

УДК 621.317.7

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ОДНОКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЕ С ДВУХСТОРОННИМ ВЫБЕГОМ БОЙКА

Л.А. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: neyman31@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания машин ударного действия с повышенной энергией единичного удара при одновременном снижении влияния работы электропривода на питающую сеть.

Цель работы: анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним свободным выбегом бойка, работающей в циклическом режиме и характеризующейся высокими удельными показателями и пониженной частотой ударов.

Методы исследования: На основе баланса энергии электромеханической системы синхронной однокатушечной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним свободным выбегом бойка рассматривается процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл.

Результаты: Реализация рабочих циклов со свободным выбегом бойка обеспечивает снижение амплитуды тока за счет разгона ударной массы электромагнитными силами при обратном и рабочем ходе за два импульса напряжения, что уменьшает влияние работы электропривода на питающую сеть. Возможность в достижении высоких удельных показателей и КПД передачи энергии ударом рабочих циклов со свободным выбегом бойка следует из совершенства самих циклов, обеспечивающих эффективное преобразование электрической энергии в полезную механическую работу, которое заключается в полном или частичном устранении электромагнитного торможения бойка при синхронизации частоты его механических колебаний с частотой питающей сети.

Ключевые слова:

Синхронная электромагнитная машина, электропривод, рабочий цикл машины, баланс энергии электромеханической системы, энергия удара, двухсторонний выбег бойка.

Разработка новых виброударных технологий вызывает необходимость создания машин ударного действия с повышенной энергией единичного удара. Как обладающие высокими энергетическими показателями широкое практическое применение получили синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота механических колебаний бойка равна или кратна частоте питающей сети [1–10].

Физика процесса преобразования электрической энергии в механическую работу в данных машинах определяется в равной мере совокупностью элементов магнитной и механической системы ударного узла и реализацией способа управления возвратно-поступательным перемещением ударной массы (бойка) [11–13].

Полезная работа, совершаемая синхронной электромагнитной машиной, имеет импульсный характер, и увеличение энергии удара при получении питания от источника напряжения промышленной частоты ограничивается значениями допустимой импульсной мощности самого источника [14–17].

Одним из перспективных направлений создания электромагнитных машин с повышенной энергией удара является использование рабочих циклов, позволяющих снизить амплитуду тока и уменьшить влияние работы электропривода на питающую сеть [18, 19].

Особый интерес представляет рабочий цикл с двухсторонним свободным выбегом бойка. Одним из достоинств данного цикла является возможность в достижении высоких удельных показателей и КПД передачи энергии ударом.

Несмотря на то, что данный рабочий цикл достаточно исследован и анализ возможных режимов энергопреобразования на основе закона сохранения энергии подробно изложен в [1], вопросу анализа процесса преобразования электрической энергии в механическую за полный рабочий цикл не уделено должного внимания.

Целью настоящей работы является анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним свободным выбегом бойка, работающей в циклическом режиме и характеризующейся высокими удельными показателями и пониженной частотой ударов.

Один из вариантов исполнения ударного узла однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка приведен на рис. 1 [3].

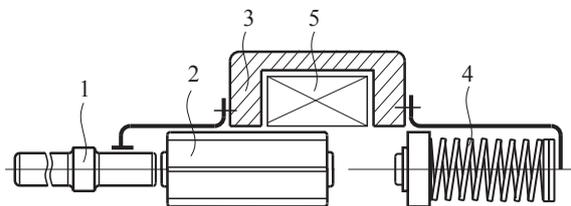


Рис. 1. Вариант однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двухсторонним выбегом бойка

Ударный узел, объединяющий в себе элементы магнитной и механической системы, содержит рабочий инструмент – 1, боек – 2, магнитопровод – 3, реверсирующее устройство – 4, выполненное в ви-

де пружинного буфера, и намагничивающую катушку – 5.

Синхронизация возвратно-поступательного движения бойка – 2 с напряжением источника, подаваемым на катушку – 5, осуществляется при свободном выбеге бойка – 2.

Для реализации рабочего цикла со свободным выбегом бойка используется одна катушка, обеспечивающая разгон ударной массы (бойка) электромагнитными силами в двух направлениях.

Рабочий цикл ударного узла приведен на рис. 2 в виде диаграммы перемещения x бойка, напряжения u и тока i катушки, получаемой питание от переменного однофазного тока по схеме однополупериодного выпрямления.

