

8. Разработанное и исследованное энергосберегающее управление при пуско-тормозных и установившихся режимах трамвая предназначено для снижения в нем непроизводительных потерь энергии и рекомендуется для применения как в существующих трамваях, оснащенных тяговыми ЧРАД, так и при проектировании и создании отечественного украинского трамвая с указанным типом тягового двигателя.

Список литературы

1. Фирма «Siemens» <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/rail-solutions/rolling-stock/trams-and-light-rail.html> (23.10.2018)
2. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network / J. Edstrand. – Goteborg, Sweden, 2012. – 101 p.
3. ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (23.10.2018)
4. Xiao Zh. Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route / Zh. Xiao, P. Sun, Q. Wang, Y. Zhu, X. Feng. – Chengdu, China, 2018. – PP. 1– 21.
5. Fernandez L.M. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway / L.M. Fernandez, P. Garcia, C.A. Garcia, F. Jurado. – Spain, 2011. – 2183 – 2191.
6. Сайт «Харьков транспортный» http://gortransport.kharkov.ua/ps_models/50/ (23.10.2018)
7. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
8. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, Е.П. Исаев, Н.Н. Сидоров: Учебник для вузов ж/д транспорта. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328с.
9. Атаманов Ю.Е. Теория подвижного состава городского электрического транспорта / Ю.Е. Атаманов, В.Н. Плющ. – Минск, Беларусь, 2012. – 236с.
10. Клепиков В.Б. Энергоэффективность рекуперативных режимов электромотобилей / В.Б. Клепиков, А.В. Семиков // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6, С. 36 – 42.
11. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584 с.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 62-83

Н.Н. Казачковский, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ALTIVAR 21

Анотація. Експериментально досліджені вихідні напруга та струм, споживана перетворювачем частоти (ПЧ) активна потужність залежно від моменту двигуна та вихідної частоти ПЧ за різних законів частотного керування асинхронним двигуном. Доведено, що енергоощадний закон частотного керування (закон мінімального струму) внаслідок зменшення напруги на статорі двигуна та статорного струму забезпечує найменший рівень споживання перетворювачем частоти активної потужності.

Ключові слова: перетворювач частоти, асинхронний двигун, статор, активна потужність, закон мінімального струму

Аннотация. Экспериментально исследованы выходные напряжение и ток, потребляемая преобразователем частоты (ПЧ) активная мощность в зависимости от момента двигателя и выходной частоты ПЧ при различных законах частотного управления асинхронным двигателем. Доказано, что энергосберегающий закон частотного управления (закон минимального тока) вследствие уменьшения напряжения на статоре двигателя и статорного тока обеспечивает наименьший уровень потребления преобразователем частоты активной мощности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, асинхронный двигатель, статор, активная мощность, закон минимального тока

Abstract. The output voltage and current consumed by the frequency converter (inverter) are experimentally investigated, depending on the engine moment and the frequency of the IF on the basis of different laws of frequency control of the induction motor. It is proved that the energy saving law of frequency control (the law of minimum current) due to the reduction of the voltage on the stator of the engine and stator current provides the lowest level of consumption of the converter of active power.

Keywords: frequency converter, asynchronous motor, stator, active power, law of minimum current

Преобразователи частоты (ПЧ) находят все большее применение в современном электроприводе. Наибольшую эффективность они обеспечивают при регулировании скорости асинхронных двигателей турбомеханизмов (вентиляторов, насосов, дымососов, воздуходувок и т.п.). Компания «Шнейдер Электрик» выпускает серию ПЧ Altivar 21, специально предназначенную для подобных механизмов (для использования в жилищном и коммерческом секторе, диапазон мощностей 0,75...75 кВт). Преобразователи имеют набор законов частотного управления, обеспечивающих их адаптацию к конкретным условиям применения. Задачей данной статьи является экспериментальное сопоставление законов управления ПЧ (в первую очередь в части энергопотребления).

