

УДК 621.311.001.57
ББК 327-016:3261.8

А.Л. СЛАВУТСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ВЫБЕГА И САМОЗАПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ УЗЛА КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ*

Ключевые слова: переходные процессы, узел комплексной нагрузки, асинхронный двигатель, выбег, самозапуск.

Разработана методика расчета переходных процессов в участках систем электроснабжения с мощными электродвигателями. Моделирование проводится методом синтетических схем в мгновенных значениях величин. На его основе создано программное обеспечение. Рассмотрен режим отключения с последующим возобновлением питания узла комплексной нагрузки с мощным асинхронным двигателем. Приводятся основные результаты моделирования и краткий анализ режимов. Моделируются отключение и повторное включение выключателя на шинах низкого напряжения. Показано изменение электромагнитного момента двигателя в ходе протекания переходных процессов. Отмечено влияние режима электродвигателя на статическую нагрузку узла. Выбег двигателя с рекуперацией характеризуется влиянием генераторного режима двигателя на нагрузку узла, а режим самозапуска, – повышенным отбором мощности двигателем у остальных потребителей в рамках узла нагрузки. Режим самозапуска двигателя из режима неполного выбега укорочен относительно пуска из состояния покоя. Показаны перегрузки, возникающие в этом режиме в питающей сети и двигателе. Приведенные примеры показывают возможность рассматривать различные последовательные переходные процессы в узле нагрузки и оценивать взаимное влияние элементов нагрузок. Такой подход может быть полезен при наладке и выборе параметров работы защиты и автоматики узла нагрузки.

В узлах комплексной нагрузки с мощными электродвигателями распространённым переходным режимом является выбег электродвигателей с последующим их самозапуском [2, 3, 12]. Эти режимы обусловлены частичным или полным пропаданием питания узла вследствие различных неполадок питающей сети [2]. Эти режимы обычно сопровождаются рекуперацией энергии двигателя в сеть и последующим самозапуском двигателя из состояния частичного выбега или покоя. Выбег двигателя с рекуперацией интересен влиянием генераторного режима двигателя на нагрузку узла [2], а режим самозапуска – повышенным отбором мощности двигателем у остальных потребителей в рамках узла [4, 8]. Кроме того, при протекании указанных режимов следует рассмотреть режим работы самого электродвигателя, поскольку в нем происходят значительные изменения электромагнитного момента, влияющие на сам двигатель и на приводимые им в движение механизмы.

Модель узла нагрузки. Рассматриваемый режим характеризуется частичным выбегом электродвигателя с рекуперацией энергии в сеть и последующим его самозапуском из режима неполного выбега. Проведено моделирование соответствующих переходных процессов в узле комплексной нагрузки, питающемся через двухобмоточный трансформатор 110/10 кВ. В со-

* Работа поддержана грантом Фонда содействия инновациям (конкурс «УМНИК»), договор 11555ГУ/2017.

став узла входят мощный асинхронный двигатель, статическая нагрузка и устройство компенсации реактивной мощности. Более подробно схема узла описана в [5]. Рассмотрен режим работы узла при отключении питания на стороне низкого напряжения с последующим его включением.

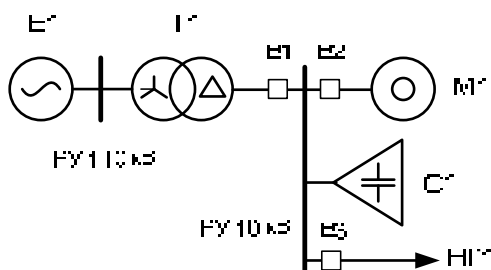


Рис. 1. Схема исследуемого узла нагрузки

Параметры элементов данного узла следующие: трансформатор Т1 марки ТДН-16000/110, двигатель М1 АЗМП-5000, нагрузка: $S_{НГ1} = 1 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos\varphi_{НГ1} = 0,9$, компенсирующее устройство имеет мощность $Q_{С1} = 840 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$. Параметры моделей рассчитаны из паспортных данных [1]. Характеристика зависимости механической нагрузки на валу двигателя от угловой скорости задана вентиляторной и характеризуется квадратичной частотной зависимостью

$$T_M = \omega^2 / 6,6 \quad (1)$$

Моделирование переходных процессов производилось методом синтетических схем [6, 7]. Метод позволяет рассчитывать электромагнитные и электромеханические процессы в электрических цепях в мгновенных значениях величин с учетом изменяющихся во времени параметров модели [11]. Применена динамическая модель асинхронного двигателя [9, 10, 13].