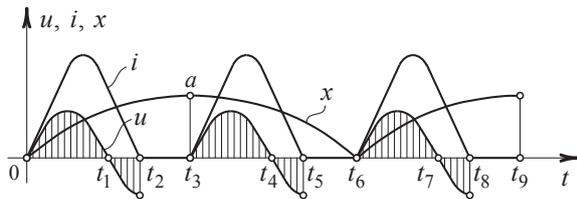


Рис. 2. Рабочий цикл однокатушечной синхронной электромагнитной машины

За один период напряжения в катушку поступает только одна полуволна тока. Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время двух периодов напряжения питающего источника, что при частоте $f=50$ Гц обеспечивает синхронную частоту ударов бойка $n_{уд}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{ц}$:

$$n_{уд} = \frac{60f}{2p} = 1500 \text{ уд/мин}; \quad t_{ц} = \frac{2p}{f} = 0,04 \text{ с},$$

где $2p=2$ – число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

Свободный выбег бойка в сторону пружинного буфера выполняется в период бестоковой паузы t_2-t_3 , в течение которой боек, двигаясь по инерции, сжимает буферную пружину. В период второй бестоковой паузы t_5-t_6 свободный выбег бойка осуществляется в сторону рабочего инструмента и в момент времени t_6 наносит по нему удар.

Далее цикл повторяется. Таким образом, одна и та же катушка используется дважды за цикл для совершения рабочего и обратного хода.

В конкретном случае рассматривается наиболее сложный процесс энергопреобразования в электромагнитной машине, когда происходит обмен между электрической, магнитной и механической энергией.

В соответствии с цикличностью повторяющихся процессов последовательно рассмотрим структуру преобразования электрической энергии в механическую работу.

Для упрощения анализа силами сопротивления движения бойка пренебрегаем. Также полагаем, что к началу рассматриваемого интервала времени $0-t_1$ ударный узел обладает определенным началь-

ным запасом кинетической энергии, приобретенной при отскоке бойка от рабочего инструмента в предыдущем цикле. Первый этап рабочего цикла связан с обеспечением обратного хода бойка и его перемещением в сторону буферной пружины. Он начинается с момента $t=0$ подачи импульса напряжения на катушку (рис. 2).

Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки. Уравнение энергетического баланса

$$\int_0^{t_1} (ui - i^2R)dt + \frac{mv_0^2}{2} = \int_0^{v_1} mv dv + \Delta w_m(x, t),$$

где ui – мощность источника; i^2R – мощность тепловых потерь; v_0 – начальная скорость бойка при отскоке от рабочего инструмента; v_1 – скорость бойка в момент времени t_1 ; m – масса бойка; $\Delta w_m(x, t)$ – приращение энергии магнитного поля катушки.

В уравнении энергобаланса работа электромагнитных сил преобразуется в кинетическую энергию при ускорении бойка и составляет величину

$$\int_0^{t_1} f_{эм} v dt = \int_0^{v_1} mv dv - \frac{mv_0^2}{2},$$

где $f_{эм}$ – электромагнитная сила катушки; $\int_0^{t_1} f_{эм} v dt$ – работа электромагнитных сил, затраченная на ускорение ударной массы.

Если кинетической энергией при отскоке бойка от рабочего инструмента можно пренебречь или она равна нулю ($v_0 \approx 0$), то кинетическая энергия бойка на момент времени t_1 будет определяться только работой электромагнитных сил, т. е.

$$\int_0^{t_1} f_{эм} v dt = \frac{mv_1^2}{2}.$$

На интервале времени t_1-t_2 (рис. 2) электрическая энергия из сети не потребляется. Механическая работа совершается только за счет энергии магнитного поля катушки, которая частично расходуется на увеличение кинетической энергии бойка и частично в виде электрической энергии может рекуперироваться обратно в сеть, компенсируя тепловые потери в катушке. Уравнение энергетического баланса может быть представлено в виде

$$\Delta w_m(x, t) = \int_{t_1}^{t_2} f_{эм} v dt + \int_{t_1}^{t_2} i^2R dt + \Delta w_{эл}(x, t),$$

где $\Delta w_{эл}(x, t)$ – электрическая энергия, рекуперирова-

емая в сеть; $\int_{t_1}^{t_2} f_{эм} v dt = \int_{v_1}^{v_2} mv dv$ – работа электро-

магнитных сил, преобразуемая в кинетическую энергию при ускорении бойка.

В период бестоковой паузы t_2-t_3 (рис. 2) осуществляется свободный выбег бойка в сторону пружинного буфера при обесточенной катушке. За счет ранее запасенной кинетической энергии боек движется по инерции и сжимает пружину. При этом кинетическая энергия бойка переходит в потенциальную энергию при сжатии пружины

$$\int_0^{v_1} mv dv + \int_{x_1}^{x_2} mv dv = \int_{x_2}^{x_1} kx dx,$$

где k – коэффициент жесткости пружины; kx – усилие сжатия пружины.