Экспериментальная лабораторная установка состояла из испытуемого ПЧ (ATV21) с асинхронным двигателем АИР71А6У2 (0,37 кВт, 220/380 В, 2,3/1,3 А, 916 об/мин) и нагрузочного агрегата. В состав последнего входил двигатель, аналогичный испытуемому и сочлененный с ним валами, а также ПЧ Altivar 71 (0,75 кВт, 380 В). Преобразователь Altivar 71 служил для плавного изменения нагрузки на валу испытуемого двигателя и использовался в двух режимах: регулирования момента (для обеспечения достаточного больших нагрузок) и регулирования скорости (для задания нагрузок, близких к холостому ходу). Исследования проводились в двигательном режиме испытуемого двигателя, для чего нагрузочный агрегат переводился в рекуперативный режим. Для сброса рекуперированной энергии служил тормозной резистор, включенный в звено постоянного тока ПЧ Altivar 71. Частота вращения агрегата задавалась с терминала испытуемого ПЧ, уровень нагрузки – с аналогового входа нагрузочного ПЧ.

Исследовались следующие законы частотного управления:

- закон $U/f = const$ ($P_t=0$);
- закон $U/f = var$ ($P_t=1$, для турбомеханизмов);
- IR -компенсация ($P_t=2$, степень компенсации $F402=100\%$);
- бездатчиковое векторное управление ($P_t=3$);
- закон минимального тока (т.н. «энергосберегающий» закон, $P_t=4$).

При проведении экспериментов оценивались значения следующих переменных:

- выходной ток и напряжение испытуемого ПЧ (действующие значения);
- его выходная частота;
- частота вращения двигателей;
- момент испытуемого двигателя;
- активная мощность, потребляемая преобразователем.

В качестве базовой (номинальной) частоты для испытуемого ПЧ была установлена частота $\nu L=50$ Гц, в качестве максимальной – $FH=60$ Гц. Номинальное выходное напряжение $\nu L\nu=380$ В. В диапазоне частот 0...50 Гц (первая зона) регулирование осуществлялось с постоянным магнитным потоком, в диапазоне 50...60 Гц (вторая зона) выходное напряжение равнялось номинальному и производилось ослабление поля. Частота модуляции $F401=8$ кГц.

Основные свойства законов управления отображают вольт-частотные и механические характеристики.

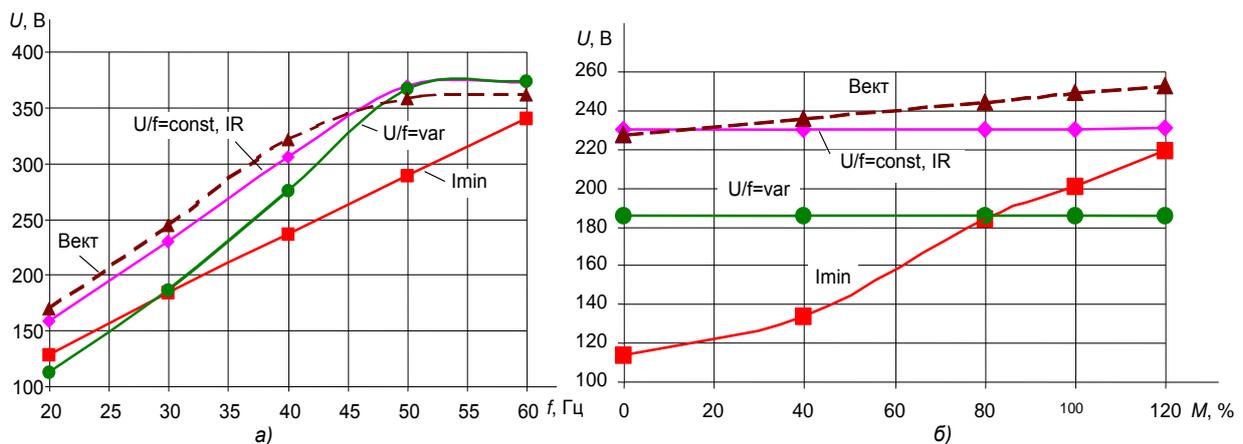


Рис. 1 Выходное напряжение как функция:
а) частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Вольт-частотные характеристики (ВЧХ) законов $U/f = const$ и IR -компенсации практически совпадают (рис. 1, а). Подобна им и характеристика для векторного управления. ВЧХ закона управления для турбомеханизмов в первой зоне является крутопадающей и криволинейной, а во второй совпадает с пер-

выми двумя. ВЧХ для закона минимального тока гораздо своеобразнее. Она близка к линейной во всем диапазоне частот и расположена заметно ниже остальных.

