірів трансформатора використовується напруга підвищеної частоти (700 Гц), а сердечник трансформатора виконаний з аморфного сплаву [12].

Варіант структури системи електропостачання залізниці постійного струму, що використовує сонячні генератори електричної енергії, встановлені на земельній смузі відчуження залізниці приведений в [12]. Структурна схема пропонованого удосконалення тягової мережі представлена на рис. 1 для трьох ПП (ординати встановлення ПП, відповідно – 5, 10 та 15 км при відстані між тяговими підстанціями 20 км).

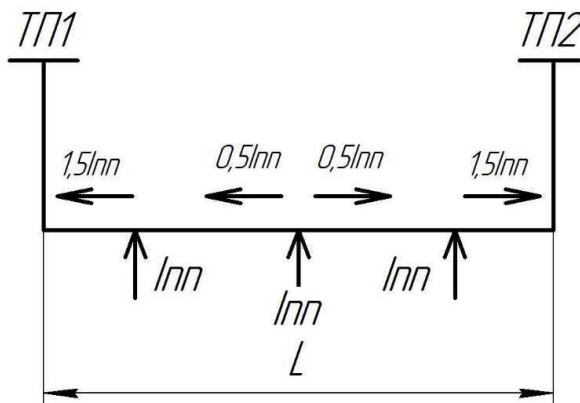


Рис. 1. Структурна схема живлення тягової мережі з трьома ПП: ТП1, ТП2 – тягові підстанції; Іпп1, Іпп2, Іпп3 – струми відповідно трьох підсилюючих пунктів; L - довжина міжпідстанційної зони.

Необхідно зазначити, що кількість і потужність ПП має визначатись за двома критеріями: компенсації втрат напруги та забезпечення нормативу необхідної питомої потужності тягової мережі. За умовами організації руху поїздів при нормальному режимі руху, в залежності від реальних довжин блок-діляниць, відстань між поїздами може складати 3,5-5 км, тому, в першому наближенні, розглянутий вище приклад (рис. 1) може бути прийнятий за основу для попередніх розрахунків, результати яких зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Показники	Існуюча система електропостачання	Система електропостачання з підсилюючими пунктами		
		Кількість перетворюючих пунктів		
		1	2	3
Витрата енергії E, кВт·год	1980	1620	1620	1590
Зниження витрати енергії ΔE, кВт·год	—	360	360	390
Втрати потужності ΔP, кВт	2018,25	1503,9	1307,5	900,9
Потужність ПП P, кВт	—	1800	900	650

Як показують виконані розрахунки, нормований рівень напруги для швидкісного руху витримується, при цьому втрати електричної енергії зменшуються до 50 % при зменшенні витрат на тягу майже на 20 %.

Звідси, зробимо висновок, що для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачі електровозу, зменшення втрат потужності та електроенергії доцільним є встановлення трьох підсилюючих пунктів на приведеній міжпідстанційній зоні. Потужність таких пунктів може знаходитись у межах 600-700

кВт. Кожен ПП може керуватися на основі закону, який формується в ході реального часу. Вид цього закону визначається значенням координати та струму електрорухомого складу, який розташовується в міжпідстанційній зоні. Проведемо розрахунок тягової мережі з ПП, які рівномірно розташовані на міжпідстанційній зоні, з метою забезпечення мінімальних втрат потужності в тяговій мережі згідно розрахункової схеми, представленої на рис. 1.

Для розрахунку використовуємо такі дані: довжина ділянки - 20 км; відстань між підсилюючими пунктами - 5 км; потужність підсилюючих пунктів - 650 кВт; струм електровоза при номінальній напрузі - 3000 А; питомий опір тягової мережі M120 +2 MФ100 + P65 - 0,069 Ом / км; схема живлення тягової мережі - двостороння.

У якості цільової функції приймаємо втрати потужності ΔP в тяговій мережі, які необхідно мінімізувати. В результаті отримуємо функцію чотирьох змінних:

$$\Delta P = f(I_{pp1}, I_{pp2}, I_{pp3}, x) \quad (1)$$

Таким чином, залежно від координати розташування поїзда, струми підсилюючих пунктів повинні мати таке значення, щоб забезпечувалася мінімум цільової функції ΔP , тобто відповідати критерію оптимізації.