В точке a на кривой хода (рис. 2), соответствующей моменту времени t_3 , выполняется реверс бойка и смена знака скорости движения на противоположную.

Следующая часть рабочего цикла электромагнитной машины на интервале времени t_3-t_6 будет характеризоваться ускоренным движением бойка в сторону рабочего инструмента.

На интервале времени t_3-t_4 (рис. 2) движение бойка осуществляется под действием сил буферной пружины, обладающей запасом потенциальной энергии, и электрической энергии, поступающей из сети, которая расходуется на изменение кинетической энергии при ускорении бойка, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки. Согласно режиму уравнение баланса энергий на данном интервале

$$\int_{t_3}^{t_4} (ui - i^2 R) dt + \int_{x_3}^{x_2} kx dx = \int_{v_3}^{v_4} mv dv + \Delta w_m(x, t),$$

где $v_3=0$ – начальная скорость бойка при реверсе.

На следующем интервале времени t_4-t_5 (рис. 2), так как электрическая энергия из сети не поступает, механическая работа совершается только за счет накопленной энергии магнитного поля катушки, которая частично расходуется на увеличение кинетической энергии движущегося в сторону рабочего инструмента бойка, и частично рекуперирована в виде электрической энергии обратно в сеть с компенсацией тепловых потерь в катушке

$$\Delta w_m(x, t) = \int_{t_4}^{t_5} f_{эм} v dt + \int_{t_4}^{t_5} i^2 R dt + \Delta w_{эл}(x, t).$$

В период бестоковой паузы t_5-t_6 (рис. 2) осуществляется свободный выбег бойка и в момент времени t_6 , боек, двигаясь по инерции, наносит удар по рабочему инструменту. Далее цикл повторяется.

Таким образом, одна катушка используется дважды за полный рабочий цикл, и боек приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи двух импульсов напряжения питающего источника.

Кинетическая энергия бойка за полный рабочий цикл будет определяться запасом потенциальной энергии буферной пружины и работой электромагнитных сил по увеличению кинетической энергии бойка при его перемещении в сторону ин-

струмента, что будет соответствовать балансу энергий

$$\int_{x_3}^{x_2} kx dx + \int_{v_3}^{v_4} mv dv + \int_{v_4}^{v_5} mv dv = \frac{mv_5^2}{2},$$

где v_5 – предударная скорость бойка; $\frac{mv_5^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка по завершению рабочего цикла.

В момент удара по рабочему инструменту передается только часть кинетической энергии в виде силового импульса, другая часть в виде кинетической энергии при отскоке бойка от рабочего инструмента используется в следующем рабочем цикле.

Эффективность передачи энергии ударом в этом случае может быть определена как

$$A_{уд} = (1 - k_{от}) \frac{mv_5^2}{2},$$

где $k_{от} = \frac{v_0^2}{v_5^2}$ – коэффициент отскока бойка от рабочего инструмента.

Процесс энергопреобразования рассмотрен для случая полной синхронизированной работы электрической, магнитной и механической подсистем ударного узла электромагнитной машины. Согласованность в работе указанных подсистем определяется тем, что при выходе бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки ток должен быть равен нулю.

На диаграмме (рис. 2) это момент времени t_2 при обратном ходе и момент времени t_5 при рабочем ходе. В противном случае возникает электромагнитное торможение бойка, приводящее к снижению коэффициента полезного действия устройства.

Так как питание электромагнитная машина получает от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления, то избежать процесса электромагнитного торможения бойка на интервалах времени рабочего цикла t_1-t_2 и t_4-t_5 только за счет подстройки механической подсистемы ударного узла оказывается не всегда возможным. Прежде всего, это связано с непостоянством начального запаса кинетической энергии бойка при отскоке его от инструмента, которая может меняться от цикла к циклу и зависеть от твердости поверхности обрабатываемого материала.

Одним из наиболее простых вариантов устранения электромагнитного торможения бойка в зависимости от начального запаса кинетической энергии, обеспечивающего только частичное повышение КПД энергопреобразования в рабочем цикле, может являться искусственное сокращение времени протекания тока в катушке, а обусловленное данным сокращением уменьшение энергии удара может быть скомпенсировано за счет увеличения амплитуды тока.

Вторым наиболее затратным вариантом увеличения КПД является использование рабочего цикла с регулируемыми параметрами, в котором согласование электрической и механической подсистем осуществляется за счет изменения длительности тока процесса управления, который осуществляется датчиками положения или скорости движения бойка.