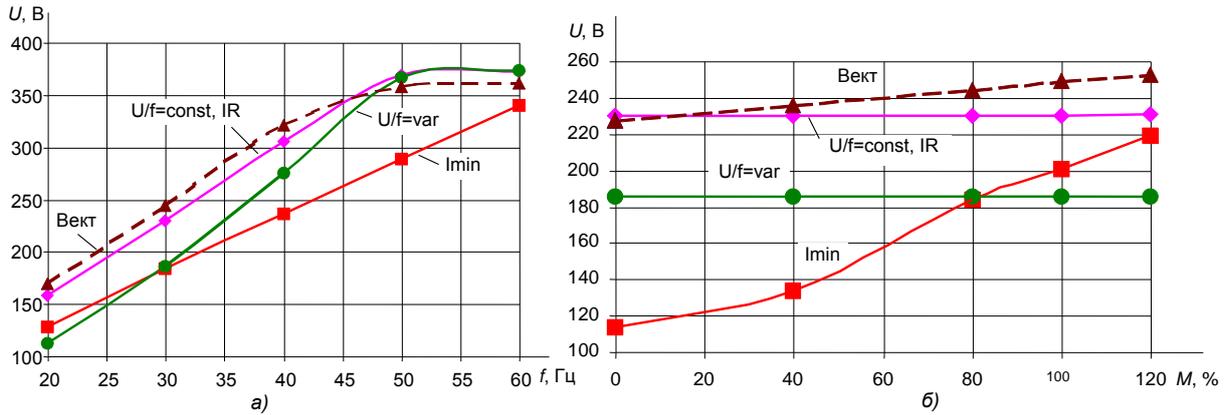


Рис. 1 Выходное напряжение как функция:
а) частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Только для двух законов (векторного и минимального тока) изменение момента нагрузки заметно влияет на вид ВЧХ. Известно, что при векторном управлении обратная связь по скорости увеличивает выходное напряжение при росте нагрузки (рис. 1, б). Поэтому, чем больше момент, тем выше соответствующая ВЧХ. Для закона минимального тока характерна еще большая связь между нагрузкой и уровнем напряжения (рис. 1, б).

Жесткость механических характеристик (рис. 2) для законов IR -компенсации, $U/f = const$ и $U/f = var$ практически одинакова (лишь у последнего на низких частотах наблюдается некоторое смягчение). Наибольшая жесткость во всем диапазоне частот, естественно, присуща векторному управлению благодаря влиянию обратной связи. Механические характеристики при использовании энергосберегающего закона имеют переменную жесткость: малую при моментах до 40% и намного большую (почти как при векторном управлении) в остальном диапазоне нагрузок. Этот факт можно объяснить резким, почти пропорциональным увеличением магнитного потока при росте нагрузки, которое иллюстрируется рис. 3, где показана зависимость отношения U/f от момента (как известно, это отношение пропорционально потоку статора).

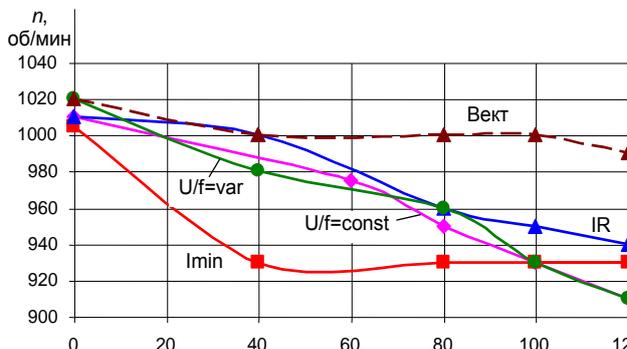


Рис. 2 Механические характеристики ($f=50$ Гц)

