

УДК 621.314

О. В. Немыкина

### ВЫБОР СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ КРАНОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

**Аннотация.** Приведена методика сравнительной оценки систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом. Получены расчетные соотношения для сравнительной оценки систем питания, выполненной троллеями или шинами по критерию установленной мощности трансформатора, сечению проводникового материала и потерь мощности. Показано, что по материальным и эксплуатационным показателям наиболее эффективной оказалась система питания кранов на постоянном токе.

**Ключевые слова:** система электропитания кранов, постоянный и переменный ток, частотно-регулируемый привод, потери напряжения

О. Nemikina

### THE CHOICE OF SUPPLY CRANES WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVE

**Abstract.** The article describes the method of comparative evaluation of systems of power cranes with variable frequency drive. The calculated ratio for the comparative assessment of power systems, trolleys or buses made by the criterion of the installed capacity of the transformer, the cross section of conductor material and power losses. The result shows that the material and operational performance most efficient system power taps DC.

**Keywords:** power system of cranes, DC and AC current, variable frequency drive, the loss of power

О. В. Немикіна

### ВИБІР СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ КРАНІВ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ПРИВОДОМ

**Анотація.** Наведено методику порівняльної оцінки систем живлення кранів з частотно-регульованим приводом. Отримані розрахункові співвідношення для порівняльної оцінки систем живлення, виконаної троллями або шинами за критерієм встановленої потужності трансформатора, перетину провідникового матеріалу і втрат потужності. Показано, що за матеріальним і експлуатаційним показниками найбільш ефективною виявилась система живлення кранів на постійному струмі.

**Ключові слова:** система електроживлення кранів, постійний і змінний струм, частотно-регульований привод, втрати напруження

**Введение.** В связи с возрастающим использованием частотно-регулируемого привода (ЧРП) для крановых установок возникает необходимость в определении системы питания. В существующей практике в основном применяется две системы питания кранов (СЭК): на переменном и постоянном токе.

Система питания кранов с ЧРП может быть выполнена шинопроводом или троллейной линией. Общим свойством СЭК с ЧРП является наличие выпрямителя между питающей сетью и приводным механизмом. Место расположения входного выпрямителя на кране или вне его определяет постоянный или переменный ток.

Эффективность СЭК с ЧРП определяется капитальными и эксплуатационными затратами по результатам сравнительной оценки, которая должна быть выполнена по следующим критериям: допустимой плотности тока, потери напряжения и потери мощности в СЭК.

**Целью работы** является разработка методики сравнительных исследований двух наиболее распространенных СЭК с ЧРП, которые выполнены троллями или шинами.

Для выполнения сравнительного анализа СЭК полагаем, что системы электропитания с шиной переменного и постоянного тока работают в установившемся режиме при равной суммарной номинальной нагрузке. Численные значения сравнительной оценки

представлены для троллей постоянного тока (ЗАО «Запорожсталь», г. Запорожье) и шин переменного тока (морской порт «Южный», г. Одесса).

К системе питания переменного тока подключено четыре крана «Сокол», в пределах 150-метрового причала, к системе питания постоянного тока подключено пять мостовых кранов (четыре – грузоподъемностью 80 т, один – грузоподъемностью 50 т) в пределах 290 метрового пролета цеха [4 – 6].

Установленная мощность крана «Сокол»,  $P_{уст} = 322$  кВт (грузоподъемностью 16 т). Мощность двигателей крана:  $2 \times 110$  кВт;  $2 \times 26$  кВт;  $1 \times 20$  кВт;  $4 \times 7,5$  кВт. Установленная мощность мостового крана цеха горячей прокатки ЗАО «Запорожсталь», грузоподъемностью 80 и 50 т –  $P_{уст} = 288$  кВт и  $P_{уст} = 123$  кВт.

Мощность двигателей крана:  $P_{уст} = 288$  кВт; 185 кВт; 55 кВт; 32 кВт; 16 кВт.

Мощность двигателей крана  $P_{уст} = 123$  кВт; 75 кВт; 23 кВт; 18 кВт; 6,5 кВт.

Расчет нагрузки произведен методом упорядоченных диаграмм, позволяющий производить расчет мощности без точного графика нагрузки [1 – 3; 8].

Число электроприемников (ЭП) системы питания переменного тока соответствует числу кранов с установкой выпрямителя на кране. Число ЭП, питающихся от шин или троллей постоянного тока, соответствует числу двигателей крановых установок [7].