Управление питанием нагрузки производится выключателем В1, расположенным со стороны выводов низкого напряжения трансформатора. Произведено моделирование в такой последовательности событий: из режима установившейся работы узла производится отключение выключателя В1 в момент времени 0,1 с. Двигатель переходит в режим выбега с рекуперацией. Через 1,4 с происходит возобновление питания узла включением выключателя В1, после чего двигатель переходит в режим самозапуска из состояния частичного выбега.

Результаты моделирования. На рис. 2 показан ток в статоре двигателя, напряжение на шинах 10 кВ и скольжение двигателя. В момент выбега именно двигатель является источником мощности и через него течет суммарный ток узла. Из графиков видно, что напряжение в узле снижается не мгновенно, а постепенно. При этом частота сети зависит от частоты вращения ротора двигателя, поскольку двигатель работает в генераторном режиме. Ток в статоре после отключения питания достаточно мал в силу малой мощности нагрузки.

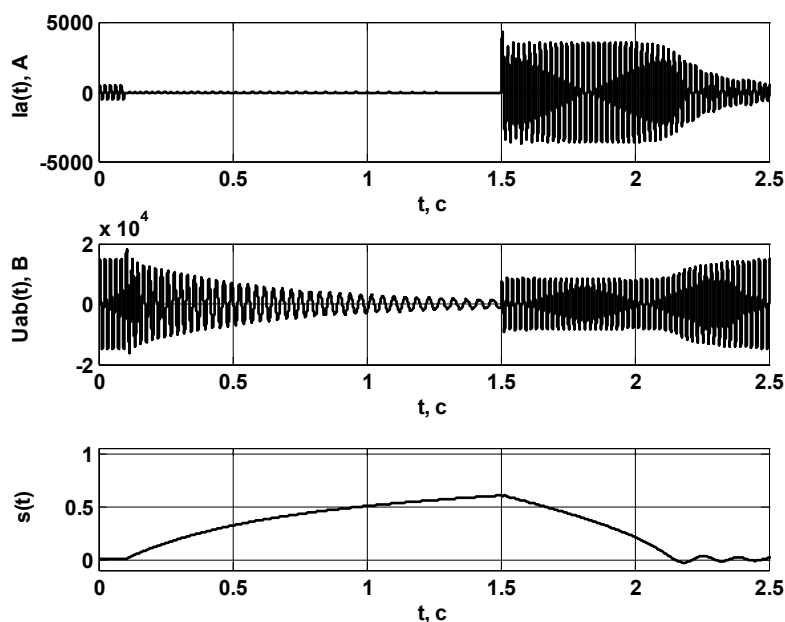


Рис. 2. График тока фазы A статора электродвигателя М1, напряжения на шинах узла нагрузки и скольжение двигателя М1

На рис. 3 показан ток статической нагрузки узла. Как видно из графика тока, после отключения выключателя нагрузка продолжает питаться от двигателя, находящегося в генераторном режиме.

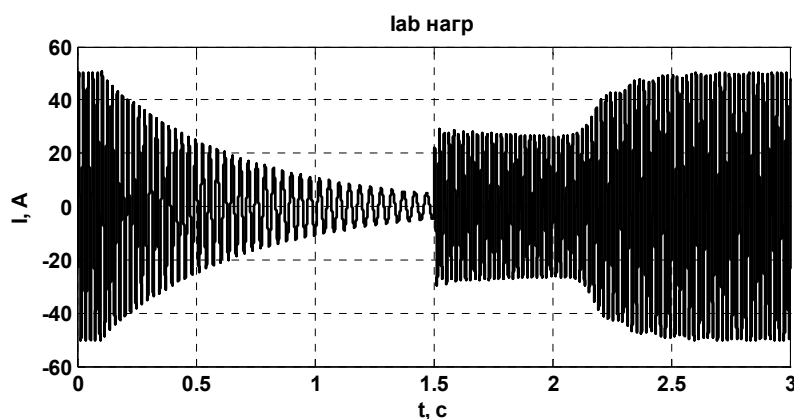


Рис. 3. Ток одной фазы A статической нагрузки

Рассмотрим изменение электромагнитного момента двигателя, показанного на рис. 4. Как видно из графика, при отключении питания электромагнитный момент начинает колебаться с высокой частотой, а его усредненное значение меняет знак на противоположный, что говорит о переходе из двига-

тельного режима в генераторный. Затем по мере перехода механической энергии, запасенной двигателем, в электромагнитную момент стремится к нулевому значению, аналогично амплитуде тока и напряжения, наведенных генераторным режимом двигателя, показанных на рисках 2 и 3.