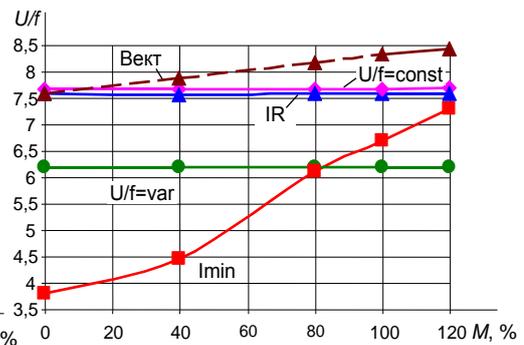


Рис. 3 U/f как функция момента ($f=30$ Гц)

В первой зоне со снижением частоты магнитный поток (рис. 4) для законов $U/f = const$ и IR -компенсации остается практически неизменным, а для закона $U/f = var$ снижается (последнее обусловлено более быстрым снижением напряжения, см. рис. 1, а). На малых частотах растет роль активного сопротивления статора по сравнению с индуктивными сопротивлениями и падает жесткость механических характеристик машины. Поэтому векторный закон обеспечивает заданную жесткость благодаря увеличению напряжения и потока. Для закона минимального тока характерен монотонный рост потока со снижением частоты (об этом свидетельствует и меньший наклон его ВЧХ на рис. 1, а).

Выходной ток ПЧ для энергосберегающего закона практически не зависит от выходной частоты (рис. 5, а) и наименьший в сравнении с другими законами практически во всем диапазоне нагрузок и частот (только при больших моментах и малых частотах закон $U/f = var$ может иметь меньшую величину

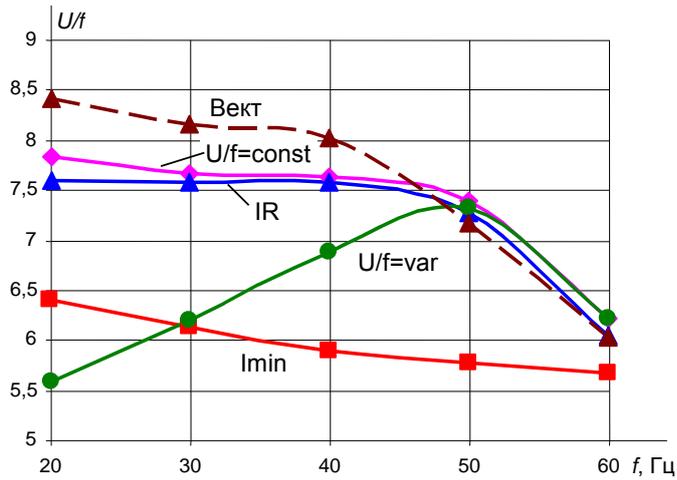


Рис. 4 Зависимость U/f от выходной частоты ($M=80\%$)

тока). Для всех остальных законов характерно наличие максимума зависимости $I(f)$ при частотах вблизи номинальной. В зависимости же тока от нагрузки (рис. 5, б) наблюдается минимум при моментах, меньших номинального (абсцисса этого минимума смещается вправо при уменьшении частоты). По величине тока статора эти законы практически равноценны (отличие не более 15% номинального тока, причем наибольший ток присущ, как правило, закону $U/f = const$).

Наибольшую активную мощность потребляет ПЧ, управляемый по закону $U/f = const$, и лишь при малых нагрузках худшим в этом смысле может быть закон $U/f = var$. Наименьшее потребление характерно для IR -компенсации и закона минимального тока (рис. 6). Последний безусловно лучший на всех частотах при нагрузках, близких к номинальной, а при снижении нагрузки – лишь больших частотах. Снижение энергопотребления обусловлено уменьшением потерь в двигателе (потери в стали пропорциональны квадрату напряжения, в обмотке статора – квадрату тока).