© Немыкина О.В., 2015

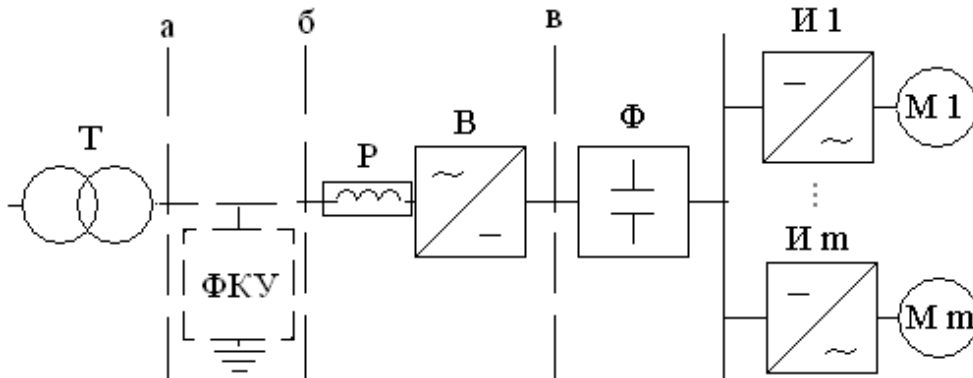


Рис. 1. Структурная схема системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом

Определение расчетной мощности для СЭК выполняется по соотношению [1 – 3]:

$$P_{расч} = k_{max} \cdot P_{ср} \quad (1)$$

где  $P_{ср}$  – средне-потребляемая мощность

$$P_{ср} = \sum_{i=1}^n k_{исп i} \cdot P_{ном i};$$

$k_{max}$  – коэффициент максимума,

$$k_{max} = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_{эф}}} \cdot \sqrt{\frac{1 - k_{исп}}{k_{исп}}};$$

$k_{исп}$  – коэффициент использования,

$$k_{исп} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{исп i} \cdot P_{ном i}}{\sum_{i=1}^n P_{ном i}};$$

$n_{эф}$  – эффективное число ЭП,

$$n_{эф} = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{ном i})^2}{\sum_{i=1}^n P_{ном i}^2};$$

$k_{исп i}$ ,  $P_{ном i}$  – коэффициент использования, номинальная мощность  $i$ -го ЭП.

Наличие большого числа приводов крановых механизмов, питающихся от шин постоянного тока, приводит к увеличению  $n_{эф}$  и соответственно. Увеличение приводит к снижению значения расчетной мощности для СЭК от шины постоянного тока за счет уменьшения величины коэффициента максимума.

Сравнительный анализ для СЭК проведен при значении  $n=n_{эф}$  для СЭК переменного тока, равному 4 либо 5 и изменении значений  $n_{эф}$  для СЭК постоянного тока от  $n$  до 11.

Отношение расчетной мощности СЭК постоянного тока ( $P_{расч-}$ ) к расчетной мощности СЭК переменного тока ( $P_{расч~}$ ) с учетом (1) имеет вид:

$$P_{расч}^* = \frac{P_{расч-}}{P_{расч~}} = \frac{\sqrt{n} \cdot (\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5\sqrt{1 - k_{исп}})}{\sqrt{n_{эф}} \cdot (\sqrt{k_{исп} n} + 1,5\sqrt{1 - k_{исп}})} \quad (2)$$

Значение отношения расчетных мощностей, вычисленных из выражения (2) представлены в таблице. Анализ данных, позволяют сделать вывод при  $n/n_{эф}=0,5$  имеется возможность уменьшения мощности трансформатора СЭК с ЧРП питанием постоян-

ном током на 12% при  $k_{исп}=0,5$  и на 13 % при  $k_{исп}=0,3$  и  $n/n_{эф}=0,57$  за счет увеличения ЭП постоянного тока.

Для возможной экономии материала токоведущих шин для СЭК с ЧРП постоянного тока по сравнению с переменным током необходимо оценить сечение токоведущих частей, выбранное по условию нагрева и проверенное на допустимую потерю напряжения в самой удаленной точке, граничную длину, выбранную по потерям напряжения и мощности.