На рис. 5 показана зависимость электромагнитного момента двигателя от угловой скорости. Выбег двигателя начинается из установившегося режима (стрелка 1). В момент отключения внешнего питания двигатель переходит в режим рекуперации (стрелка 2), характеризующийся спадом угловой скорости и переходом электромагнитного момента в отрицательную область (участок 2). При этом электромагнитный момент стремится к нулевому значению по мере выбега, т.е. по мере перехода механической энергии запасенной двигателем в электромагнитную, потребляемую элементами узла нагрузки, подключенными к шинам 10 кВ. В это время двигатель генерирует в сеть напряжение и ток уменьшающейся амплитуды и частоты (рис. 2). На участке 4 рисунка 5 наблюдается режим самозапуска двигателя из режима неполного выбега, когда скольжение двигателя $s = 0,6$.

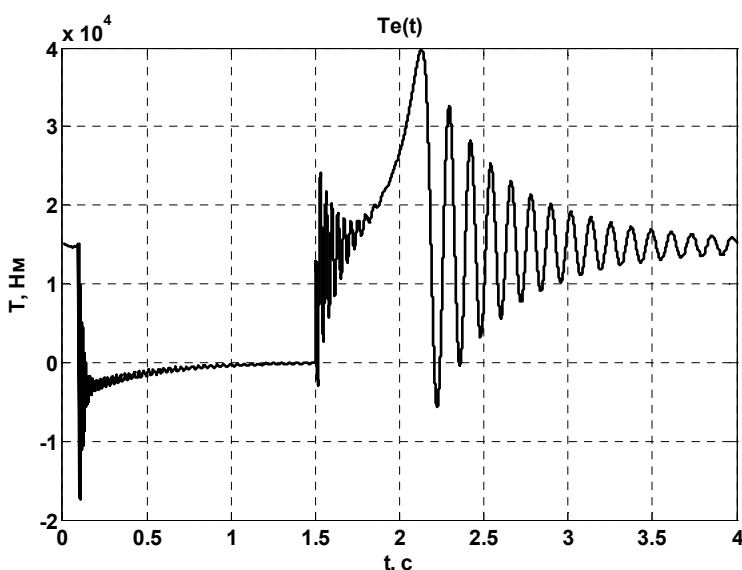


Рис. 4. График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от времени при его выбеге и последующем самозапуске

Этот режим укорочен относительно пуска из состояния покоя. Следует отметить, что в этом режиме питающая сеть и двигатель испытывают перегрузки, аналогичные перегрузкам, возникающим в момент запуска из состояния покоя, но в течение меньшего промежутка времени, что облегчает пуск и уменьшает негативное влияние пониженного напряжения сети на потребителей. С другой стороны, пуск из состояния частичного выбега может привести к ударному воздействию электромагнитного момента в двигателе при появлении питания на сам двигатель и механизмы [2]. Это зависит от положения ротора двигателя в момент подачи питания.