терно для IR -компенсации и закона минимального тока (рис. 6). Последний безусловно лучший на всех частотах при нагрузках, близких к номинальной, а при снижении нагрузки – лишь больших частотах. Снижение энергопотребления обусловлено уменьшением потерь в двигателе (потери в стали пропорциональны квадрату напряжения, в обмотке статора – квадрату тока).

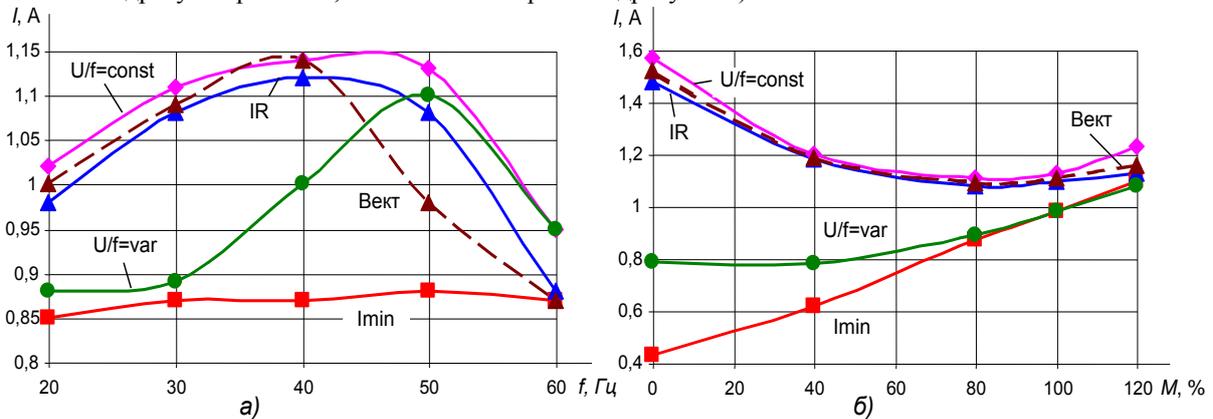


Рис. 5 Выходной ток ПЧ как функция:
а) выходной частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Выводы

1. При использовании закона минимального тока степень снижения напряжения на выходе ПЧ по сравнению с другими законами достигает 43% и тока – 24%. Это обеспечивает снижение нагрева двигателя и ПЧ.

2. При нагрузках, близких к номинальной, наибольшая экономия электроэнергии присуща закону минимального тока (при номинальной частоте от 10 до 24%).

3. К области применения закона минимального тока следует отнести механизмы с неглубоким регулированием скорости (порядка 1:2) при постоянной и переменной нагрузке. Практически во всем диапазоне частот данный закон в энергетическом смысле эффективнее традиционно применяемого для турбомеханизмов закона $U/f = var$.

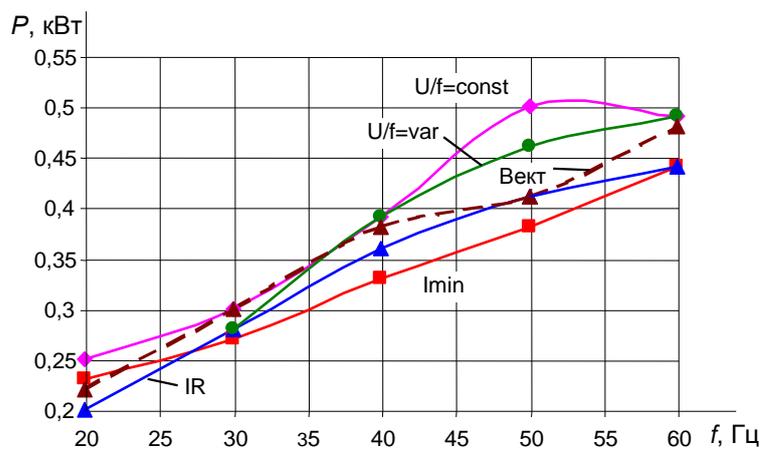


Рис. 6 Потребляемая ПЧ мощность ($M=100\%$):

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Беитой А.С.