Для возможной экономии материала токоведущих шин для СЭК с ЧРП постоянного тока по сравнению с переменным током необходимо оценить сечение токоведущих частей, выбранное по условию нагрева и проверенное на допустимую потерю напряжения самой удаленной точке, граничную длину выбранную по потере напряжения и потере мощности.

Значение расчетного тока для СЭК переменного и постоянного тока имеет вид [1]:

$$I_{расч-} = \frac{P_{расч-}}{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot U_{ном}}; \quad I_{расч~} = \frac{P_{расч~}}{U_{ном-}} \quad (3)$$

где  $U_{ном-} = 1,35 \cdot U_{ном}$ ;  $U_{ном-} = 380$  В;  $\lambda$  – коэффициент мощности.

Сравнительный анализ СЭК проводился при  $\lambda=0,5$ ; 1.

Для СЭК на постоянном токе характерна более высокая плотность тока по допустимому нагреву ( $j$ ) в абсолютных единицах. В относительных единицах  $j^* = j_{ст}/j_{ал} = 1,01-1,1$  – для шинпровода (ал);  $j^* = 1,46-2,2$  – для троллей (сталь) [1 – 3].

Отношение сечений шин  $S_{ш}^*$  или троллей  $S_m^*$  постоянного к переменному току с учетом выражения (3):

$$S_{ш(m)}^* = \frac{S_{ш(m)-}}{S_{ш(m)~}} = \frac{1,28 \cdot \lambda \cdot \sqrt{n} \cdot (\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5\sqrt{1 - k_{исп}})}{j_{ш(m)}^* \cdot \sqrt{n_{эф}} \cdot (\sqrt{k_{исп} n} + 1,5\sqrt{1 - k_{исп}})} \quad (4)$$

где индекс (ш) – шина; (m) – троллей.

Полагая в первом приближении, что максимальный расчетный ток синусоидальный и коэффициент мощности равен коэффициенту сдвига  $\cos\phi \approx \lambda$  произведем оценочный расчет потери напряжения.

Нормированное значение потери напряжения:  $\Delta U_{ш,(m)-} = 4$  %;  $\Delta U_{ш,(m)~} = 5$  % [1]:

Отношение потери напряжений на шине или троллеи имеет вид:

$$\Delta U_{ш,(m)}^* = \frac{\Delta U_{ш,(m)}}{\Delta U_{ш,(m)~}} = 0,8 = \frac{0,85 \cdot I_{расч-} \cdot l_{гр}^*}{I_{расч-} \cdot S_{ш(m)} \cdot K^* (\cos \phi + tg \phi_{ш(m)} \cdot \sin \phi)}; \quad (5)$$

где  $K^* = K_{-}/K_{+}$  – отношение удельной проводимости;  $K_{+}, K_{-}$  – удельная проводимость на переменном и постоянном токе, для алюминия  $K_{+} = 35,7$ ;  $K_{-} = 36,5$  м/Ом·мм<sup>2</sup>; для стали  $K_{+} = 4$ ;  $K_{-} = 10$  м/Ом·мм<sup>2</sup> [1];  $I_{расч-}$  – расчетный ток в СЭК постоянного и переменного тока, А;  $l_{гр}^* = l_{гр-}/l_{гр+}$  – отношение граничной длины;  $l_{гр-}, l_{гр+}$  – граничная длина постоянного и переменного тока, м;

При увеличении сечения шин значения  $tg \phi_{ш}$  увеличивается со значения 1,2 до 4,4.

Значение  $tg \phi_{т}$  для угловой стали имеет практически постоянное значение равное 0,58 и основным значением магнитной проницаемости слабо зависит от размеров, а определяется в стального уголка  $\mu$ .

Выражение (5) позволяет определить отношение длин шин или троллей при равном сечении или отношении сечений при равной длине.

Отношение потерь мощности в шинах и троллеях имеет вид:

$$\Delta P_{ш,(m)}^* = 0,36 \frac{P_{расч-}^2 \cdot l^*}{P_{расч-}^2 \cdot S_{ш(m)} \cdot K^*} \cdot (\cos \phi)^2; \quad (6)$$

Результаты сравнительной оценки СЭК с ЧРП выполненной на постоянном или переменном токе приведены в таблице. Отношения сечения и граничной длины троллей постоянного к переменному току имеет одинаковое значение при  $\cos \phi = 0,5$  и  $\cos \phi = 1$ , в связи с равным значением потери напряжения при  $\cos \phi = 0,5$  и активной составляющей потери напряжения ( $\Delta U_a$ ) при  $\cos \phi = 1$ .