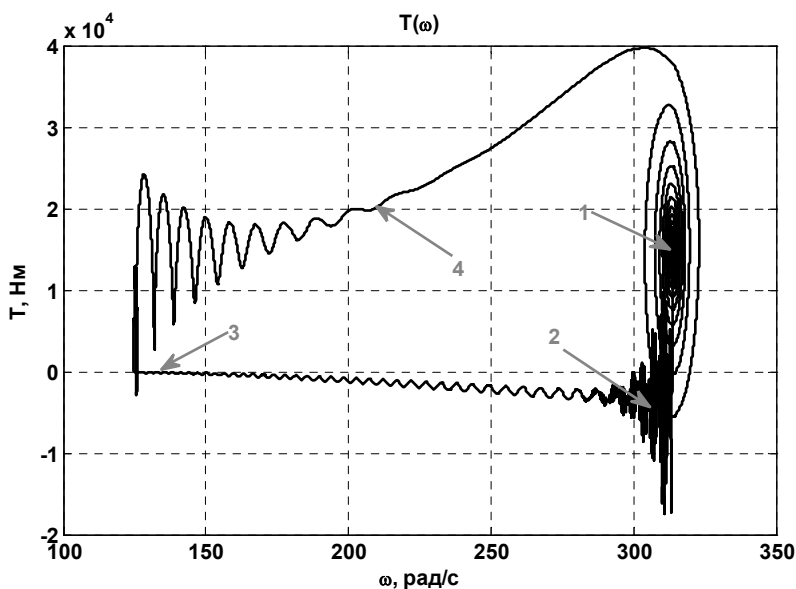


Рис. 5. График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от угловой скорости двигателя при его выбеге и последующем самозапуске

Резкое изменение электромагнитного момента двигателя при возобновлении питания узла нагрузки показано на рис. 4 и 5. На рис. 4 это момент времени 1,5 с, а на рис. 5 это момент перехода участка 3 в участок 4, где момент близок к нулю, а угловая скорость – к 125 рад/с. Именно такой скачек момента является ударным для механической части двигателя и приводимых им в движение механизмов. В данном случае важную роль играет не абсолютная величина момента, а скорость его изменения.

При отключении выключателя на стороне высокого напряжения трансформатора спад напряжения на шинах при выбеге двигателя происходит быстрее. Напряжение падает в 2 раза за 0,1 с после отключения. При отключении на нижней стороне перед шинами 10 кВ напряжение падает в 2 раза за 0,45 с. Это объясняется тем, что при отключении на верхней стороне трансформатора обмотки трансформатора участвуют в потреблении мощности, вырабатываемой двигателем в режиме рекуперации.

Выводы. Результаты дают возможность рассмотреть различные режимы узла комплексной нагрузки с мощным асинхронным двигателем. Приведенный пример показывает возможность рассматривать различные последовательные переходные процессы в узле и оценивать взаимное влияние элементов нагрузок при использовании разработанных методик и моделей. Более детальное моделирование различных вариантов переключений позволит оценить наиболее благоприятные и неблагоприятные комбинации режимов. Такой подход может быть полезен при наладке и выборе параметров работы защит и автоматики узла нагрузки.

Литература

1. Воронов П.Л., Щедрин В.А. О параметрах мощных электрических машин в симметричных и несимметричных режимах // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. VIII. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. С. 45–57.
2. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Изд-во МЭИ, 1997. 421 с.
3. Донской Н.В. Асинхронный двигатель в системах автоматического управления. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. 283 с.
4. Калинин А.Г., Аракелян А.К. Анализ провалов напряжения при пусках электродвигателей с вентиляторной нагрузкой // Электричество. 2011. № 6. С. 46–50.
5. Славутский А.Л. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с асинхронным двигателем в фазных координатах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 1. С. 38–45.
6. Славутский А.Л., Пряников В.С., Славутский Л.А. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с трехобмоточным трансформатором на разных уровнях напряжения // Электротехника. 2017. № 7. С. 20–24.
7. Славутский А.Л. Оценка динамических характеристик измерительных органов при переходных процессах в энергосистеме // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 161–165.
8. Щедрин В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. 422 с.
9. Paul C.K., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Krause Analysis of the machinery and drive systems. N.Y., IEEE PRESS, 2002, 630 p.
10. Marti J.R., Myers T.O. Phase-Domain Induction Motor Model for Power System Simulators. IEEE Wescanex '95 Proc., pp. 276–282.
11. Wang L., Jatskevich J., Dinavahi V. et al. Method of Interfacing Rotating Machine Models in Transient Simulation Programs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 891–903.
12. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26.
13. Wang L., Jatskevich J., Wang C., Li P. A Voltage-Behind-Reactance Induction Machine Model for the EMTP-Type Solution. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1226–1238.

СЛАВУТСКИЙ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела разработки программных продуктов, Обособленное подразделение ООО «Юнител Инжиниринг» в г. Чебоксары, Россия, Чебоксары (slavutskii@gmail.com).