Використовуючи розроблену методологію розрахунку [14], визначимо струми підсилюючих пунктів, при яких забезпечуються мінімальні втрати потужності. Результати розрахунків змін напруги і втрат потужності представлені на рис. 2., 3.

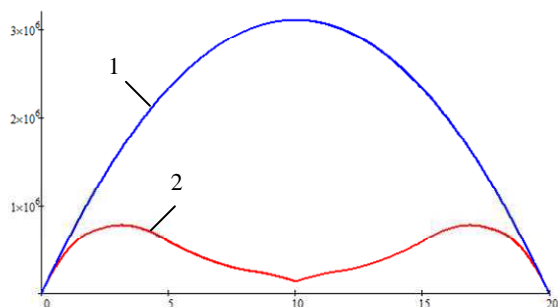


Рис. 2. Миттєві втрати потужності на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

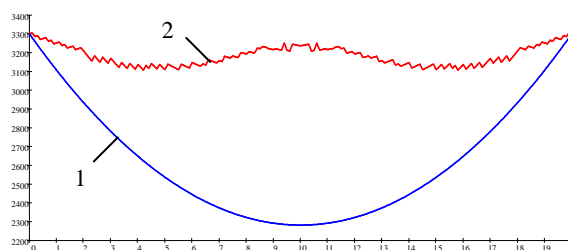


Рис. 3. Миттєві значення напруги на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

Таким чином обрані підсилюючі пункти відповідають встановленим критеріям для впровадження високошвидкісного руху: забезпечують підтримання необхідного рівня напруги не нижче 2900 В, а також мінімальні втрати потужності у тяговій мережі.

Висновки.

1. Інтеграція сонячної генерації в систему тягового електропостачання постійного струму може здійснюватись по декільком напрямкам: паралельна робота СЕС з системою зовнішнього електропостачання за умови дотримання приведених рекомендацій; живлення власних потреб тягових підстанцій у буферному режимі по відношенню до існуючої схеми живлення; підсилення тягової мережі для забезпечення необхідного рівня напруги та зменшення втрат потужності.

2. Зважаючи на нестабільний рівень генерації СЕС та нестаціонарний характер тягового навантаження створення пропонувані пункти підсилення тягової мережі повинне передбачати застосування накопичувачів електричної енергії, здатних віддавати енергію в різкозмінних режимах.

3. Для підвищення ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму з пунктами підсилення, використовуваними сонячну енергію, необхідно розробити закони керування їх режимами в реальному часі у єдиній інтелектуальній системі тягового електропостачання.

Список літератури. 1. Сиченко В.Г. Аналіз впливу сонячної генерації на роботу тягових підстанцій електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Бондар О.І., Прихода М.С. // Світлотехніка та електроенергетика, № 1, 2015, с. 10-18. 2. Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети. / Е.И. Сокол [и др.] // Відновлювальна енергетика XXI століття: XIII міжнародна науково-практична конференція. 2012. – С. 112-115. 3. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розсосередженою генерацією / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД, – Київ, 2011. – Спец. Вип. – С. 30-37. 4. Крюков А.В. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, М.О. Арсентьев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / ИрГУПС. – Иркутск, 2008. – №3 (19). – С. 81-87. 5. Кириленко, О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД, – Київ, 2009.– Вип. 24 – С. 3–7. – ISSN 1727–9895. 6. Праховник А.В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине / А.В. Праховник, В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, М.Т. Кокорина // Энергетика, економіка, технології, екологія: науковий журнал / НТУУ «КПІ». – Київ, 2012. – № 2(31). – С. 7-14. 7. Яндутьський О.С. Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій

на режимі роботи електричної мережі/ О.С. Яндульський, О.В. Хоменко, А.А. Марченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / ДонНТУ. – Донецьк, 2013. – № 1(14). – С. 324-329. 8. Caldon R. Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation / R. Caldon, A. Stocco, R. Turri // Electric Power Systems Research / 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2017–2023. 9. Conti S. Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation/ S. Conti // Electric Power Systems Research / 2009, vol. 79, iss. 1, pp. 49–56. 10. Claypool A. Аккумуляторные и солнечные источники питания для локомотивов и устройств сигнализации и связи / A. Claypool // Железные дороги мира/ 2007. – № 5. – С. 62-64. 11. Goldenberg Ph. Применение возобновляемых источников энергии на железных дорогах/ Ph. Goldenberg // Железные дороги мира/ 2013. – № 1. – С. 43-48. 12. Гончаров Ю.П. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев и др. // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наукових праць. - Маріуполь, 2015. - Випуск № 30. с. 200-211. 13. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Сасенко Ю.Л., Босий Д.О. / Дніпропетровськ. Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с. 14. Сыченко В.Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающими пунктами. Сыченко В.Г., Босий Д.А., Косарев Е.Н. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. № 9, т. 2, 2014, с. 8-18

Bibliography. 1. Sychenko V., Bondar O., Prikhoda M. *Analysis of influence of solar generation to work traction substation of electrified railways*. Svitlotekhnika ta elektroenergetika, 2015. No. 1, pp. 10-18. 2. Sokol E.I. and others *Integration of renewable energy facilities in low-voltage electrical network*. Renewable Energy XXI Century: XIII International Scientific and Practical Conference. 2012. pp. 112-115. 3. Denisyuk S.P., Derevyanko D.G., Kolesnik P.S. *Modes optimization of power supply in local systems of decentralized generation*. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kiyv, 2011. Special issue. pp. 30-37. 4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. *The use of distributed generation technologies in rail transport*. Modern technology. System analysis. Modeling. IrGUPS. – Irkutsk, 2008. No. 3 (19), pp. 81-87. 5. Kirilenko, O. V., Trach, I. V. *The technical operation of power systems with integration of distributed generation sources*. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kiyv, 2009. No. 24. pp. 3–7. ISSN 1727–9895. 6. Prakhovnik, A.V., Popov, V.A., Yarmolyuk, E.S., Kokorina, M.T. *Perspectives and the development of distributed generation in Ukraine*. Energy, economy, technology, ecology: scientific journal NTUU «KPI». Kiyv, 2012. No. 2(31). pp. 7-14. 7. Yandul's'kiy, O.S. Khomenko, O.V., Marchenko, A.A. *Modeling and analysis of the impact of solar power to the electrical grid modes*. Proceedings of Donetsk National Technical University / DonNTU. – Donetsk, 2013. No. 1(14). pp. 324-329. 8. Caldon R., Stocco A., Turri R. *Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation*. Electric Power Systems Research / 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2017–2023. 9. Conti S. *Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation*. Electric Power Systems Research, 2009, vol. 79, iss. 1, pp. 49–56. 10. Claypool A. *Battery and solar power supplies for locomotives and signaling and communication devices*. Railways of the world, 2007. No. 5. pp. 62-64. 11. Goldenberg Ph. *The use of renewable energy sources on the railways*. Railways of the world, 2013. No. 1. pp. 43-48. 12. Goncharov, Yu.P., Sokol, E.I., Zamaruev V.V. i dr. *Sistema preobrazovaniya energii, generiruemoy v polose otchuzhdeniya zheleznoy dorogi s pomoshch'yu solnechnykh paneley*. Visnik Priazov's'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: Zbirmik naukovikh prats. Mariupol, 2015. Iss. 30, pp. 200-211. 13. Sichenko, V. G., Saenko, Yu.L., Bosiy, D.O. *Yakist' elektrichnoi energii u tyagovikh merezakh elektrifikovanih zaliznits'*. Dnipropetrovsk: PF "Standard-Service", 2015. 344 p. 14. Sichenko V.G., Sayenko Yu.L., Bosiy D.O. *Usovershenstvovanie metodologii rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s usilivayushchimi punktami*. Energoberezhenie, energetika, energoaudit, 2014. No. 9. Vol. 2. pp. 8-18.

Поступила (receive) 28.08.2015