Результаты сравнительной оценки СЭК с ЧРП, выполненной на постоянном или переменном токе, приведены в таблице.

### 1.- Сравнительная оценка СЭК с ЧРП

Критерий	Троллейная линия (сталь)				Шинопровод (Al)					
	переменный		постоянный		переменный		постоянный			
	Расчетная мощность									
1. Р <sub>расч</sub> входного выпрямителя при Р <sub>ном-</sub> = Р <sub>ном+</sub>	P <sub>расч-</sub> = 1; n = 5; k <sub>исп</sub> = 0,5		P <sub>расч+</sub> = 0,88; n <sub>эф</sub> = 10; n/n <sub>эф</sub> = 0,5; k <sub>исп</sub> = 0,5		P <sub>расч-</sub> = 1; n = 4; k <sub>исп</sub> = 0,3		P <sub>расч+</sub> = 0,87; n <sub>эф</sub> = 7; n/n <sub>эф</sub> = 0,6; k <sub>исп</sub> = 0,3			
Экономия на расчетной мощности трансформатора	$\Delta P_{\Delta \delta \tilde{n} \pm} = \frac{1 - 0,88}{1} \cdot 100\% = 12\%$				$\Delta P_{\Delta \delta \tilde{n} \pm} = \frac{1 - 0,87}{1} \cdot 100\% = 13\%$					
	Сечение									
	cos φ = 0,5		cos φ = 1		cos φ = 0,5		cos φ = 1		-	
2. I <sub>расч</sub> при Р <sub>расч-</sub> = Р <sub>расч+</sub>	1,5		1		1,28		1,28		1,28	
относительная плотность тока (j <sup>*</sup> )	1		1		1,46 – 2,2		1		1,01 – 1,1	
Сечение шины (S <sub>ш</sub> <sup>*</sup> ), о. е.	1,5		1		0,88 – 0,58		1,5		1	
3 ΔU <sub>доп</sub>	ΔU <sub>доп</sub> ≤ 5 %		ΔU <sub>доп</sub> ≤ 4 %		ΔU <sub>доп</sub> ≤ 5 %				ΔU <sub>доп</sub> ≤ 4 %	
tg φ / j <sup>*</sup>	0,58		0,58		1,46		2,2		1,2	
ΔU <sub>γ</sub> , /100 м	4,99 %		4,99 %		3,98 %		3,99 %		4,9 %	
Граничная длина l <sup>*</sup> , о. е.	1		1		1,63		1,07		1	
Сечение шины (S <sub>ш</sub> <sup>*</sup> ), о. е.	1		1		0,62		0,93		1	
Сечения п-шин, троллей (S <sub>т</sub> <sup>*</sup> ), о. е.	3		3		1,24		1,86		4	
Экономия на сечении п-шин, троллей	$\Delta S = \frac{3 - (1,24 \div 1,86)}{3} \cdot 100\% = 59 \div 38\%$				$\Delta S = \frac{4,56 - (0,5 \div 1,58)}{4,56} \cdot 100\% = 89 \div 65\%$					
4. Потери электроэнергии	3,88		1		0,35		3,5		1	
Экономия на потерях	$\Delta P = \frac{(3,88 \div 1) - 0,35}{(3,88 \div 1)} \cdot 100\% = 91 \div 65\%$				$\Delta P = \frac{(3,5 \div 1) - 0,14}{(3,5 \div 1)} \cdot 100\% = 96 \div 86\%$					

**Вывод:** Разработана методика сравнительной оценки СЭК. Установлено, что реализация СЭК постоянного тока с ЧРП при передаче равной мощности позволяет уменьшить мощность трансформатора, материальные затраты на сечение шин и троллей по сравнению с переменным током. При этом можно увеличить граничную длину участка шин и троллей по допустимой потере напряжения, а также уменьшить потери мощности в СЭК.