Альтернативным вариантом, уменьшающим зависимость КПД энергопреобразования от начальной скорости бойка при отскоке от инструмента и одновременно решающим проблему снижения амплитуды тока и влияния работы устройства на питающую сеть, может являться разработанный на основе рассматриваемого рабочего цикла новый рабочий цикл со свободным выбегом бойка и реализованный на его основе способ управления двухкатушечной синхронной электромагнитной машиной ударного действия [20].

Результаты анализа процесса энергопреобразования за полный рабочий цикл показывают, что использование пружинного буферного устройства в качестве промежуточного звена для преобразования кинетической энергии ударной массы в потенциальную энергию при обратном ходе с последую-

щим преобразованием в кинетическую энергию при рабочем ходе позволяет получать ударную мощность, превосходящую мощность источника питания, и тем самым позволяет снизить амплитуду тока и влияние работы электропривода на питающую сеть.

Выводы

1. Реализация рабочих циклов со свободным выбегом бойка обеспечивает снижение амплитуды тока за счет разгона ударной массы электромагнитными силами при обратном и рабочем ходе за два импульса напряжения, что уменьшает влияние работы электропривода на питающую сеть.
2. Возможность достижения высоких удельных показателей и КПД передачи энергии ударом рабочих циклов со свободным выбегом бойка следует из совершенства самих циклов, обеспечивающих эффективное преобразование электрической энергии в полезную механическую работу, которое заключается в полном или частичном устранении электромагнитного торможения бойка при синхронизации частоты его механических колебаний с частотой питающей сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1970. – 260 с.
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденция развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
3. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А. Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–121.
4. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25–30.
5. Neyman V.Yu., Smirnova G.N. New principles and increase of energy efficiency of electromagnetic machines // IFOST 2006: Proceedings of the 1st International Forum on Strategic Technology. – Ulsan, Korea, Oct, 18–20, 2006. – P. 314–315.
6. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 12. – P. 651–652.
7. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 6. – P. 328–331.
8. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Линейные импульсные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во КГУ, 2010. – 250 с.
9. Кадышев А.И., Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю. К вопросу расчета статических параметров электромагнитных машин ударного действия с большим воздушным зазором и распределенной н.с. // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 20–26.
10. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухкатушечных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: Матер. II Междунар. научно-практ. конф. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2011. – С. 271–277.

11. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
12. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с аккумулярованием магнитной энергии в динамических процессах // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30–36.
13. Линейный электромагнитный двигатель: патент РФ № 2405237; заявл. 27.05.09; опубл. 27.11.10, Бюл. № 33. – 1 с.
14. Malinin L.I., Neyman V. Yu. Calculation of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems // IFOST 2006: Proceedings of the 1st International Forum on Strategic Technology. – Ulsan, Korea, Oct. 18–20, 2006. – P. 320–321.
15. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Энергетические показатели электромагнитного двигателя постоянного тока // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: Труды II Междунар. научно-техн. конф. – Тобольск, 2004. – Ч. 1. – С. 353–360.
16. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61–66.
17. Malinin L.I., Neyman V. Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors // Russian Electrical Engineering. – 2009. – V. 80. – Iss. 12. – P. 701–706.
18. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: Коллективная монография / под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.
19. Нейман В.Ю., Евреинов Д.М., Нейман Л.А., Скотников А.А., Смирнова Ю.Б. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением // Транспорт: Наука, техника, управление: Научный информационный сборник. – М.: Изд-во ВИНТИ, 2010. – № 8. – С. 29–31.
20. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем возвратно-поступательного движения: патент № 2486656 Рос. Федерация; заявл. 20.02.12; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18. – 6 с.

Поступила 06.06.2013 г.

ANALYSIS OF ENERGY CONVERSION IN A SINGLE-WINDING SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH TWO-SIDE HEAD RUNNING-OUT

L.A. Neyman

Novosibirsk State Technical University

The relevance of the paper is caused by the necessity of developing impact machines with the increased energy of a unit impact at simultaneous decrease of the electric drive operation influence on a power grid.

The purpose is to analyze energy conversion processes in a single-winding synchronous electromagnetic machine with head two-side free running-out. The machine operates in a cyclic mode and has high specific parameters and reduced impact frequency.

Research methods: The conversion process for the total operating cycle analysis is based on the energy balance of the electromechanical system of the synchronous single-winding impact electromagnetic machine with head two-side free running-out.