A. SLAVUTSKIY
SIMULATION OF THE RUNNING-OUT MODE
AND SELF-STARTING OF INDUCTION MOTOR
IN THE COMPLEX LOAD NODE

Key words: *transient processes, the node of complex load, induction motor, running-out, self-starting.*

A method for calculating of transients in segments of power supply systems with powerful electric motors are designed. The simulation is done by the direct current synthetic schemes method in the instantaneous values of magnitudes. On the basis of the method the software was developed. The shutdown mode with the subsequent renewal of power supply of the complex load node with a powerful induction motor is considered. The main results of modeling and a brief analysis of the modes are presented. The switching off and back on of the switch on low-voltage bus is simulated. The change in the electromagnetic torque of the motor during the transient processes is shown. The influence of the electric motor mode on the static load of the node is noted. The running-out mode of the motor with recuperation is characterized by the influence of the generator mode of the motor on the load of the node. The self-starting mode is connected by increased power takeoff by motor from other power consumers within the load

node. The self-starting mode of the motor from the incomplete run-out mode is shortened relative to the start from the state of rest. The overloads occurring in this mode in the power supply network and the engine are shown. The overloads occurring in this mode in the power supply network and the motor are shown. These examples show the possibility to consider different sequential transients in the load node and to evaluate the mutual influence of load elements. This approach can be useful when setting up and selecting the parameters of protection and load node automation.

References

1. Voronov P.L., Shchedrin V.A. *O parametrakh moshchnykh elektricheskikh mashin v simmetrichnykh i nesimmetrichnykh rezhimakh* [About the parameters of powerful electric machines in symmetric and asymmetric modes]. In: *Regional'naya energetika i elektrotehnika: problemy i resheniya: sb. nauch. tr. Vyp. VIII* [Regional energy and electrical engineering: problems and solutions: collection of proceedings. Vol. 8]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2012, pp. 45–57.
2. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Cyruk S.A. *Perekhodnye processy v sistemakh promyshlennogo e'lektrosnabzheniya, obuslovlennye e'lektrodvigatel'noi nagruzkoi* [Transient processes in power supplying systems with electrical driving load]. Moscow, MEI Publ., 1997, 421 p.
3. Donskoi N.V. *Asinkhronnyi dvigatel' v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* [Asynchronous motor in automatic control systems]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2012, 283 p.
4. Kalinin A.G., Arakelyan A.K. *Analiz provalov napryazheniya pri puskakh elektro dvigatelei s ventilyatornoi nagruzkoi* [Analysis of power failures during start-up of electric motors with fan load]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 6, pp. 46–50.
5. Slavutskiy A. L. *Modelirovanie perehodnykh rezhimov uzla nagruзки s asinhronnim dvigatelem v faznykh koordinatah* [Modeling transients in the load nodes containing the induction motors in phase coordinates]. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrical facilities and systems], 2015, no. 1, pp. 38–45.
6. Slavutskii A.L., Pryanikov V.S., Slavutskii L.A. *Modelirovanie perehodnykh rezhimov uzla nagruзки s trekhobmotochnym transformatorom na raznykh urovnyakh napryazheniya* [Simulating the transients in a load node with a triple-wound transformer at different voltage levels]. *Elektrotehnika*, 2017, vol. 88, no. 7. pp. 412–415.
7. Slavutskiy A.L. *Otsenka dinamicheskikh kharakteristik izmeritel'nykh organov pri perehodnykh protsessakh v energosisteme* [The estimate of dynamic characteristics of measuring elements to transient processes in power systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 161–165.
8. Shchedrin V.A. *Elektromagnitnye perehodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2007, 422 p.
9. Paul C.K., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Krause Analysis of the machinery and drive systems*. N.Y., IEEE PRESS, 2002, 630 p.
10. Marti J.R., Myers T.O. Phase-Domain Induction Motor Model for Power System Simulators. *IEEE Wescanex '95 Proc.*, pp. 276–282.
11. Wang L., Jatskevich J., Dinavahi V. et al. Method of Interfacing Rotating Machine Models in Transient Simulation Programs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 891–903.
12. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26.
13. Wang L., Jatskevich J., Wang C., Li P. A Voltage-Behind-Reactance Induction Machine Model for the EMTP-Type Solution. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1226–1238.

SLAVUTSKIY ALEXANDR – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Software Products Development, a Separate Division of LLC «Unitel Engineering» in Cheboksary, Russia, Cheboksary (slavutskii@gmail.com).

Формат цитирования: *Славутский А.Л.* Моделирование режима выбега и самозапуска асинхронного двигателя в составе узла комплексной нагрузки // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 3. – С. 132–138.