#### Список использованной литературы

1. Лигерман И. И. Крановые троллеи / И. И. Лигерман. – М. : «Энергия», 1969. – 88 с.
2. Кабышев А. В. Электроснабжение объектов: учеб. пособие. Ч.1. / А. В. Кабышев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 185 с.
3. Брауде В. И. Справочник по кранам в 2-х томах / В. И. Брауде, М. М. Гохберг, И. Е. Звягин и др. – М. : Машиностроение, 1988. – 536 с.
4. Кошеленко Б. Б. Влияние преобразователей частоты на качество электроэнергии при рекуперации / Б. Б. Кошеленко, О. В. Немыкина, С. Е. Фашенко // Сборник научных трудов SWorld. – Иваново : – 2013. МАРКОВА АД. – Вып. 4. – Том 16. – С. 62 – 67.
5. Радимов С. Н. Повышение пропускной способности кранового шинпровода морского порта / С. Н. Радимов, В. Л. Беляев, А. В. Ковченко // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып. 28. – С. 349 – 350.
6. Радимов С. Н. Экспериментальное определение фактических электрических параметров крановых шинпроводов – информационная основа оптимизации их функционирования / С. Н. Радимов – Вісник Одеського державного морського університету. – Одеса, ОДМУ. – 2001. – № 7. – С. 161 – 168.
7. Берестов В. М. Частотно-регулируемый электропривод с резервным питанием от сети постоянного тока / В. М. Берестов, В. В. Вдовин, В. Ю. Волков, С. С. Доманов, В. А. Клан, Д. А. Котин, В. В. Панкратов // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург : УрФУ. – 2012. – С. 43 – 46.
8. Федоров А. А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: под ред Федорова А. А. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.
3. Braude V.I., Goxberg M.M., Zvyagin I.E. i dr. *Spravochnik po kranam v 2 t.* [Reference Cranes 2 m.], (1988), *Mashinostroenie*, 536 p. (In Russian).
4. Koshelenko B., Nemikina O., and Faschenko S. *Vliianie preobrazovatelei chastoty na kachestvo elektroenergii pri rekuperacii* [Influence of Frequency Converters and Power Quality in Recovery], (2013), *Sbornik Nauchnykh Trudov SWorld. Publ.* Ivanovo, Russian Federation, *MARKOVA AD*, Ukraine, Issue 4, Vol. 16, pp. 62 – 67 (In Russian).
5. Radimov S., Belyaev V., and Kovchenko A. *Povyshenie propusknnoi sposobnosti kranovogo shinoprovoda morskogo porta* [Improving the Capacity of the Crane Busbar Seaport], (2010), *Vest. NTU “KhPI”. Publ.* Kharkov, Ukraine, Vol. 28, pp. 349 – 350 (In Russian).
6. Radimov S. *Eksperymentalnoe opredelenie faktycheskikh elektrycheskikh parametrov kranovykh shynoprovodov – informacionnaia osnova optimizacii ikh funkcionirovaniia* [Experimental Determination of the Electrical Parameters of the Actual Crane Busbar – an Information Base to Optimize their Functioning], (2001), *Visn. Metro Manila Sovereign Morskogo Universitetu. Publ.* Odessa, Ukraine, No. 7, pp.161 – 168 (In Russian).
7. Berestov V.M., Vdovin V.V., Volkov V.Yu., Domanov S.S., Klan V.A., Kotin D.A., and Pankratov V.V. *Chastotno-reguliruyemyy elektroprivod s rezervnym pitaniyem ot seti postoyannogo toka* [Variable Frequency Drive with Backup Power From DC], (2012), *Elektroprivody Peremennogo Toka: Trudy Mezhdunarodnoy 15-y Konferentsii Publ.* Yekaterinburg, Russian Federation, pp. 43 – 46 (In Russian).
8. Fedorov A.A. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu.* [Handbook of Electricity and Electrical Equipment], (1987), pod red Fedorova A.A., Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 592 p.

Получено 25.05.2015

#### References

1. Ligerman I.I. *Kranovye trollei* [Crane Trolleys], (1969), Moscow, Russian Federation, *Energiya*, 88 p. (In Russian).
2. Kabyshev A.V. *Elektrosnabzhenie obektov: ucheb. posobie. ch.1.* [Power Supply Facilities: Proc. allowance. Part 1.], (2007), Tomsk, Russian Federation, *Izd-vo Tomskogo Politeknicheskogo Universiteta*, 185 p. (In Russian).



Немыкина  
Ольга Владимировна,  
ассистент Запорожского нац.  
технического ун-та.  
69059. г. Запорожье, ул. Жуков-  
ского 64, т/ф (061)7698-280.  
E-mail: olganemikina@mail.ru