Results: the head free running-out operating cycles provide current amplitude decrease by impact mass acceleration with electromagnetic forces at the direct and reverse travel during two voltage pulses. Therefore, the electric drive effect on the power grid is reduced. High specific parameters and energy transmission efficiency during the operating cycles with head free running-out is provided by the effective electric energy transformation to useful mechanical work when the head electromagnetic braking is partially or completely eliminated at mechanical oscillations frequency synchronized with power frequency.

Key words:

Synchronous electromagnetic machine, electric drive, machine operating cycle, electromechanical system energy balance, impact energy, head two-side running-out.

REFERENCES

- Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* (Theory, calculation and design of electromagnetic impact machines). Novosibirsk, Nauka, 1970. 260 p.
- Ugarov G.G., Neyman V.Yu. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2002. 2, pp. 37–43.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. Strukturny analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya (Structural analysis of synchronous electromagnetic impact machines). *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy. Sbornik nauchnykh trudov* (Proc. Automated electromechanical systems). Novosibirsk, NGTU Publ., 2011. pp. 106–121.
- Neyman V.Yu. *Elektrotehnika*, 2003. 9, pp. 25–30.
- Neyman V.Yu., Smirnova G.N. New principles and increase of energy efficiency of electromagnetic machines. *IHOST 2006: Proceedings of the 1st International Forum on Strategic Technology*. Ulsan, Korea, Oct, 18–20, 2006. pp. 314–315.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion. *Russian Electrical Engineering*, 2011. 82, 12, pp. 651–652.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011. 82, 6, pp. 328–331.
- Neyman V.Yu., Moshkin V.I., Ugarov G.G. *Lineynyye impulsnyye elektromagnitnyye dvigateli* (Linear pulsed motors). Kurgan, KGU Publ., 2010. 250 p.
- Kadyshev A.I., Simonov B.F., Neyman V.Yu. K voprosu rascheta staticheskikh parametrov elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya s bol'shim vozdushnym zazorom i raspredelennoy n.s. (On the issue of calculation of statistic parameters for electromagnetic impact machines with large air space and magnetizing force) *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy: sbornik nauchnykh trudov* (Proc. Automated electromechanical systems). Novosibirsk, NGTU Publ., 2010. pp. 20–26.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. Tendentsii v razvitiy konstruktsiy sinkhronnykh dvukhobmotochnykh elektromagnitnykh mashin dlya impulsnykh tehnologiy (Tendencies in developing synchronous double-winding machines for pulse technologies). *Aktualnyye problemy energetiki APK: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Current problems of power engineering. The II International research and training conference). Saratov, SGAU Publ., 2011. pp. 271–277.
- Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Lvitsyn A.V. *Elektromagnitnyye pressy* (Electromagnetic machines). Novosibirsk, Nauka Sibirskoe otделение, 1989. 216 p.
- Neyman V.Yu. *Elektrotehnika*, 2003. 2, pp. 30–36.
- Evreinov D.M., Neyman V.Yu., Petrova A.A., Smirnova Yu.B. *Lineyny elektromagnitnyy dvigatel* (Linear electromagnetic motor). Patent RF no. 2405237, 2010.
- Malinin L.I., Neyman V.Yu. Calculation of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems. *IHOST 2006. Proc. of the 1st International Forum on Strategic Technology*. Ulsan, Korea, Oct, 18–20, 2006. pp. 320–321.
- Malinin L.I., Neyman V.Yu. Energeticheskiye pokazateli elektromagnitnogo dvigatelya postoyannogo toka (Energy indicators of electromagnetic direct current motor). *Energetika, ekologiya, energosberezhenie, transport* (Power engineering, ecology, power consumption, transport). *Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Proc. II international scientific and technical conference). Tobolsk, 2004. 1, pp. 353–360.
- Malinin L.I., Neyman V.Yu. *Elektrotehnika*, 2009. 12, pp. 61–66.
- Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors. *Russian Electrical Engineering*, 2009. 80, 12, pp. 701–706.
- Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh prorsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin (On the issue of simplification of procedure and selection of structural schemes of electromagnetic impact machines). *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* (Automated electromechanical systems). Novosibirsk, NGTU Publ., 2004. pp.155–170.
- Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazateley odnoobmotochnykh impulsnykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem (Methods of increasing energy indicators of single-winding impulse devices with electromagnetic excitation). *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: Nauchnyy informatsionnyy sbornik* (Transport: science, technique, control). Moscow, VINITI Publ., 2010. 8, pp. 29–31.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A. *Sposob upravleniya dvukhkatushechnym elektromagnitnym dvigatelem vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* (Method of controlling two-coil electromagnetic reciprocating movement motor). Patent RF no. 2486656, 2013.